

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL**



**“INFLUENCIA DE LA PENDIENTE Y LA  
PRECIPITACIÓN EN LA EROSIÓN DE  
TALUDES DESPROTEGIDOS”**

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

**DANIEL A. HERNÁNDEZ HERRERA**

**Prof. Guía: Álvaro Suazo Schwencke.**

**Concepción, Marzo de 2011.**

*“Todo sueño comienza a ser realidad desde el momento en que te das cuenta que tienes el poder en tus manos para lograrlo”.*

*DANIEL A. HERNÁNDEZ HERRERA.-*

---

### *Agradecimientos:*

*Mis primeros agradecimientos están dirigidos a Dios, quien ha estado y estará cercano a mí, quien derriba las barreras impuestas por la vida y despeja el camino para seguir adelante aun cuando el escenario se haga adverso.*

*A mis padres, quienes con su esfuerzo, sacrificio, abnegación son la principal fuente de motivación he incentivo por alcanzar esta meta, surgir y forjar mi destino. Gracias por su apoyo, sabios consejos y entrega incondicional que siempre me han sabido demostrar en cada instante de mi vida.*

*Agradezco en forma muy especial a mis hermanos Adrián, Gabriel, Bryan, quienes me han enseñado que nada bueno se consigue sin grandes esfuerzos y sacrificios. Que el logro de éxitos no es más que el premio a la dedicación, entereza y perseverancia impuesta.*

*Una mención especial recae sobre Carla Echeverría, la persona que ha sabido entregarme todo su apoyo, ternura, cariño y amor incondicional. Que ha lidiado con mis exigentes horarios y ha esperado pacientemente cuando se ha requerido.*

*Como no agradecer a mi familia universitaria; Carlos Albornoz, Gerson González, Henry Vejar, Jorge Aguilera, Marcelo González, Patricio Contreras, Valentina Lizama, y tantos más con los que compartimos infinitos momentos de alegría, ansiedad, estrés y logros. Por su amistad, paciencia y comprensión gracias.*

*Finalmente, no puedo dejar de mencionar a quienes han colaborado directamente en el desarrollo de este trabajo: el profesor Álvaro Suazo, Don Miguel Orellana, Carlos Garrido y Rodrigo Rivas. Se agradece su compromiso, cooperación y excelente disposición.*

---

## **SUMARIO**

El presente Proyecto de Título es un aporte al estudio de la cuantificación del efecto de la precipitación y la pendiente en la pérdida de suelo de taludes producto de la erosión hídrica generada por medio de un sistema de lluvia artificial, que simula las precipitaciones máximas que se ocasionan en la zona centro-sur del país.

Para el análisis se utilizaron tres lisímetros con taludes a escala de diferentes pendientes, que buscan representar la realidad de los suelos inclinados de la región a modo de escala. Para lo anterior fueron simulados taludes con pendiente baja (5%), pendiente media (25%) y pendiente alta (60%), empleando para el análisis un mismo tipo de suelo.

El lisímetro tiene por finalidad permitir un estudio de las fases del ciclo hidrológico de manera controlada. Este caso en particular se empleará para el estudio del efecto sobre taludes de las precipitaciones y la pendiente, las cuales son variables principales del proceso de erosión hídrica. Para eso se deben realizar diferentes ensayos y seguimientos a los lisímetros, usando diferentes parámetros, técnicas y métodos que ayuden a caracterizar, cuantificar y medir satisfactoriamente la pérdida de suelo generada por erosión hídrica.

Para representar el efecto de las precipitaciones sobre los taludes fue necesario realizar el diseño y construcción de un sistema de lluvia artificial, el cual permite simular diferentes intensidades de lluvias sobre las microparcels investigadas.

---

El estudio señala que bajo una intensidad de precipitación constante de 334 mm/hr, la pendiente fuerte supera en promedio de material erosionado en más de tres veces a la pendiente media, mientras que a la pendiente suave por sobre 22 veces.

Ante un incremento en la intensidad se ocasiona un aumento en la cantidad de material erodado, producto de la variación en el volumen de escorrentía superficial y al cambio en la frecuencia de golpeteo de la gota de lluvia lo que se traduce en un poder erosivo superior. Conservando para la totalidad de las pendientes involucradas una tendencia lineal similar, aún cuando el comportamiento detectado difiere sustancialmente.

La variabilidad en la toma de registros se incrementa con la duración del ensayo, lo cual infiere que ciertos parámetros presentan un comportamiento oscilatorio o del tipo aleatorio, acrecentando con esto la incertidumbre sobre la potencial predicción de erosión de un talud de tamaño real.

Al comparar la cantidad de material erodado medida in-situ con la MUSLE, se observa un error relativo promedio de 75, 62 y 44% para las pendientes fuerte, media y suave respectivamente. Mientras que la máxima aproximación se aprecia cuando el tiempo de ensayo es mayor.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
 <b>CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA. ....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 EL PROCESO DE EROSIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 EROSIÓN HÍDRICA.....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Mecanismos que intervienen en el proceso.....	6
2.2.1.1 Erosión por impacto.....	7
2.2.1.2 Erosión por escurrimiento superficial.....	9
<b>2.3 FORMAS DE EROSIÓN HÍDRICA.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Erosión laminar o de manto.....	10
2.3.2 Erosión por surcos o resqueros.....	11
2.3.3 Erosión en cárcavas o barrancos.....	11
<b>2.4 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA.....</b>	<b>12</b>
2.4.1 Influencia de la precipitación.....	12
2.4.2 Influencia de la topografía.....	15
2.4.3 Influencia de la erosionabilidad.....	16
2.4.4 Influencia de la cubierta vegetal.....	17
<b>2.5 MODELOS DE EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA.....</b>	<b>19</b>
2.5.1 Modelos de evaluación indirecta.....	19
2.5.1.1 Ecuación universal de pérdida de suelo.....	20
2.5.1.2 Estimación de factores USLE.....	22
2.5.1.3 Usos, ventajas y limitaciones de la USLE.....	25
2.5.1.4 Ecuación universal de pérdida de suelo revisada.....	26
2.5.1.5 Ecuación universal de pérdida de suelo modificada.....	27
2.5.2 Modelos de evaluación directa.....	28
2.5.2.1 Medición de la erosión de impacto.....	28
2.5.2.2 Medición de la erosión laminar.....	29
2.5.2.3 Medición de la erosión en surcos y cárcavas.....	39
2.5.2.4 Experimentos de laboratorio.....	41
 <b>CAPÍTULO III: SIMULADORES DE LLUVIA.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 TIPOS DE SIMULADORES DE LLUVIA.....</b>	<b>45</b>
3.1.1 Simuladores goteadores.....	46
3.1.2 Simuladores pulverizadores.....	48
<b>3.2 CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LA LLUVIA SIMULADA.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE SIMULADORES.....</b>	<b>55</b>

<b>CAPÍTULO IV: ETAPA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>58</b>
4.1 <i>LISÍMETROS Y SUS MODIFICACIONES.</i> .....	58
4.2 <i>ESTUDIO DEL SUELO.</i> .....	60
4.2.1    Calibración del extractor de testigos de suelo.....	60
4.2.2    Método de compactación del suelo en lisímetros.....	62
4.2.3    Prueba de datos dudosos.....	64
4.3 <i>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIA.</i> .....	64
4.3.1    Caracterización del sistema de aspersión.....	65
4.3.2    Construcción del simulador de lluvia.....	66
4.4 <i>CASOS DE ESTUDIO.</i> .....	68
4.5 <i>PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.</i> .....	70
<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
5.1 <i>VALIDACIÓN DEL NIVEL DE COMPACTACIÓN.</i> .....	73
5.2 <i>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS DE ESTUDIO.</i> .....	77
5.2.1    Intensidad de precipitación constante con duración variable.....	77
5.2.2    Intensidad de precipitación variable con duración constante.....	83
5.2.3    Influencia del volumen precipitado.....	88
5.3 <i>COMPARACIÓN ENTRE EROSIÓN MEDIDA Y LA ESTIMADA CON MUSLE.</i> .....	90
<b>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>104</b>

---

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En Chile uno de los principales problemas en el proceso de degradación es la erosión. Ésta es causada por la acción del agua o del viento y se asocia a la falta y/o pérdida de la cobertura vegetal. La erosión hídrica, en la cual la región del Biobío presenta una de las más altas tasas del país, es producida por el agua de lluvia que no infiltra y escurre superficialmente. Ello genera serios daños a la estabilidad del suelo y taludes, debido principalmente al efecto de la escorrentía resultante, la cual elimina cantidades importantes de suelo y origina surcos de erosión que actúan como ruta principal del agua, lo que aumenta el problema.

Producto de los grandes volúmenes de precipitaciones generados en la época invernal en la región, surgen numerosas complicaciones en las zonas desprovistas de vegetación. Esto se combina con la composición de los suelos en el sector, que poseen un alto porcentaje de limos de alta vulnerabilidad a la erosión. Por consiguiente se genera un escenario ideal para que la erosión hídrica actúe fuertemente. Es por esto que se hace imperioso el cuantificar el efecto de pérdida de suelo bajo precipitaciones controladas.

El presente estudio tiene por objetivo cuantificar los efectos de la precipitación y pendiente producto de la erosión hídrica, a través del control de microparcels experimentales, empleando un simulador de lluvia. Los simuladores de lluvia son utilizados en proyectos de investigación, los que consisten en estimar la infiltración y el transporte de sedimentos. Además

---

*Universidad del Bío-Bío* *Departamento de Ingeniería Civil*

permiten analizar la vulnerabilidad de suelos desnudos a la erosión, a través de la simulación de precipitaciones a una intensidad controlada, lo que lo hace independiente de las condiciones climatológicas de la zona, facilitando y reduciendo los plazos de investigación.

Finalmente, se pretende determinar un grado de validez (si es que existe) para la aplicación de la ecuación universal de la pérdida de suelo modificada (MUSLE), en el uso de la proyección de pérdidas de suelos desprotegidos.

## **1.1.-OBJETIVOS.**

### **1.1.1.-Objetivo general.**

- Analizar los efectos de la pendiente y la precipitación en la erosión registrada en un talud a escala con un suelo sin vegetación.

### **1.1.2.-Objetivos específicos.**

- Evaluar la importancia de la pendiente en la pérdida de suelo en talud a escala.
- Determinar la importancia de las características de la precipitación en la erosión de suelo en lisímetro.
- Comparar la pérdida de suelo registrada en un lisímetro con la ecuación universal de la pérdida de suelo modificada (MUSLE).

---

## **CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA**

En este capítulo se presentan las características y parámetros que son fundamentales para entender el proceso de erosión hídrica a través de su evolución, señalando los factores que la afectan, formas físicas en las que se presenta, además de los métodos empleados actualmente para intentar predecir las tasas de pérdida de suelo.

### **2.1.- El Proceso de Erosión**

En términos generales, la erosión genera la remoción de la capa superficial del suelo, sea cual sea el agente responsable: agua, viento, hielo, actuaciones humanas etc. Como resultado, el suelo manifiesta un descenso neto de su fertilidad natural y productividad biológica mediante la reducción del espesor efectivo, pérdida de materias orgánicas y nutrientes, degradación de la estructura física y disminución de la capacidad de la retención de agua.

El fenómeno de erosión se presenta como un proceso de degradación, transporte y depositación de las partículas de la masa de suelo. De este modo se determina que el proceso erosivo tiene tres fases principales, el desprendimiento de las partículas individuales del suelo, su transporte, llevados a cabo por los agentes erosivos. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente se produce la tercera fase del proceso que es la sedimentación.

La erosión, por tanto, es un proceso de desgaste que ocurre naturalmente y depende de las características climáticas, la naturaleza del suelo, la topografía

---

y la vegetación. No obstante es posible distinguir que sobre el suelo actúan básicamente dos tipos de erosión:

**Erosión Geológica:** proceso natural que se desarrolla a muy largo plazo, que ha dado origen a la mayor parte de la topografía y paisaje actual.

**Erosión Acelerada:** es el proceso de degradación que induce el hombre en los suelos, a través de prácticas incorrectas de uso y manejo. Esta erosión causa efectos dañinos al sitio, además de provocar una disminución de la productividad como consecuencia de la pérdida de nutrientes, de materia orgánica y parte del suelo mineral (Gayoso y Alarcón, 1999).

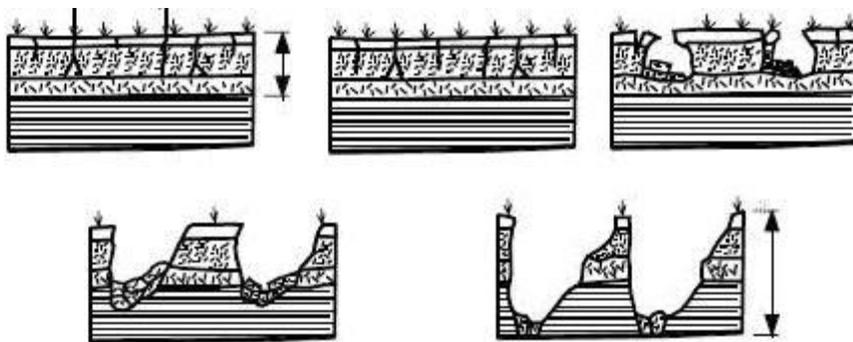
Según Honorato (2000), los procesos erosivos se caracterizan por ser relativamente lentos, intermitentes y recurrentes en el tiempo, ya que están asociados a las lluvias o al viento. Son a la vez progresivos, ya que se va perdiendo el suelo superficial. Esto significa que se trata de procesos irreversibles y su recuperación es a menudo imposible. Si el agente es el agua, se habla de erosión hídrica y para el caso del viento se denomina erosión eólica.

## **2.2.- Erosión hídrica**

La erosión hídrica es causada específicamente por la acción de la energía cinética de las gotas de lluvia al impactar en una superficie de terreno desnudo, o no debidamente protegida por la vegetación. Esta acción separa las partículas de los agregados del suelo, las que posteriormente son arrastradas por el escurrimiento superficial de las aguas (figura 1) (Pérez y González,

2001). Algunas de ellas son depositadas en huecos del suelo, generando un sellamiento del manto superficial, lo que favorece el escurrimiento. Dicho escurrimiento es producido cuando la intensidad de las precipitaciones supera la capacidad de infiltración del suelo.

En la región del Biobío, la erosión hídrica es el tipo de erosión que más afecta a los taludes construidos en el batolito costero. Provocada por el desprendimiento y arranque de las partículas de suelo por efecto del impacto directo de la gota de lluvia. Este proceso se produce a microescala, por lo cual no es perceptible a priori, pero a largo plazo produce efectos catastróficos sobre los taludes dado que la geometría inicialmente considerada para dar una condición mecánicamente estable se ve alterada.



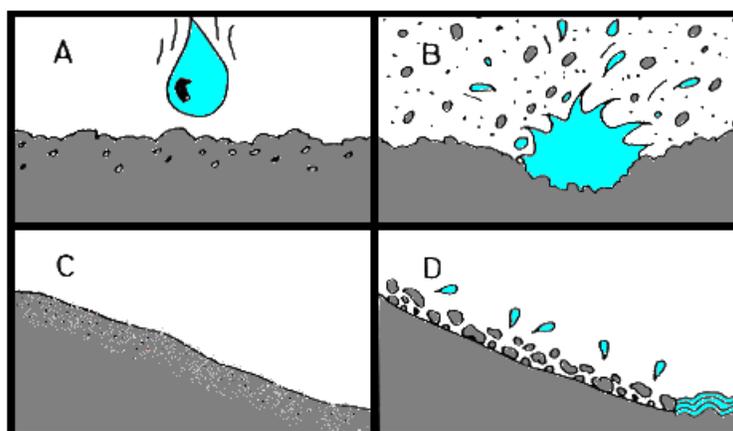
**Figura 1:** Esquema del avance del proceso de erosión en sus distintas etapas. (Fuente: Suárez, 2009).

### 2.2.1.- Mecanismos que intervienen en el proceso de erosión hídrica

Como se mencionó anteriormente, el agua de lluvia ejerce su acción erosiva sobre el suelo mediante el impacto de las gotas y mediante la escorrentía o agua de escurrimiento (Suárez, 1980). Por esta razón se hace necesario

diferenciar estos principales mecanismos que intervienen en el proceso de erosión hídrica.

Como se exhibe en la figura 2, el proceso de erosión comienza por el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo (A); sus agregados son desintegrados en partículas minúsculas (B); que tapan los poros formando una selladura superficial (C); provocando el escurrimiento superficial del agua de lluvia. El agua contiene partículas de suelo que son depositadas en lugares más bajos (D). (Derpsch, 2004).



**Figura 2:** Etapas de la erosión hídrica. (Fuente: [www.rolf-derpsch.com](http://www.rolf-derpsch.com)).

### 2.2.1.1.- Erosión por impacto

El efecto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo se denomina erosión por impacto o salpicadura. Cuando la gota cae a través de la atmósfera, sufre cambios en su tamaño por condensación o evaporación; ésta cae por gravedad y al no encontrarse con obstáculos, golpea al suelo de forma directa con una fuerza considerable, disgregando así las partículas terrosas (García, 1999).

---

Inicialmente, la masa de suelo se expone generalmente a las precipitaciones en estado no saturado, de modo que el primer impacto de las gotas de lluvia provoca una entrada de agua a los poros superficiales con una velocidad considerable. El aire contenido en los poros afectados es comprimido o desplazado, lo que genera cambios en la estructura del suelo y movilidad de las partículas dentro de ellos. Posteriormente los poros superficiales alcanzan la saturación, los agregados se destruyen rápidamente y los poros reducen su volumen y continuidad, que se acompaña con un desprendimiento intenso de aire.

Luego, la estructura del suelo se ha degradado, los poros que conducen agua desde la superficie son escasos y comienza el encharcamiento. A medida que el encharcamiento se desarrolla, la capa de agua superficial reduce la interacción entre las gotas de agua que se aproximan y la superficie de suelo degradada (Manzo, 2010).

Como se muestra en la figura 3, cuando llueve se verifica que gotas de hasta 6 mm de diámetro, bombardean la superficie del suelo a velocidades de impacto de hasta 32 km/h. El impacto de la gota lanza partículas de suelo y agua en todas direcciones a una distancia de hasta 1 metro (Derpsch, 2004).



**Figura 3:** Impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo.  
(Fuente: [www.rolf-derpsch.com](http://www.rolf-derpsch.com)).

El efecto del impacto sobre el suelo puede resumirse en los siguientes aspectos:

- Disgregación de los agregados de la capa superficial del suelo.
- Desestabilización de los agregados y debilitamiento del suelo frente a posibles aguaceros.
- Desplazamiento por salpicadura de las partículas disgregadas por el impacto.
- Compactación y sellado de la capa superficial del suelo y contribución de escorrentía.
- Contribución al aumento del efecto disgregador de la escorrentía que se ve favorecido por la presencia de partículas sólidas en su flujo.

#### **2.2.1.2.- Erosión por escurrimiento superficial**

La formación de escurrimiento superficial dependerá del régimen de las precipitaciones y de las características del suelo. Si estas características

---

permiten la infiltración de una cantidad de agua igual o superior a la que aporta la precipitación, no se producirá ninguna corriente superficial; en caso contrario, se formará una lámina superficial que escurrirá ladera abajo, en función de la pendiente del terreno (Mintegui y López, 1990). En este contexto, a medida que el agua se concentra va aumentando su cantidad, su velocidad y la cantidad de materiales en suspensión, lo cual le da un mayor poder socavante y transportador de partículas, situación que sólo se modifica por las variaciones de la lluvia y las variaciones de la erodabilidad del suelo (Peralta, 1976).

Según Peralta (1976), el agua de escurrimiento se mueve en la superficie del suelo de dos formas: como una delgada lámina de agua en toda la superficie del suelo, o concentrada, lo que es también conocido como escurrimiento canalizado.

### **2.3.- Formas de Erosión Hídrica**

Es posible distinguir distintos tipos de erosión hídrica (ver figura 4), los cuales se pueden encontrar combinados en terreno. La definición de las formas en las cuales se distingue la erosión, normalmente se presenta en un orden creciente en función del daño producido al suelo.

#### **2.3.1.- Erosión laminar o de manto**

Según Honorato (2000), la erosión laminar se define como el movimiento uniforme y difuso de una capa delgada de suelo sobre las laderas, como consecuencia del escurrimiento del agua.

---

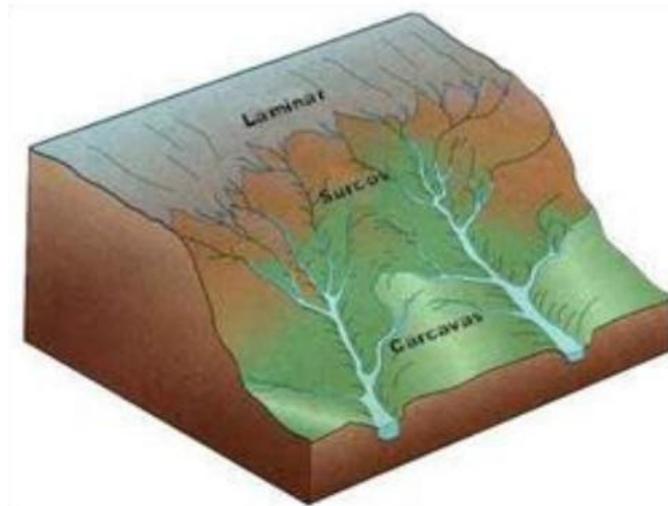
Este tipo de erosión es altamente perjudicial, debido a que aporta grandes cantidades de sedimentos a los cursos de agua, además de remover la capa más fina de suelo, lo que se traduce en una notable disminución en la fertilidad (Mintegui y López, 1990). La erosión laminar deja al descubierto nuevas capas que son más erosionables.

### **2.3.2.- Erosión por surcos o regueros**

La erosión por surcos ocurre cuando por pequeñas irregularidades del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar canalículos que se manifiestan en la superficie (Suárez, 1980). Este tipo de erosión se puede eliminar con la labranza (Honorato, 2000).

### **2.3.3.- Erosión en cárcavas o barrancos**

Ésta representa un estado avanzado de erosión; su formación es compleja y ha estado precedida por los tipos de erosión descritos anteriormente. La erosión en cárcavas se genera por una gran concentración de escorrentía y se manifiesta por profundas incisiones en el terreno. Esto ocurre como consecuencia del flujo de agua que amplía y profundiza el surco o por la concentración del escurrimiento de varios surcos en uno, que posteriormente se agranda por socavamiento y por aceleración del proceso en dirección de la pendiente (Honorato, 2000).



**Figura 4:** Tipos de erosión hídrica producto de la esorrentía  
(Fuente: <http://wakefieldsoil.blogspot.com>).

## **2.4.- Factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica**

Entre los principales factores que pueden influenciar la tasa de erosión en un lugar determinado, están la intensidad de las precipitaciones y su duración, el grado de inclinación de la pendiente y su longitud, la erodabilidad propia del suelo y la cobertura del suelo tanto en altura como en la superficie.

### **2.4.1.- Influencia de la precipitación**

La erosión hídrica, como se acaba de ver, está relacionada con la acción de la precipitación ya que tiene su origen en la energía del agua, tanto al caer como al fluir sobre la superficie del suelo; es decir, está fuertemente influenciada por las características de la lluvia.

Según Suárez (1980, citado por Pizarro, 2005), el factor climático que más influye en la erosión es la precipitación. De su cantidad, intensidad y

---

distribución depende el volumen del flujo que se desliza en capa uniforme sobre la tierra, llevando en suspensión las sustancias minerales.

La pérdida de suelo va a estar muy influenciada por las propiedades de la precipitación; por un lado, por cantidad disgregadora del impacto de la gota sobre el suelo y su capacidad de desplazamiento, y por otro, por la capacidad disgregadora y de transporte de la precipitación que se convierte en escorrentía.

De los dos causantes erosivos de la lluvia, impacto de gotas y escorrentía, es el impacto de gotas sobre el suelo o sobre una delgada película de agua el que constituye el principal agente iniciador de la erosión, fundamentalmente a través del mecanismo de salpicadura (Sempere Torres, 1994).

La capacidad erosiva del impacto de las gotas de lluvia depende de su carga de energía, que es función de la distribución de tamaño de gota y de la velocidad con la que impacta sobre la superficie del suelo (Hunson, 1971).

Por otra parte, el poder erosivo efectivo del impacto de las gotas va a depender no solo de las propiedades de las gotas, sino también de las propiedades del suelo y de la interacción entre ellas (Park et al., 1982).

Durante la precipitación parte del agua cae sobre el suelo, bien porque no hay vegetación que proteja ese suelo, bien porque pase a través de los huecos que deja la vegetación, pero también puede ser interceptada por la cubierta sobre el suelo o por la vegetación aérea, y luego caer desde ella con distintos

---

tamaños de gota y velocidad que el de la lluvia natural. De tal manera, que la precipitación directa sobre el suelo y el drenaje foliar son los responsables de la erosión por salpicadura (ver figura 5).

El impacto es el agente más importante para el desprendimiento y la disgregación de las partículas. La mayor parte de la energía que llevan las gotas precipitadas se va a consumir en dicho proceso, siendo menor la energía disponible en el desplazamiento de las partículas disgregadas, que pueden ser más o menos importantes en función de la pendiente del terreno.

Las gotas pueden llegar a ser muy erosivas cuando golpean un suelo sin vegetación, proporcionando, además de la fuerza disgregadora, una fuerza de consolidación que compacta el suelo. El efecto fuerza de consolidación donde mejor se aprecia es en la formación de una costra superficial, normalmente de pocos milímetros, que aparece como consecuencia de la reducción de poros por compactación, favoreciéndose también, en este caso, la generación de la escorrentía (Morgan, 1997).

Por otro lado, la exposición continua o frecuente del suelo a lluvias intensas con gotas grandes, y por tanto con velocidades también elevadas, puede debilitarse mucho el suelo ante posibles lluvias posteriores, aunque sus intensidades sean menores, ya que al romperse los posibles agregados estructurales del suelo, se elimina la resistencia que pudiese ofrecer ese suelo a dichas lluvias.



**Figura 5:** Impacto de gotas de lluvia intensa contra el suelo.  
(Fuente: <http://noticiasonline.com/D.asp?id=16679>).

#### **2.4.2.- Influencia de la topografía**

Entre los factores topográficos que tienen influencia en la erosión hídrica, se encuentran esencialmente el ángulo de la pendiente (mientras más pronunciada, mayor severidad de la erosión); el largo de la ladera (a mayor largo de la ladera se incrementa la severidad de la erosión); y la forma de la ladera (Gayoso y Alarcón, 1999).

Según Mardones (2007), la erosión se va incrementando a medida que aumenta la pendiente del terreno ya que también lo hacen la cantidad y la energía de la escorrentía superficial. En una superficie plana, las gotas de lluvia salpican las partículas de suelo en todas direcciones. En cambio en una superficie con pendiente las partículas de suelo que toman dirección hacia arriba recorren menos distancia que si fueran hacia abajo (debido a su trayectoria parabólica), por lo cual, estadísticamente cuando se observa al

---

efecto de la erosión por salpique en un terreno inclinado, las partículas de suelo tienden a desplazarse hacia abajo, aumentando la proporción en función de la pendiente.

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica crecen al aumentar la inclinación y la longitud de un talud como consecuencia del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, y sus efectos se hacen sentir mucho más fuertemente en las partes inferiores de las laderas.

Un 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).

### **2.4.3.- Influencia de la Erosionabilidad**

Ésta se puede definir como la susceptibilidad o vulnerabilidad de un suelo a sufrir procesos de erosión, se relaciona directamente con las propiedades físico químicas del suelo. Es función tanto de las características del suelo como del relieve y la vegetación. Los valores relativos de la erosionabilidad no son influenciados por la lluvia o el viento, pero sólo puede ser medido cuando estos actúan con una determinada erosividad. La erosionabilidad afecta directamente a la facilidad de absorber agua. Por consiguiente, para que un perfil continúe infiltrando después de haberse saturado el suelo es preciso que tenga una textura suficientemente uniforme.

La estructura del suelo, relacionada con los contenidos de humus y de cal, es otro factor determinante en la infiltración, por el efecto que ejerce la mayor o

---

menor cantidad de poros (Ayres, 1960). Los suelos pueden variar en su contenido de humedad y con ello en su resistencia a la cohesión. La erosionabilidad es dinámica, cambia durante una tormenta, durante el año o de año a año.

Los suelos de la región del Biobío presentan un alto grado de meteorización, por lo que es muy susceptible a la erosión, debido a que está compuesto por una gran cantidad de limos, los que presentan una baja resistencia a la cohesión, o casi cero al variar su humedad.

#### **2.4.4.- Influencia de la cubierta vegetal**

Esta constituye la más importante defensa contra la erosión, ya que a medida que aumenta la cobertura de vegetal, se incrementa el resguardo frente al impacto de las gotas de lluvia, se frena la escorrentía y se facilita la infiltración. Disminuye así el efecto erosivo al no actuar directamente sobre la superficie del suelo, mientras que los componentes radiculares contribuyen a aumentar la resistencia mecánica del suelo. Además, la mayor cantidad de materia orgánica presente en el suelo incrementa su estabilidad, rugosidad y porosidad, lo que supone un aumento en la capacidad de infiltración.

La figura 6 muestra un talud protegido contra la erosión debido a la vegetación.



**Figura 6:** Talud protegido con una cobertura vegetal.  
(Fuente: <http://www.urbanarbolismo.es/blog/?p=155>).

En resumen, los principales beneficios de la presencia de vegetación como factor protector son:

- Proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia
- Disminuir la velocidad del escurrimiento del agua por aumento de la rugosidad.
- Aumentar la infiltración por huecos de raíces, animales, etc.
- Control del contenido de agua en las capas superiores del suelo, gracias a la evapotranspiración de las plantas.

La cobertura vegetal presenta uno de los parámetros más fácilmente manipulables por la actividad humana.

---

## **2.5.- Modelos de Evaluación de la Erosión Hídrica**

Para la estimación o medición del grado de erosión existente en el suelo se han desarrollado distintos métodos, los cuales se han diferenciado en dos tipos; los modelos cualitativos y los modelos cuantitativos. En los modelos cualitativos destaca la cartografía de unidades homogéneas en función de los parámetros principales que controlan el proceso erosivo (erosividad de la lluvia, suelo, vegetación, topografía), con otros atributos de ajustes más subjetivos (Honorato et al., 2001). Por otra parte, los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y se diferencian en modelos de evaluación directa y en modelos de evaluación indirecta, donde estos últimos son los de mayor aplicación en la actualidad. Según López (1998), se ha intentado salvar el vacío existente entre los modelos de evaluación indirecta y los procesos físicos, pero se reconoce que falta mucho por hacer, tanto en la teoría del transporte de sedimentos en el flujo superficial, como en el trabajo experimental.

### **2.5.1.- Modelos de evaluación indirecta**

Los métodos de evaluación indirecta están asociados a modelos que son representaciones simplificadas de la realidad (Honorato et al., 2001). Entre éstos se pueden distinguir modelos estadísticos, modelos físicos y modelos paramétricos.

Dentro de este último grupo se presenta el modelo revisado y modificado más empleado en cuanto a la cuantificación cualitativa de la pérdida de suelos producto de la erosión hídrica, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Wischmeier y Smith, 1978); la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de

---

Suelos, (Renard et.al., 1991) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (Williams J., 1975).

#### **2.5.1.1.- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.**

USLE es el acrónimo para Universal Soil Loss Equation, es decir, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Esta ecuación se desarrolló en EEUU hacia 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EEUU (USDA SCS; actualmente Natural Resources Conservation Service, NRCS). Esta ecuación es largamente utilizada en el mundo, incluso en los trópicos.

A la ecuación se le llamó universal porque estaba exenta de algunas de las generalizaciones y restricciones geográficas y climáticas inherentes en los primeros modelos. Esta ecuación se desarrolló en distintos lugares de E.E.U.U. Se utiliza en la determinación de las medidas adecuadas para conservar y planificar el cultivo y para predecir las pérdidas indefinidas de sedimentos en programas de control de la contaminación. A pesar de la simplificación de las muchas variables implicadas, la ecuación universal de pérdida de suelo es el método más aceptable para estimar las pérdidas de sedimentos (Schwb et al, 1990, citado por Guido, 1997). Se desarrolló como un método para predecir la pérdida promedio anual de suelo proveniente de la erosión en arroyuelos. Al conocer los valores de los parámetros, las alternativas de cultivo y de manejo, es posible estimar los valores de pérdida de suelo, según Wischmeier (1976, citado por Guido, 1997).

La USLE expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (en toneladas métricas por hectárea y año,  $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ ) bajo usos y manejos de suelo específicos. Es una ecuación estocástica, no válida para un año concreto ni para un evento particular. La ecuación es dada por el producto lineal de seis factores independientes, como se señala a continuación:

$$A=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

### **A: Pérdida de suelo promedio anual**

Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente toneladas (t) hectárea (ha)<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

### **R: factor erosividad por precipitación pluvial**

Factor de lluvia y escurrimiento superficial expresado como unidades de índice de erosión (I E). Refleja el potencial erosivo de las lluvi

### **K: factor Erodabilidad del suelo**

Se define como la pérdida en Ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> por unidad de índice de erosión, medida en una parcela de 22,13 m de longitud, con pendiente uniforme de 9% y bajo condiciones de barbecho continuo.

### **L: factor longitud**

Relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno de longitud determinada cualquiera y la de una parcela de 22,13 m, bajo idénticas condiciones de manejo.

**S: factor gradiente de la pendiente**

Factor de pendiente que expresa la relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno con pendiente determinada cualquiera y la de una ladera con 9%, bajo idénticas condiciones de uso y manejo.

**C: factor cobertura vegetal**

Factor de cobertura y manejo del cultivo, definido como la relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno con un cultivo cualquiera, bajo condiciones específicas de manejo y una parcela de idéntica superficie pero en barbecho desnudo.

**P: factor prácticas de conservación de suelos y agua**

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

**2.5.1.2.- Estimación de factores USLE**

A continuación se muestra una alternativa de valoración de los factores que influyen en la USLE, guiados por las recomendaciones de algunos autores encontrados en la literatura.

**a. Factor de erosividad (R).** Según Roose (citado por Morgan, 1997), el índice erosión pluvial (R) puede obtenerse por medio de la precipitación media anual.

$$R = 1,73 \cdot 0,5 \cdot P$$

Donde:

P: Precipitación media anual (mm)

Morgan (1997) obtiene el índice de erosión pluvial (R) mediante la precipitación media anual e intensidad.

$$R = (9,28 P - 8838) I_{30} 1000^{-1}$$

Donde:

P: Precipitación media anual (mm)

$I_{30}$ : Máxima intensidad de lluvia en 30 minutos ( $\text{mmh}^{-1}$ )

Foster (citado por Morgan, 1997) establece una fórmula basada en las precipitaciones medias anuales e intensidad, respectivamente:

$$R = 0,276 P I_{30}$$

Donde:

P: Precipitación media anual (mm)

$I_{30}$ : Máxima intensidad de lluvia en 30 minutos ( $\text{mmh}^{-1}$ )

**b. Factor de erodabilidad (K).** La estimación del factor de erodabilidad K ( $\text{Ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) se obtiene por medio de la ecuación empírica de Loch y Rosewell (citado por Peña, 1995):

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

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).

**c. Factor topografía (LS).** El tipo de pendiente y su longitud produce una pérdida de suelo que suele incrementarse exponencialmente. El valor de este factor puede obtenerse según:

$$LS = \sqrt{f} (0,0138 + 0,0096s + 0,00138 s^2)$$

Donde:

f : Longitud de la ladera (m)

s : Pendiente del terreno (%)

**d. Factor de cobertura (C).** El factor de cobertura es obtenido por medio de valores ajustados a los entregados por Roose en 1975 (citado por Morgan, 1997).

**e. Factor de prácticas complementarias (P).** Las prácticas complementarias de control de erosión se obtienen a través de lo establecido por Wischemeier y Smith (1978), Roose (1977), y Chan (1981) (citado por Morgan, 1997).

### **2.5.1.3.- Usos, ventajas y limitaciones de la USLE**

Como todo modelo predictivo la USLE posee acotaciones en cuanto a la validez de sus proyecciones. En esta sección se darán a conocer las principales recomendaciones sobre su aplicación además de entrever sus beneficios y restricciones.

La ecuación universal de pérdida de suelo puede utilizarse adecuadamente para:

- Predecir la pérdida anual de suelo de una pendiente en un campo con condiciones específicas para uso de la tierra.
- Servir como guía en la selección de sistemas de cultivo y manejo de prácticas de conservación para suelos y pendientes específicas.
- Predecir el cambio en la pérdida de suelo que resultaría de un cambio de las cosechas de conservación sobre un campo en específico.
- Determinar cómo pueden aplicarse o alternarse las prácticas de conservación para permitir un cultivo más intensivo.
- Estimar las pérdidas de suelo en áreas con uso de suelo distinto al agrícola.
- Obtener estimaciones de pérdida de suelo para que los conservacionistas determinen las necesidades de conservación (Kirby y Morgan, 1991, citado por Guido, 1997).

Las ventajas del uso de la USLE son:

- Planificación y conservación adecuada de los cultivos.
- Predice las pérdidas indefinidas de sedimento.
- Simplifica en muchas de sus variables.
- Amplia adaptación bajo diferentes condiciones.

- Facilidad de su aplicación.

Entre las limitaciones de la USLE se tiene:

- Se recomienda utilizar a largo plazo
- La ecuación se diseñó para predecir pérdidas de suelos asociadas con erosión laminar y en surcos; no corresponde a producción de sedimento de un campo.
- Los valores obtenidos con la ecuación corresponden a las mejores estimaciones posibles, no son valores absolutos.
- La ecuación predice pérdida promedio anual de suelo en un campo específico y bajo condiciones y prácticas dadas de manejo.

#### **2.5.1.4.- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada.**

Durante la década de los setenta, la USLE fue ampliamente utilizada para evaluar pérdidas de suelo por erosión laminar y en regueros, apoyándose en estimaciones de más de un millón de puntos de muestreo. La información obtenida sirvió de base para formular políticas de conservación de suelos, llegando a emplearse en condiciones ajenas a sus datos básicos, por ejemplo, para terrenos forestales.

Como consecuencia de esas experiencias los investigadores continuaron mejorando USLE, lo que llevó al desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) la cual tiene la misma estructura que USLE, pero con mejoras sobre sus factores. Estos incluyen algunos mapas de curvas con igual erosión nuevos y revisados, un enfoque de variables en el tiempo para el factor de erosionabilidad del suelo; un enfoque de subfactor para evaluar el factor de cobertura vegetal por rugosidad superficial, una

nueva ecuación para reflejar la pendiente y longitud, además de nuevos valores para las prácticas de conservación (Renard, et al., 1997).

### **2.5.1.5.- Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada**

La ecuación modificada de pérdida de suelo (MUSLE) fue desarrollada por Williams J.R en 1975. Es la extensión del modelo USLE aun cuando se formula de manera diferente pues su propósito difiere de forma sustancial: ya no se trata de hacer una estimación promediada a largo plazo, sino de calcular el aporte de sedimentos de un evento singular aplicado a pequeñas cuencas hidrográficas y utilizando un factor de escurrimiento para reemplazar el factor de energía pluvial de la ecuación universal de pérdida de suelo. Esta ecuación se recomienda utilizar en cuencas que tengan una superficie alrededor de 100 Km<sup>2</sup>, cuando las cuencas presentan homogeneidad en los factores integrantes del modelo. En caso contrario se recomienda utilizar en pequeñas cuencas de 25 Km<sup>2</sup>.

Su expresión es la siguiente:

$$Y = 11,8 * (Q * q_p)^{0.56} * K * L * S * C * P$$

Donde:

Y: sedimento emitidos por una tormenta específica (ton/ha)

Q: volumen de escurrimiento por tormenta (m<sup>3</sup>)

q<sub>p</sub> = caudal instantáneo máximo (m<sup>3</sup>/s)

11,8: factor de conversión

---

K: erodabilidad del suelo, en (ton/ha\*año/MJ\*mm/ha/hr), calculado a través del nomograma de Wischmeier (1971), (ver Anexo B).

Los factores (L, S, C y P) son los mismos empleados en la ecuación universal de la pérdida de suelo.

### **2.5.2.- Modelos de evaluación directa**

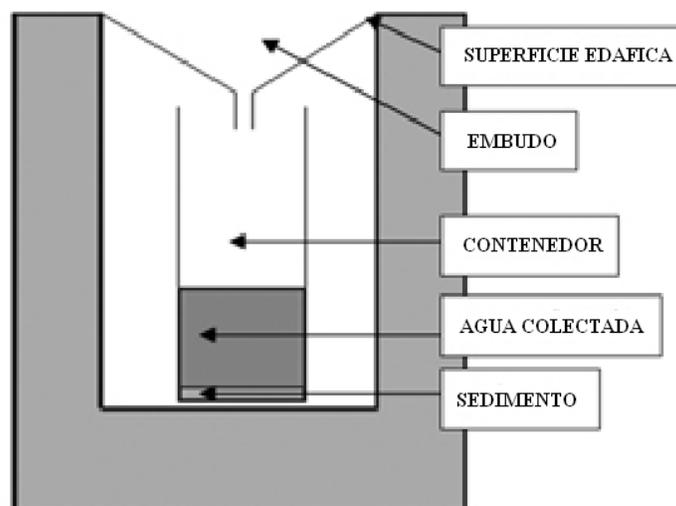
Los modelos directos o de evaluación directa se desarrollan en terreno a través de modelos experimentales, por la medición en parcelas de erosión o por la medición de variables, tales como sedimentos en el agua y en algunos casos con la ayuda de los simuladores de lluvia, donde los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a zonas homogéneas (Honorato et al., 2001).

Con la finalidad de comprender de mejor forma las principales metodologías existentes para la medición de la producción de sedimentos, se han agrupado en tres secciones dependiendo del tipo de degradación del suelo que se pretenda cuantificar.

#### **2.5.2.1.- Medición de la erosión de impacto**

La erosión de impacto, como proceso erosivo aislado, puede estimarse de muchas formas (Morgan, 2005). Entre las más utilizadas se encuentra el embudo de impacto, cuya circunferencia mayor se ubica al nivel de la superficie del suelo (figura 7). El embudo drena en un recipiente tanto precipitación directa como partículas de suelo desprendidas por el impacto de las gotas de lluvia, provenientes de sectores aledaños al embudo. Al término de la tormenta se colecta el recipiente y se seca, determinándose la

deposición de sedimentos en un área dada, para después llevar los datos a la hectárea.



**Figura 7:** Esquema descriptivo del embudo de impacto.  
(Fuente: Bolline, 1975).

Otros investigadores han estimado la erosión de impacto mediante la instalación de papeles de peso conocido, dispuestos en orientación perpendicular a la superficie del suelo. Los sedimentos desprendidos impactan las caras del papel, permaneciendo adheridos a éstas. Una vez finalizada la tormenta, se seca el papel y se pesa. La diferencia entre el peso inicial del papel y el peso del papel con sedimentos representa la erosión de impacto ocurrida.

#### **2.5.2.2.- Medición de la erosión laminar.**

A continuación se presentan una serie de métodos potenciales para la aplicación de medición de la erosión laminar, dentro de los cuales se destaca

---

el de parcelas de erosión por ser el que se aplicará en el estudio desarrollado en los capítulos finales de este documento.

### **i. Parcelas de erosión**

Las parcelas de erosión se utilizan como áreas permanentes de monitoreo, para estudiar los factores que afectan la erosión (Morgan, 2005) o bien cuando se desea demostrar algún hecho conocido, como enseñarle a comunidades locales cuánto ayuda la vegetación en la disminución de la erosión (Hudson, 1993). Cada parcela es un área físicamente aislada del resto de la tierra, con dimensiones de ancho y largo predeterminadas, así como pendiente, tipo de suelo y vegetación conocidos. Para cada parcela se mide la escorrentía y el suelo perdido, así como la precipitación en el área de estudio. El número de parcelas es, por lo general, de dos o más réplicas por tratamiento.

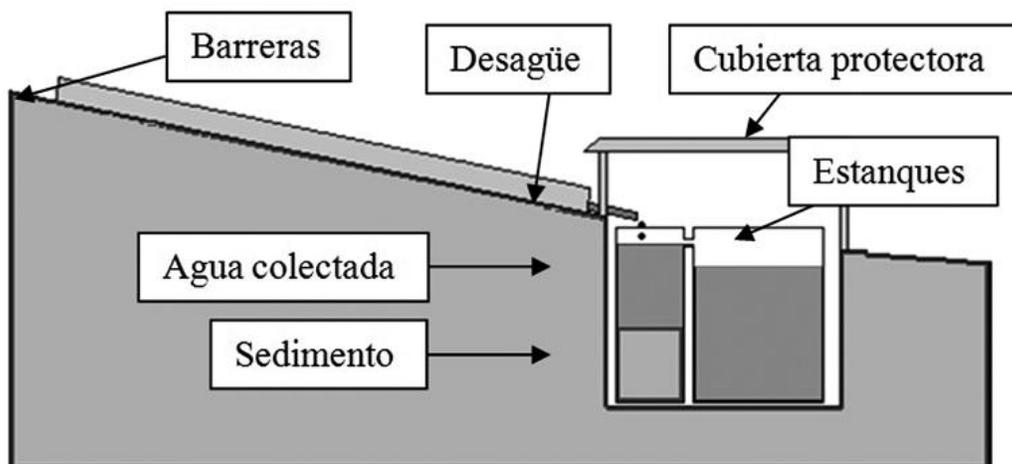
Las barreras físicas que determinan las dimensiones de las parcelas deben sobrepasar la superficie del suelo en al menos 15 centímetros, siendo éstas enterradas bajo la superficie para evitar traspaso subterráneo de flujos de agua. Dichas barreras pueden ser de madera, metal o cualquier material impermeable y duradero (Morgan, 2005).

La escorrentía superficial producida dentro de los límites de la parcela es almacenada en un estanque. Sin embargo, para escorrentías de mayor envergadura se utilizan dos estanques, uno para depositar los sedimentos más pesados y otro para almacenar el agua restante (figura 8). Las dimensiones de dichos estanques varían de acuerdo a la escala temporal de medición y el clima del área en estudio. Una vez finalizado el período de estudio, se calcula

la cantidad de sedimentos acumulados en términos de peso, valor que se lleva a la hectárea (por ejemplo, Mg/ha) relacionándolo con la superficie de la parcela. Además, se mide el agua acumulada, variable que se relaciona con el agua caída para obtener la relación precipitación/caudal correspondiente a cada tratamiento.

Para determinar el peso total de suelo acumulado en el tanque, se toman muestras de sedimento en un volumen conocido, para luego secarlas y determinar el promedio de suelo (peso) en un volumen dado (recipiente de muestreo), determinando así el peso total a través de la multiplicación de dicho peso por el volumen total de suelo colectado.

Lo más efectivo en términos de precisión y costos es coleccionar datos a nivel de tormenta. Así, se requerirán estanques de menores dimensiones, lo que se traduce en menores costos de instalación y vaciado. Nótese además que los estanques deben estar protegidos de la precipitación directa (figura 8).



**Figura 8:** Vista lateral de una parcela de erosión.

(Fuente: Adaptado de Hudson, 1965).

---

Las parcelas de erosión constituyen uno de los métodos más utilizados en estudios focalizados en los efectos de distintas variables y prácticas de manejo de la tierra en la pérdida de suelo. Típicamente se utilizan dimensiones específicas (22 metros de largo y 1,8 metros de ancho), representando una centésima parte de un acre, para así poder comparar los resultados obtenidos con otros estudios. Sin embargo, cualquier dimensión es válida, mientras se mantenga constante entre tratamientos y réplicas. Por otro lado, es común la aplicación artificial de la precipitación, mediante el uso de simuladores de lluvia, sobre todo en climas de lluvias convectivas, en donde las variaciones espaciales de precipitación son altas. Este tema será desarrollado con mayor profundidad en el capítulo siguiente.

Es importante recalcar que la erosión obtenida en las parcelas de muestreo no representa la erosión real del área en que dicha parcela se encuentra, pues la presencia de una barrera superior excluye la erosión laminar y en surcos producida por el escurrimiento superficial proveniente de zonas localizadas ladera arriba de la parcela. Sin embargo, puesto que todas las parcelas cuentan con esta exclusión, la comparación entre tratamientos es perfectamente válida.

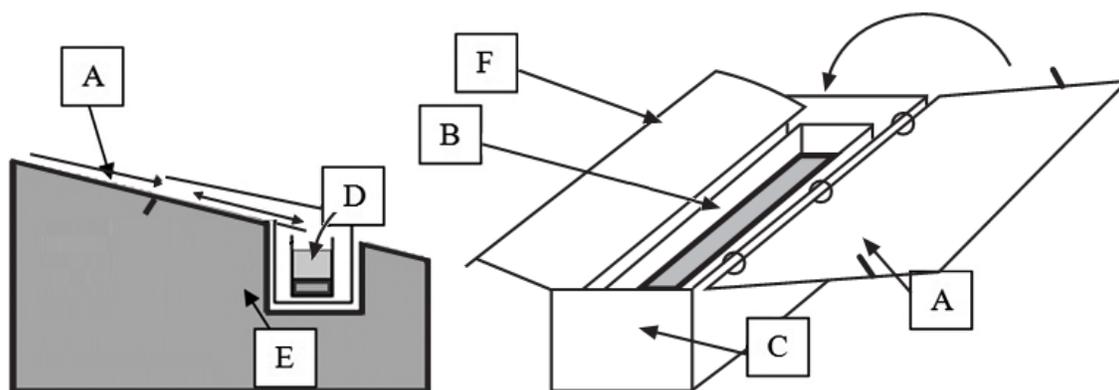
Especial cuidado debe tenerse en todas las etapas de los estudios basados en parcelas de erosión. Entre los problemas más comunes se pueden mencionar los siguientes (Morgan, 2005): rebalse de los estanques colectores, estanques mal tapados, animales en busca de agua o caudal ingresando al tanque tras el rebalse del foso en que éste se encuentra.

---

## **ii. Colectores de Geralch**

Geralch (1966) implementó un método alternativo para medir la erosión laminar y la escorrentía superficial en laderas. El método consiste en la instalación de colectores, en los cuales se almacena la escorrentía superficial proveniente de alguna sección de la ladera. Posteriormente, se traspasa el sedimento y el caudal colectados en recipientes, los cuales se pesarán y secarán para la determinación de tasas de erosión, de acuerdo al área de contribución del colector de Geralch específico. Sin embargo, es común expresar la erosión en términos de unidad de longitud.

De este modo, se instalan colectores en distintas secciones de la ladera, considerando cierto número de réplicas. Pese a que el colector de Geralch original consistía en un contenedor de dimensiones 50x10x20 cm, con una botella recolectora localizada ladera abajo, una modificación bastante atractiva es ilustrada en la figura 9, en la que un sub-colector es posicionado dentro de la caja externa. De este modo, se extrae sólo la caja interna para coleccionar el sedimento almacenado en ésta, facilitando su transporte y manipulación.



**Figura 9:** Modificación del colector de Geralch en vista lateral (izquierda) y angular-aérea (derecha): (A) cubierta protectora, (B) contenedor interno de almacenamiento, (C) contenedor externo, (D) agua colectada, (E) sedimento y (F) rampa de arrastre de sedimentos.(Fuente: Morgan 2005).

Al igual que en las parcelas de erosión, es muy factible utilizar colectores de Geralch para determinar la efectividad de distintos tratamientos frente a la erosión. La gran ventaja de este sistema es su bajo costo. Además, el método considera el escurrimiento superficial proveniente de sectores más altos en la pendiente, asemejándose más a la realidad, en comparación a las parcelas de erosión. Por otro lado, la desventaja de este método es la dificultad de estimar el área de contribución, pues los límites no están claramente identificados. Además, los contenedores no poseen grandes dimensiones, por lo que existe un riesgo de rebalse considerable.

Como ya se mencionó, otra opción es simplemente conectar una manguera entre el contenedor y una botella, localizada pendiente abajo. Este método facilita el traslado de los sedimentos desde el área de estudio al laboratorio de secado, aunque se corre el riesgo de que la botella se rebalse o que los sedimentos contenidos en la manguera o tubo obstruyan el flujo. Para evitar

esto, el ducto debe instalarse con inclinaciones que permitan altas velocidades de flujo, así como botellas relativamente grandes, dependiendo de la erodabilidad del suelo y la frecuencia de colección. No debe olvidarse que una vez llenado el contenedor, el experimento no tiene validez alguna.

### iii. Mallas de limo

Según la experiencia, medir la erosión en laderas es, por lo general, costoso e implica mucho tiempo (Robichaud y Brown, 2002). Sin embargo, una metodología barata y rápida es la instalación de mallas de limo, hechas de material geotextil (Dissmeyer, 1982). Básicamente, la malla se instala en orientación paralela a las curvas de nivel, disponiendo los extremos pendientes arriba, para que la escorrentía superficial no tenga otra opción más que infiltrarse a través de la malla, como se ilustra en la figura 10. Nótese que la malla debe enterrarse para evitar el escape de escorrentía bajo ésta.



**Figura 10:** Distribución de las mallas de limo en terreno.  
(Fuente: US Forest Service).

---

Como regla general, la longitud del período de medición está en función de la erosión esperada (principalmente de la cobertura vegetal y las características de la pendiente). Si se trata de un proyecto de erosión post-fuego, basta una tormenta como para llenar la trampa con sedimentos. Como es de suponerse, si la trampa se rebalsa el estudio no tiene validez. Por esta razón, hay quienes instalan más de una malla, dispuestas en forma paralela unas con otras, con el fin de atrapar los sedimentos en caso que éstos se rebalsen.

Una vez completado el período de estudio se debe estimar el volumen de sedimento acumulado en la trampa, tomando algunas muestras en recipientes de volumen conocido, para luego secarlas y estimar valores totales de suelo perdido. Si se cuenta con el área de contribución es posible definir tasas de erosión en términos de Mg/ha.

#### **iv. Dendrocronología**

La erosión laminar es un proceso usualmente lento (a escala humana), el cual no es posible notarlo más que con el contraste entre objetos y el nivel topográfico. En este sentido, los dendrocronólogos a menudo correlacionan la posición y ocurrencia de antiguas raíces arbóreas con las tasas de erosión laminar. Las raíces de los árboles sólo crecen bajo tierra, por lo que la presencia de fustes con raíces expuestas es una indicación de que el suelo se encontraba a un nivel topográfico superior al actual (figura 11).



**Figura 11:** Variación temporal de las tasas de erosión laminar. Las líneas punteadas indican una estimación del nivel topográfico antiguo, en comparación al actual. (Fuente: García-Chevesich, 2005).

#### **v. Clavos de erosión (erosion pins)**

Siguiendo el mismo principio de la dendrocronología, la manera más simple de medir los cambios de nivel en la superficie del suelo es utilizando clavos de erosión (figura 12), los cuales consisten en clavos de unos 20 cm de largo, con una golilla soldada en su cabeza (García-Chevesich, 2005). La metodología propone la instalación del clavo en forma perpendicular a la superficie del suelo, quedando ésta al mismo nivel que la golilla. Una vez transcurrido el período de medición (tormenta o lluvias invernales) se mide la distancia entre la golilla y la nueva superficie del suelo, la cual representa la pérdida de suelo neta producida en un tiempo dado.



**Figura 12:** Registro en clavo de erosión, posterior a una tormenta.  
(Fuente: García-Chevesich, 2005).

Puesto que una medición no es suficiente, se debe cubrir la totalidad del área en estudio, mediante el establecimiento aleatorio-sistemático de clavos de erosión. Además, se deben tomar muestras de suelo con el fin de determinar su densidad. Una vez obtenida una altura promedio de suelo perdido y considerando el área en cuestión, se determina un volumen de suelo erosionado. Mediante el producto entre dicho volumen y la densidad del suelo, se obtiene la tasa de erosión neta. Al dividir dicha tasa por el número de hectáreas se obtiene la tasa de erosión por unidad de área y tiempo (por ejemplo, Mg/ha-año). Como todo experimento enfocado a la erosión, se debe considerar la variabilidad de los datos obtenidos para determinar diferencias espaciales, temporales o, si es el caso, entre tratamientos.

---

Pese a la simplicidad del método existen algunos factores a considerar, como la dificultad de relocalización de los clavos cuando éstos han sido cubiertos por hojarasca o sedimentos (depositación) o simplemente porque es difícil localizar un pequeño clavo en una extensa área. Para solucionar dicho problema se utilizan banderines o, incluso, detectores de metal (García-Chevesich, 2005). Además, los clavos pueden ser fácilmente removidos por animales tanto domésticos como salvajes.

#### **vi. Puentes de erosión (erosion bridges)**

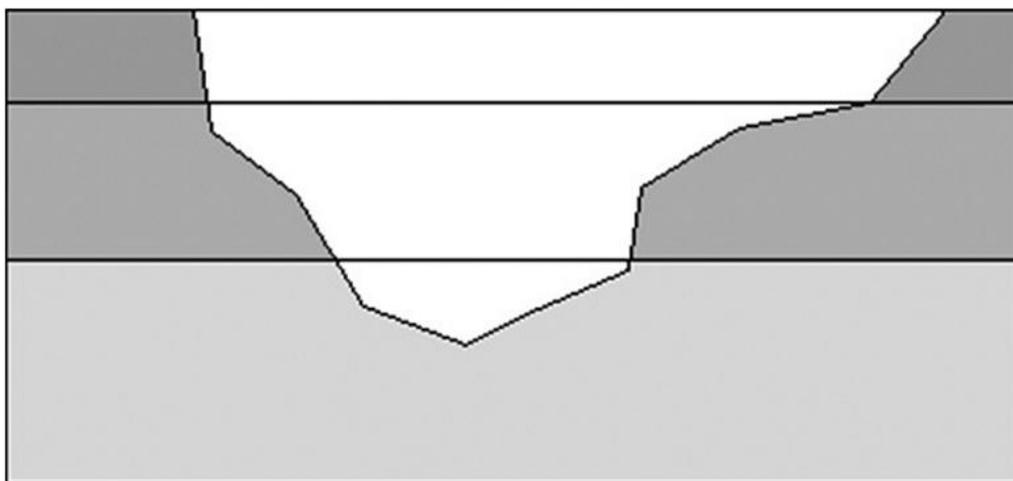
Para soslayar problemas de relocalización algunos utilizan puentes de erosión, los cuales consisten en la instalación de parcelas permanentes de medición de la microtopografía existente entre dos puntos fijos. De este modo los operadores pueden encontrar las parcelas con facilidad, pues éstas consisten en dos tubos insertados en la tierra y fijados a ésta con cemento. Una vez localizada la parcela, los investigadores determinan los niveles microtopográficos cada cierta distancia, midiendo la distancia entre la superficie del suelo y una varilla posicionada sobre los dos tubos verticales fijos. Se repite el procedimiento tan seguido como el estudio lo determine (después de cada tormenta, después de las lluvias invernales, etc.).

#### **2.5.2.3.- Medición de la erosión en surcos y cárcavas**

El método más sencillo de estimar la erosión en surcos es midiendo el volumen de suelo perdido, es decir el volumen ocupado por aire donde antiguamente se encontraba el suelo. Esto se debe hacer en transectos cuya separación puede variar entre algunos centímetros a varios metros, según lo que se esté midiendo (surcos o cárcavas), además de la homogeneidad de la

grieta. El volumen de suelo perdido entre dos transectos consecutivos está representado por el producto de la distancia entre dichos transectos y el promedio del área de las secciones transversales. Dicho volumen debe multiplicarse por la densidad del suelo en cuestión.

Para el caso de cárcavas de mayor envergadura es recomendable aplicar el mismo principio, utilizando equipos topográficos (midiendo los bordes y el canal central de la cárcava). En caso de no contar con dichos equipos, dos personas pueden ir midiendo la distancia y el ángulo de inclinación existente entre el borde y el canal central. De este modo, se establecen relaciones geométricas y se determinan las áreas y, por ende, los volúmenes. Puesto que las cárcavas son más profundas, se debe tener en cuenta la posibilidad de que éstas hayan perforado más de un horizonte edáfico (figura 13), por lo que cada capa de suelo debe considerarse en forma separada al momento de multiplicar volumen total por densidad, para determinar el peso total de suelo perdido.



**Figura 13:** Las cárcavas de mayor envergadura perforan más de un horizonte edáfico, factor a considerar al momento de estimar tasas de erosión.

(Fuente: García -Chevesch, 2008).

#### **2.5.2.4.- Experimentos de laboratorio**

Es prácticamente imposible simular la totalidad de los factores influyentes en los procesos erosivos bajo condiciones controladas. Sin embargo, los experimentos en los cuales se controlan ciertos factores son útiles para determinar diferencias relativas en las tasas de erosión obtenidas, de acuerdo a la variabilidad de éstos.

Existe un sinnúmero de estudios relacionados con la erosión que utilizan simuladores de lluvia (ver figura 14). Dichos experimentos son diseñados para producir tormentas de energía, intensidad y tamaño de las gotas predeterminadas, las cuales pueden repetirse variando otros factores influyentes en los procesos erosivos. El requerimiento más importante de un simulador de lluvia es que debe ser capaz de producir la misma distribución de tamaños de gotas, velocidades terminales y la intensidad que la lluvia natural de algún área determinada, siendo además capaz de repetir el experimento (Bubenzer, 1979; Page et al., 2003).

Los simuladores de lluvias se clasifican de acuerdo a los mecanismos utilizados para formar las gotas de agua, destacando entre los más comunes los tubos perforados y los aspersores (Morgan, 2005). No obstante, no existe simulador que se iguale a las características de la lluvia natural (Hall, 1970). En la mayoría de los laboratorios existe una insuficiencia en altura, por lo que las gotas no alcanzan su velocidad terminal natural. Por esta razón, usualmente se incrementa la presión de salida. Sin embargo, dicha acción aumenta la intensidad de la lluvia, pero disminuye el tamaño de sus gotas. La intensidad puede disminuirse reduciendo la frecuencia en que la lluvia cae

sobre la parcela de erosión, pese a que sólo se reduce la intensidad promedio de la simulada tormenta. Esto hace meditar en que es prácticamente imposible simular condiciones naturales de lluvia, en términos de intensidad real y distribución espacial (Morgan, 2005).

De este modo, se mide el caudal producido por la lluvia falsa, recolectando muestras cada cierto lapso previamente establecido, con el fin de determinar la variación de la concentración de sedimentos y estimar la erosión total. También pueden utilizarse clavos de erosión, pese a su reducida aplicación en la historia de los simuladores de lluvia.



**Figura 14:** Simulador de lluvia Walnut Gulch.  
(Fuente: Stone J., 1993).

---

En cuanto a la erosión de impacto, se han utilizado una serie de metodologías en las cuales se ha simulado la lluvia. Por lo general, se usan contenedores llenos de algún tipo de suelo, el que se satura justo antes de iniciar el experimento. Conociendo el peso del contenedor y del suelo seco antes y después de la lluvia falsa, se pueden determinar las tasas de erosión por unidad de área y según intensidad y duración de la tormenta. De este modo se pueden comparar distintos tipos de suelo en términos de erodabilidad. Sin embargo, el experimento daría sólo valores relativos, pues el suelo utilizado se encuentra en condiciones de agregación y cohesividad muy distintas a la realidad (Morgan, 2005).

Cuando se estudian distintos tipos de suelos, o suelos del mismo tipo pero provenientes de sitios diferentes, se deben extraer las muestras bajo las mismas condiciones de humedad. Para cumplir con dicha condición, lo más recomendable es extraer los suelos en su capacidad de campo, esto es, que el suelo se satura de agua para después cubrirlo con un plástico (para evitar evaporación) por 24 a 48 horas. Sólo después puede extraerse la muestra para luego ser estudiada en condiciones de laboratorio (Moldenhauer, 1965).

Existen ocasiones en que la precipitación es reemplazada por caudales conocidos (simuladores de caudal), descargados en la sección más elevada de la parcela (Savat, 1975). Además, existen estudios en los que se han combinado ambas variables (precipitación y caudal), con el fin de estimar tasas de erosión más cercanas a la realidad (Govers et al., 1987).

---

### ***CAPÍTULO III: SIMULADORES DE LLUVIA***

Uno de los más grandes problemas en la investigación de la erosión hídrica es la necesidad de contar con una lluvia natural para observar la pérdida de suelo, ya que es imposible predecir con certeza dónde y cuándo ocurrirán los eventos, así como su intensidad y duración, además si estas características son suficientes para producir procesos de escorrentía y pérdida de suelo.

Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para aplicar precipitaciones con intensidad y duración controladas a parcelas experimentales de manera similar a los episodios de precipitaciones naturales. Este tipo de herramientas es útil para obtener datos de infiltración, escorrentía superficial, transporte de sedimentos y erosión. Enfocada en esta última, es posible realizar mediciones que permiten calibrar, validar y verificar modelos predictivos de erosión como la MUSLE. De esta forma, los simuladores han contribuido ampliamente al entendimiento de los procesos erosivos en el suelo, aun cuando existen diferencias entre una lluvia natural y una simulada, es posible encontrar buenas correlaciones entre los valores de pérdida de suelos medidos en una parcela de erosión bajo una lluvia simulada y la ocurrida en una cuenca (Hamed et al., 2002).

Todos los simuladores de lluvia tienen ciertas características en común tales como: portátiles; tienen fuente de energía y agua, lo que permite disponer de cantidades de precipitación cuando y donde se necesite; tienen un mecanismo de rociado con el cual variando los grados de control se pueden proporcionar diferentes intensidades, tamaño de gotas y volúmenes de

---

precipitación. Sin embargo su principal problema es alcanzar un nivel aceptable de precisión para replicar una tormenta natural específica, ya que su implementación nace de la necesidad de controlar las características de la lluvia, intentando una aproximación lo más acertada posible a las condiciones de la lluvia natural.

La elección de un determinado tipo de simulador depende de parámetros de la precipitación como tamaño de gota, velocidad de impacto, intensidad de los eventos a simular, así como de los objetivos del proyecto. Las múltiples combinaciones que resultan de lo anterior ha conducido al desarrollo de numerosos tipos de dispositivos; los más comunes se describen en este Capítulo.

### **3.1.- Tipos de simuladores de lluvia**

Existe una amplia bibliografía acerca de los distintos simuladores de lluvia que han sido utilizados en los últimos años por distintos investigadores. Los diferentes tipos son seleccionados según su tamaño, si usa agua presurizada o por gravedad, o si la emisión del agua es de forma rotatoria, intermitente o de aspersión continua, en función de la disponibilidad, costes de construcción y del objetivo experimental. No existe hasta la fecha una total estandarización en los diseños o metodología que se emplea. Sin embargo se pueden diferenciar dos grandes grupos de simuladores de lluvia. En uno las gotas de lluvia se precipitan a muy baja presión y cuya velocidad inicial es cero (formadores de gota), mientras que en los otros se utilizan aspersores mediante los cuales se aplica el agua con cierta velocidad inducida mediante presión (pulverizadores). Estas diferencias suponen características distintas de las

---

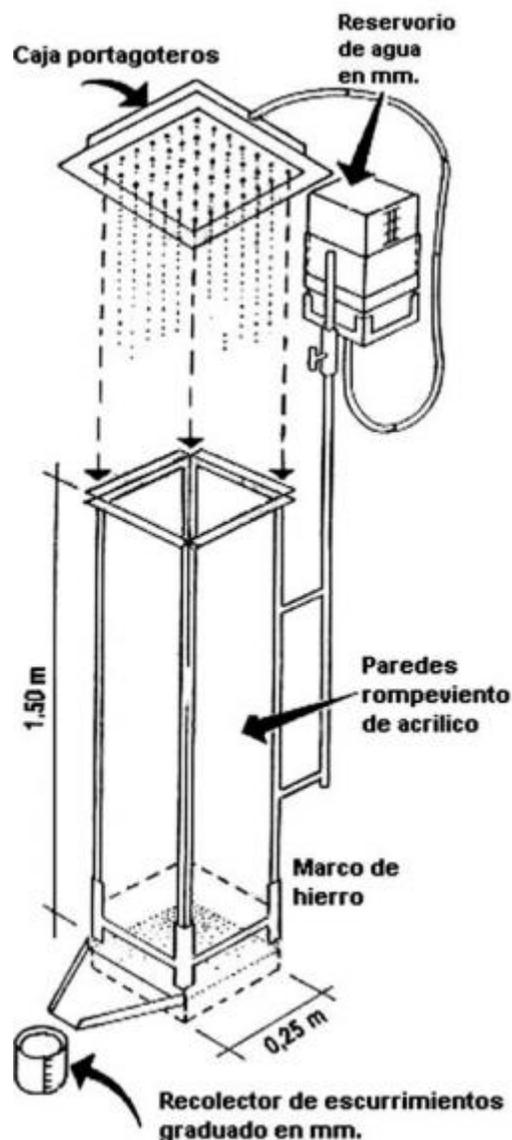
gotas de lluvia simulada y además determinan las características del aparato que en el primero de los casos hace que sea muy difícil su uso en el campo (De Ploey, 1983).

### **3.1.1.- Simuladores goteadores**

Los primeros simuladores de lluvia que se construyeron fueron de tipo goteador. Aunque su construcción y uso se produjo durante los años 30, la publicación de los primeros resultados no llegó hasta pasada una década. Su funcionamiento se basa en la formación de gotas en la punta de los materiales empleados para tal efecto hasta que su peso supera la tensión superficial y la gota cae. Los primeros simuladores de este tipo usaban tubos cortos que colgaban del fondo de un recipiente que contenía agua; más recientemente se han estado utilizado tubos de vidrio y de plástico, agujas hipodérmicas, entre otros. En estos aparatos la tasa de formación de gota se controla por la longitud del tubo o aguja, y el flujo o presión se controla por medio del diámetro o bien, por medio de módulos herméticos. El diámetro de la gota que se puede esperar varía entre 2 y 5 mm.

Puesto que las gotas de agua inician su caída con velocidad cero, los formadores de gota deberán estar localizados a una altura suficiente del suelo para que el impacto sea similar al de la velocidad real. Asimismo, los tubos o agujas no deberán estar muy espaciados uno del otro para obtener distribuciones de intensidad satisfactorias. Esto pone de manifiesto que los simuladores de lluvia tipo formadores de gota se utilizan en parcelas pequeñas.

Un simulador comúnmente usado, perteneciente a esta categoría, es el infiltrómetro tipo modular diseñado para estudios hidrológicos como sedimentación y erosión hídrica; un ejemplo de este simulador se muestra en la figura 15.



**Figura 15:** Simulador infiltrómetro modular.  
(Fuente: Aoki et al., 2006).

---

Este infiltrómetro provee de intensidades de precipitación que varían de 30 a 250 mm h<sup>-1</sup> sobre una parcela de 0,34 m<sup>2</sup>. El tamaño de gota es de 2,5 mm aproximadamente; en relación a la energía cinética de las gotas de lluvia naturales, este aparato las simula en un 28 por ciento. La cámara de agua (donde están insertadas 517 agujas hipodérmicas) es rotatoria en posición horizontal para asegurar igual presión en las agujas, las cuales son de acero inoxidable, con diámetro interior de 0,476 y 0,635 mm de diámetro exterior.

La parcela no está delimitada por un armazón, por lo que las tasas de infiltración resultan un tanto alteradas por el movimiento lateral del agua en el suelo; el aparato es portátil y se puede utilizar principalmente en pendientes pronunciadas y en suelos rocosos.

### **3.1.2.- Simuladores pulverizadores**

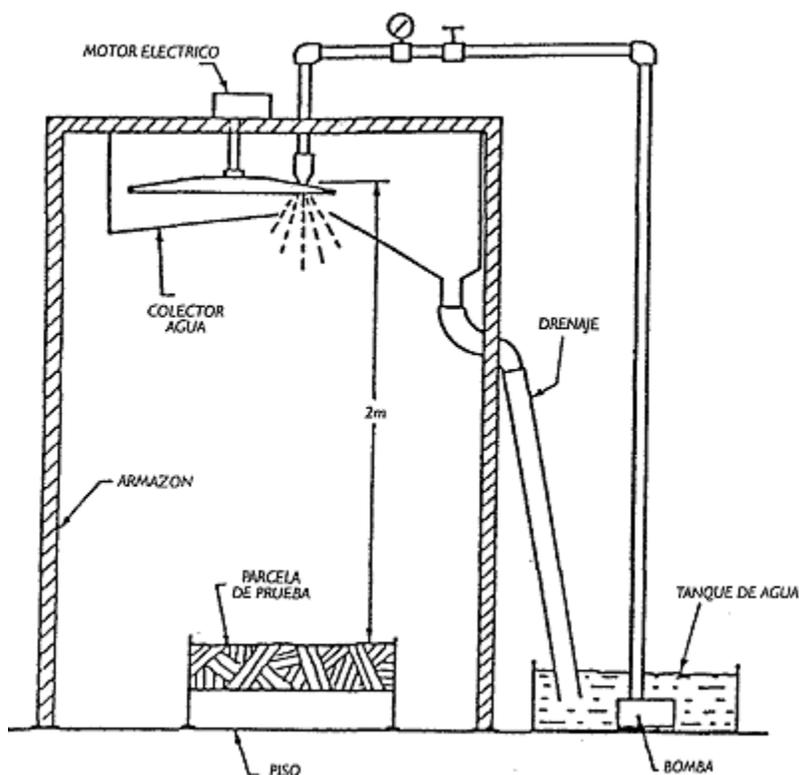
Durante la década de los 40, y especialmente los 50 y 60, aparecieron los simuladores de lluvia del tipo pulverizadores, es decir, aquellos simuladores en donde el agua sale a una determinada velocidad por estar sometida a una presión inicial determinada. Éstos vieron incentivado el crecimiento de su número cuando se comprobó que una de las características de la lluvia natural es su elevada energía cinética.

Su principal ventaja es que en función de la boquilla seleccionada, de la presión de salida del agua y de la altura a la que se sitúa, se pueden obtener lluvias de intensidades y energías muy diferentes y seleccionar aquellas que correspondan a las características de la lluvia natural de la zona. Su mayor

---

problema estriba en que suelen obtenerse distribuciones de tamaños de gota óptimos (similares a la lluvia natural) para intensidades demasiado elevadas, por lo que han tenido que introducirse mecanismos que permitan disminuir la intensidad manteniendo esa distribución de gotas. Como sistemas correctores de la intensidad se han utilizado discos giratorios con un corte radial (Morin et al., 1967) o bien se ha optado por situar la boquilla en un sistema oscilante (Meyer & Harmon, 1979; Neibling et al., 1981).

El simulador de disco rotatorio, consiste en un disco de 400 mm de diámetro fabricado de aluminio de 13 mm de espesor, laminado de tal manera que forma un cono truncado con pendientes laterales de nueve por ciento aproximadamente. En el disco se cortó una sección de forma anular y alrededor de ésta se colocan dos pequeños seguros con los que se selecciona el ángulo deseado. La boquilla usada opera a 8,8 libras por pulgada cuadrada de presión es del tipo 1,5H30 y la descarga choca con el disco (figura 16). La precipitación máxima que simula este aparato es de 220 mm h<sup>-1</sup>; la altura de caída de las gotas es de 2 m y cubren un área de 30x67 cm.

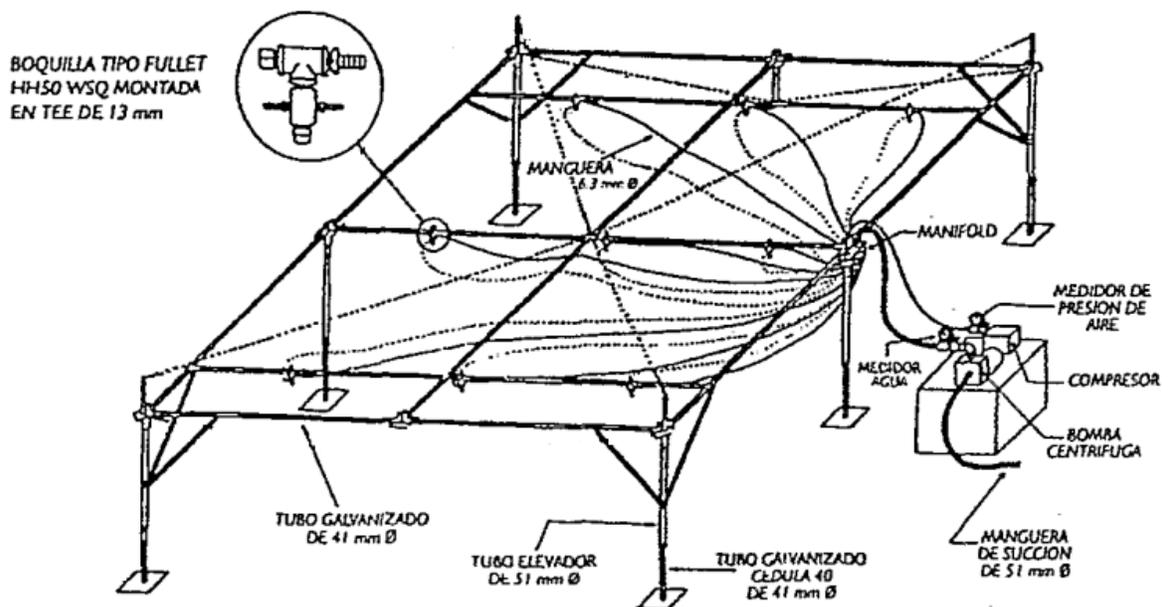


**Figura 16:** Simulador de lluvia de disco rotatorio.  
(Fuente: China et al., 1985).

Numerosos estudios indican que existe una relación inversa entre las tasas de aplicación y el diámetro de gota, por lo que es complicado el mantener un diámetro de gota deseado sin afectar las características de la tasa de aplicación; con fundamento en lo anterior, se han hecho modificaciones a los simuladores que utilizan boquillas inyectando aire dentro del conducto de agua para reducir las tasas de aplicación mientras se mantiene constante el diámetro de gota.

De esta manera se ha concebido la idea de inyectar aire al conducto de agua para compensar la presión de la boquilla y controlar el tamaño de gota mientras se varía la intensidad. El flujo que se genera con la selección

apropiada de la boquilla y la presión de operación, provee de precipitación no intermitente teniendo tamaño de gota e intensidades deseables (figura 17). Este simulador ofrece resultados confiables en intensidades del rango de 50-150 mm h<sup>-1</sup>, con un diámetro medio de gota de 2,6 mm.



**Figura 17:** Simulador de lluvia de flujo continuo.  
(Fuente: Rojas, 1977).

Las principales desventajas de los simuladores pulverizadores son que la energía de las gotas es constante independientemente de la intensidad de aplicación (Hignett et al., 1995). La distribución del tamaño de gotas también es constante y el máximo diámetro de gota no se incrementa con la intensidad como ocurre en los episodios tormentosos naturales. Otros inconvenientes serían su elevado consumo de agua y la mayor complejidad y coste de su montaje.

---

Recientemente, Agassi & Brad-Ford (1999) han realizado una amplia discusión sobre los principales problemas que presentan las experiencias con lluvia simulada en el laboratorio y en el campo, considerando como mejor alternativa para evaluar los efectos de la intensidad de la lluvia y de la energía cinética en la estabilidad de agregados y pérdida de suelo el seleccionar uno de los dos tipos de boquillas anteriormente mencionados y emplear al menos tres de ellas con diferentes flujos con el fin de alcanzar distintas energías cinéticas a la vez que se varía la intensidad. Además concluyen que la estandarización del diseño de los simuladores de lluvia y de los tests de procedimiento, es fundamental para poder realizar una adecuada comparación entre los resultados de erosión obtenidos por diferentes investigadores.

### **3.2.- Características deseables de la lluvia simulada**

Conviene que todas las características físicas de la lluvia natural se reproduzcan lo más fielmente posible, pero es aceptable cierta elasticidad en busca de la simplicidad y la economía de costos. Las principales características reproducibles son:

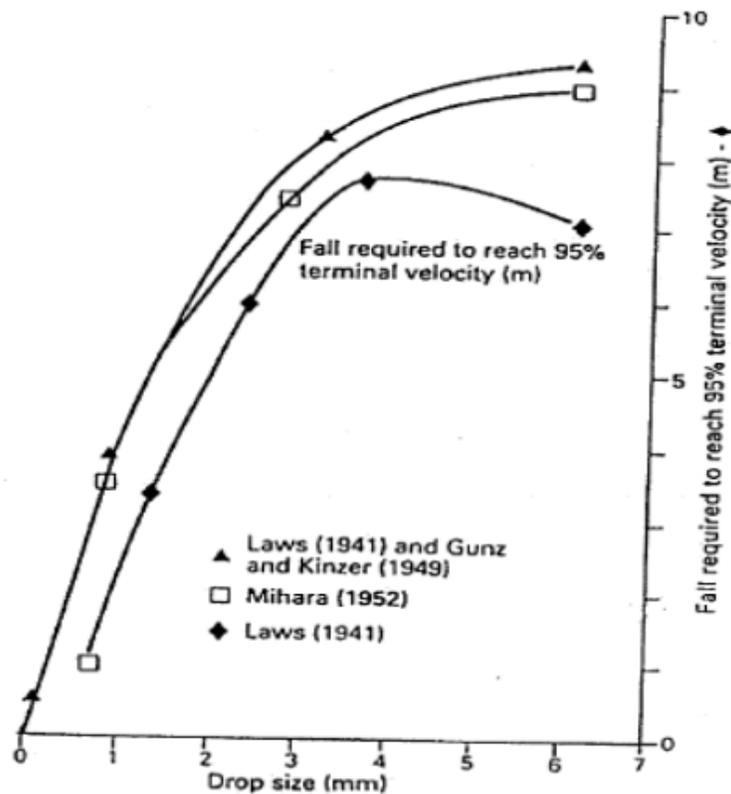
- a) **Tamaño medio de la gota.** Las gotas de lluvia natural varían desde un tamaño insignificante en la niebla hasta un tamaño máximo de 6 o 7 mm de diámetro. Este es el límite físico superior del tamaño de la gota y por encima de esa dimensión cualquier gota que se forme como resultado de la unión de más de una gota será inestable y se dividirá en gotas más pequeñas. El diámetro medio o mediano de una gota oscila entre 2 y 3 mm y varía con la intensidad.

---

b) **Distribución del tamaño de gotas.** Ésta varía de una precipitación a otra, las precipitaciones ciclónicas en los climas templados están principalmente compuestas de gotas de tamaño pequeño o mediano, pero las tempestades tropicales de gran intensidad tienen una proporción mayor de gotas grandes. Esta distribución varía con la intensidad, existiendo un mayor número de gotas de tamaño mayor para lluvias de intensidad elevada.

Sería conveniente que hubiera uniformidad en la distribución espacial de la lluvia sobre las parcelas de ensayo.

c) **Velocidad de caída.** las gotas de lluvia que caen alcanzan una velocidad máxima (o terminal) cuando la fuerza de aceleración gravitacional es igual a la resistencia de las gotas que cae a través del aire. La velocidad terminal es función del tamaño de la gota y aumenta hasta un máximo cercano a los 9 m/s para las gotas mayores (figura 18).



**Figura 18:** Relación altura/diámetro de la gota, para alcanzar un 95% de la velocidad terminal de una gota de lluvia real (Fuente: Epema, 1983).

- d) **La energía cinética de la lluvia.** Es la suma de las energías cinéticas de las gotas precipitadas. Esa energía cinética de la lluvia define la erosividad intrínseca de la lluvia o capacidad potencial de la lluvia para producir erosión. Por eso el conocimiento de esa energía cinética es muy importante en los estudios de erosión hídrica y por eso también una característica a tener en cuenta en la lluvia simulada cuando se quiere conocer el efecto de una determinada lluvia en el proceso de erosión hídrica.

---

En resumen, según lo recomendado por Meyer (1965) y Bubenzer (1979), las principales características de la lluvia natural que han de conseguir los simuladores de lluvia son las siguientes:

- Distribución del tamaño de las gotas de lluvia similar a la de la lluvia natural.
- Velocidad de impacto similar a la velocidad terminal de las gotas en la lluvia natural.
- Intensidad de lluvia correspondiente a las condiciones naturales.
- Energía cinética similar a la de la lluvia natural.
- Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas.

### **3.3.- Ventajas y desventajas del uso de simuladores**

Las ventajas principales que ofrecen los simuladores de lluvia son:

- Acelera la investigación de la erosión y de los procesos hidrológicos (como la escorrentía) ya que se puede replicar una tormenta estándar varias veces en un menor tiempo, proporcionando una alta capacidad de tomar numerosas mediciones y repetición de ensayos rápidamente sin tener la necesidad de esperar las precipitaciones naturales.
- Posibilidad de comparación de ensayos bajo un mismo sistema de simulación de lluvia.
- Permite estudio de factores específicos de la erosión, como el efecto del corte producido por el impacto de la gota de lluvia en los agregados del suelo, proporcionando mediciones de la estabilidad de los agregados del suelo con mayor exactitud que otros métodos usados.

- 
- Se puede diseñar para una intensidad, frecuencia y energía erosiva media estándar, en otras palabras, otorga la posibilidad de trabajar con precipitaciones controladas, eliminando de ese modo la variabilidad de la lluvia natural y permitiendo variar otros factores determinantes en la variación de pérdida del suelo, por lo que es muy útil para estudios de erosión comparativos, como por ejemplo, entre distintos tratamientos o distintos cultivos (Rickson, 1992).

Por otra parte, dentro de las principales desventajas o inconvenientes que presentan los simuladores se puede señalar:

- Los problemas que se presentan a la hora de comparar datos entre lluvia simulada y real, debido al desconocimiento en la mayoría de los casos de los parámetros de la lluvia simulada, como son los diámetros medios, energía cinética, distribución espacial, velocidad, etc.
- Suele ser económico y sencillo de utilizar un simulador sobre una parcela de ensayo de pocos metros cuadrados, pero cuando se requiere cubrir grandes parcelas de campo, su valor económico lo hace poco factible y su abultes poco práctico.
- La posibilidad de que los simuladores se vean afectados por el viento, aun cuando es posible solucionar con la aplicación de cortavientos o parabrizas, lo cual reduce la ventaja de simplicidad.
- Las mediciones obtenidas a partir de pruebas con simuladores efectuadas en pequeñas parcelas no pueden extrapolarse a superficies más extensas.

---

Además los simuladores goteadores presentan de por sí solo una serie de desventajas añadidas debido a su diseño, entre las cuales se destacan las siguientes:

- Su desventaja principal es que la velocidad terminal en caída libre se consigue para las gotas de lluvia de mayor diámetro solamente para alturas de caída de 12 m (Hudson, 1971), siendo una altura muy elevada para trabajar con un simulador tanto en el laboratorio como en el campo.
- El impacto de las gotas de lluvia se produce siempre en el mismo punto, perdiéndose así una de las características de la lluvia natural, la estocasticidad.
- Para la gran parte de los ensayos se vuelve dificultoso la alimentación del depósito de agua debido a su elevada ubicación por requerimientos de diseño.
- Finalmente, las gotas producidas en casi todos ellos, son del mismo tamaño a diferencia de lo que sucede en la lluvia natural, en donde el tamaño de gotas varía permanentemente.

---

## **CAPÍTULO IV: ETAPA EXPERIMENTAL**

En general, en esta etapa experimental se buscó definir procedimientos estandarizados que logran concebir un cierto nivel de homogeneidad de parámetros y variables que se desean “controlables” como los son la pendiente, compactación, lluvia y tipo de suelo, entre otros. Además se definen también una serie de casos de estudio que buscan responder de manera contundente los objetivos de esta investigación. Finalmente se entregará el procedimiento recomendado en base al criterio formado de acuerdo a la experiencia adquirida en la realización de éste estudio.

En primer lugar se da a conocer las modificaciones necesarias sobre el sistema recomendado por Riquelme (2010), para realizar un muestreo de una mejor manera, ayudando de cierta forma a depurar dicho sistema.

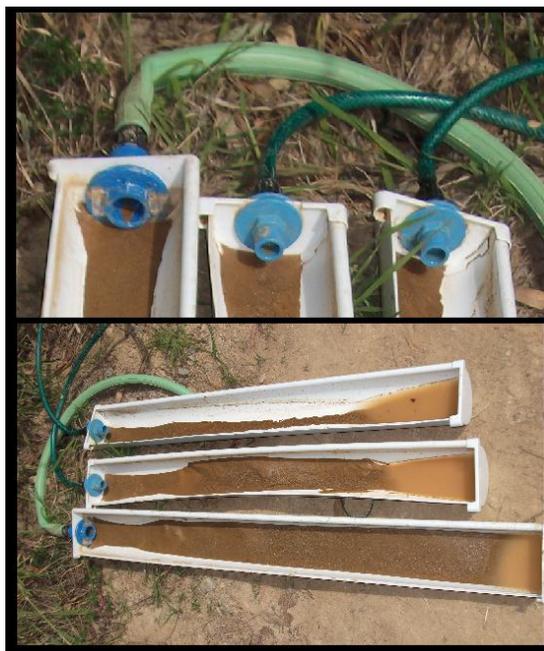
El desarrollo de la etapa experimental tuvo lugar en el Campus Concepción de la Universidad del Bío-Bío, en un sector designado para experimentación en taludes denominado Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente, bajo condiciones ambientales normales en meses de verano. Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad.

### **4.1.- Lisímetros y sus modificaciones**

Para la realización de esta experiencia se utilizaron los lisímetros diseñados por Riquelme (2010), esto es, tres lisímetros con taludes a escala de diferentes pendientes. Taludes con pendiente baja del 5%, pendiente media del 25% y

pendiente alta de 60% que pretenden representar la realidad de los suelos inclinados a modo de escala.

Sin embargo, fue necesario realizar modificaciones en el sistema de evacuación de la escorrentía superficial, debido a las altas intensidades de precipitación alcanzada en algunos ensayos, las cuales superaron las condiciones de diseño del sistema. Estas modificaciones (ver figura 19) consistieron en un aumento en la capacidad del canal receptor de escorrentía superficial, incremento del diámetro de salida de la manguera conectora del canal con el depósito de mezcla de sólido-líquido, además de ampliar la altura de energía hidráulica del sistema canal-depósito mediante la profundización del nivel de piso del depósito lo que generó un incremento en el caudal de evacuación lo que permitió la realización de los ensayos de manera satisfactoria.



**Figura 19:** Modificaciones en sistema de retención de escorrentía superficial  
(Fuente: Elaboración propia).

## **4.2.- Estudio del suelo**

En lo que respecta al suelo empleado en los ensayos, éste corresponde a una arena limosa encontrada en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente, la cual ha sido ampliamente en la Universidad del Bío-Bío, Campus Concepción. Por consiguiente, se extraerán las características que sean necesarias de los proyectos de título reciente como lo son: Manzo (2010) y Mendoza (2010) (ver Anexo A).

### **4.2.1- Calibración de extractor de testigos de suelo**

En el marco de las simulaciones de prueba, se identificó la necesidad de conocer ciertas características del suelo a simular (densidad máxima compactada seca, densidad compactada húmeda, densidad compactada seca, contenido de humedad) para definir las condiciones de control de los ensayos en lisímetros. Es por esto que se creó un extractor de testigo que lograra medir la densidad de la capa superficial de los taludes a escala de manera no invasivo. Este extractor de testigos es un tubo de PVC de 24,5 mm de diámetro exterior y 22 mm de diámetro interior el cual fue 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.

La validación de dicho extractor de testigos se realizó entre el ensayo de densidad (según métodos y procedimientos descritos en la Nch 1516.of79) y cinco extractores de testigos con profundidades de muestreo variables.

La figura 20 muestra parte del proceso de la validación de testigos, las cuales fueron realizadas en el interior del lisímetro de menor pendiente.



**Figura 20:** Validación de medidores de densidad  
(Fuente: Elaboración propia.)

Los resultados (tabla 1) señalan que el extractor de testigos más confiables es el de profundidad 25 mm arrojando un error promedio inferior al 5%, en las variables medidas, esto es, densidad compactada humedad (D.C.H.), densidad compactada seca (D.C.S.) y humedad natural del suelo (W).

**Tabla 1:** Calibración de la profundidad de extracción del testigo  
(Fuente: Elaboración propia).

Testigo	Profundidad (mm)	D.C.H. (Kg/m <sup>3</sup> )	D.C.S. (Kg/m <sup>3</sup> )	W (%)	Error D.C.H. (%)	Error D.C.S. (%)	Error W (%)
<b>Cono</b>	Variable	1748	1372	27.4	---	---	----
<b>1</b>	75	1281	1002	26.9	26,7	26,9	1,9
<b>2</b>	50	1458	1151	26.2	16,6	16,1	4,3
<b>3</b>	50	1441	1137	26.0	17,5	17,1	5,2
<b>4</b>	25	1624	1275	26.8	7,1	7,1	2,4
<b>5</b>	25	1718	1336	27.8	1,7	2,6	1,5

#### **4.2.2.- Método de compactación del suelo en lisímetros**

Para introducir la muestra de suelo en los lisímetros, se generó una metodología de compactación estandarizada, para así mantener controlada la densidad del suelo y que ésta se encuentre entre un rango del 60 y 80 % de la DMCS ( $1768 \text{ kg/m}^3$ ).

Dentro de los métodos de compactación que se conocen, el más fácil de llevar a cabo, dado las dimensiones de los lisímetros, es aquél que se realiza mediante la utilización de un pisón manual (ver figura 21). Una vez seleccionado el pisón, que posee una masa de 5,56 Kg y un área efectiva de  $0,028\text{m}^2$ , fue necesario determinar la cantidad de capas de suelo con la que se llenarán los lisímetros, número de golpes y desde qué altura se dejará caer. Luego de una serie de pruebas, variando la cantidad de golpes y número de capas, se determina que para el talud de pendiente de 5% los mejores resultados se obtenían llenándolo con dos capas de suelo suministrándole 874 golpes a cada una con una altura de caída libre de 30 cm. Los taludes restantes, al poseer un ángulo importante de inclinación, no es posible aplicar la compactación por caída libre. Producto de esto se procuró generar una similitud de la densidad mediante comparación al tacto, siendo el parámetro de comparación el talud de pendiente 5%.



**Figura 21:** Pisón manual estándar (fuente: Elaboración propia)

Para verificar que el método de compactación cumple con el rango de densificación requerido, se realizaron pruebas con extracción de testigos, los que arrojaron los resultados que se aprecian en la tabla 2.

**Tabla 2:** Resumen porcentajes de densificación obtenidos (Fuente: Elaboración propia).

Repetición	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )		% DMCS	
	Nº	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1
1	1264	1265	72	72
2	1277	1259	73	72
3	1318	1220	75	69
4	1207	1294	69	74
5	1292	1230	73	70

Las mediciones realizadas sobre el lisímetro de 5% están ampliamente dentro del rango de DMCS planteado, obteniéndose en promedio un 72% de la máxima densificación, por lo que se asegura que el método de compactación utilizado es correcto.

#### **4.2.3.- Prueba de datos dudosos**

De acuerdo con las recomendaciones entregadas en Ven Te Chow (1994), y con la finalidad de tener controlada la variable densidad se empleó el método del Water Resources Council (1981), el cual recomienda la realización de ajustes de datos dudosos. Los datos dudosos son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas. Esta prueba de datos dudosos posee un nivel de significancia del 10%. La metodología recomendada para su utilización se describe en el Anexo C.

#### **4.3.- Diseño y Construcción del Simulador de Lluvia**

El simulador construido consiste en un sistema de aspersion continua con agua presurizada para microparcels de 1 m<sup>2</sup> de área efectiva. Para generar la presión en el sistema se empleó la dispuesta en la red de agua potable disponible en el lugar de ensayo. La red del sistema simulador de lluvia está compuesta por manguera de 13mm de diámetro. El sistema de aspersion es distribuido mediante cuatro líneas de alimentación con perforaciones (figura 31), las que están interconectadas por uniones tipo plana y un manómetro ubicado antes del sistema de aspersion para verificar la presión de trabajo.

Dicho sistema tiene por finalidad proporcionar características de precipitaciones comunes a los lisímetros estudiados y no simular alguna tormenta en específica de la región.

### 4.3.1.- Calibración del sistema de aspersión

Con la finalidad de cuantificar y caracterizar la pluviosidad, se realizó una calibración del sistema empleando valores de presión de trabajo predefinidos (0,5; 0,7 y 1 bar), evaluando la pluviosidad a través de vasos receptores ubicados en un cuadrículado de 18,5x 17,5 cm a 55 cm del suelo que es la altura promedio de los tres taludes en estudio, cubriendo una superficie de 1 m<sup>2</sup> para cada prueba. La pluviosidad se caracterizó a través del coeficiente de uniformidad de Christiansen y mediante un análisis espacial a través de triangulación con interpolación lineal.

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

Donde CU es el coeficiente de uniformidad de Christiansen; x es la altura de agua registrada sobre una grilla de espaciamiento uniforme y  $\bar{x}$  es la media de altura registrada. Las intensidades calibradas son mostradas en la tabla 3, mientras que la metodología y resultados se describen en detalle en el Anexo D.

**Tabla 3:** Intensidad efectiva según presión del sistema

(Fuente: Elaboración propia).

Presión Sistema (bar)	Intensidad generada (mm/hr)	Intensidad efectiva (mm/hr)	Eficiencia sistema (%)
0,5	383	334	87
0,7	568	460	81
1	742	684	92

---

### **4.3.2.- Construcción del simulador de lluvia**

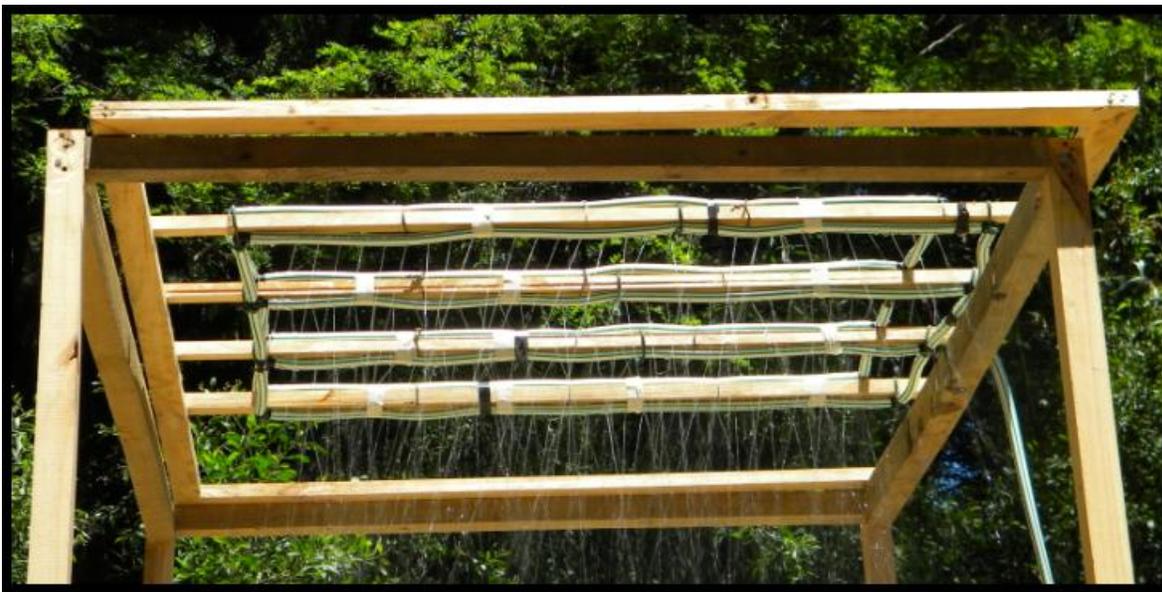
Para este estudio se construyó un sencillo simulador de 3,2 m de alto, para un área efectiva de 1m<sup>2</sup>. Su materialización se enfocó en la economía, movilidad y simplicidad del montaje. El sistema de simulación de lluvia se puede dividir en las siguientes partes:

#### **a) Alimentación**

Consta de una llave de paso (está conectada a la red de agua potable) la cual mediante una unión americana se conecta a la manguera que alimenta de agua al sistema de aspersión y al mismo tiempo mediante una bifurcación al manómetro. Dicha llave de paso es la encargada de regular la presión de trabajo en el sistema y así la intensidad de precipitación.

#### **b) Sistema de aspersión**

Este sistema (ver figura 22) está compuesto por un bastidor de madera de 1,2 x 1,2 m y sobre él un circuito de manguera de 13mm de diámetro que consta de 4 líneas de aspersión en paralelo espaciado a 200 mm, perforadas mediante una aguja a alta temperatura con un diámetro de 0,5mm y un espaciamiento de perforaciones en línea recta de 30mm.



**Figura 22:** Sistema de aspersión (Fuente: Elaboración propia).

### **c) Soporte de la estructura**

El objetivo de la estructura es soportar y mantener estable el sistema de aspersión, además de ser manejable, ya sea por su tamaño como por su peso. De esta forma, el sistema de soporte se basa en 4 pilares de madera de 2x2” unidos por vigas de similares dimensiones (ver figura 23). Estos pilares son reforzados en su base, generando una mayor estabilidad de la estructura. La totalidad de las uniones fueron generadas mediante clavos corrientes de 3 ½”.

La diferencia de altura el manómetro y la parrilla de aspersión es de 1,9 metros.

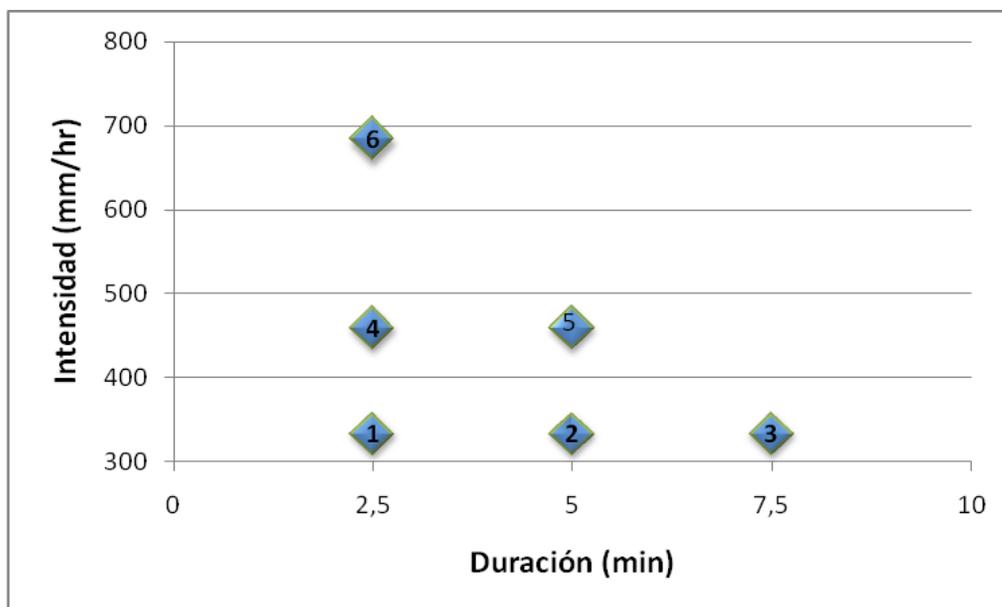


**Figura 23:** Simulador de lluvia. 1) Manguera de alimentación; 2) Bifurcación; 3) Manómetro; 4) Estructura soportante; 5) Sistema de aspersión  
(Fuente: Elaboración propia).

#### 4.4.- Casos de estudio

Con el fin de lograr apreciar la influencia de las precipitaciones en los efectos erosivos se dispuso una serie de seis casos de estudios ( figura 24), que serán aplicados a cada uno de los lisímetros ejecutando tres repeticiones para cada una de ellos. Estos casos fueron dispuestos de tal forma que al menos sea posible cuantificar la pérdida de suelo debido a las precipitaciones bajo tres escenarios:

- a) Intensidad de precipitación constante con duración variable. (casos 1-2-3)
- b) Intensidad de precipitación variable con duración constante. (casos 1-5-6)
- c) Influencia del volumen precipitado. (casos 1-2-3-4-5-6)



**Figura 24:** Distribución de casos de estudio (Fuente: Elaboración propia).

Es importante destacar que la variabilidad de la información registrada dependerá de la capacidad de mantener invariable el resto de los parámetros que involucra el proceso de erosión.

#### **4.5.- Procedimiento de ensayo**

Previamente al registro de mediciones se realizaron algunos ensayos, cuyo objetivo era prever inconvenientes y posibles problemas, para así definir un procedimiento estandarizado que permitiera ejecutar la totalidad de los ensayos de forma similar.

A continuación se detallan de manera secuencial los pasos seguidos:

- a) Reperfilear el talud, esto es, retirar la capa superficial de suelo para reemplazarla por otro que posea semejantes condiciones iniciales que la ya ensayada. Para asegurar un nivel de compactación similar incorporar el nuevo material en 2 capas uniformemente esparcidas de acuerdo con la configuración señalada en la tabla 4.

**Tabla 4:** Dosificación recomendada para compactación por capas  
(Fuente: Elaboración propia).

<b>Pendiente</b> (%)	<b>Reperfilado</b> (cm)	<b>Capas</b> Nº	<b>Masa de tierra</b> (Kg/capa)
<b>60</b>	3	2	28
<b>25</b>	3	2	23
<b>5</b>	2	2	16

- b) Introducir el sensor EC-5 en el suelo para medir y registrar la humedad volumétrica con el instrumento de lectura ECH<sub>2</sub>O CHECK (ver especificaciones en Decagon, 2011).
- c) Retirar los cuatro testigos de densidad introduciendo el extractor en el suelo mediante un doble giro de 360° hasta lograr los 25mm de profundidad. Posteriormente verificar la profundidad con una regla y enraizar la superficie del testigo al nivel de la probeta. Rellenar las perforaciones con el nuevo material mediante compactación manual.

- 
- d)** Llevar los testigos al laboratorio de mecánica de suelos en donde serán vaciados en recipientes previamente pesados e identificados. Medir y registrar el peso del recipiente más la muestra húmeda para posteriormente ser secado en horno hasta alcanzar masa constante.
  
  - e)** En el lugar del ensayo, montar el sistema recolector de escorrentía (canal con manguera más depósito de mezcla sólido-líquido).
  
  - f)** Realizar el montaje del simulador de lluvia. Una vez instalado en la posición adecuada proceder a conectar la manguera de alimentación y abrir la llave de paso, verificar la presión en el sistema y simultáneamente cuando cae la primera gota sobre la superficie comenzar a registrar el tiempo.
  
  - g)** Una vez transcurrido el tiempo del caso ensayado, cerrar la llave de paso y se desconectar de forma inmediata la manguera de alimentación para evacuar la presión del sistema y evitar goteo sobre la superficie del talud.
  
  - h)** Trascurrido un par de minutos y cuando el material sólido de mayor tamaño presente haya visiblemente decantado, retirar cuidadosamente el canal receptor de sedimentos.
  
  - i)** Extraer el recipiente con mezcla sólido-líquido para ser colocado en una base horizontal hasta que logre el reposo, en ese instante registrar el volumen de precipitación escurrido sobre la superficie del talud.

- j)** Extraer un testigo homogéneo de la mezcla no inferior a  $250\text{cm}^3$ .
  
- k)** Retirar el material contenido en la canaleta y colocarlo en un envase de transporte para ser llevado a laboratorio en donde será depositado en un recipiente previamente pesado e identificado el cual será secado en horno hasta lograr una masa constante.
  
- l)** Extraer una submuestra homogénea de la mezcla sólido-líquido de 50ml con jeringa y depositarlo en un recipiente previamente pesado e identificado el cual será secado en horno hasta alcanzar una masa constante.

---

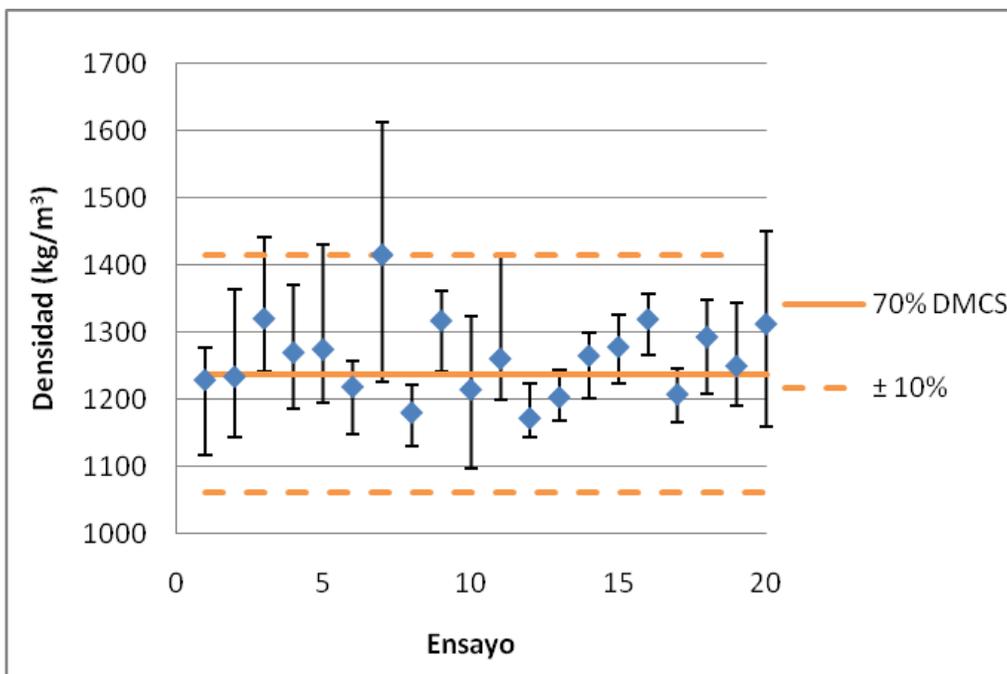
## CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen y discuten las observaciones acerca de la erodabilidad de un suelo tipo arena limosa, hechas a partir de una serie de ensayos realizados en función de la pendiente del suelo, intensidad y duración de precipitación. Dichos ensayos fueron realizados sobre los lisímetros diseñados por Riquelme 2010, a excepción de las mediciones 7 y 8 las cuales por motivo de agilización del estudio se realizaron en los lisímetros elaborados por Rivas 2011.

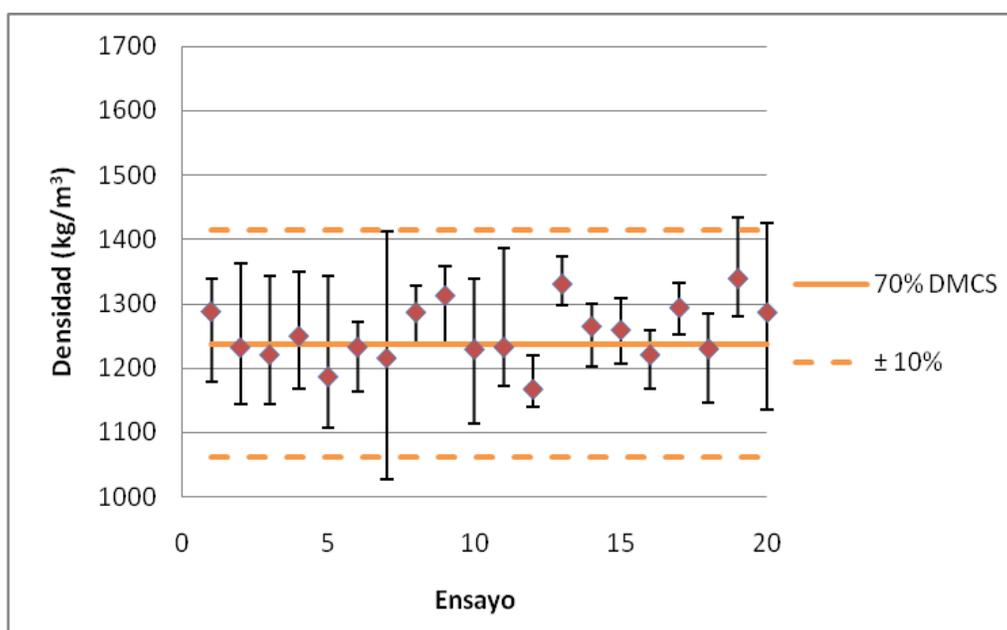
### 5.1.- Validación del nivel de compactación

Una de las variables a controlar es el nivel de compactación generado en los diferentes taludes ensayados. Para ello se dispuso de un rango de validez de del ensayo fijado en un  $70\% \pm 10$  de la D.M.C.S. De esta forma se permite limitar las distorsiones que pudiese generar este parámetro en las variables de estudio.

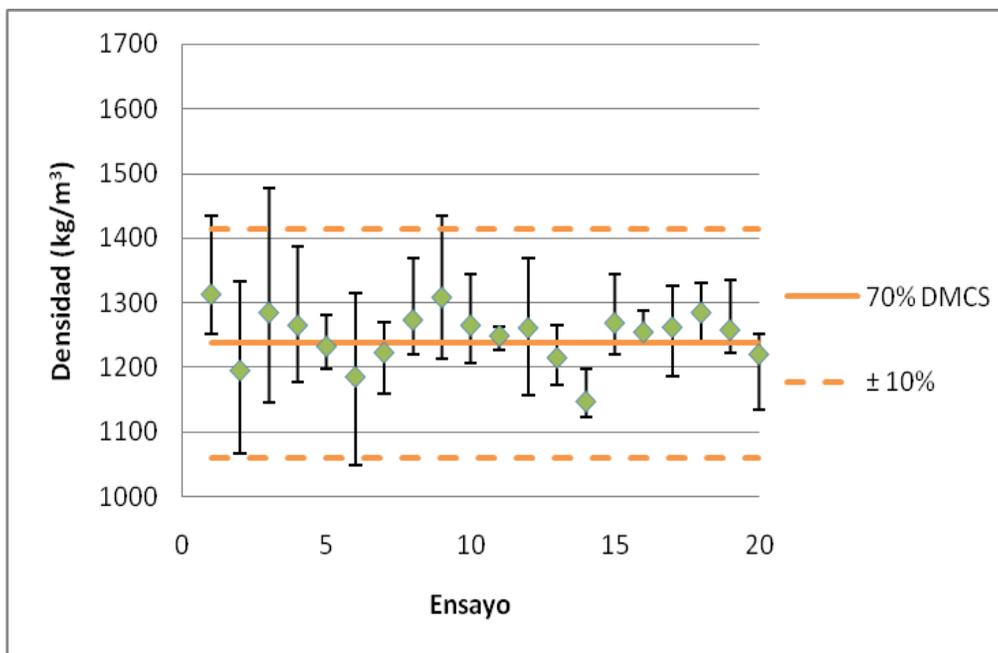
En las figuras 25, 26 y 27 se exponen los valores máximos, mínimos y promedios de densidad compactada seca registrados en cada uno de los 20 ensayos efectuados en los tres taludes en estudio. Dicha densidad promedio es el producto de la medición registrada por medio del extractor de testigos no invasivo en cuatro puntos representativos de la superficie de los lisímetros.



**Figura 25:** Densidad media, máxima y mínima registrada en las probetas de cada ensayo en talud de 60% . (Fuente: Elaboración propia).



**Figura 26:** Densidad media, máxima y mínima registrada en las probetas de cada ensayo en talud de 25% . (Fuente: Elaboración propia).



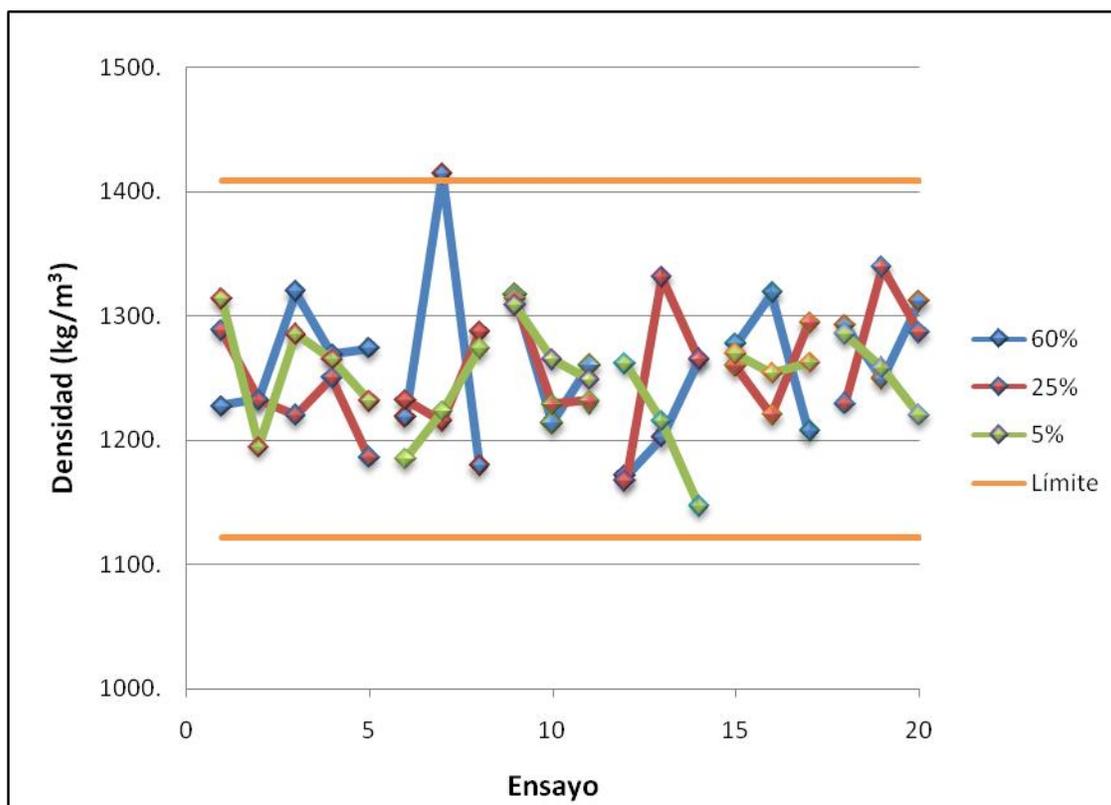
**Figura 27:** Densidad media, máxima y mínima registrada en las probetas de cada ensayo en talud de 5% . (Fuente: Elaboración propia).

Cabe señalar que el séptimo ensayo, es el que presenta la mayor diferencia entre el valor mínimo y máximo tanto para los registros del talud de pendiente 60 como del 25%. Esto se debe a que dichos ensayos fueron realizados en los lisímetros experimentales empleados por Rivas (2011), los cuales presentaron un nivel de compactación bastante elevado, generándose incluso complicaciones en la extracción de los testigos de densidad.

El valor promedio de la totalidad de las mediciones de densidad compactada seca para los taludes de pendiente 60, 25 y 5% alcanzan mediciones de 1261, 1254 y 1248,  $\text{kg/m}^3$  respectivamente, con lo que permite asegurar que en potenciales oscilaciones de las variables de estudio el nivel de compactación imprimido a los lisímetros no posee un nivel de importancia significativo.

Por otra parte la desviación de los datos considerando el orden anterior es de 58, 46 y 41 Kg/m<sup>3</sup>, lo cual indica que los registros se encuentran bastante agrupados; pero además indica que debido al incremento de la pendiente aumenta el nivel de dificultad para mantener este parámetro a una tendencia constante.

Los resultados obtenidos de la prueba de datos dudosos se presenta en la figura 28.



**Figura 28:** Representación gráfica del Test de datos dudosos aplicados sobre la densidad registrada en lisímetros. (Fuente: Elaboración propia).

---

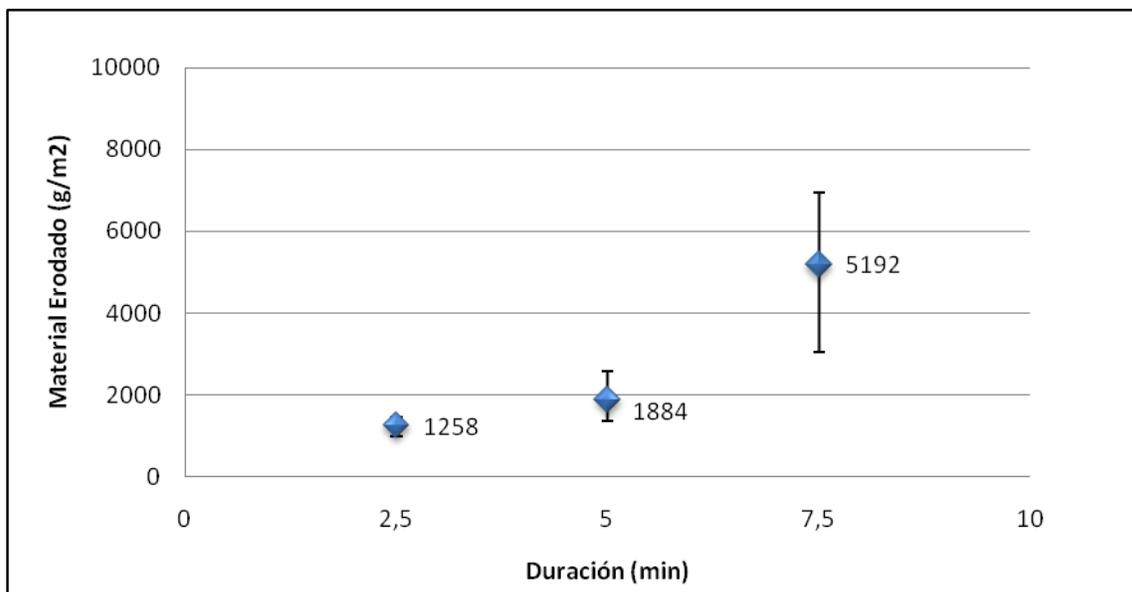
Es posible identificar que la mayor parte de los datos cumple con holgura y satisfacción el criterio impuesto. Sin embargo, la medición registrada en el séptimo ensayo es la única que ligeramente supera dicho límite. El incumplimiento de esta condición no implica necesariamente la eliminación de la medición, sino más bien un especial cuidado en el impacto que este valor podría generar en las variables de estudio.

## **5.2.- Resultados y análisis de los escenarios de estudio**

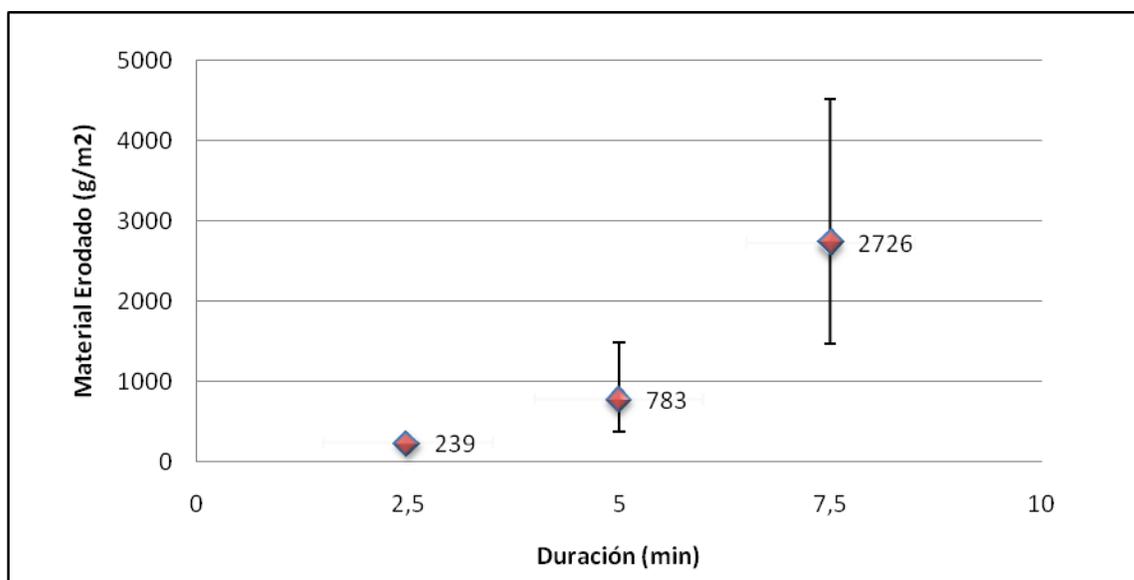
Como bien se señaló en el capítulo anterior, sección 4.4, existen seis casos de estudio (con tres repeticiones) que permiten analizar tres escenarios de interés enfocados a la caracterización de la influencia de la precipitación y la pendiente en la generación de sedimentos producto de la erosión hídrica. Dichos escenarios serán analizados en las secciones siguientes considerando el material erodado por unidad de superficie inclinada.

### **5.2.1.- Intensidad de precipitación constante con duración variable**

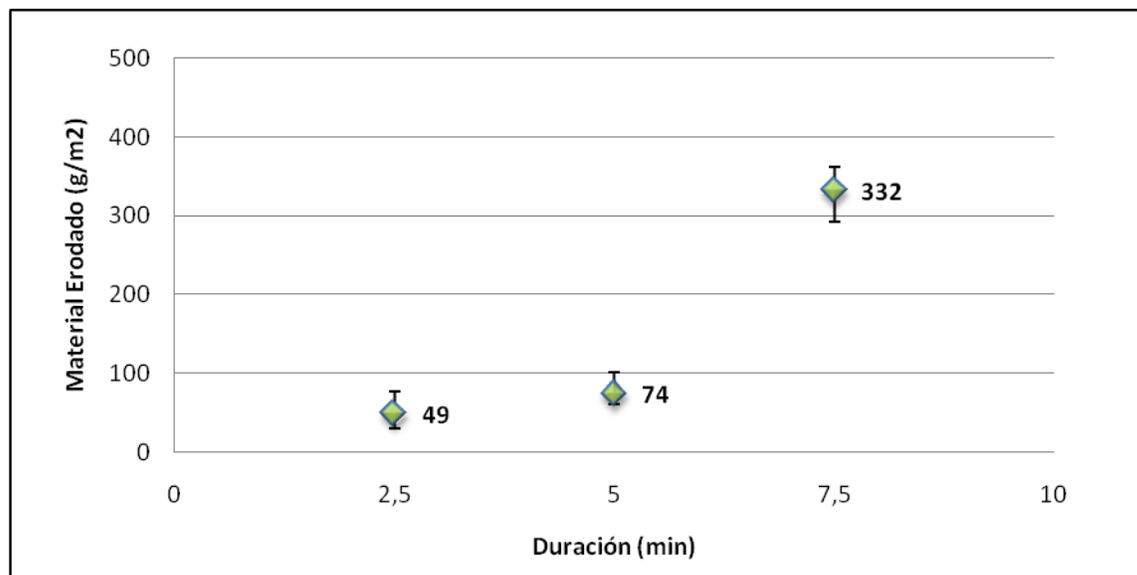
De acuerdo con la tabla 3 del capítulo anterior, para una presión de funcionamiento del sistema de 0,5 bar se genera un intensidad de precipitación efectiva de 334 mm/hr, la cual se considera constante en el tiempo, se realizan tres mediciones del material erodado con ensayos independientes asumiendo una constante de paso de 2,5 minutos. Esta situación se presenta en las figuras 29 a 31 para las tres pendientes en estudio. Corresponde a los casos 1, 2 y 3, de la figura 24.



**Figura 29:** Media, máximo y mínimo de material erodado por unidad de superficie inclinada en pendiente de 60% (Fuente: Elaboración propia).



**Figura 30:** Media, máximo y mínimo de material erodado por unidad de superficie inclinada en pendiente de 25% (Fuente: Elaboración propia).



**Figura 31:** Media, máximo y mínimo de material erodado por unidad de superficie inclinada en pendiente de 5% (Fuente: Elaboración propia).

Como era de esperar, a mayor pendiente se genera una mayor cantidad de material erodado. Esto se debe principalmente a las altas velocidades que se generan sobre la superficie provocando el arrastre de partículas de suelo de mayor tamaño y generando en las mediciones de cinco y más minutos algún tipo de surquillo en las pendientes mediana y elevada.

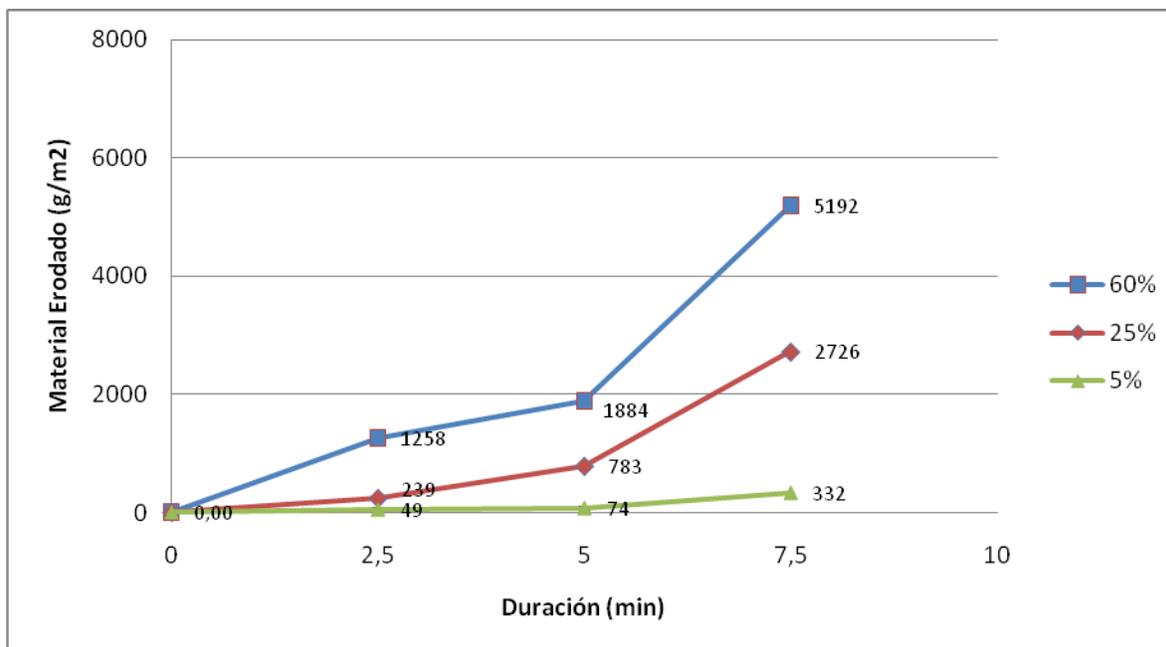
Es posible dilucidar que la variabilidad en las mediciones se incrementa con la duración de la prueba, es decir, aumenta la incertidumbre. Esto se debe principalmente a la heterogeneidad de la respuesta de la superficie del talud ante los efectos de erosión hídrica.

Por otra parte, la tasa de erosión se incrementa fuertemente a partir de los 5 minutos de ensayo. Esto se debe principalmente a que, transcurrido ese tiempo de ensayo, se hace más notorio cómo la capa superficial comienza a

---

desgastarse perdiendo gran parte del contenido de partículas finas, además de la selladura generada por la compactación inicial, lo cual modifica la textura de la superficie produciendo arrastre de partículas de mayor tamaño y generando conductos de evacuación acelerada como lo son los surquillos. Esta observación es válida para los taludes de 60% y con un efecto notoriamente desfasado para el talud de 25%. No obstante la justificación del aumento registrado en el talud del 5% a partir de los 5 minutos de ensayo se debe principalmente al tiempo de transporte de las partículas hacia el borde de medición, ya que se apreció constantemente un encharcamiento en dicho talud además de una baja velocidad de escurrimiento, lo cual justifica en gran medida el valor del cantidad de material erodado registrado en este talud.

En la figura 32 se aprecia claramente el efecto que genera la pendiente sobre la cantidad de material erodado por unidad de superficie inclinada, manteniendo para la totalidad de las pendientes involucradas una tendencia similar. Dicha tendencia muestra como aumenta la erosión debido a la duración de la precipitación, especialmente al superar los 5 minutos. Pero cabe señalar que aún cuando la tendencia a la erosión es similar, el comportamiento detectado difiere sustancialmente entre taludes.



**Figura 32:** Material desprendido promedio producto de la variación de pendiente en lisímetros. (Fuente: Elaboración propia).

Si se analiza la evolución de la curva del talud de pendiente 60% se observa que para los 2,5 minutos de medición se genera un valor de material erodado significativo que alcanza los  $1258 \text{ g/m}^2$ . Esta cantidad es producida por las partículas de suelo sueltas en la superficie, además de la gran cantidad de suelo fino de fácil transporte. En los 2,5 minutos siguientes el talud se encuentra despojado de gran parte del material de rápida erodabilidad generando una etapa de transición de textura de la superficie terminando con la erosión laminar y avanzando hacia la erosión por surquillos. Durante el tiempo restante se alcanza un alto valor de material erodado de  $3308 \text{ g/m}^2$ . Esto se debe a que el flujo se concentra en algunas zonas hasta adquirir volúmenes y velocidades suficientes para hacer cortes, arrastrar partículas de mayor tamaño y formar incluso surquillos sobre la superficie.

---

En el caso del talud de 25% de pendiente, es evidente que el efecto erosivo se genera con un retardo importante, esto es, para alcanzar el mismo nivel de erosión que el talud de 60% a los 2,5 minutos de ensayo se requiere un tiempo de 5,6 minutos. En términos generales para dicho talud no es posible apreciar algún tipo de suquillos durante el tiempo experimentado, pero sí un indudable cambio en la textura de la capa superficial de suelo.

En lo que respecta al talud de pendiente 5% son varios los factores que determinan su baja erosividad, evidentemente el principal y la raíz de ello es su bajo nivel de inclinación que ocasiona una disminuida velocidad de escurrimiento superficial aportando al borde de medición con partículas muy finas en el inicio y partículas diezmadas de mayor tamaño al finalizar el ensayo. Debido a la poca pendiente se alcanza un alto nivel de infiltración duplicando el valor de la pendiente fuerte, lo que disminuye la cantidad de escorrentía. Otro efecto es la pronta superación de la tasa de infiltración lo que genera un encharcamiento en la superficie que funciona como amortiguador del impacto de las gotas de lluvia, disminuyendo de esta manera la disgregación de las partículas de suelo.

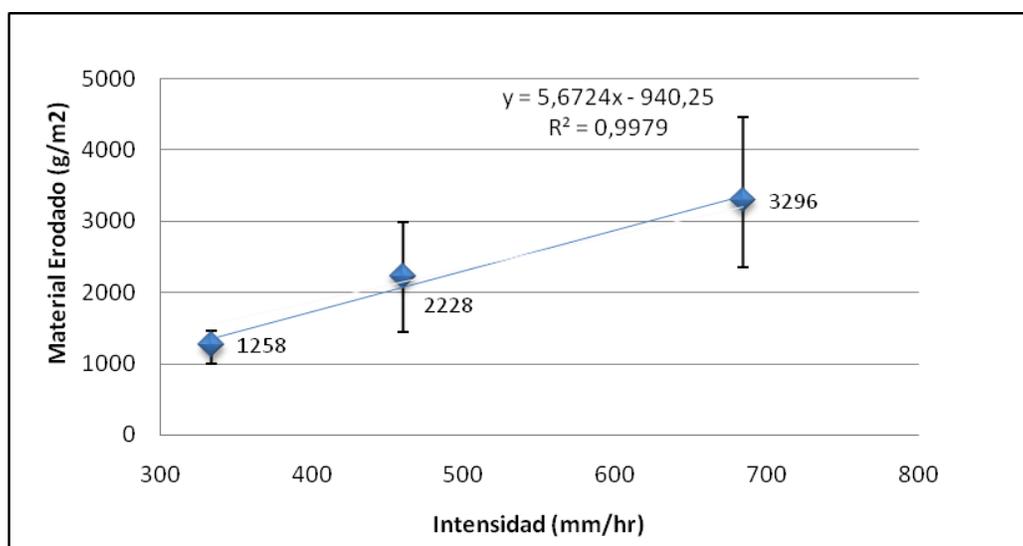
Por otra parte, las variaciones de la tasa de erosión promedio por ensayo se ven reflejada de una mejor forma en la tabla 5, donde demuestra que para las pendientes del 60 y 5% se genera una disminución a los 5 minutos con respecto a la medición de 2,5 minutos, además para la duración de 7,5 minutos la pendiente del 60% registra un aumento tal que supera la medición de 5 minutos en un factor de 1,8 veces, por otra parte la pendiente del 5% es más explosivo aún superando dicha medición con un factor cercano a 3.

**Tabla 5:** Tasa de erosión instantánea promedio a distintos niveles de intensidad de precipitación. (Fuente: Elaboración propia)

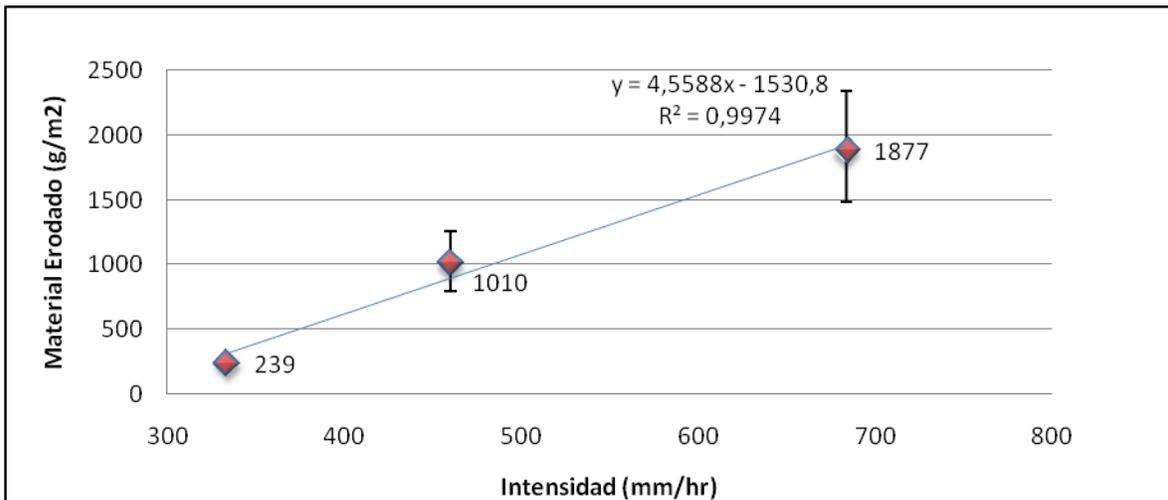
TASA DE EROSIÓN PROMEDIO ((g/m <sup>2</sup> )/min)			
TIEMPO (min)	PENDIENTE DEL TALUD		
	60%	25%	5%
2,5	503	96	20
5	377	157	15
7,5	693	363	44

**5.2.2.- Intensidad de precipitación variable con duración constante.**

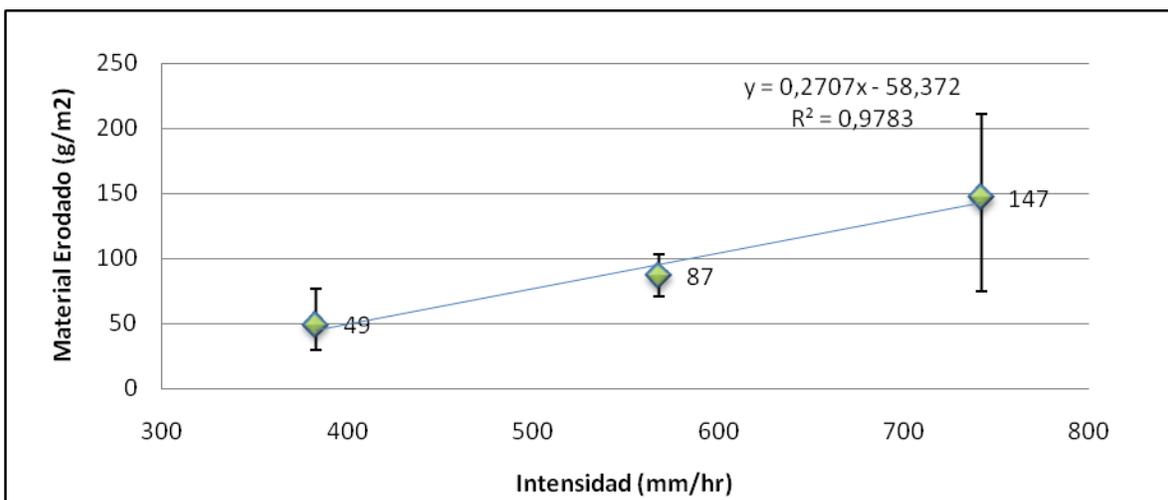
En esta sección se analizó la respuesta que genera en los distintos taludes los cambios en la intensidad de precipitación. Esto se llevó a cabo mediante la realización de tres mediciones del material erodado con ensayos independientes bajo intensidades de precipitación efectiva de 334, 460 y 684 mm/hr en un tiempo constante de 2,5 minutos. Esta situación se presenta en las figuras 33 a 35, correspondiente a los casos 1, 4 y 6 de la figura 24.



**Figura 33:** Relación del material desprendido producto de la variación de intensidad de precipitación en pendiente de 60%.(Fuente: Elaboración propia).



**Figura 34:** Relación del material desprendido producto de la variación de intensidad de precipitación en pendiente de 25% (Fuente: Elaboración propia).



**Figura 35:** Relación del material desprendido producto de la variación de intensidad de precipitación en pendiente de 5% (Fuente: Elaboración propia).

Como se ha mencionado anteriormente la pendiente tiene un papel fundamental en la cantidad de material erosionado. Esto queda ratificado en las figuras anteriores donde para la máxima intensidad de precipitación del

---

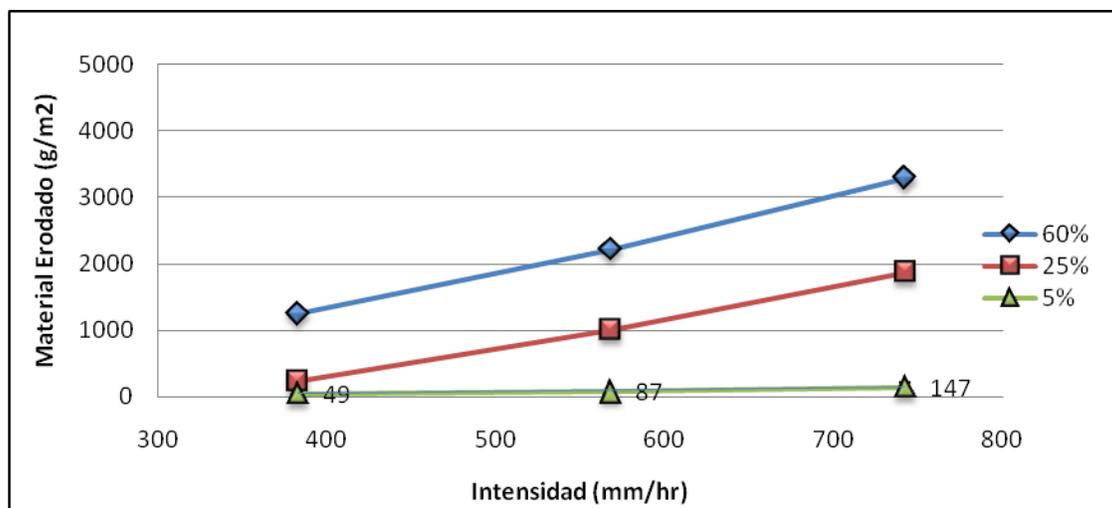
talud de 25% de pendiente no es suficiente para alcanzar el valor de erosión del talud de 60% en su mínima intensidad.

En lo que respecta a la variabilidad de los registros, éstos se incrementan en la medida que el valor de erosión aumenta, lo cual infiere que ciertos parámetros presentan un comportamiento oscilatorio o del tipo aleatorio, acrecentando con esto la incertidumbre sobre la potencial predicción de erosión de un talud de tamaño real.

En términos generales el aumento de la intensidad de precipitación en cualquiera de los taludes lleva paralelamente consigo un incremento de la cantidad de material erodado. Esto debido principalmente al cambio producido en la frecuencia de golpeteo de la gota de lluvia y a su vez la variación en el volumen de escorrentía superficial que se refleja en un poder erosivo superior de arrastre de sólidos.

Por otra parte al extender las tendencias lineales de las figuras 33 a 35 se visualiza la existencia de un umbral donde el valor de erosión dentro de ese rango tiende a cero. La pendiente de 60% demuestra un rango de humbral menor, sin embargo el resto de las pendientes no presenta claridad debido principalmente a que el estudio se realizó bajo altos rangos de intensidad lo que limita la validez del resultado a un rango tentativo de investigación del comportamiento producido en bajas intensidades.

El resumen del comportamiento de las tres pendientes queda registrado en la figura 36 considerando la relación del material erodado por unidad de superficie con respecto a la presión del sistema de lluvia artificial equivalente a distintos valores de intensidad de precipitación.



**Figura 36:** Relación del material desprendido producto de la variación de intensidad de precipitación (Fuente: Elaboración propia).

Se aprecia visiblemente el efecto que genera las variaciones de intensidad sobre la cantidad de material erodado por unidad de superficie inclinada, conservando para la totalidad de las pendientes involucradas una tendencia lineal similar, la que conlleva a un aumento de la erosión debido al incremento de la intensidad de la precipitación. Sin embargo, aún cuando la tendencia a la erosión es similar, el comportamiento detectado difiere sustancialmente debido principalmente al desfase en la pérdida de suelo. En otras palabras, si se considera la intensidad máxima de registro, el talud de baja pendiente sólo erosiona una mezcla de partículas gruesas cercanas al borde de medición y partículas muy finas de la superficie total. Por otra parte el talud de mediana

pendiente aporta partículas de tamaño significativo y modifica fuertemente su textura superficial. Sin embargo sólo alcanza a registrar un 57% del total del material erodado por el talud de pendiente fuerte, el cual a ese tiempo ya ha alcanzado un nivel de erosión superior visualizándose incluso formación de surquillos.

Por otra parte, las variaciones de la tasa de erosión promedio por ensayo se ven reflejada de una mejor forma en la tabla 6.

**Tabla 6:** Variaciones de la tasa de erosión promedio por pendiente.  
(Fuente: Elaboración propia)

TASA DE EROSIÓN PROMEDIO ((g/m <sup>2</sup> )/min)			
INTENSIDAD (mm/hr)	PENDIENTE DEL TALUD		
	60%	25%	5%
334	503	96	20
460	891	404	35
684	1318	751	59

De la tabla 6 se extrae que la relación entre la intensidad mínima y media posee un factor de 1,38. Esta relación no es reflejada de igual forma en las tasas de erosión de las pendientes de 60, 25 y 5% en las cuales se observan factores de 1,77; 4,21 y 1,75 respectivamente con respecto a la tasa de erosión generada por la intensidad mínima. De igual forma la relación entre la intensidad mínima y máxima posee un factor de dos, mientras que las pendientes en orden descendente incrementan su tasa de erosión en un factor de 2,6; 7,8 y 2,9. De esta forma se refleja el factor de erosión registrado en la totalidad de los taludes supera al factor de variación de intensidad, además de clarificar que el talud más sensible a dichas variaciones es el de pendiente media.

### 5.2.3.- Influencia del volumen precipitado.

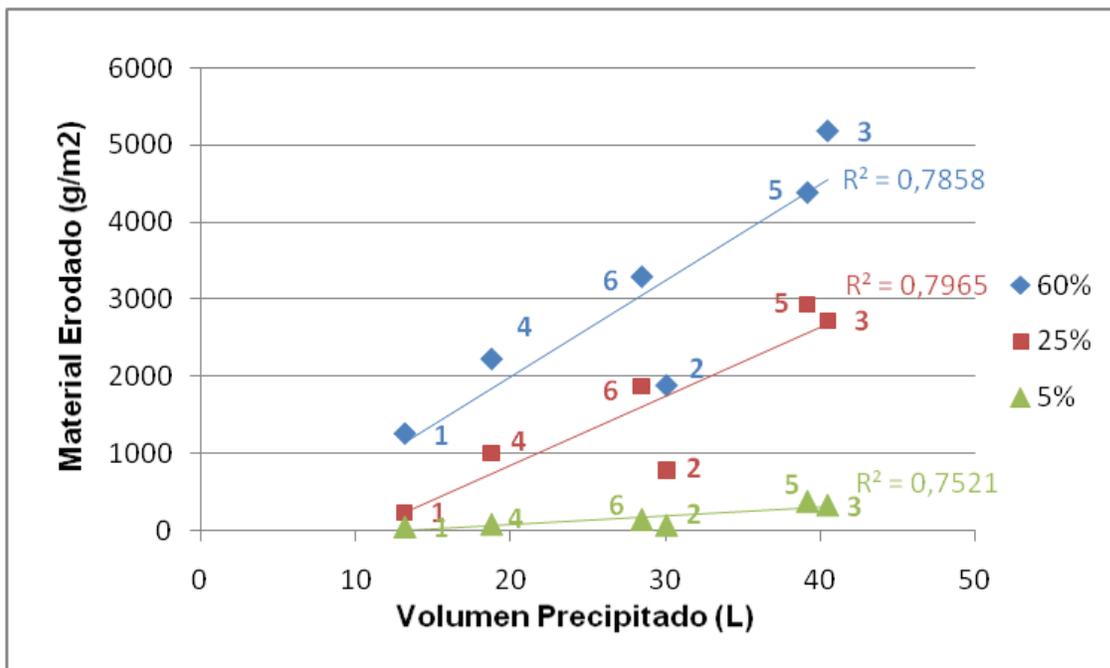
En esta sección será analizado el efecto generado por la aplicación de volúmenes de precipitación constante (Casos 2-6 y 3-5 con variaciones relativas inferior al 6%) y variables (Casos 1-4) sobre el valor de material erosionado.

Los valores de intensidad de precipitación efectiva, duración del ensayo, volumen precipitado efectivo y la cantidad promedio de material erosionado en cada uno de los casos y pendientes en estudio son presentadas en la tabla 7.

**Tabla 7:** Parámetros de los casos analizados (Fuente: Elaboración propia)

Caso Nº	Intensidad (mm/hr)	Duración (min)	Vol. Precipitado (L)	Erosión por pendiente (g/m <sup>2</sup> )		
				60%	25%	5%
1	334	2,5	13,2	1258	239	49
2	334	5	30,1	1884	783	74
3	334	7,5	40,5	5192	2726	332
4	460	2,5	18,8	2228	1010	87
5	460	5	39,2	4392	2931	380
6	684	2,5	28,5	3296	1877	147

Los datos expuestos anteriormente se presentan gráficamente en la figura 37 exponiendo adicionalmente el coeficiente de determinación múltiple ( $R^2$ ) que indicará el grado de relación lineal existente entre las variables.



**Figura 37:** Relación del material desprendido debido al volumen precipitado (Fuente: Elaboración propia).

Para los caso 2 y 6 que corresponden a intensidad mínima y máxima, se observa la importancia que presenta intensidad de lluvia sobre el valor registrado de material erosionado. Las tres pendientes presentan una tendencia similar, que está asociado al incremento de la cantidad de material erosionado producto de la aplicación de un mismo volumen de precipitación en una menor cantidad de tiempo, en otras palabras una mayor intensidad, la cual como antes ya se ha mencionado, genera un importante aumento en la frecuencia de impacto de la gotas, velocidad y volumen de escorrentía superficial lo que incrementa el nivel erosivo de las precipitaciones.

El factor de intensidad existente entre el caso N°6 y 2 es de 2, mientras que los factores apreciables en relación al material erosionado en orden

---

decreciente de pendiente arrojar valores de 1,7; 2,4 y 2, evidenciándose que la más sensible a las variaciones de intensidad es la pendiente del 25%.

Los casos 3 y 5, que corresponden a intensidades mínima y media, el factor de intensidad existente es de 1,4, mientras que los factores apreciables en relación al material erosionado en orden decreciente de pendiente arrojar valores de 0,8; 1,1 y 1,1.

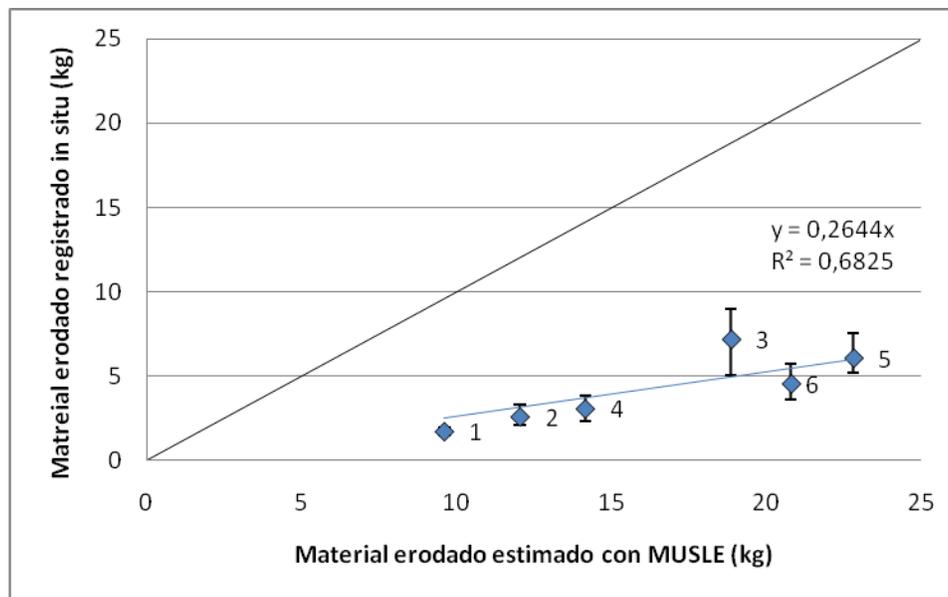
A diferencia de los casos 2-6, la pendiente del 60% presenta un decremento sobre el valor erodado al precipitar un mismo volumen en menor tiempo, lo que se contrasta con la tendencia registrada por la totalidad de los casos evaluados con las restantes pendientes. Sin embargo, se debe recordar que se trabajó con valores promedio sobre un total de tres mediciones en donde la validez representativa del promedio es altamente dependiente de la variabilidad de los registros.

Por otra parte al extender las tendencias lineales de la figura 37 se visualiza la existencia de un humbral donde el valor de erosión dentro de ese rango tiende a cero. Dicho rangos se comportan inversamente al aumento de la pendiente e infieren un valor central de 4, 10, y 12 L/m<sup>2</sup>.

### **5.3.- Comparación entre erosión medida y la estimada con MUSLE.**

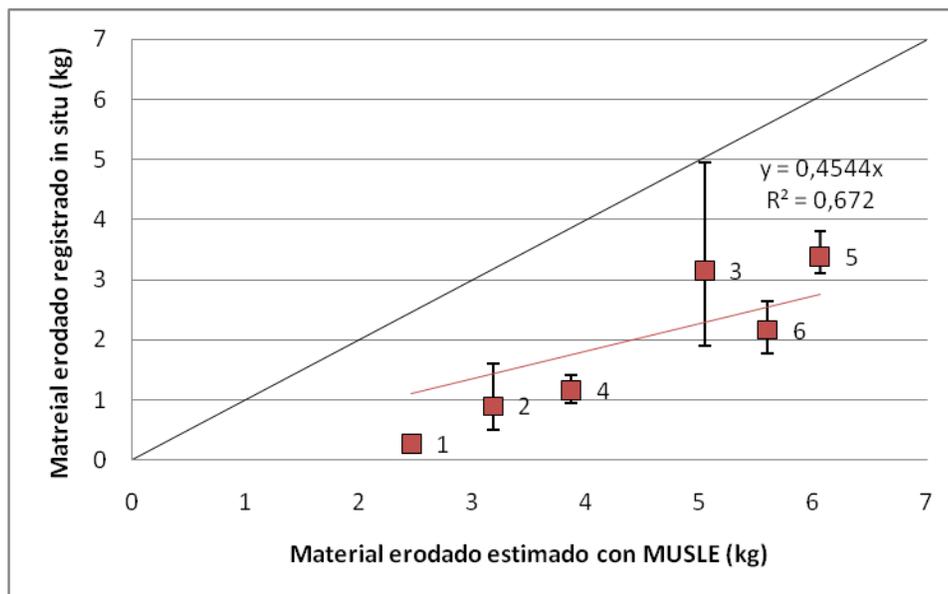
Se analizó el nivel de similitud existente entre la cantidad de material erodado medida in-situ y los valores entregados por la ecuación de pérdida de suelo modificada (MUSLE) conforme a lo descrito en la sección 2.5.1.5. Dicho análisis fue segmentado de acuerdo a la pendiente estudiada.

Los resultados promedios por casos ensayos obtenidos tanto para el método de medición directa e indirecta son resumidos gráficamente en las figuras 38 a 40. Donde se comparan las pérdidas de suelo medidas en los lisímetros con las estimaciones de la ecuación MUSLE.



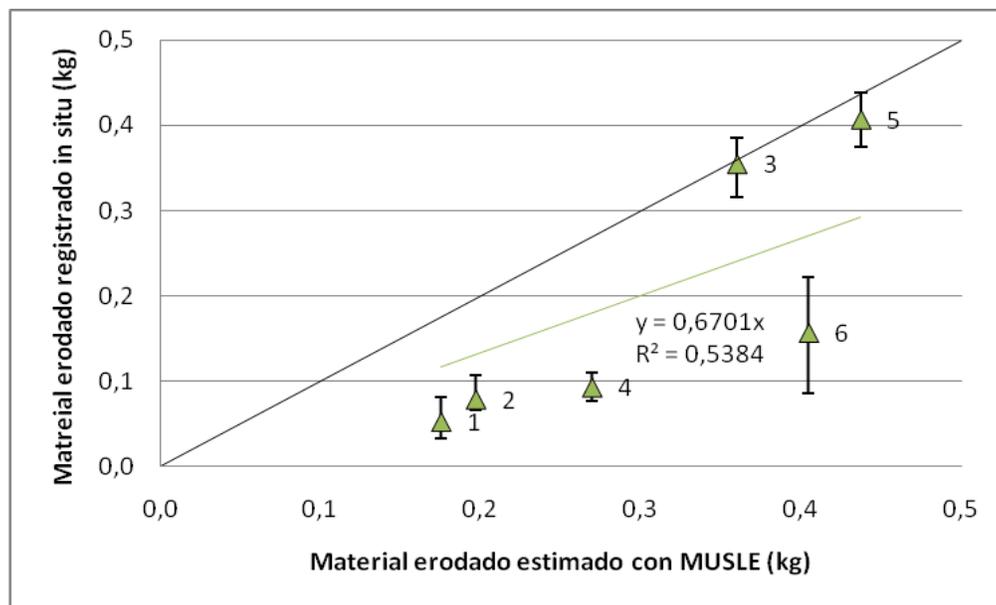
**Figura 38:** Relación del material total erosionado registrado in situ versus estimado con MUSLE para pendiente 60% (Fuente: Elaboración propia).

Para la pendiente del 60% se trazó una tendencia lineal (considerando el origen) entre los casos de estudio. Se observa, en promedio que el modelo MUSLE sobreestima la cantidad las pérdidas de suelo en un 73% para un grado de relación lineal del 70%. Se ocasiona un amplio nivel de holgura entre el valor de erosión medido y el proyectado, alcanzando un error relativo promedio de 75,3%. Sin embargo este error posee variaciones significativas registrando un máximo de 81,8% en el Caso N°1 y un mínimo valor de 61,8% en el Caso de estudio N°3.



**Figura 39:** Relación del material total erosionado registrado in situ versus estimado con MUSLE para pendiente 25%. (Fuente: Elaboración propia).

Por otra parte, La pendiente media presenta una sobreestimación promedio de material erosionado cercana al 55%. Dicha sobreestimación posee un simil con respecto al talud de 60% referido a los máximos y mínimos errores relativos registrados en los mismos Casos N°1 y 3 con valores de 88,8 y 37,6% repectivamente.



**Figura 40:** Relación del material total erosionado registrado in situ versus estimado con MUSLE para pendiente 5%. (Fuente: Elaboración propia).

La pendiente del 5% disminuye notoriamente la brecha presentada en las mediciones de los taludes de mediana y fuerte pendiente respecto a la proyección hecha por MUSLE. Esto se ratifica al valorar el error relativo, el cual entrega valores máximos y mínimos para los Casos N°1 y 3 de 70 y 1,3%.

De la tendencia lineal fijada en el origen se observa la existencia de una menor pero no menos significativa sobreestimación por parte del modelo MUSLE de la cantidad las pérdidas de suelo alcanzando un valor de 33% para un grado de relación lineal del 54%.

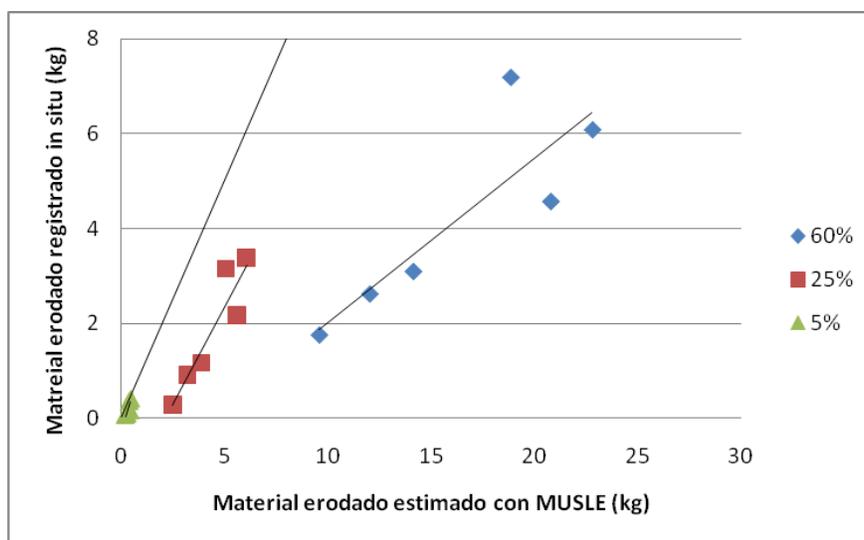
La Tabla 8 deja en claro que se obtiene un mejor ajuste entre las curvas cuando el tiempo de medición es mayor. Esto queda demostrado mediante el seguimiento al error relativo de los Casos 1-2-3 y 4-5, donde la intensidad de

precipitación es constante y únicamente varía la duración del ensayo. La observación es válida para la totalidad de las pendientes analizadas.

**Tabla 8:** Material erosionado sólido seco medido y proyectado.  
(Fuente: Elaboración propia)

Caso Nº	Tiempo (Min)	Intensidad (mm/hr)	Sólidos Medidos(Kg)			Sólidos Proyectados(Kg)			Error Relativo		
			60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%
1	2,5	334	1,7	0,3	0,1	9,6	2,5	0,2	81,8	88,8	69,8
2	5	334	2,6	0,9	0,1	12,0	3,2	0,2	78,3	71,5	59,7
3	7,5	334	7,2	3,1	0,4	18,9	5,0	0,4	61,8	37,6	1,3
4	2,5	460	3,1	1,2	0,1	14,1	3,9	0,3	78,2	69,8	65,4
5	5	460	6,1	3,4	0,4	22,8	6,1	0,4	73,3	44,1	6,8
6	2,5	684	4,6	2,2	0,2	20,8	5,6	0,4	78,0	61,3	61,1

En la medida que el valor de la pendiente disminuye la holgura existente entre el material medido y el proyectado lo hacen también, pasando de un valor de error relativo promedio máximo de 75,3 % en el talud de pendiente fuerte a 44% en pendiente suave (figura 41).



**Figura 41:** Relación del material total erosionado registrado in situ versus estimado con MUSLE (Fuente: Elaboración propia).

---

## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El experimento basado en la implementación de un sistema de lluvia artificial y lisímetros permitió desarrollar un análisis cualitativo y cuantitativo sobre los efectos producidos por las variaciones de pendiente y precipitación en la estimación de la pérdida de suelo del tipo arena limosa habitual en la región del Biobío.

Se verificó el efecto de la pendiente en la producción de sedimentos registrándose para la pendiente fuerte factores de tres y 22 veces sobre las pendientes media y suave.

Se ratifica que ante el incremento de la intensidad de lluvia aumenta la cantidad de material erodado conservándose una tendencia lineal similar entre las pendientes. Sin embargo la respuesta superficial del suelo difiere sustancialmente.

Para variaciones de intensidad con duración de precipitación constante se observa que el factor de amplificación de intensidad no es directamente proporcional a la tasa de erosión, superando al factor de variación para la totalidad de las pendientes, con mayor sensibilidad en el talud de pendiente media.

El análisis conjunto de la intensidad y volumen de precipitación suponen la existencia de un umbral donde el valor de erosión tiende a cero. Dichos rangos infieren un valor central de 4, 10, y 12 L/m<sup>2</sup> de acuerdo a un orden decreciente

---

de pendiente. El estudio se realizó para altos rangos de intensidad limitando la validez del resultado a un rango tentativo enfocado a la investigación del comportamiento producido en bajas intensidades.

Respecto a la variabilidad de los registros, éstos se incrementan en conjunto con el valor de erosión y duración del ensayo, lo cual infiere que ciertos parámetros presentan un comportamiento oscilatorio, acrecentando la incertidumbre sobre la potencial predicción de erosión de un talud de tamaño real.

Las predicciones de pérdida de suelo realizadas con el modelo MUSLE sobreestimaron altamente la totalidad de las mediciones de erosión en lisímetros. A medida que el valor de la pendiente disminuye, la holgura entre el material medido y el proyectado lo hacen también, pasando de un valor de sobrestimación de 73 % en el talud de pendiente fuerte a 33% en pendiente suave.

Se podría inferir que el nivel de sobreestimación está relacionado principalmente a dos factores: al factor topográfico LS y la duración de la experiencia. Debido a que existe un mejor ajuste entre curvas cuando el tiempo de medición es mayor.

Debido a que el simulador de lluvia diseñado tiene por finalidad proporcionar condiciones de precipitaciones comunes a los lisímetros y no reproducir una tormenta real. Se recomienda realizar una investigación acuciosa y acotada al diseño y materialización de un sistema de lluvia artificial capaz de simular las precipitaciones reales de la Región del Biobío, con intensidades que no superen los 25 años de periodo de retorno.

En cuanto a los lisímetros empleados se recomienda realizar un cambio en la estructuración y materialidad, con la finalidad de extender la vida útil de los elementos siendo capaces de resistir varios estudios sin sufrir deformaciones significativas para la medición de variables.

Generar estudios sobre tipos y formas de protección vegetal que logren minimizar las tasas de erosión en búsqueda de una solución eficiente, técnica y económicamente viable para controlar los efectos generados por el proceso de erosión hídrica.

Finalmente, se recomienda realizar ensayos adicionales que permitan descubrir los umbrales erosivos además de estimar, comparar y predecir las tasas de pérdida de sedimentos para suelos comunes de la región.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Agassi M., Bradford J. (1999). Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil and Tillage Research*. 49: 277-287.
- ❖ Aoki A., Sereno M. (1999). Modificaciones de un micro-simulador de lluvias. *Investigación agrícola, Chile*. 19:47-51.
- ❖ Aoki A., Sereno M. (2006). Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia XXIII*. (1):23-31
- ❖ Arnáez J., Lasanta T., Ruiz P., Ortigosa L. (2007). Factors effecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. *Soil & Tillage Research*. 16: 137-217.
- ❖ Asseline J. (1981). Construcción de un infiltrómetro a aspersión. *Ortom Abidjan*, 22 p. + 30 fig.
- ❖ Ayres Q. (1960). *La erosión del suelo y su control*. Barcelona, España. Ediciones Omega S.A.
- ❖ Bubenzer G. (1979). Rainfall characteristics important for simulation. In: *Proceedings of the rainfall simulator workshop*. Tucson, Arizona. Department of agriculture, science and education administration.
- ❖ CAZALAC (Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe, Chile). (2004). *Simulador de lluvia, construcción y especificaciones*. La Serena, Chile. (Nota técnica).
- ❖ Cerdá A., Ibañez S., Calvo A. (1997). Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology*. , 11: 163-170.
- ❖ Chow, Ven Te (1994). *“Hidrología aplicada”*. Mc Graw-Hill Interamericana Editores, Colombia.

- 
- ❖ Decagon Devices. Educación y tecnología en suelos. [En línea].  
< <http://www.decagon.com/> > [Consulta: 07 Noviembre 2010].
  - ❖ De Ploey J., Kirkby MJ., Ahnert F. (1991). Hillslope erosion by rainstorms, a magnitude-frequency analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*.
  - ❖ Derpsch R. (2004). Entender el proceso de la erosión y de la infiltración de agua en el suelo. [En línea]. <http://www.rolf-derpsch.com/erosion-es.html>. [Consulta: 08 Noviembre 2010].
  - ❖ Erosion.com.co. Sitio Web del Ingeniero Jaime Suárez. Página con imágenes sobre procesos erosivos. [En línea].  
< [www.erosion.com.co/index.php?option=com\\_docman&task](http://www.erosion.com.co/index.php?option=com_docman&task) >  
[Consulta: 05 Noviembre 2010].
  - ❖ Epema G., Riezebos H. (1983). Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. *Catena Supplement 4*. Braunschweig.
  - ❖ FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). (1997). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. [En línea].  
<<http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s00.htm#Contents>.>  
[Consulta: 22 Noviembre 2010].
  - ❖ García J. (1999). La erosión hídrica: Mecanismos y modelos. Curso: Evaluación y Control de erosión. España.
  - ❖ Gayoso J., Alarcón D. (1999). Guía de conservación de suelos forestales. Programa de producción forestal y medio ambiente. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
  - ❖ Hall M. (1970). Use of stain method in determining the drop-size distributions of coarse liquid sprays. 41, 33-37.

- 
- ❖ Honorato R. (2000). Manual de edafología. 4a. edición. Distrito Federal, México. Ediciones Universidad Católica de Chile. Alfaomega Grupo Editor S.A.
  - ❖ Honorato R., Barrales L., Peña I., Barrera F. (2001). Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX región de Chile. [En línea]. <<http://www.uc.cl/agronomia/rcia/Espanol/pdf/28-1/7-14.pdf>. > [Consulta: 14 Octubre 2010].
  - ❖ Hudson N. (1981). Soil Conservation. London, Bastford.
  - ❖ Hudson N. (1995). Soil Conservation. Iowa State University Press.
  - ❖ Hudson N. (1997). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Boletín de Suelos de la FAO – 68. Roma, Italia.
  - ❖ Ipm.iastate. Manejo Integrado de Plagas en la Universidad Estatal de Iowa. Página con imágenes sobre erosión por gota de lluvia sobre el suelo. [En línea]. < <http://www.ipm.iastate.edu/ipm/icm/2005/5-2005/reducespringerosion.html> > [Consulta: 21 Diciembre 2010].
  - ❖ Laws J. (1941). Measurements of fall-velocity of water-drops and raindrops. Transactions of the American Geophysical Union. 22: 709-721.
  - ❖ López F. (1998). Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. In Erosión en superficie: Modelos de evaluación. 2ª edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España.
  - ❖ Mancilla Gabriel (2008). “Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal”. Apuntes Docentes, Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile.
  - ❖ Manzo J. (2010). “Diseño de una experiencia para determinar la erodabilidad de un suelo”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

- 
- ❖ Martínez-Mena M., Abadía R., Castillo V., Albaladejo J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta.
  - ❖ Mendoza F. (2010). “Análisis de la erodabilidad de mezclas suelo-biosólido”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
  - ❖ Meyer L., Harmon W. (1979). Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row side slopes. 22: 100-103.
  - ❖ Mintegui J., López F. (1990). La ordenación agrohidrológica en la planificación. Departamento de Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco. Vitoria, España.
  - ❖ Morgan R., Rickson R. (1995), “Slope stabilization and erosion control. A bioengineering approach”, 1ª Edición, Publicado por E & F N Spon, United Kingdom, Capítulo 5.
  - ❖ Morgan R. (1997). Erosión y conservación del suelo. Segunda edición. Traducido del inglés por P. Urbano Terrón y J. de M. Urbano López de Meneses. Mundi-Prensa.
  - ❖ Morgan I. (2005). Sistema de información ambiental de la IX región de Chile: deforestación y erosión del suelo. [En línea]. <<http://www.ima.ufro.cl/siamb/p06011.html>> [Consulta: 21 Diciembre 2010].
  - ❖ Morin J., Goldberg D., Seginer I. (1967). A rainfall Simulator with a rotating disk. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers. 8 (1): 67-68.
  - ❖ Noticiasonline. Diario en línea de Puerto Rico. Página con imágenes sobre intensidad de precipitación. [En línea]. <<http://www.noticiasonline.com/D.ASP?ID=16679>> [Consulta: 15 Octubre 2010].

- 
- ❖ Park S., Mitchell J., Bunbenzer G. (1982). Splash erosion modeling: physical analysis. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.
  - ❖ Peralta M. (1976). Uso, clasificación y conservación de suelos. Santiago, Chile. Ministerio de Agricultura, SAG.
  - ❖ Pérez C., González J. (2001). Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Chillán, Chile. Instituto de investigaciones agropecuarias, centro regional de investigación Quilamapu. (Boletín INIA N° 15)
  - ❖ Pizarro R., Sangüesa C., Flores P., Martínez E. (2005). Elementos de ingeniería hidrológica para el mejoramiento de la productividad silvícola. Talca, Chile.
  - ❖ Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J., Collinet J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. Catena.
  - ❖ Renard K., Foster G., Weesies G., Cool D., Yonder D. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), United States Department of Agricultura, Agricultura Reasearch Service, Agriculture Handbook Number 703.
  - ❖ Riquelme C. (2010). “Diseño de lisímetros para estudiar la erosión hídrica en taludes a escala”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
  - ❖ Rivas R. (2011). “Efectos de la incorporación de biosólidos en la erosión de taludes desprotegidos”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
  - ❖ Rolf-derpsch. Sitio Web del doctor Rolf Derpsch. Página con imágenes sobre la erosión por cárcavas. [En línea].  
< <http://www.rolf-derpsch.com/> > [Consulta: 02 Noviembre 2010].

- 
- ❖ Sepúlveda Pablo (2006). “Erosión combinada en taludes de pendiente fuerte”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
  - ❖ Sempere D. (1994). La lluvia como agente erosivo: formación, distribución, erosividad e intercepción. Ingeniería hidráulica en México. Vol. IX.
  - ❖ Suárez F. (1980). Conservación de suelos. 3a. edición. San José, Costa Rica. Editorial IICA.
  - ❖ Urbanarbolismo. Empresa que trabaja en la integración de arquitectura y naturaleza. Página con imágenes sobre talud protegido con cobertura vegetal. [En línea]. < <http://www.urbanarbolismo.es/blog/?p=155> > [Consulta: 20 Enero 2011].
  - ❖ 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.
  - ❖ Wakefield Soil Erosión. Blog destinado a la difusión de la erosión de suelos. Página con imágenes sobre la erosión por surquillos. [En línea]. < <http://wakefieldsoil.blogspot.com/> > [Consulta: 17 Octubre 2010].
  - ❖ Wischmeier W., Smith D. (1958). Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions of the American Geophysical Union.
  - ❖ Wischmeier W., Smith D. (1978). Predicting rainfall erosion. United States Department of Agricultura, Agricultura Handbook n° 537.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

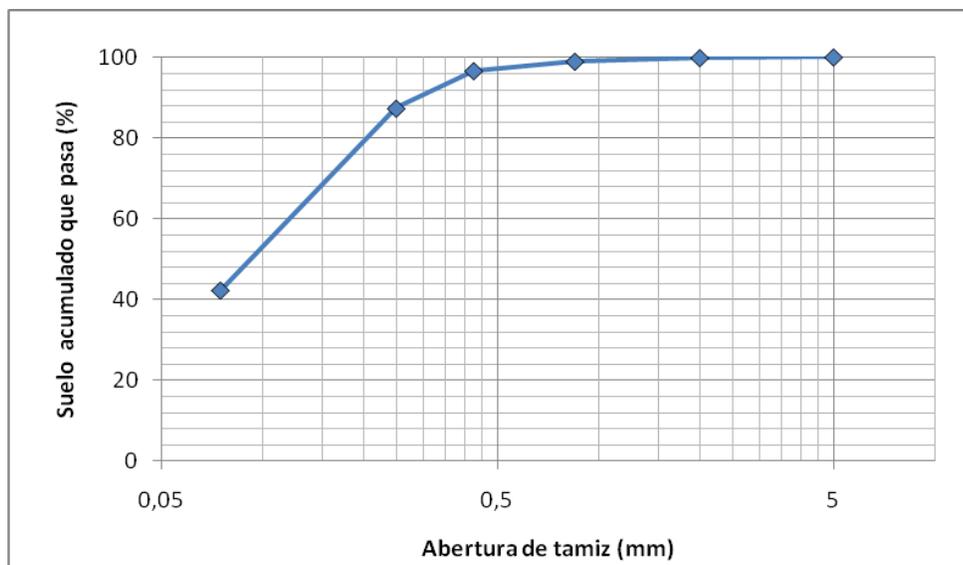
A continuación se muestra algunos parámetros del suelo estudiado (arena limosa).

### A.1.- Granulometría

Se realizó una granulometría siguiendo lo recomendado por la norma NCh 165 of. 77, los resultados obtenidos se exponen en la figura 42.

**Tabla 9:** Granulometría (Fuente: Manzo, 2010).

<b>Tamiz</b>	<b>Peso Ret. (g)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
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



**Figura 42:** Curva granulométrica suelo. (Fuente: Elaboración propia).

### A.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.2.1.- Límite líquido.

**Tabla 10:** Resumen ensayos para límite líquido (Fuente: Manzo, 2010).

	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

### A.2.2.- Límite plástico

**Tabla 11:** Resumen límite plástico (Fuente: Manzo, 2010).

Cápsula N°	13 A
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	18,52
Peso Cápsula + Suelo Seco	17,68
Peso Cápsula	14,96
Peso Agua	0,84
Peso Suelo Seco	2,72
% Humedad	30,88

### A.3.- Proctor modificado

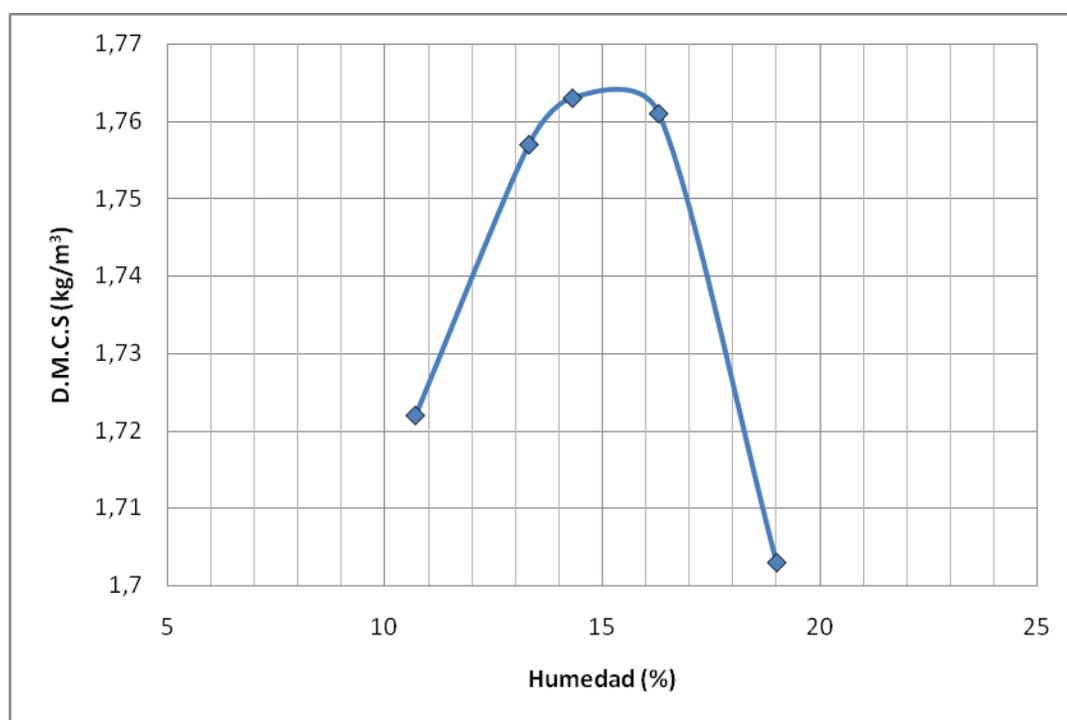
Se realizó un Proctor modificado según de la NCh 1534 of. 1979 (figura 43).

**Tabla 12:** Densidad de moldes según grado de humedad agregada.  
(Fuente: Manzo, 2010).

Fracción	Humedad Agregada (%)	Masa molde + Suelo húmedo (g)	Masa molde (g)	Masa suelo húmedo (g)	Volumen molde (cm <sup>3</sup> )	Densidad húmeda ρ <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
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 13:** Determinación de humedades (Fuente: Manzo, 2010).

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



**Figura 43:** Densidad máxima compactada seca según humedad óptima. (Fuente: Elaboración propia).

Según la figura 43 se obtiene que la máxima densidad que se puede alcanzar para el suelo analizado es de 1768 kg/m<sup>3</sup> con una humedad óptima de 15,2 %.

## ANEXO B

En este anexo se presentan los resultados obtenidos del estudio para cada uno de los ensayos, segmentando los registros de acuerdo con la observación de surquillos, cuantificación de la erosión, medición de parámetros y desarrollo MUSLE.

**Tabla 14:** observación de surquillos en talud de pendiente fuerte.  
(Fuente: Elaboración propia).

Ensayo Nº	Tiempo (min)	Presión (bar)	Profundidad de surquillos (cm)			
			1	2	3	4
1	5	0,5	2,0	1,7	1,9	2,3
2	5	0,5	1,4	1,6	1,9	2,2
3	5	0,5	1,5	1,3	1,8	1,6
4	5	0,5	0,7	0,4	0,6	0,7
5	5	0,5	0,7	1,0	1,4	1,3
6	7,5	0,5	1,3	1,0	1,4	1,2
7	7,5	0,5	0,5	0,7	0,6	0,4
8	7,5	0,5	1,8	2,2	2,3	1,4
9	5	0,7	0,8	0,7	0,6	1,6
10	5	0,7	1,6	1,4		
11	5	0,7	2,3			
12	2,5	1				
13	2,5	1	1,3	1,4	1,6	

**Tabla 15:** Resultados de la medición de erosión.

(Fuente: Elaboración propia).

Ensayo Nº	Tiempo (min)	Presión (bar)	CONCENTRACIÓN POR TALUD (Bidón (g))			LITROS DE ESCORRENTÍA (Bidón (L))			MATERIAL ERODADO EN BIDÓN (g)			MATERIAL ERODADO EN CANAL (g)			MATERIAL ERODADO TOTAL (g)		
			60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%
1	5	0,5	43,8	36,6	7,4	15,5	14,5	5,5	678,9	530,7	40,7	2905,1	1192,2	28,0	3584,0	1722,9	68,7
2	5	0,5	33,0	14,4	4,2	13,5	11,5	6,5	445,5	165,6	27,3	2067,2	272,9	38,2	2512,7	438,5	65,5
3	5	0,5	34,0	16,4	7,6	17,5	14,0	10,0	595,0	229,6	76,0	1920,4	632,7	32,6	2515,4	862,3	108,6
4	5	0,5	40,2	4,8	4,0	14,0	13,0	11,0	562,8	62,4	44,0	2004,0	589,1	24,1	2566,8	651,5	68,1
5	5	0,5	31,0	12,4	4,6	15,0	16,5	12,0	465,0	204,6	55,2	1413,4	642,7	29,8	1878,4	847,3	85,0
6	7,5	0,5	32,2	18,0	6,2	29,0	29,0	17,5	933,8	522,0	108,5	3293,0	1174,2	204,6	4226,8	1696,2	313,1
7	7,5	0,5	63,6	65,0	6,8	44,5	39,0	35,5	2830,2	2535,0	241,4	4902,7	2693,1	124,0	7732,9	5228,1	365,4
8	7,5	0,5	67,0	16,0	9,0	39,0	38,0	35,5	2613,0	608,0	319,5	7015,7	1911,9	67,3	9628,7	2519,9	386,8
9	5	0,7	59,6	22,8	9,8	38,0	35,0	30,0	2264,8	798,0	294,0	4618,7	3066,1	78,8	6883,5	3864,1	372,8
10	5	0,7	49,0	28,4	6,0	37,0	34,0	25,5	1813,0	965,6	153,0	4665,0	2263,6	256,1	6478,0	3229,2	409,1
11	5	0,7	40,8	17,0	7,8	34,0	32,5	31,0	1387,2	552,5	241,8	3515,0	2509,4	198,5	4902,2	3061,9	440,3
12	2,5	1	30,6	27,4	4,0	21,5	20,5	17,5	657,9	561,7	70,0	2604,5	1522,9	10,5	3262,4	2084,6	80,5
13	2,5	1	80,2	29,0	11,8	23,0	21,5	17,0	1844,6	623,5	200,6	4346,7	2085,0	25,8	6191,3	2708,5	226,4
14	2,5	1	61,6	27,4	7,4	19,0	18,5	17,3	1170,4	506,9	127,7	3081,9	1202,8	37,1	4252,3	1709,7	164,8
15	2,5	0,7	50,0	23,4	6,2	17,0	18,0	13,0	850,0	421,2	80,6	2279,1	1034,0	12,3	3129,1	1455,2	92,9
16	2,5	0,7	82,0	20,8	7,6	17,5	14,5	13,0	1435,0	301,6	98,8	2704,6	616,4	11,7	4139,6	918,0	110,5
17	2,5	0,7	40,6	24,4	5,6	14,0	15,0	12,0	568,4	366,0	67,2	1427,6	761,0	9,1	1996,0	1127,0	76,3
18	2,5	0,5	42,2	14,4	7,2	11,5	11,0	10,0	485,3	158,4	72,0	1323,2	166,6	10,6	1808,5	325,0	82,6
19	2,5	0,5	33,0	15,4	3,8	11,5	10,0	7,0	379,5	154,0	26,6	1008,5	114,8	5,5	1388,0	268,8	32,1
20	2,5	0,5	48,4	15,6	4,2	11,5	9,0	8,0	556,6	140,4	33,6	1478,7	92,7	10,3	2035,3	233,1	43,9

**Tabla 16:** Medición promedio de: Humedad, Densidad compactada seca y Temperatura media diaria.  
(Fuente: Elaboración propia).

Ensayo Nº	Tiempo (min)	Presión (bar)	Humedad instrumental (m3/m3)			Humedad de laboratorio (%)			D.C.S (kg/m3)			Temperatura (°C)			Presencia de surquillo		
			60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%	60%	25%	5%
1	5	0,5	25	31	21	15	21	21	1228	1288	1313	16,5	16,5	16,5	SI	NO	NO
2	5	0,5	27	25	24	18	19	19	1233	1232	1195	19	19	19	SI	NO	NO
3	5	0,5	33	30	34	22	19	26	1319	1220	1285	18	18	18	SI	NO	NO
4	5	0,5	22	21	27	12	13	16	1269	1250	1265	16,5	16,5	16,5	SI	NO	NO
5	5	0,5	29	31	32	18	19	23	1274	1186	1232	15	15	15	SI	NO	NO
6	7,5	0,5	16	20	24	18	14	16	1218	1232	1185	16	16	16	SI	NO	NO
7	7,5	0,5	31	21	28	24	21	17	1414	1215	1224	16,5	16,5	16,5	SI	NO	NO
8	7,5	0,5	34	31	31	20	21	23	1179	1287	1273	19	19	19	SI	NO	NO
9	5	0,7	35	34	30	24	25	22	1316	1313	1308	19	19	19	SI	NO	NO
10	5	0,7	33	25	35	21	19	25	1214	1229	1265	17	17	17	SI	NO	NO
11	5	0,7	33	31	35	20	21	21	1260	1232	1249	17	17	17	SI	NO	NO
12	2,5	1	26	30	30	15	16	16	1171	1167	1261	16,5	16,5	16,5	NO	NO	NO
13	2,5	1	27	35	35	23	26	19	1202	1331	1215	15,5	15,5	15,5	SI	NO	NO
14	2,5	1	33	33	37	19	18	25	1264	1265	1147	15,5	15,5	15,5	NO	NO	NO
15	2,5	0,7	33	35	35	22	24	21	1277	1259	1269	17,5	17,5	17,5	NO	NO	NO
16	2,5	0,7	36	32	39	24	20	27	1318	1220	1254	17,5	17,5	17,5	NO	NO	NO
17	2,5	0,7	32	34	35	20	23	22	1207	1294	1262	17	17	17	NO	NO	NO
18	2,5	0,5	34	33	39	23	19	27	1292	1230	1285	17	17	17	NO	NO	NO
19	2,5	0,5	35	38	34	23	26	21	1249	1339	1258	16,5	16,5	16,5	NO	NO	NO
20	2,5	0,5	37	35	40	23	21	27	1312	1287	1220	16,5	16,5	16,5	NO	NO	NO

**Tabla 17:** Parámetros MUSLE.  
(Fuente: Elaboración propia).

ENSAYO	Factores MUSLE 60%							Factores MUSLE 25%							Factores MUSLE 5%						
	Q (m3)	qp (m <sup>3</sup> /s)	K	LS	C	P	Y (Kg)	Q (m3)	qp (m <sup>3</sup> /s)	K	LS	C	P	Y (Kg)	Q (m3)	qp (m <sup>3</sup> /s)	K	LS	C	P	Y (Kg)
1	0,0155	0,000100	0,40	4,63	1	1	12,22	0,0145	0,000100	0,40	1,28	1	1	3,25	0,0055	0,000100	0,40	0,101	1	1	0,15
2	0,0135	0,000100	0,40	4,63	1	1	11,31	0,0115	0,000100	0,40	1,28	1	1	2,86	0,0065	0,000100	0,40	0,101	1	1	0,16
3	0,0175	0,000100	0,40	4,63	1	1	13,08	0,0140	0,000100	0,40	1,28	1	1	3,19	0,0100	0,000100	0,40	0,101	1	1	0,21
4	0,0140	0,000100	0,40	4,63	1	1	11,54	0,0130	0,000100	0,40	1,28	1	1	3,06	0,0110	0,000100	0,40	0,101	1	1	0,22
5	0,0150	0,000100	0,40	4,63	1	1	12,00	0,0165	0,000100	0,40	1,28	1	1	3,50	0,0120	0,000100	0,40	0,101	1	1	0,23
6	0,0290	0,000090	0,40	4,63	1	1	16,33	0,0290	0,000090	0,40	1,28	1	1	4,52	0,0175	0,000090	0,40	0,101	1	1	0,27
7	0,0445	0,000090	0,40	4,63	1	1	20,76	0,0390	0,000090	0,40	1,28	1	1	5,33	0,0355	0,000090	0,40	0,101	1	1	0,40
8	0,0390	0,000090	0,40	4,63	1	1	19,28	0,0380	0,000090	0,40	1,28	1	1	5,25	0,0355	0,000090	0,40	0,101	1	1	0,40
9	0,0380	0,0001305	0,40	4,63	1	1	23,39	0,0350	0,0001305	0,40	1,28	1	1	6,18	0,0300	0,0001305	0,40	0,101	1	1	0,45
10	0,0370	0,0001305	0,40	4,63	1	1	23,04	0,0340	0,0001305	0,40	1,28	1	1	6,08	0,0255	0,0001305	0,40	0,101	1	1	0,41
11	0,0340	0,0001305	0,40	4,63	1	1	21,98	0,0325	0,0001305	0,40	1,28	1	1	5,92	0,0310	0,0001305	0,40	0,101	1	1	0,46
12	0,0215	0,0001899	0,40	4,63	1	1	20,97	0,0205	0,0001899	0,40	1,28	1	1	5,65	0,0175	0,0001899	0,40	0,101	1	1	0,41
13	0,0230	0,0001899	0,40	4,63	1	1	21,78	0,0215	0,0001899	0,40	1,28	1	1	5,80	0,0170	0,0001899	0,40	0,101	1	1	0,40
14	0,0190	0,0001899	0,40	4,63	1	1	19,57	0,0185	0,0001899	0,40	1,28	1	1	5,33	0,0173	0,0001899	0,40	0,101	1	1	0,40
15	0,0170	0,0001250	0,40	4,63	1	1	14,55	0,0180	0,0001250	0,40	1,28	1	1	4,15	0,0130	0,0001250	0,40	0,101	1	1	0,27
16	0,0175	0,0001250	0,40	4,63	1	1	14,79	0,0145	0,0001250	0,40	1,28	1	1	3,68	0,0130	0,0001250	0,40	0,101	1	1	0,27
17	0,0140	0,0001250	0,40	4,63	1	1	13,05	0,0150	0,0001250	0,40	1,28	1	1	3,75	0,0120	0,0001250	0,40	0,101	1	1	0,26
18	0,0115	0,000088	0,40	4,63	1	1	9,60	0,0110	0,000088	0,40	1,28	1	1	2,59	0,0100	0,000088	0,40	0,101	1	1	0,19
19	0,0115	0,000088	0,40	4,63	1	1	9,60	0,0100	0,000088	0,40	1,28	1	1	2,46	0,0070	0,000088	0,40	0,101	1	1	0,16
20	0,0115	0,000088	0,40	4,63	1	1	9,60	0,0090	0,000088	0,40	1,28	1	1	2,31	0,0080	0,000088	0,40	0,101	1	1	0,17



## ANEXO C

### C.1.- Prueba de datos dudosos

Se realiza el análisis de datos dudosos de acuerdo con lo recomendado por Ven te Chow 1994.

#### C.1.1.- Procedimiento recomendado

1. Obtener los Logaritmos de los datos.
2. Determinar en número de datos (n).
3. Obtener el Promedio  $\bar{y}$  y Desviación Estándar  $S_y$ .
4. Ingresando con el número de datos a la tabla 19, se obtiene el parámetro  $K_n$ .
5. Obtener el límite inferior  $y_L$  y superior  $y_H$  según:
 
$$y_L = \bar{y} - K_n S_y$$

$$y_H = \bar{y} + K_n S_y$$
6. Determinar el máximo y mínimo de la serie.
7. Obtener la asimetría de los logaritmos de los datos.
8. Si la asimetría es menor que -0.4, buscar datos dudosos bajos, si la asimetría es mayor que 0.4, buscar datos dudosos altos y si la asimetría está entre  $\pm 0.4$ , buscar datos dudosos altos y bajos.
9. Si hay valores fuera de los límites, o sea datos dudosos, estos se deben eliminar.
10. Repetir los pasos 1 al 9 a la serie luego de eliminar los datos del paso anterior.
11. Realizar el proceso hasta que no existan datos dudosos.

**C.1.2.- Resultados obtenidos**

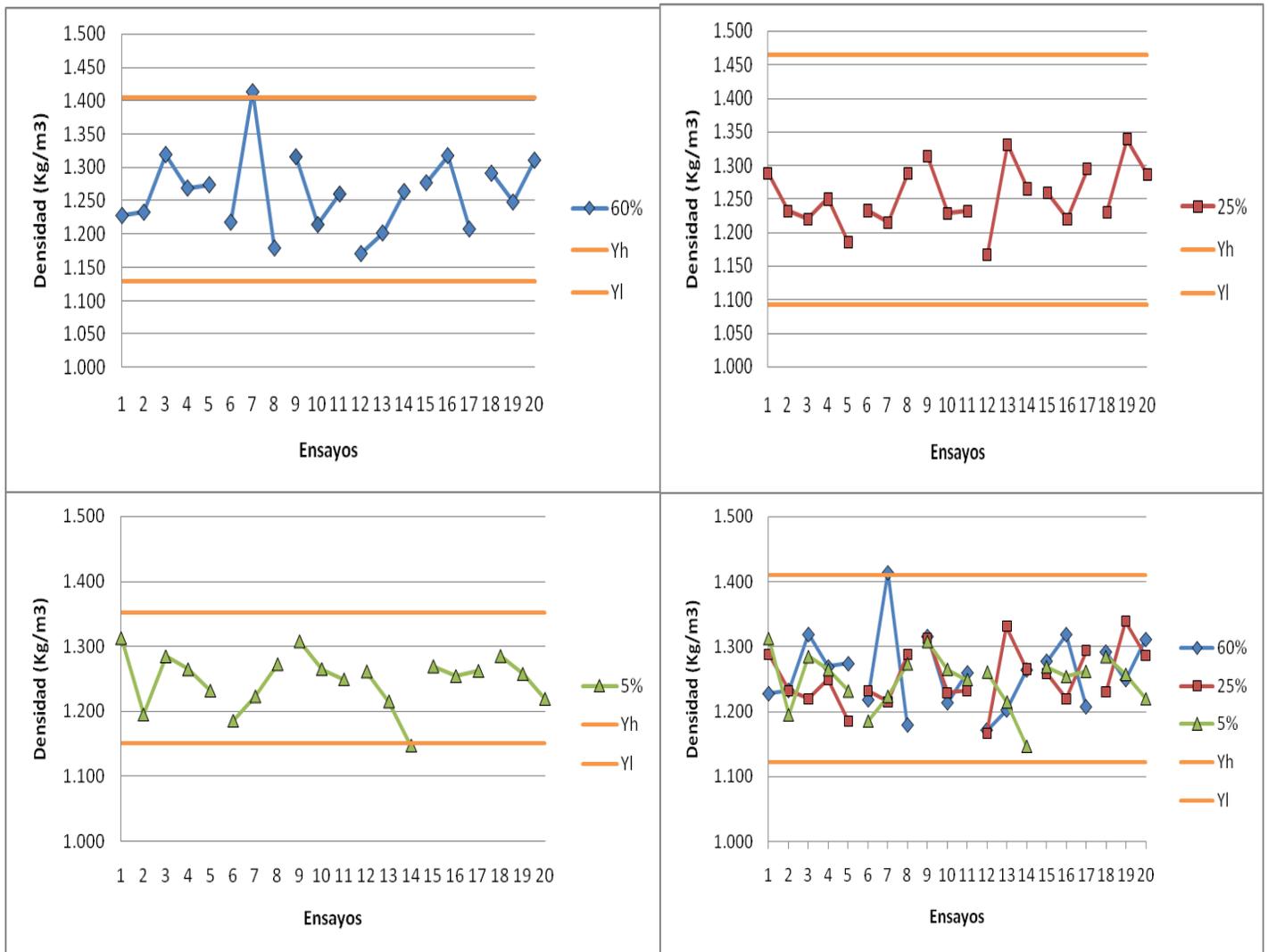
**Tabla 18:** Prueba de Datos Dudosos. (Fuente: Elaboración propia)

ENSAYO Nº	D.C.S POR PENDIENTE			log (D.C.S)		
	60%	25%	5%	60%	25%	5%
1	1228	1288	1313	3,09	3,11	3,12
2	1233	1232	1195	3,09	3,09	3,08
3	1319	1220	1285	3,12	3,09	3,11
4	1269	1250	1265	3,10	3,10	3,10
5	1274	1186	1232	3,11	3,07	3,09
6	1218	1232	1185	3,09	3,09	3,07
7	1414	1215	1223	3,15	3,08	3,09
8	1179	1287	1273	3,07	3,11	3,10
9	1316	1313	1308	3,12	3,12	3,12
10	1214	1229	1265	3,08	3,09	3,10
11	1260	1232	1249	3,10	3,09	3,10
12	1171	1167	1261	3,07	3,07	3,10
13	1202	1331	1215	3,08	3,12	3,08
14	1264	1265	1147	3,10	3,10	3,06
15	1277	1259	1269	3,11	3,10	3,10
16	1318	1220	1254	3,12	3,09	3,10
17	1207	1294	1262	3,08	3,11	3,10
18	1292	1230	1285	3,11	3,09	3,11
19	1249	1339	1258	3,10	3,13	3,10
20	1312	1287	1220	3,12	3,11	3,09
N	20	20	20	20	20	20
Promedio	1261	1254	1248	3,100	3,098	3,096
Sy	58,20	46,12	41,32	0,020	0,016	0,015
Kn	2,385	2,385	2,385	2,385	2,385	2,385
Yh	1400	1364	1347	3,147	3,136	3,131
Yl	1122	1144	1150	3,053	3,06	3,061
Máximo	1414	1339	1313	3,15	3,13	3,12
Mínimo	1171	1167	1147	3,07	3,07	3,06
Asimetría	0,727	0,182	-0,740	0,582	0,104	0,830

Valor dudoso

Tamaño de muestra $n$	$K_n$						
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

**Tabla 19:** Valores  $K_n$  para la prueba de datos dudosos. (Fuente: Ven te Chow 1994)



**Figura 45:** Representación de los límites de datos dudosos; evaluados individual y colectivamente. (Fuente: Elaboración propia).

## ANEXO D

### D.1.- Calibración del sistema de aspersión

Con la finalidad de cuantificar y caracterizar la pluviosidad, se realizó una calibración del sistema empleando valores de presión de trabajo predefinidos (0,5; 0,7 y 1 bar), evaluando la pluviosidad a través de vasos receptores ubicados en un cuadrículado de 18,5 x 17,5 cm a 55 cm del suelo que es la altura promedio de los tres taludes en estudio, cubriendo una superficie de 1 m<sup>2</sup> para cada prueba.

El procedimiento se resume en la figura 46.



**Figura 46:** 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: Elaboración propia).

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

### ***D.1.1.- Uniformidad de Distribución (UD)***

Este término fue introducido por Merrian y Keller en 1978, y podemos definirlo como:

$$UD (\%) = \frac{\text{altura media de agua recogida en el 25\% del área menos regada} \times 100}{\text{Altura media de agua recogida}}$$

Normalmente, el aplicar riegos que produzcan ligeros déficits en las zonas menos regadas, por falta de uniformidad, suelen conducir al óptimo económico. Así, para cultivos de valor medio o alto se tiende a que la altura media de agua aplicada (dosis neta) sea igual al "déficit permisible de manejo (DPM)" o que coincida con la media del 25% del área menos regada. De esta forma, sólo el 12,5% del área estará infrarregada.

### ***D.1.2.- 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.

$n$  = número total de pluviómetros que intervienen en la evaluación.

### ***D.1.3.- 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.

**D.4.- Resultados obtenidos**

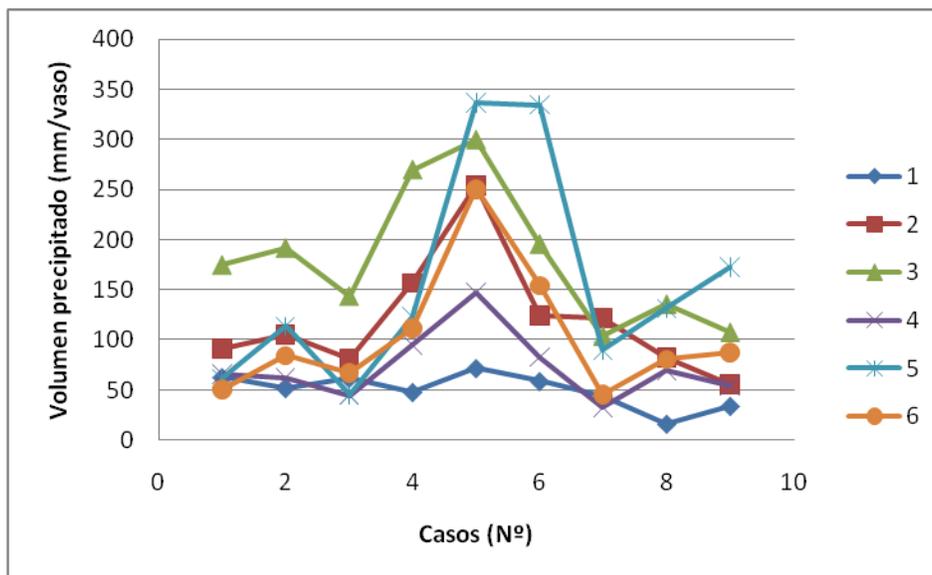
Los resultados se presentan en las tablas 20 a 23, considerando tres repeticiones para cada uno de los casos señalados en la figura 47.

**Tabla 20:** Medición de volumen precipitado para muestreo N°1.  
(Fuente: Elaboración propia).

Vaso	Casos (muestreo N°1)					
	1	2	3	4	5	6
1	63	92	175	66	62	51
2	52	106	192	62	114	85
3	62	82	144	45	46	68
4	48	157	270	95	124	112
5	72	254	300	147	337	251
6	59	125	196	83	335	155
7	44	122	104	33	90	46
8	16	83	136	70	132	81
9	34	56	108	55	173	88
Promedio	50	120	181	73	157	104

Coeficiente de uniformidad					
1	2	3	4	5	6
74,2	66,7	71,0	67,6	47,1	56,1
Uniformidad de la distribución					
1	2	3	4	5	6
50,0	57,7	58,7	53,5	34,4	46,6
Coeficiente de variación total					
1	2	3	4	5	6
0,3	0,5	0,4	0,5	0,7	0,6



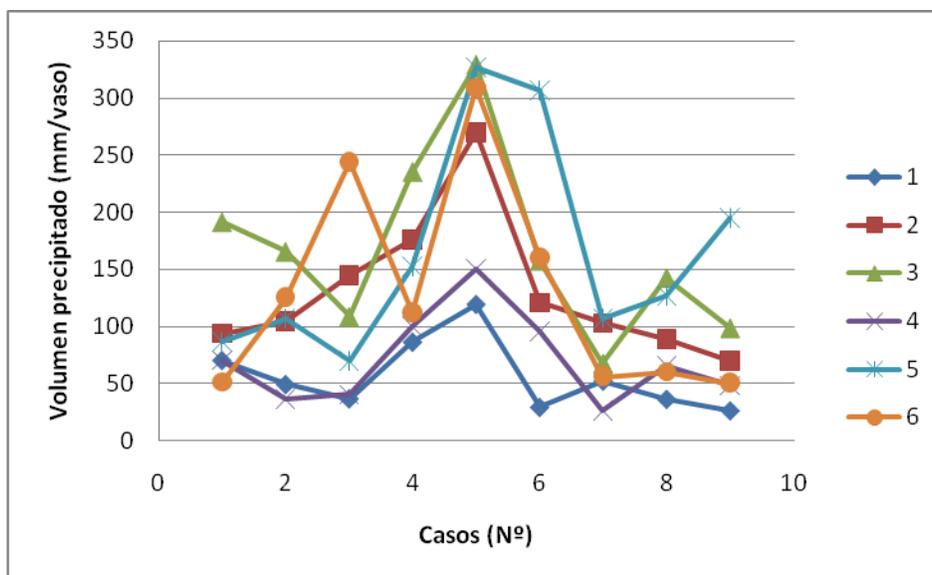
**Figura 47:** Distribución del volumen precipitado según caso de estudio, repetición 1. (Fuente: Elaboración propia).

**Tabla 21:** Medición de volumen precipitado para muestreo N°2.  
(Fuente: Elaboración propia).

Vaso	Casos (muestreo N°2)					
	1	2	3	4	5	6
1	70	94	191	70	87	51
2	49	105	165	36	107	125
3	36,5	145	108	40	70	244
4	86	176	235	100	153	112
5	119	270	329	150	327	309
6	29	121	157	95	307	160
7	52	103	67	26	107	56
8	36	89	142	65	127	60
9	26	70	98	48	195	50
Promedio	56	130	166	70	164	130

Coeficiente de uniformidad					
1	2	3	4	5	6
57,4	65,9	65,5	57,1	54,6	44,5
Uniformidad de la distribución					
1	2	3	4	5	6
49,2	61,0	49,8	44,3	47,7	38,9
Coeficiente de variación total					
1	2	3	4	5	6
0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7



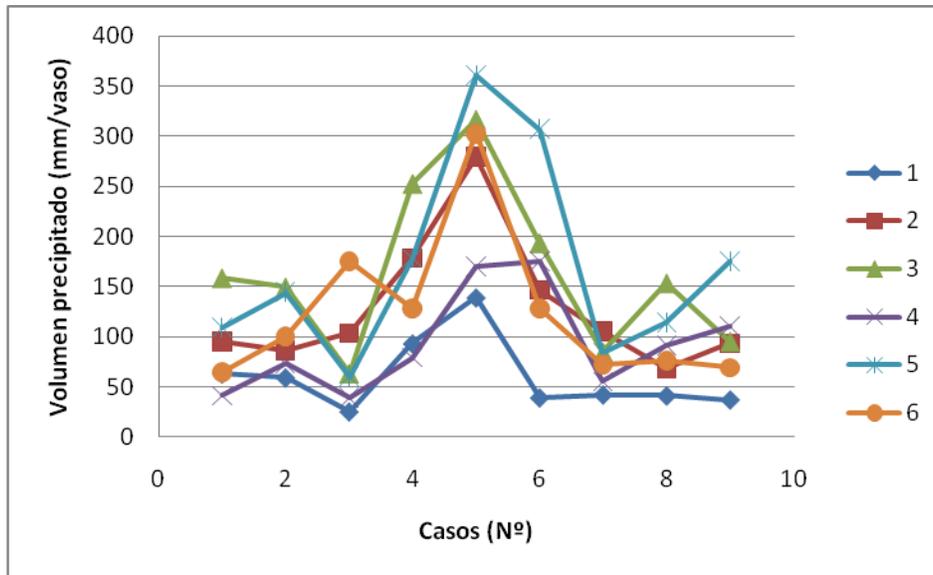
**Figura 48:** Distribución del volumen precipitado según caso de estudio, repetición 2. (Fuente: Elaboración propia).

**Tabla 22:** Medición de volumen precipitado para muestreo N°3.  
(Fuente: Elaboración propia).

Vaso	Casos (muestreo N°3)					
	1	2	3	4	5	6
1	63	95	158	41	109	64
2	59	86	149	73	144	100
3	25	103	63	39	60	175
4	93	178	252	79	178	128
5	139	279	316	170	361	303
6	39	146	193	175	307	128
7	42	105	84	55	84	72
8	41	68	153	91	114	76
9	37	93	95	110	175	69
Promedio	60	128	163	93	170	124

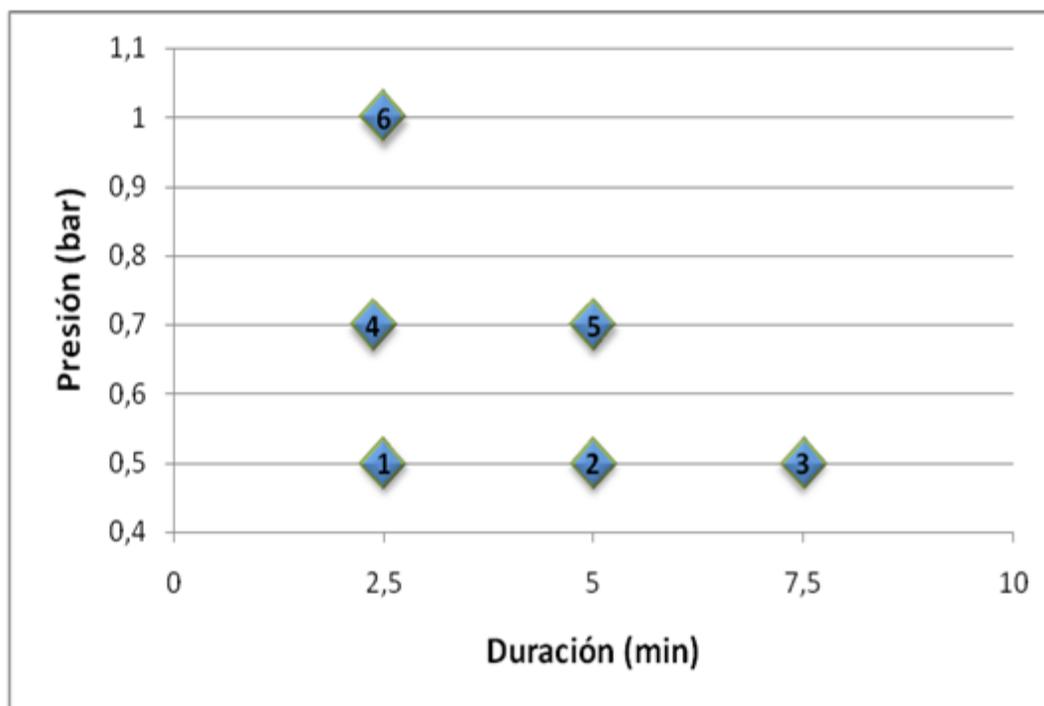
Coeficiente de uniformidad					
1	2	3	4	5	6
57,0	62,1	62,6	57,4	55,6	57,2
Uniformidad de la distribución					
1	2	3	4	5	6
51,9	60,1	45,2	43,2	42,3	53,7
Coeficiente de variación total					
1	2	3	4	5	6
0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6



**Figura 49:** Distribución del volumen precipitado según caso de estudio, repetición 3. (Fuente: Elaboración propia).

**Tabla 23:** Precipitación, volumen e intensidad promedio según caso.  
(Fuente: Elaboración propia).

Precipitación media (mm/vaso)					
1	2	3	4	5	6
55	126	170	78	164	119
Volumen de precipitación (L)					
1	2	3	4	5	6
13,2	30,1	40,5	18,8	39,2	28,5
Intensidad media (mm/hr)					
1	2	3	4	5	6
317	361	324	450	470	684



**Figura 50:** Casos de estudio según presión del sistema.  
(Fuente: Elaboración propia).

