



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

ESTRÉS HIDRÁULICO CRÍTICO PARA LA REMOCIÓN DE
PARTÍCULAS EN SUELOS BAJO DISTINTAS COBERTURAS
FORESTALES, EN EL PREDIO PANTANILLOS, VII REGIÓN

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

CARLOS ALBERTO MARAMBIO HENRÍQUEZ

Profesor Guía: Sr. Gabriel Mancilla Escobar. Ingeniero Forestal, MSc., Ph.D.

Santiago, Chile

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESTRÉS HIDRÁULICO CRÍTICO PARA LA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS EN SUELOS BAJO DISTINTAS COBERTURAS FORESTALES, EN EL PREDIO PANTANILLOS, VII REGIÓN

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

CARLOS ALBERTO MARAMBIO HENRÍQUEZ

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Gabriel Mancilla Escobar	6,8
Prof. Consejero Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz	7,0
Prof. Consejero Sr. Cristián Kremer Fariña	6,8

Dedicada a todos, menos a uno...

si a Ud.

Agradecimientos

Primero que todo a mis padres y hermano por el cariño entregado durante mis años de estudio y de ocio, y fundamentalmente, por su gran apoyo en este último paso. A mis abuelos, quienes siempre estuvieron atentos durante toda la carrera.

Agradecer a mi Profesor Guía Sr. Gabriel Mancilla por su apoyo y paciencia en los n+1 meses de espera para la entrega de los resultados, y por que a través de su proyecto se financió mi Memoria de Título. A mis Profesores Consejeros, en especial al Sr. Juan Pablo Fuentes por sus correcciones cuyo resultado se refleja en las notas obtenidas.

Como no agradecer a la persona con quien compartí y me aguantó durante toda la carrera y que ahora tengo a mi lado, entregándome su amor incondicional desde hace dos años, y que en esta última etapa ha aguantando todas mis mañas, la Srta. Natalia Vargas.

Agradecer a mis compañeros de Universidad por compartir conmigo esos gratos momentos de estudio, terreno y carrete: Claudio Garrido, Manuel Donoso, Evelyn Arias, Benita Garrido, Juan Pablo González, Bárbara Vivedes, Cristina Pavez, Carolina Soto, Julio Astudillo, Pablo Bruna, a la "Dostora Pola" y a

(Escriba su nombre aquí si es que se me olvidó nombrarlo)

A Sofía Pino quien me ayudó desinteresadamente en la toma de datos y muestra en terreno, y a la Sra. Rosa y Don Cristián, por acogerme cariñosamente en el predio Pantanillos.

"Mención Honrosa" al Sr. César Ormazabal por sus innumerables bromas respecto al Título: "¿cuando vas a firmar los Planes de Manejo?, ah verdad que aún no te titulas, ya pásame el PMF para firmarlo", que me motivó a terminar la memoria.

Índice de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Estrés crítico de corte hidráulico	1
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo General	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
2. MATERIAL Y MÉTODO	6
2.1 Material	6
2.1.1 Lugar de estudio	6
2.1.2 Clima	6
2.1.3 Suelo y geología	7
2.1.4 Topografía	7
2.1.5 Vegetación	7
2.1.6 Situaciones boscosas a estudiar	7
2.2 Método	9
2.2.1 Diseño y características de las parcelas de escurrimiento	9
2.2.2 Determinación del sector de muestreo y establecimiento de la parcela en terreno	11
2.2.3 Toma de muestras	12
2.2.4 Desarrollo del experimento	12
2.2.5 Análisis de laboratorio	13
2.2.5.1 Determinación de la densidad aparente y contenido de humedad	13
2.2.5.2 Determinación de la clase textural y contenido de materia orgánica	14
2.2.5.3 Determinación de la concentración de partículas	14
2.2.6 Análisis de datos	14
2.2.6.1 Determinación de estrés crítico de corte hidráulico mediante metodología de observación	14
2.2.6.2 Análisis estadístico	15
2.2.6.3 Comparación de valores obtenidos mediante observación con los obtenidos mediante curvas de regresión, modelo WEPP y modelos de Mancilla (2004)	15
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
3.1 Determinación de valores de estrés crítico de corte mediante metodología de observación	16
3.1.1 Análisis estadístico	17
3.2 Comparación de valores obtenidos mediante observación con los obtenidos mediante curvas de regresión, modelo WEPP y modelos de Mancilla (2004)	18
4. CONCLUSIONES	22
5. BIBLIOGRAFÍA	23

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Valores de Estrés Crítico de Corte Hidráulico.....	16
Cuadro 2. Estrés crítico de corte para los tratamientos obtenidos mediante curvas de regresión, modelo WEPP y modelo Mancilla (2004).....	18
Cuadro 3. Textura, contenido de arcilla, contenido de arena muy fina y densidad aparente de los suelos de cada uno de los tratamientos.....	19

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de Predio Pantanillos.....	6
Figura 2. Ubicación de los rodales de muestreo al interior del Predio Pantanillos.....	8
Figura 3. Vista general de los lugares de muestreo.....	9
Figura 4. Diseño de la Parcela de Esgurrimiento. Vista superior de la parcela de esgurrimiento (A), vista inferior de la parcela de esgurrimiento (B), tubo perforado vista inferior (C), tubo perforado vista superior donde se conecta a la manguera alimentadora (D).....	10
Figura 5. Contenedores de agua (A), manguera de alimentación (B) y medidor de flujo (C). .	11
Figura 6. Esquema de la instalación de la parcela en terreno, vista de planta.....	11
Figura 7. Instalación de la parcela de esgurrimiento (A) y desarrollo de experimento (B y C).	14
Figura 8. Curvas de regresión para determinación de estrés crítico de corte hidráulico.	20

RESUMEN

Predecir y modelar los procesos erosivos requiere conocer los valores del estrés hidráulico crítico para la remoción de partículas del suelo. Se diseñó un experimento para la determinación del estrés hidráulico crítico, en un renoval de *Nothofagus glauca*, una plantación de *Pinus radiata* realizada el año 1996 y otra realizada en 1986, y en una situación de quema de residuos post-cosecha de *Pinus radiata*.

El estudio se llevó a cabo en el Centro Experimental Forestal Dr. Justo Pastor León, perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. Para el desarrollo del experimento en terreno se diseñó un sistema de parcela de escurrimiento movable, sobre la cual se simuló la escorrentía superficial aplicando agua y se tomaron muestras de efluente a la salida de la parcela. Con la información obtenida en terreno se determinó el estrés crítico mediante observación directa del momento en que partículas de suelo eran arrastradas por el flujo.

Adicionalmente, se obtuvieron valores de estrés crítico de corte hidráulico a través del método de regresión lineal y según la metodología de los modelos matemáticos WEPP (Water Erosion Prediction Project) y Mancilla (2004).

Los valores obtenidos fueron 2,66; 2,54; 2,76 y 1,91 Pa, para el estrés crítico de corte de los tratamientos renoval de *Nothofagus glauca*, plantación de *Pinus radiata* de 1996, plantación de *Pinus radiata* de 1986 y quema de residuos post-cosecha de *Pinus radiata*, respectivamente. Los valores más altos registrados, para los tratamientos renoval de *Nothofagus glauca*, plantación de *Pinus radiata* de 1986, se debe a que no muestran perturbaciones recientes y por lo tanto presentan una mayor probabilidad de agregación de las partículas del suelo, además de una mejor integración de la materia orgánica al sustrato mineral.

Los valores obtenidos por el método de regresión, sin bien son distintos, presentan una tendencia similar a la registrada por el método de observación. Sin embargo el estrés crítico de corte estimado según los procedimientos del modelo WEPP y de Mancilla (2004), se alejan de los obtenidos por el método de observación.

Palabras clave: Estrés crítico de corte hidráulico, escurrimiento superficial, Water Erosion Prediction Project (WEPP), densidad aparente, concentración de sedimentos.

ABSTRACT

The modeling of the erosive process requires knowing the values of the hydraulic critical shear stress for the removal of particles of the soil. Field experiments were designed, to determine the critical shear stress in a *Nothofagus glauca* second growth forest site, a 1996 and 1986 *Pinus radiata* site, and a post-harvest *Pinus radiata* site where the residues was burn.

The experiments were conducted at the Dr. Justo Pastor Leon Experimental Forest Station, which belongs to the College of Forestry Sciences of the University of Chile.

A movable runoff plot was designed for developing the field experiments. On this, water was applied, simulating surface runoff, and effluent samples were taken at the plot outlet. In the field experiments, the critical shear stress was determined by means of direct observation at the moment in which particles of soil were dragged by the flow. In addition, critical shear stress was determined by other methods, such as linear regression (by using the values obtained by laboratory analysis of the effluent sampling), and by the methodology used in mathematical models like WEPP (Water Erosion Prediction Project) and Mancilla (2004).

The critical shear stress obtained values were 2.66; 2.54; 2.76 and 1.91 Pa, for the a *Nothofagus glauca* second growth forest site, a 1996 *Pinus radiata* site, a 1986 *Pinus radiata* site and a post-harvest *Pinus radiata* site where the residues was burn. The highest values recorded, for the a *Nothofagus glauca* second growth forest site and a 1986 *Pinus radiata* site, is that show no recent disturbances and therefore a higher probability of aggregation of soil particles, and a better integration of organic matter to the mineral substrate.

The critical shear stress values obtained by the regression method showed a similar trend to the values obtained by the observation method, however the values were different. The values obtained by the models WEPP and Mancilla (2004), were quite different from the recorded by the method of observation.

Keywords: Critical shear stress, superficial run-off, Water Erosion Prediction Project (WEPP), bulk density, concentration of sediments.

1. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es un serio problema ambiental que amenaza el futuro desarrollo silviagropecuario y de toda la sociedad. La erosión del suelo es un proceso de desgaste que ocurre naturalmente, no obstante, es casi siempre magnificado por la acción del hombre.

Entre los agentes causantes de la erosión del suelo, las precipitaciones constituyen uno de los principales determinantes de la magnitud e intensidad de erosión hídrica (Ibarra y Mancilla, 1995). Este proceso se encuentra definido por las etapas de desagregación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo.

El proceso antes mencionado es causado por la gota de lluvia y el escurrimiento superficial (Peralta, 1976), correspondiente a un 90% y 10%, respectivamente, del total de la remoción del suelo causado por la erosión hídrica (Stallings, 1962). La erosión hídrica, en general, se ve afectada por varios factores, entre éstos, la cantidad, intensidad y duración de la lluvia, propiedades del flujo superficial, naturaleza del suelo, la pendiente y el tipo de cubierta vegetal (Peralta, 1976). Si bien la influencia de la vegetación sobre la erosión hídrica varía con la época del año, tipo y grado de cobertura, entre otras, puede considerarse que su efecto se relaciona directamente con la intercepción, velocidad de escurrimiento e infiltración.

La mayoría de los modelos basados en procesos físicos de erosión de suelo, actualmente en uso en el mundo (*e.g.* USLE, Wischmeier y Smith, 1978; WEPP, Nearing *et al.*, 1989; EUROSEM, Morgan *et al.*, 1992, citado por Knapen *et al.*, 2006), no consideran de gran importancia las situaciones que presentan coberturas de bosques, principalmente porque se entiende que la cobertura y residuos que ellos otorgan al suelo aminoran casi en su totalidad los efectos erosivos, en especial los causados por el efecto de la gota de lluvia y la escorrentía superficial. La excepción ocurre cuando la cosecha del bosque deja áreas desnudas a merced de los impactos antes mencionados. La situación descrita se presenta fuertemente en las áreas del sector cordillerano costero de la Región del Maule, donde la vulnerabilidad de los suelos a la erosión está incrementada por la presión que se ejerce durante las faenas de cosecha forestal.

1.1 Estrés crítico de corte hidráulico

En la modelación de fenómenos erosivos, con base en procesos físicos, uno de los parámetros más controversiales, pero no menos importante, es el estrés o esfuerzo crítico de corte hidráulico (Léonard y Richard, 2004; Mancilla, 2004). Particularmente, el esfuerzo hidráulico crítico es usado en todos los modelos de erosión que incorporan los conceptos de capacidad de remoción (*detachment capacity*) y tasa de remoción (*detachment rate*) como procesos para predecir los montos de transporte de sedimentos (Mancilla, 2004).

Morgan (1997) señala que el desprendimiento de una partícula de la masa del suelo se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo son superiores a las fuerzas que mantienen la partícula unida al resto de las partículas. Según esto, es posible señalar que el estrés crítico de corte (τ_c) es definido como el estrés hidráulico a partir del cual partículas de

suelo comienzan a ser removidas por el escurrimiento superficial (Mancilla, 2004). Van Klaveren (1998), citado por Henderson (2006), lo define como la fuerza producida por un flujo de agua en el fondo de su cauce y en la dirección del flujo. Por lo tanto, este estrés representa la fuerza por unidad de área, expresado en Pascales (Pa), requerida para vencer la resistencia de las partículas (o agregados) del suelo a ser removidas por el agua de escorrentía.

Hanson y Cook (2004), señalan que la tasa de erosión está determinada por dos parámetros del suelo: la erodabilidad (K_d), el estrés crítico de corte (τ_c) y estrés efectivo (τ_e), según la siguiente ecuación desarrollada por Foster (1982), citado por Gilley *et al.* (1993) y Knapen *et al.*, 2006:

$$\varepsilon_T = K_d(\tau_e - \tau_c) \quad (1)$$

Donde

ε_T : tasa de erosión ($m\ s^{-1}$)

K_d : coeficiente de erodabilidad o coeficiente de remoción ($m^3\ N^{-1}s^{-1}$)

τ_e : estrés hidráulico real (Pa)

τ_c : estrés hidráulico crítico (Pa)

Como lo señala Horton (1945), citado por Knapen (2006), “el cizalle sólo ocurrirá cuando el umbral de resistencia del suelo sea excedido”, o en otras palabras, si el valor de τ_e excede al de τ_c , comienza la remoción de partículas del suelo (Hanson y Cook, 2004; Gilley *et al.*, 1993; Nearing *et al.*, 1989) y por lo tanto, el proceso de erosión.

Esta ecuación fue utilizada en un modelo de predicción de erosión desarrollado por Nearing *et al.* (1989) para el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), iniciado en 1987 por el USDA (United States Department of Agriculture) y desarrollado como alternativa al antiguo modelo USLE y de manera de establecer una nueva generación en tecnología destinada a la predicción de fenómenos de erosión, para la conservación del suelo y el agua y, la planificación y evaluación ambiental (Foster y Lane, 1987, citado por Ghebreiyessus *et al.*, 1994).

K_d y τ_c , han sido considerados como los mejores parámetros universales para describir resistencia a la erosión por flujo de agua (Knapen *et al.*, 2006).

El estrés de corte hidráulico (τ), y en particular el estrés crítico de corte hidráulico (τ_c), es posible estimarlo a través de las siguientes ecuaciones (Ghebreiyessus *et al.*, 1994; Nearing *et al.*, 1997; Chow *et al.*, 1988, citado por Léonard y Richard, 2004):

$$\tau = \rho * g * R_h * S_f \quad (2)$$

y por lo tanto,

$$\tau_c = \rho * g * R_{hc} * S_{fc} \quad (3)$$

Donde:

τ : estrés crítico de corte del flujo de agua (Pa)

ρ : densidad del agua (kg m^{-3})

g : constante de aceleración de gravedad (m s^{-2})

R_h : radio hidráulico¹ (m)

R_{hc} : radio hidráulico crítico (m)

S_f : pendiente de fricción (%)

S_{fc} : pendiente de fricción crítica (%)

En términos prácticos, la definición puede no ser concluyente, dado que el estrés crítico de corte puede ser temporal y espacialmente variable (Knapen *et al.*, 2006). Así, por ejemplo, Nearing (1991) indicó que el estrés crítico de corte correspondía a una variable estocástica. Asimismo, no existe una metodología estandarizada y totalmente aceptada para determinar el estrés crítico de corte hidráulico, siendo lo más conveniente la observación visual del momento en que las partículas de suelo comienzan a ser removidas (Mancilla, 2004; Knapen *et al.*, 2006).

La mayoría de las determinaciones de estrés crítico de corte han sido efectuadas mediante el ajuste de regresión. En este sentido, se establece una línea recta determinada por el estrés de corte (como variable independiente en la abscisa) y la tasa de remoción de partículas (como variable dependiente, en la ordenada), asumiendo una relación lineal entre estos factores. Así, el estrés crítico de corte es el punto de estrés donde la línea recta cruza la abscisa, o donde la tasa de remoción deja de ser cero. No obstante, existen situaciones en que el estrés crítico resultante es negativo, lo cual carece de validez física y crea incertidumbre en torno a este método (Gilley *et al.*, 1993; Zhu *et al.*, 2001).

Investigaciones indican que la resistencia del suelo a la erosión por un flujo de agua es influida por casi todas las características del suelo, volviéndose así un concepto complejo, con un alta variabilidad espacial y temporal, que no está todavía completamente comprendido (Nachtergaele y Poesen, 2002; Kanpen *et al.*, 2006).

El modelo WEPP estableció una expresión base para el estrés crítico de corte asentada en la textura del suelo:

$$\tau_c = 2,67 + 6,5clay - 5,8vfs \quad (3)$$

en donde *clay* es la fracción de arcilla del suelo, y *vfs* es la fracción de arenas muy finas del suelo (entre 0,1 y 0,05 mm).

¹ R_h : cociente entre el área de la sección transversal del flujo de agua y el perímetro mojado de un flujo.

En otro estudio, que buscaba relacionar el estrés crítico de corte a variables físicas indicadoras de resistencia del suelo, en el proceso de congelamiento y descongelamiento de suelos, Mancilla (2004) derivó una expresión que relaciona el estrés crítico de corte a la densidad aparente del suelo (ρ_d):

$$\tau_c = 0,008 * e^{0,004 * \rho_d} \quad (4)$$

Estudios previos relativos a la influencia de las propiedades del suelo, densidad de raíces y procesos de congelamiento y descongelamiento de suelo con los procesos de erosión del mismo, muestran que existe una correlación entre τ_c y la densidad aparente (Wynn y Mostaghimi, 2006). Incrementos en la densidad aparente reflejan una reducida distancia entre partículas, incrementando la interacción y fuerzas entre ellas (Wynn *et al.*, 2007).

Experimentalmente, una de las maneras de determinar el estrés crítico de corte corresponde a ensayos realizados directamente en terreno. En este caso, usando flujo artificial, se crea la condición en que ocurre el transporte de sedimentos. En este sentido, muestras de agua con sedimentos son extraídas en períodos determinados de tiempo, para posteriormente determinar las concentraciones de partículas en laboratorio. Con estos datos, se realiza un análisis de regresión. No obstante, es también posible observar el momento en el cual el suelo comienza con el proceso de remoción de partículas y así determinar el estrés hidráulico al cual éste ocurre.

El estrés hidráulico ha sido determinado de manera experimental en suelos agrícolas, y sus valores van, según diversas características y condiciones de suelo, desde 0 a más de 15 Pa (Knapen *et al.*, 2006). Particularmente, Elliot *et al.* (1989), determinó estrés críticos de corte promedio, en el marco del proyecto WEPP en Estados Unidos, que oscilaron entre -0,66 Pa para suelos de textura franca en Nebraska y 6,64 Pa para suelos de textura franco limosa en Meryland. Ghebreiyessus *et al.* (1994), en suelos franco limosos obtuvieron valores de 1,3 Pa y 4,0 Pa, para densidades aparentes de 1,0 y 1,4 g cm⁻³, respectivamente. Mancilla (2004) determinó en su investigación, efectuado en suelos descongelados y sin congelar, rangos de estrés crítico de 0,66-1,65 Pa y 0,33-3,6 Pa, respectivamente. Knapen *et al.* (2006) señala que la heterogeneidad de métodos de medición, la carencia de una definición estandarizada y la falta de un modelo para este parámetro, complica la compatibilidad de los diferentes valores, que hasta ahora se han obtenido. El estrés crítico ha sido determinado primordialmente para suelos utilizados como terrenos agrícolas, por lo que no se tiene referencia de la determinación de este parámetro para terrenos de uso forestal.

En Chile, no se han constatado trabajos de investigación relacionados a la determinación o estudio del estrés crítico de corte en erosión de suelos, de tal manera que el desarrollo de este proyecto sería, sino el único, uno de los primeros trabajos relacionados al tema.

Para poder avanzar en la modelación de los procesos erosivos en zonas vulnerables a ser degradadas, es necesario el conocimiento y modelación de los parámetros y variables involucradas, que permitan una estimación ex-ante de las consecuencias de determinadas acciones sobre la calidad del ambiente, específicamente, sobre el suelo.

Conocer el estrés crítico de corte hidráulico en situaciones de uso forestal es un avance hacia la estimación de los potenciales procesos erosivos, dado que la disponibilidad de datos cuantitativos de este factor es bastante limitada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar y comparar el estrés crítico de corte hidráulico en suelos del predio Pantanillos, VII Región, bajo cuatro coberturas forestales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el rango de valores de estrés crítico de corte para las situaciones a estudiar.
- Comparar los valores de estrés crítico de corte obtenidos mediante observación con los estimados mediante las curvas de regresión del modelo WEPP y de Mancilla (2004).

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material

2.1.1 Lugar de estudio

El estudio se realizó en el Centro Experimental Forestal Dr. Justo Pastor León, perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile. Posee una superficie de 379,7 ha y está ubicado en la Comuna de Constitución (Figura 1), Provincia de Talca, VII Región del Maule, comprendido entre las coordenadas UTM (según carta "Constitución" del IGM): 744.000 y 748.000 metros este-oeste, y entre los 6.071.000 y 6.076.000 norte-sur (Moreira, 2001).

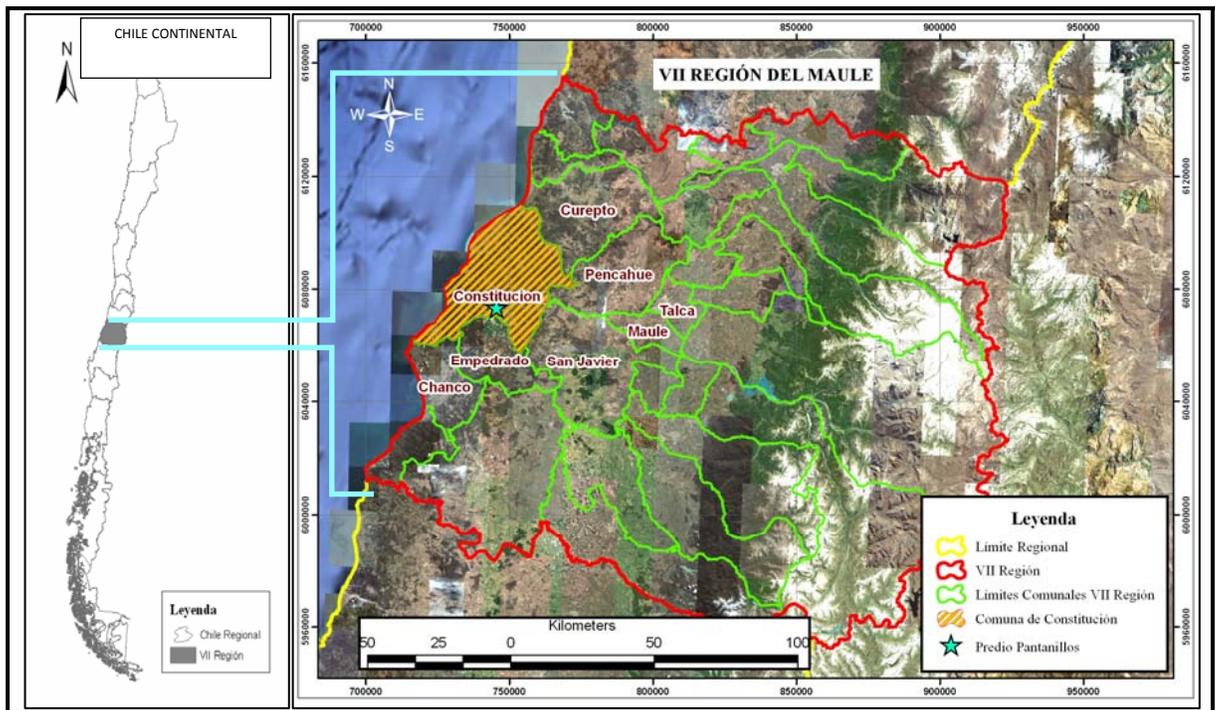


Figura 1. Ubicación de Predio Pantanillos.

2.1.2 Clima

Santibáñez y Uribe (1993) describen la zona de estudio con un régimen térmico cuyas temperaturas varían entre una máxima promedio de 24,7°C en enero y una mínima promedio en julio de 6,3°C. Posee una precipitación media anual de 926 mm, con un déficit hídrico anual de 788 mm. Tiene un período seco que se prolonga por seis meses. En cuanto a la humedad relativa, su valor mínimo es en enero con 70%, y con un promedio anual de 78%.

2.1.3 Suelo y geología

El predio está inserto en la serie de suelo Constitución, que es un complejo metamórfico granítico. El suelo del predio según su capacidad de uso, está clasificado como de Aptitud Preferentemente Forestal, Clase VII. Según Peralta (1976), en esta zona se encuentran antepuestos a los materiales granitoídeos, cordones de materiales que forman un complejo metamórfico, que constituyen los suelos llamados Asociación de suelos Pocillas.

Dentro de sus características, cabe señalar que el suelo tiene una textura franco limosa y un pH levemente ácido.

En cuanto a la erosión en el predio, se puede encontrar erosión de manto severa, con zanjas frecuentes y derrumbes ocasionales en las orillas de la carretera, de los caminos internos y en sectores de muy poca vegetación. En sectores con buena cobertura vegetal la erosión es no aparente y en aquellos con poca vegetación es del tipo ligera a moderada, principalmente en el entorno a las instalaciones del Centro Experimental, el cual posee poca vegetación y es de uso intensivo (Reyes, 1988; Márquez, 1992).

2.1.4 Topografía

Según Márquez (1992), el predio se encuentra conformado por dos cordones de la Cordillera de la Costa, ambos de orientación Norte-Sur. Su topografía es variada y posee terrenos planos en los sectores altos de los cordones, así como en los sectores bajos que rodean a la entrada principal del predio y al Norte de la carretera San Javier-Constitución que lo atraviesa. Las pendientes fluctúan entre 0% y más de 40% y en algunos sectores próximos a los límites Oeste y Este, superan al 100%. En cuanto a las exposiciones predominan las Este, Oeste y Norte.

2.1.5 Vegetación

El predio se encuentra cubierto principalmente por plantaciones de *Pinus radiata* D. Don y en menor medida por ensayos de especies del género *Eucalyptus*. También existen sectores de bosque nativo en donde predomina la especie *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser. Según Gajardo (1994), la vegetación nativa de la zona corresponde al Bosque Caducifolio Maulino con una asociación hualo-maquicillo.

2.1.6 Situaciones boscosas a estudiar

Para la realización de los experimentos se identificaron cuatro situaciones de cobertura forestal (figuras 2 y 3):

- Renoval de Hualo (**T1**), que fue intervenido hace aproximadamente 30 años para la producción de leña y carbón, y que actualmente poseen una altura de 5 m y una cobertura de 60-70%.

- Plantación de pino insigne realizada el año 1996 (**T2**), de aproximadamente 10 años al momento de los ensayos de terreno. Presenta un área basal de $32 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$, con un espaciamiento de $2 \times 3 \text{ m}$ y presencia de sotobosque.
- Plantación de pino insigne realizada en 1986 (**T3**), de aproximadamente 20 años al momento de los ensayos de terreno. Presenta un área basal de $25 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$, con un espaciamiento de $4 \times 3 \text{ m}$ y presencia de sotobosque.
- Situación de quema de residuos post-cosecha (**T4**) (plantación de pino insigne plantada en 1981 y cosechada en 2005).

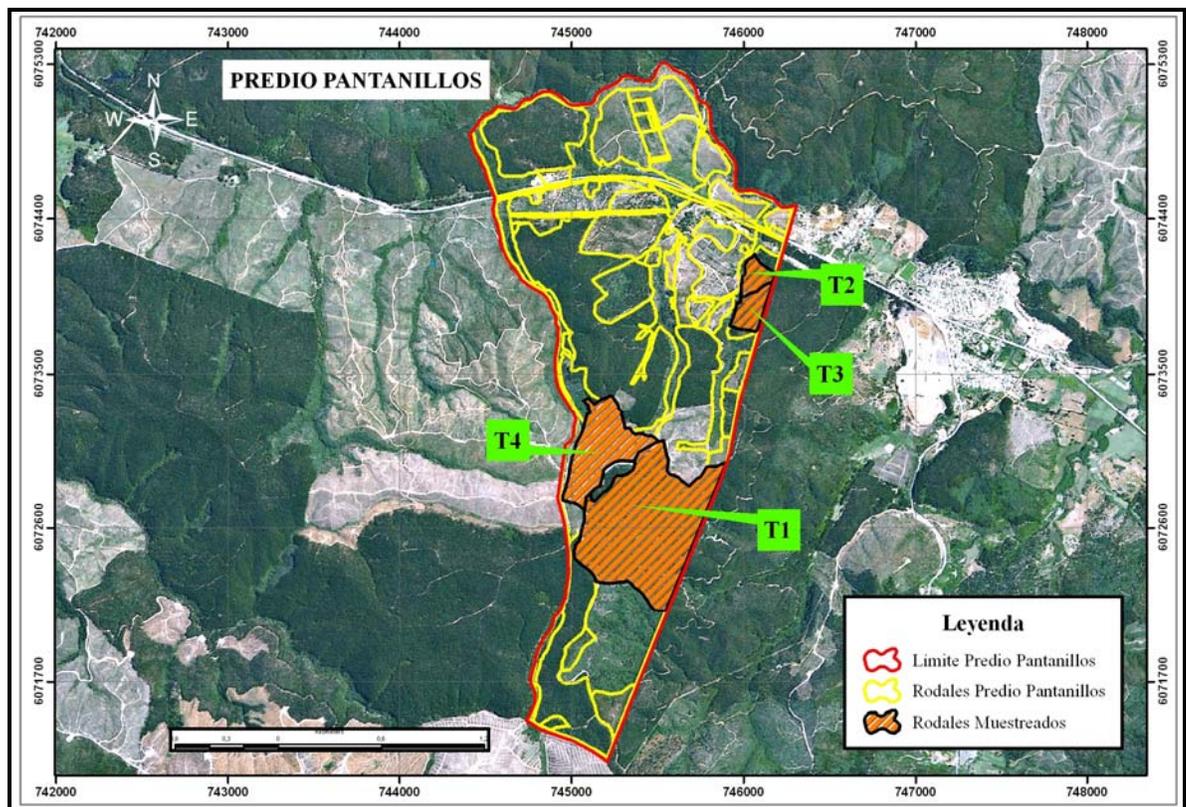


Figura 2. Ubicación de los rodales de muestreo al interior del Predio Pantanillos.



Figura 3. Vista general de los lugares de muestreo.

2.2 Método

2.2.1 Diseño y características de las parcelas de escurrimiento

Se diseñó un sistema especial de parcela de escurrimiento, que posee un área útil de $0,075 \text{ m}^2$ ($30 \times 25 \text{ cm}$) y consistente en dos láminas rígidas de acero unidas en su parte superior por dos barras de metal (Figura 4). Se seleccionó este diseño ya que Lei *et al.* (2002) y Lei *et al.* (2008), demostraron experimentalmente que parcelas de escurrimiento muy largas aportan una muy pobre estimación de las tasas de remoción de partículas y que el incremento en la concentración de sedimentos removidos por un flujo de agua decrece exponencialmente a lo largo de un canal. Además, Huang *et al.* (1996a), señalan que un canal corto es necesario para determinación de tasas de remoción. Basado en lo anterior, para la realización del experimento, se diseñó un sistema especial de parcela de escurrimiento, que posee un área útil de $0,075 \text{ m}^2$ ($30 \times 25 \text{ cm}$) y consistente en dos láminas rígidas de acero unidas en su parte superior por dos barras rígidas de metal (figura 4).

La sección trasera de la parcela consiste en una caja de metal removible, correspondiente al ancho de la parcela, con una tapa perforada en la parte superior para el abastecimiento de agua y con una ranura en la parte inferior para la salida de agua. En su interior se instaló un

tubo de PVC, sellado en sus extremos y que posee orificios continuos por los cuales se hizo pasar agua hacia la sección de salida de la caja (Figura 4 C), y con un orificio mayor en su parte superior donde se unió a la manguera alimentadora (Figura 4 D). Dentro de la caja y envolviendo el tubo de PVC se dispuso una esponja, con una sección saliente por la ranura, a fin de facilitar una salida lenta y uniforme de agua hacia la parte útil de la parcela (Figura 4).

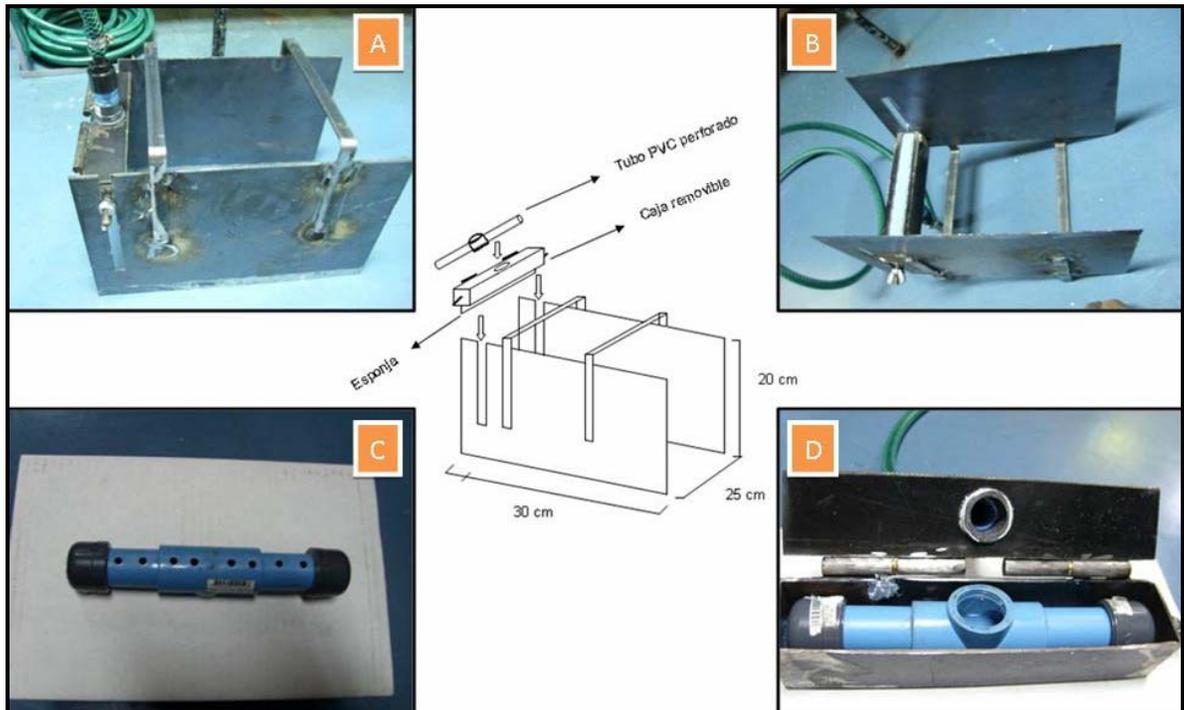


Figura 4. Diseño de la Parcela de Escorrimento. Vista superior de la parcela de escurrimento (A), vista inferior de la parcela de escurrimento (B), tubo perforado vista inferior (C), tubo perforado vista superior donde se conecta a la manguera alimentadora (D).

Como contenedores de agua se utilizaron dos tubos de PVC (Figura 6), con un volumen conjunto aproximado de 40 L. Ambos tubos se conectaron a la manguera principal mediante una unión plástica (Figura 5 A).

Se dispuso de un medidor de flujo anexo, ubicado entre los contenedores y la parcela de escurrimento a través de una manguera de alimentación, y mediante una llave de paso que permitió medir y regular el monto de agua aplicado (Figura 5 B y C y Figura 6). Por otra parte, la sección delantera de la parcela estaba abierta, de tal manera de facilitar la salida del agua incorporada en ella (Figura 6).

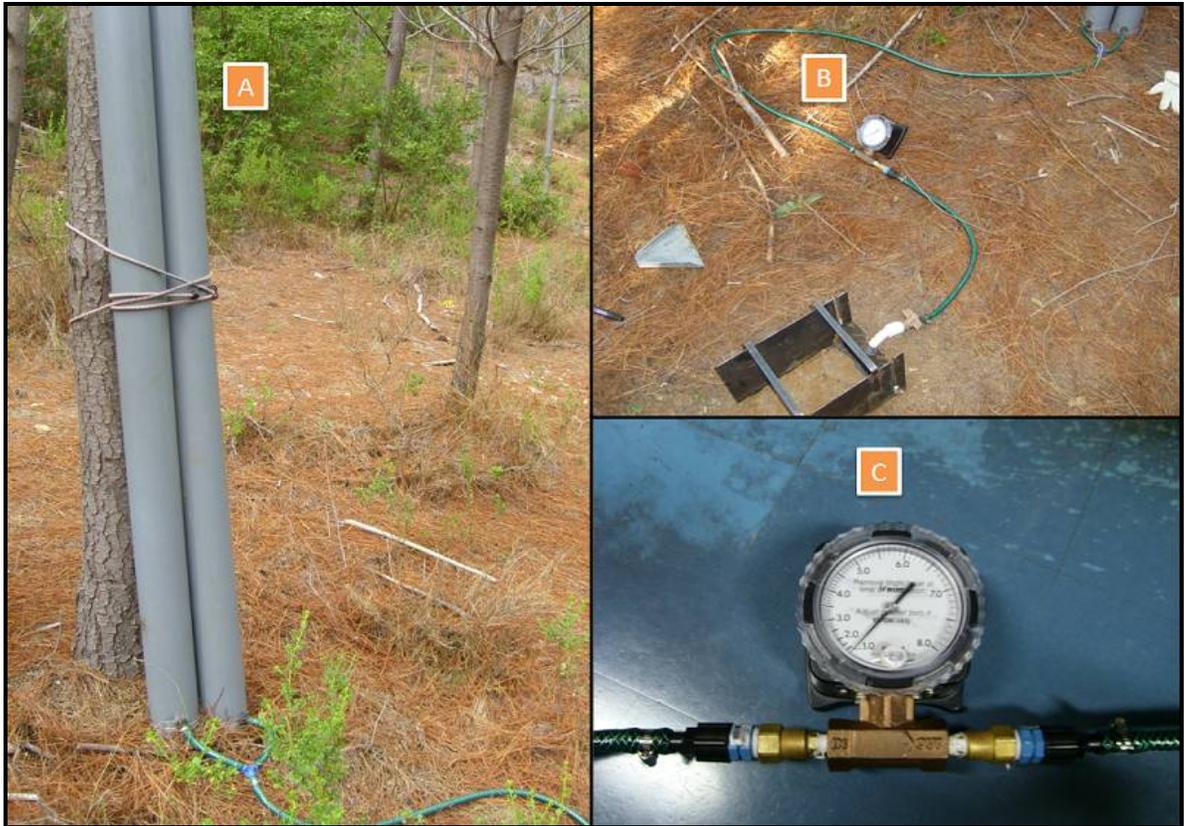


Figura 5. Contenedores de agua (A), manguera de alimentación (B) y medidor de flujo (C).

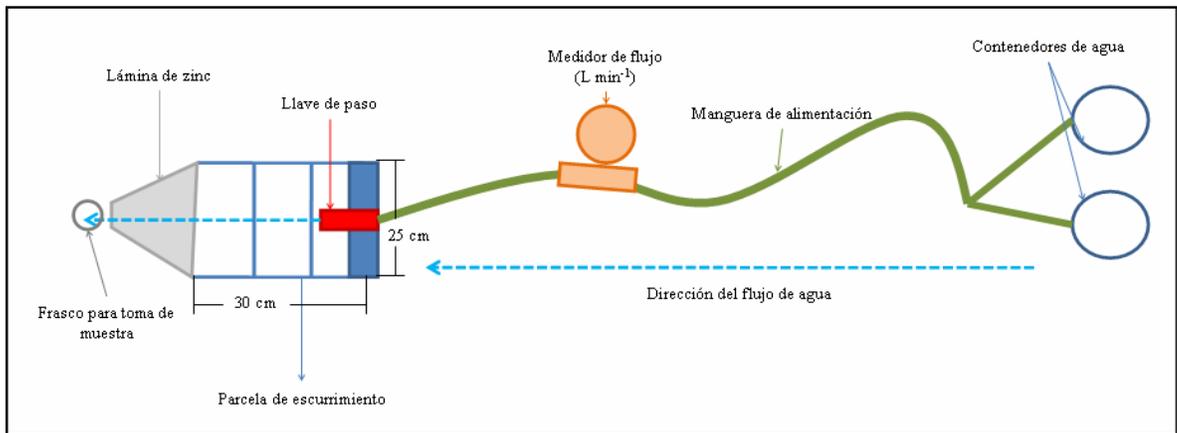


Figura 6. Esquema de la instalación de la parcela en terreno, vista de planta.

2.2.2 Determinación del sector de muestreo y establecimiento de la parcela en terreno

Dentro de cada una de las situaciones antes mencionadas, los sectores puntuales en donde se realizaron los experimentos debieron tener como mínimo una superficie de $0,5 \text{ m}^2$, ser homogéneos y representativos de la situación en estudio. Además, debían tener una pendiente de entre el 10 y 20%, favoreciendo el escurrimiento superficial en forma

moderada. La sección longitudinal de la superficie de suelo era lo menos rugosa posible, evitando la concentración local excesiva del flujo de agua que se aplicaba.

Dado que la determinación del estrés hidráulico considera sólo el efecto del agua de escorrentía sobre la partículas de suelo mineral, se realizó una limpieza del sector donde se dispuso la parcela, correspondiente a la remoción de los residuos no degradados (trozos de madera, corteza, hojarasca u otro residuo), a fin de no entorpecer la visualización del movimiento incipiente de partículas del suelo, verificando que el experimento se desarrollará efectivamente sobre el suelo mineral.

La parcela se empleó para delimitar el área de terreno útil donde se aplicó el flujo artificial. Para ello, los bordes afilados de las láminas se introdujeron unos 10 cm o hasta donde las características del suelo lo permitieron (Figura 7 A).

Posteriormente, la manguera se conectó a la cañería de distribución, dando paso al flujo de agua regulado por la llave de paso (Figura 6).

2.2.3 Toma de muestras

Previo a realizar cada experimento, se realizó una toma de muestra de suelo en la zona inmediata al lugar del experimento. Experiencias anteriores indican que son los primeros centímetros de suelo los importantes en la determinación del estrés crítico de corte hidráulico (Wynn, 2007). El muestreo consistió en la determinación del contenido de agua del suelo en los primeros 10 cm de profundidad. Asimismo, la densidad aparente ha sido considerada como importante, por lo cual también se determinó, mediante el método del cilindro, a partir de muestras colectadas. Para la toma de muestras se utilizó un cilindro metálico de volumen conocido (3,9 x 5,4 cm), con borde afilado para lograr penetrar en el suelo. Una vez extraída la muestra, esta se selló herméticamente en bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad. Adicionalmente, y para contrastar los estrés críticos, los porcentajes de arcilla y arenas muy finas fueron determinados mediante análisis textural de laboratorio.

2.2.4 Desarrollo del experimento

Inicialmente, se aplicó un flujo mínimo, correspondiente a 1 L min^{-1} , el cual se mantuvo por aproximadamente 3 a 5 minutos, tiempo que obedecía a la concentración del flujo en la sección de terreno delimitada por la parcela. De esta manera, fueron removidas las partículas del suelo que estaban sueltas previo al ensayo, tanto en la sección útil de la parcela como en la salida. Posteriormente, el flujo fue aumentado en $0,5 \text{ L min}^{-1}$ cada 3 minutos, hasta obtener una visión clara² de que el estrés crítico de corte había sido alcanzado (Figura 7 B).

Se tomaron tres muestras de efluente en la salida de la parcela justo antes del cambio de flujo (Figura 7 C): la primera correspondió al primer movimiento de partículas observado;

² Se entenderá como visión clara de que el estrés crítico se ha alcanzado a aquel momento en el cual se observa un movimiento evidente y masivo de partículas del suelo.

el segundo, al movimiento evidente de las partículas del suelo; y la última, al transporte masivo de partículas del suelo. Se registró también la altura de la lámina de agua, dato necesario para el cálculo de los estreses críticos, a través de un trozo de huincha de medir adosado a la pared interna de la parcela de escurrimiento,

Se colectaron las muestras de flujo antes de variar la descarga. Para la colecta del efluente se utilizó una lámina de zinc en forma de pala (Figura 6 y Figura 7 C), la cual se dispuso al final de la parcela, con una sección mayor correspondiente al ancho de la parcela y una sección menor correspondiente al ancho de la boca de los frascos donde se colectó el efluente para el análisis posterior. Estos frascos, de 0,5 L de capacidad, se dispusieron en la salida de la lámina de zinc y una vez colectada la muestra, se rotularon, almacenaron y trasladaron al laboratorio, en donde se determinó la concentración de partículas de suelo.

Se concibió el experimento con cuatro tratamientos y diez repeticiones cada uno. En cada repetición se tomaron tres muestras de efluente.

2.2.5 Análisis de laboratorio

Los análisis de las muestras se realizaron en el Laboratorio de Suelos Ventura Matte, del Departamento de Silvicultura de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile.

2.2.5.1 Determinación de la densidad aparente y contenido de humedad

La determinación de la densidad aparente se efectuó calculando el cociente entre peso seco de la muestra y el volumen de suelo extraído al momento de realizado los análisis.

Una vez en el laboratorio se procedió a medir el peso de la muestra en húmedo, para su posterior secado en estufa a 105°C durante 24 hrs. El contenido de humedad se realizó por pérdidas de humedad reflejadas en la medición del peso antes y posterior al secado en estufa (Oyanedel, 1992; Sadzawka *et al.*, 2006).



Figura 7. Instalación de la parcela de escurrimiento (A) y desarrollo de experimento (B y C).

2.2.5.2 Determinación de la clase textural y contenido de materia orgánica

La determinación de la clase textural se realizó mediante el método de la pipeta de Kohn (Según sistema U.S.D.A.; Oyanedel, 1992; Sadzawka *et al.*, 2006). Este procedimiento entrega los valores de porcentaje de arena muy fina y arcillas, necesarios para obtener el valor del estrés crítico de corte según el modelo WEPP.

2.2.5.3 Determinación de la concentración de partículas

Las muestras de efluentes fueron vaciadas, en forma independiente, en probetas graduadas de precisión 0,5 mL, a fin de determinar el volumen colectado. Posterior a esto, el efluente fue vaciado en recipientes de aluminio, los cuales se introdujeron en la estufa de secado para evaporar el agua y obtener sólo el material arrastrado. Una vez evaporada el agua, los recipientes se pesaron y obtuvieron los pesos de los sedimentos transportados mediante sustracción con el peso del recipiente de aluminio.

El cociente entre ambos valores obtenidos, peso de los sedimentos arrastrados y volumen de efluente colectado, entrega la concentración de partículas (g L^{-1}) arrastradas por el escurrimiento superficial.

2.2.6 Análisis de datos

2.2.6.1 Determinación de estrés crítico de corte hidráulico mediante metodología de observación

La técnica de observación considera que el estrés crítico de corte ocurre cuando la remoción de partículas se hace evidente a la visual, teniendo como único sesgo la necesidad de estandarizar los criterios de apreciación. En dicho momento, se registró la profundidad

del flujo en cada uno de los experimentos. Así, para las repeticiones de los cuatro tratamientos en estudio, el estrés crítico de corte, se determinó a través de la ecuación (3).

Los respectivos valores obtenidos de cada repetición fueron promediados, obteniéndose así un valor representativo por cada tratamiento. Asimismo, se presentan los resultados como valores medios más un rango de variación, dado que el estrés crítico de corte puede también representarse como una probabilidad (Nearing, 1991).

Los resultados obtenidos en el análisis derivan de un rango de valores de estrés crítico. Es por esto que en los resultados se presenta un cuadro en el que se detallan dichos rangos, para cada uno de los tratamientos estudiados.

2.2.6.2 Análisis estadístico

Posteriormente, con el fin de determinar la existencia de diferencias entre los valores medios de estrés crítico de corte, se efectuó una comparación múltiple de medias a través de un análisis de varianza para un diseño completamente al azar y posteriormente las pruebas de Tukey y de Holm-Sidak entre las situaciones previstas, con un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0,05$).

2.2.6.3 Comparación de valores obtenidos mediante observación con los obtenidos mediante curvas de regresión, modelo WEPP y modelos de Mancilla (2004)

Se realizó un ajuste de curva de regresión, con los valores obtenidos en las diez repeticiones de estrés hidráulico, entre los estrés de corte (como variable independiente en la abscisa) y la tasa de remoción de partículas (como variable dependiente, en la ordenada), de cada una de las cuatro situaciones que se estudiaron.

Además, los valores obtenidos de arcilla y arena muy fina y, densidad aparente en los análisis de laboratorio, se introdujeron a los modelos presentados por el modelo WEPP (ecuación 3) y Mancilla (2004) (ecuación 4), respectivamente. Estos valores se compararon con los obtenidos por medio de observación.

Todos los análisis se realizaron con las herramientas estadísticas que proporciona el programa MS-EXCEL.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de valores de estrés crítico de corte mediante metodología de observación

Luego del análisis de laboratorio y procesamiento de los datos, se obtuvo los siguientes valores para la determinación del estrés crítico de corte determinado, a través del método de observación:

Cuadro 1. Valores de Estrés Crítico de Corte Hidráulico

Tratamiento	Estrés crítico mediante método de observación (Pascales)	Rango estrés crítico promedio		Desviación estándar
		Mínimo	Máximo	
T1 Renoval de hualo	2,66	2,49	4,15	0,35
T2 Plantación 10 años	2,54	1,90	5,08	0,52
T3 Plantación 20 años	2,76	2,34	5,28	0,48
T4 Cosecha con quema de residuos	1,91	0,73	3,71	0,63

De los resultados, es posible apreciar que el valor más alto de resistencia a la remoción de partículas del suelo corresponde a la plantación de pino de 20 años y muy cercano a este valor, la situación de renoval de hualo. Estos resultados son los esperados, dado que las situaciones mencionadas no muestran perturbaciones recientes y por lo tanto presentan una mayor probabilidad de agregación de las partículas de suelo, además de una mejor integración de la materia orgánica al sustrato mineral. Además, la cobertura del dosel, entre un 75% y 100%, evita el efecto de golpe de la gota lluvia.

Estos efectos se ven reflejados de igual manera en T2, en que el valor de estrés crítico de corte no se encuentra tan alejado del resultado obtenido en T1 y T3.

El menor valor se presenta en T4, correspondiente a la superficie cosechada con posterior quema de residuos. Este resultado es el esperado, ya que se presenta dicha perturbación reciente, provocando la pérdida de coloides orgánicos del suelo, una desestructuración de éstos y pérdida de suelo por efecto de la gota de lluvia y escorrentía superficial de las precipitaciones.

Respecto a lo anterior Pritchett (1986) y Hatten *et al.* (2005), señalan que los materiales calcinados y las cenizas pueden aumentar las pérdidas de material edáfico por escurrimiento superficial, además de filtrarse hacia el suelo mineral en los campos quemados y reducir la porosidad y por ende la tasa de infiltración de agua. La recuperación natural de la porosidad puede tardar una década o más (Pritchett, 1986). Además, el fuego puede reducir de manera importante las capacidades de absorción y retención del agua, pudiendo formarse suelos hidrófobos a partir de sustancias evaporadas durante la quema de

capas de hojarasca superficial sobre suelos (Pritchett, 1986), lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Hatten *et al.* (2005) y Hubbert *et al.* (2006).

Si el levantamiento de la información se hubiese realizado en un período cercano a la cosecha, el valor del estrés crítico de corte debiese haber sido más bajo. Respecto a esto Pritchett (1986) señala que en las zonas que quedan desnudas existen altas tasas iniciales de producción de sedimentos que disminuyen con rapidez. A pesar de lo anterior, en T4 el escurrimiento superficial necesita aplicar una menor fuerza para remover las partículas del suelo que en los otros tratamientos.

Para poder apreciar de mejor forma la variación del estrés crítico, el cuadro 1 expone los rangos encontrados experimentalmente.

Como se mencionó, el estrés crítico de corte hidráulico varía tanto espacial como temporalmente dentro de una misma situación o, en este caso, tratamiento. Respecto a esto es posible observar en el Cuadro 1, que el rango más estrecho de estrés crítico de corte se presenta en la situación de renoval de hualo (T1), resultado que se debe principalmente a lo homogéneo de la superficie donde se realizaron los experimentos, y a que no existió evidencia de intervenciones recientes.

En el tratamiento correspondiente a la plantación de 10 años, se presenta el rango más amplio, situación que posiblemente se vio afectada por las intervenciones recientes de manejo, correspondiente a poda y raleo, que provocaron una alteración de la superficie del suelo.

El rodal de plantación de pino de 10 años (T2) se encuentra contiguo a la plantación de pino de 20 años (Figura 2), concordante con lo presentado en el Cuadro 1, presentando rangos similares.

Los rangos de valores obtenidos concuerdan con los presentados por Morrison *et al.* (1994), Norton y Brown (1992) y West *et al.* (1992) los cuales varían entre 0 a 5 (Pa), 0 a 6 (Pa) y 0 a 7 (Pa) respectivamente, pero en suelos con cultivos agrícolas, con modelos matemáticos entre ellos el modelo WEPP y utilizando condiciones similares de muestreo (muestreo *in situ* y remoción de residuos de la superficie del suelo).

3.1.1 Análisis estadístico

El análisis de varianza realizado para un diseño completamente al azar (apéndice 1), indicó que existen diferencias significativas entre los distintos tratamientos en estudio, para un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0,05$).

A través del test de Tukey se comprobó estadísticamente que existe diferencia significativa entre el tratamiento de quema de residuos post cosecha (T4), respecto al los otros tratamientos. Según el test de Tukey no existiría evidencia estadística para señalar que existen diferencias significativas entre los tratamientos T1, T2 y T3 (apéndice 1).

3.2 Comparación de valores obtenidos mediante observación con los obtenidos mediante curvas de regresión, modelo WEPP y modelos de Mancilla (2004)

Los pasos que se llevaron a cabo para la toma de datos, fue la verificación del momento en que se producía el movimiento de partículas, instante en el cual se tomó una muestra de efluente con sedimentos. El procedimiento de toma de muestra se repitió para un movimiento evidente de partículas y posteriormente, cuando se evidenció un movimiento masivo de partículas. Con estas tres muestras se estimó la concentración de sedimentos, variable dependiente para el ajuste de regresión.

A través de la técnica de regresión (Figura 8), e ingresando los datos obtenidos por análisis de laboratorios, en los modelos WEPP y Mancilla (2004), se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estrés crítico de corte para los tratamientos obtenidos mediante curvas de regresión, modelo WEPP y modelo de Mancilla (2004)

Tratamiento	Estrés crítico por regresión (Pascuales)	Estrés crítico según modelo WEPP (Pascuales)	Estrés crítico según Mancilla (2004) (Pascuales)
T1 Renoval de Hualo	2,49	2,84	0,24
T2 Plantación 10 años	0,92	3,29	0,46
T3 Plantación 20 años	1,39	1,79	0,86
T4 Cosecha con quema de residuos	0,61	3,41	1,29

Si observamos los cuadros 1 y 2, es posible advertir que los valores que arrojó el modelo lineal de regresión, si bien no presentan una tendencia similar en los valores más altos (T1 y T3) respecto a los obtenidos por el método de observación, si lo hacen los valores más bajos (T2 y T4). No así los modelos de WEPP y de Mancilla (2004).

El método de regresión, si bien puede arrojar valores que carecen de validez física (valores negativos), en el presente estudio no ocurre dicho fenómeno. Sin embargo, son valores menores a los obtenidos por el método de observación. Por otra parte, al observar los valores de correlación lineal presentes en la Figura 8, queda de manifiesto la baja relación existente entre la concentración de sedimentos y el estrés crítico de corte, al realizar la estimación a través de regresión lineal, y por lo tanto la pobre estimación respecto a esta variable independiente.

Huang *et al.* (1996b) y Hubbert *et al.* (2006) señalan un aumento en la densidad aparente post-cosecha y post-quema, respectivamente, concordante con los resultados que se obtuvieron de los análisis de las muestras de suelo, arrojando un mayor valor de la densidad aparente en T4, correspondiente a cosecha con quema de residuos (Cuadro 3). Confirmando lo anteriormente expuesto, Pritchett (1986) señala que las tasas de porosidad e infiltración disminuyen y la densidad volumétrica aumenta después de los incendios.

Cuadro 3. Textura, contenido de arcilla, contenido de arena muy fina y densidad aparente de los suelos de cada uno de los tratamientos

Tratamiento	Clase Textural	Contenido de Arcilla (%)	Contenido de Arena Muy Fina (%)	Densidad Aparente (Ton m⁻³)
T1 Renoval de Hualo	Franco	24,44	24,43	0,85
T2 Plantación 10 años	Franco arenoso	18,34	9,75	1,01
T3 Plantación 20 años	Franco arenoso	18,48	35,95	1,17
T4 Cosecha con quema de residuos	Franco areno arcilloso	26,64	17,08	1,27

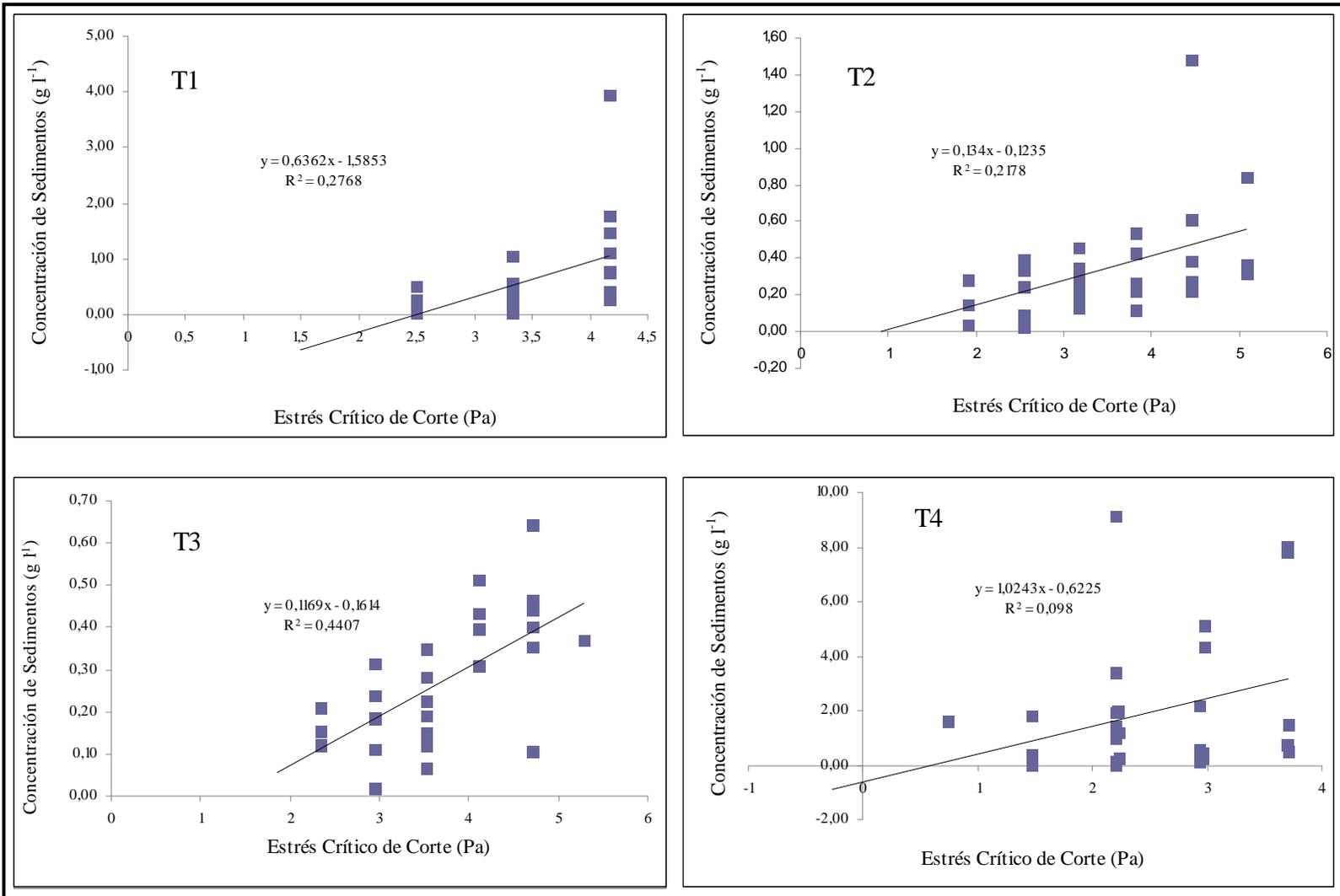


Figura 8. Curvas de regresión para determinación de estrés crítico de corte hidráulico.

Elliot *et al.* (1989), Gilley *et al.* (1993) y Alberts *et al.* (1995) citados por Knapen *et al.* (2007), utilizando el modelo WEPP, obtuvieron que el valor de estrés crítico corte disminuye a medida que aumenta el contenido de arena muy fina en el suelo, resultado que avala los obtenidos en el presente estudio (cuadros 3 y 4). Sin embargo, los mismos autores, señalan que el estrés crítico de corte se incrementa con el aumento del contenido de arcilla, utilizando el modelo WEPP. Esta información contrasta parcialmente con los resultados obtenidos en este estudio, el cual arrojó valores más altos de estrés crítico de corte, para el mismo modelo, en T2 y T4, presentándose los valores más altos de contenido de arcilla en T1 y T4 (Cuadro 3).

Según lo señalado por Ulery y Graham (1993), y Ketterings *et al.* (2000), al aumentar la temperatura por sobre los 300°C, se afecta la textura del suelo al hacer decrecer gradualmente el contenido en arcilla. A partir de esta temperatura decrece proporcionalmente el contenido en arcilla a la par que aumenta el de arena (Espejo *et al.*, 2001). La situación antes mencionada no se ve reflejada en el presente estudio ya que la textura, en cuanto a contenido de arcilla y arena total son muy similares entre T1 (renoval de hualo), y T4 (quema de residuos post-cosecha), en que los porcentajes de arcilla son de 24,4% y 26,6% y arena de 40,92% y 45,65%, respectivamente.

Los valores obtenidos a través del modelo WEPP y de Mancilla (2004), al ingresar los datos de densidad aparente, y los valores de arcilla y arena muy fina, son muy distintos a los registrados por el método de observación y de regresión. Estas diferencias pueden deberse a que los experimentos, para el desarrollo de estos modelos se realizaron en suelos con características y condiciones distintas a los que se muestrearon; no debe obviarse además, que según lo señalado por Sheridan *et al.* (2000) y Knapen *et al.* (2007), el estrés crítico de corte es variable tanto espacial como temporal en una superficie determinada. Asimismo, debe recordarse que el experimento desarrollado se realizó en suelos altamente erosionados, y por ende altos en pedregosidad superficial y subsuperficial, son suelos en que el Horizonte A se ha perdido por erosión y que actualmente se caracterizan por presentar una acumulación de materia orgánica sobre un sustrato intemperizado (Horizonte C).

4. CONCLUSIONES

De la investigación realizada es posible concluir que:

- Existe evidencia estadística para afirmar que el estrés crítico de corte hidráulico es menor en el área donde se realizó quema de residuos posterior a la cosecha, respecto a áreas con vegetación arbórea y plantaciones de 10 y 20 años.
- En el tratamiento correspondiente a quema de residuos post cosecha, se expone el suelo a los efectos erosivos de las precipitaciones, principalmente al escurrimiento superficial, lo cual ocasiona menor estabilidad en los agregados de suelo.
- El método de observación, para el presente estudio, arroja resultados esperados: un menor valor de estrés crítico de corte hidráulico para la situación de quema de residuos post-cosecha y un mayor valor para las situaciones de plantación de pino de 20 años y renoval de hualo.
- El método de regresión, si bien no entrega los mismos resultados, muestra un comportamiento similar, y por lo tanto, para este estudio es válido como método de comparación entre tratamientos.
- Los valores obtenidos por los modelos WEPP y de Mancilla (2004), no muestran un comportamiento similar a los valores críticos obtenidos por simple método de observación, y por lo tanto no serían válidos para las situaciones estudiadas. Al respecto, se hace imperativo una mayor investigación acerca de las características de los suelos forestales que se relacionan a la modelación de erosión.
- La existencia de una heterogeneidad de métodos de medición, para la determinación del estrés crítico de corte hidráulico, dificulta las comparaciones entre los valores obtenidos en diferentes estudios. A pesar de lo anterior, los resultados obtenidos por el método de observación, si bien puede presentar más posibilidades de error presentan una tendencia similar a los entregados en la bibliografía.
- Es importante señalar que existen otros factores, que para el caso del presente estudio, no se determinaron, y que pueden haber afectado los resultados obtenidos, por ejemplo el contenido de materia orgánica.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ELLIOT, W., LIEBENOW, A., LAFLEN, J., Y KOHL, K. 1989.** A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland field erodability experiments 1987 & 88. NSREL Report No. 3. The Ohio State University & USDA Agricultural Research Service.
- ESPEJO, R., GÓMEZ, V. Y PÉREZ, C. 2001.** The impact of shifting agriculture on soil erodability in toposequences of Northeastern Mozambique. En: Conservation Agriculture: EA World Challenge, I. García, J. and A. Martínez, V. (eds). I World Congress on Conservation Agriculture. Vol II 261-265.
- GAJARDO, R. 1994.** La Vegetación Natural de Chile: Clasificación y Distribución Geográfica. Editorial Universitaria. Santiago. 166 p.
- GHEBREIYESSUS, Y., GANTZER, C., ALBERTS, E. Y LENTZ, R. 1994.** Soil erosion by concentrated flow: Shear stress and bulk density. Transactions of the ASAE, 37(6): 1791-1797.
- GILLEY, J., ELLIOT, W., LAFLEN, J. Y SIMANTON, J. 1993.** Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. Journal of Hydrology, 142 (1993): 251-271.
- HANSON, G. Y COOK, K. 2004.** Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. Applied Engineering in Agriculture, 20 (4):455-462.
- HATTEN, J., ZABOWSKI, D., SCHERER, G. Y DOLAN, E. 2005.** A comparison of soil properties after contemporary wildfire and fire suppression. Forest Ecology and Management, 220 (2005): 227-241.
- HENDERSON, M. 2006.** Changes in streambank erodability and critical shear stress due to surface subaerial processes. Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science In Biological Systems Engineering. Blacksburg, VA. USA. 92 p.
- HUANG, C., BRADFORD, M. Y LAFLEN, J. 1996a.** Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. Soil Science Society of American Journal, 60: 734-739.
- HUANG, C., LACEY, S. Y RYAN, P. 1996b.** Impact of forest harvesting on the hydraulic properties of surface soil. Soil Science. 161: 79-86.
- HUBBERT, K., PREISLER, H., WOHLGEMUTH, P., GRAHAM, R. Y NAROG, M. 2006.** Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. Geoderma, 130 (2006): 284-298.

- IBARRA, M Y MANCILLA, G.** 1995. Relación entre variables pluviográficas y erosión bajo tres cubiertas arbóreas. *Ciencias Forestales*, 10 (1-2): 159-166.
- KETTERINGS, Q., BIGHAM, J. Y LAPERCHE, V.** 2000. Change in soil mineralogy and texture caused by slashand burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* 64:1108-1117.
- KNAPEN, A., POESEN, J., GOVERS, G., GYSSELS, G. Y NACHTERGAELE, J.** 2006. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. *Earth-Science Review*, 80: 75-109.
- LÉONARD, J. Y RICHARD, G.** 2004. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 57 (2004): 233 – 249.
- LEI, T., ZHANG, Q., ZHAO, J., XIA,W. Y PAN, Y.** 2002. Soil detachment rates for sediment loaded flow in rill. *Transactions of ASAE*, 45 (6): 1897-1903.
- LEI, T., ZHANG, Q., ZHAO, J., XIA,W. Y PAN, Y.** 2008. A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma*, 144: 628-633.
- MANCILLA, G.** 2004. Critical shear stress and rill sediment transport capacity of Palouse soil. Ph.D. Dissertation. Washington State University, College of Engineering and Architecture. 141 p.
- MÁRQUEZ, O.** 1992. Bases para la formulación de un plan de desarrollo en los predios experimentales “Las Brisas” y “Pantaniillos”, VII Región. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Escuela de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 76 p.
- MORGAN, R.** 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa. Madrid. 343 p.
- MORRISON, J., RICHARDSON, C., LAFLÉN, J. Y ELLIOTT, W.** 1994. Rill erosion of a Vertisol with extended time since tillage. *Transactions of the ASAE*, 37 (4): 1187-1196.
- NACHTERGAELE, J. Y POESEN, J.** 2002. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. *European Journal of Soil Science*, 53: 449–463.
- NEARING, M., FOSTER, G., LANE, L. Y FINKNER, S.** 1989. A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE*, 32 (5): 1587-1593.
- NEARING, M.** 1991. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow. *Transactions of the ASAE*, 34 (1): 81-85.

- NORTON, L. Y BROWN, L.** 1992. Time-effect on water erosion for ridge tillage. Transaction of de ASAE, 35 (2): 473-478.
- OYANEDEL, N.** 1992. Métodos de análisis de suelos. Apuntes docentes N°5. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, Santiago. 129 p.
- PERALTA, M.** 1976. Uso, Clasificación y Conservación de Suelos. Servicio Agrícola y Ganadero. 340 p.
- PRITCHETT, W.** 1986. Suelos Forestales. Edit. Limusa. México, D.F. 634 p.
- REYES, J.** 1988. Alternativas de implementación básica en las cuencas experimentales del predio “Pantanillos”, VII Región. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Escuela de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 76 p.
- SADZAWKA, A., CARRASCO, M., GREZ, R., MORA, M., FLORES, H. Y NEAMAN, A.** 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago, Chile. 164 p.
- SANTIBÁÑEZ, F. Y URIBE, J.** 1993. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones VI, VII, VIII y IX región. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago. 65 p.
- SERRANO, R., MIGUEL, V., ALONSO, F., WONDAFRASH, T., Y BARRA, C..** 2001. Estimating the Impact of Vegetation Burning on Soil Morphology in the Plateaus of Northeastern Mozambique Via A Laboratory Test. Soil Science Society of America Journal 68: 576-584.
- SHERIDAN, G., SO, H., LOCH, R. Y WALKER, C.** 2000. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. Australian Journal of Soil Research 38: 256–284.
- STALLINGS, J.** 1969. El suelo: Su uso y Mejoramiento. Editorial Continental S. A., México. 480 p.
- ULERY, A. Y GRAHAM, R.** 1993. Forest fire effects on soil color and texture. Soil Science Society of America Journal 57:135-140.
- WEST, L., MILLER, W., BRUCE, R., LANGDALE, G., LAFLEN, J.Y THOMAS, A.** 1992. Cropping system and consolidation effects on rill erosion in the Georgia Piedmont. Soil Science Society of America Journal 56: 1238–1243.
- WISCHMEIER, W Y SMITH, D.** 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. Washington, D.C., United States of America. 58 p.

- WYNN, T. Y MOSTAGHIMI, S.** 2006. The effects of vegetation and soil type on streambank erosion, Southwestern Virginia, USA. *Journal of the American Water Resources Association* 42: 69-82.
- WYNN, T., HENDERSON, M. Y VAUGHAN, D.** 2007. Changes in streambank erodibility and critical shear stress due to subaerial process along a headwater stream, Southwestern Virginia, USA. *Geomorphology*, 97 : 260-273
- ZHU, J., GANTZER, C., ANDERSON, S., PEYTON, R. y ALBERTS, E.** 2001. Comparison of concentrated-flow detachment equations for low shear stress. *Soil & Tillage Research*, 61: 203-212.

APÉNDICES

Apéndice 1

Cuadro A. Análisis de varianza de valores de Estrés Crítico de Corte Hidráulico mediante observación

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4,32630948	3	1,44210316	5,666272	0,002761807	2,866265557
Dentro de los grupos	9,16223445	36	0,25450651			
Total	13,4885439	39				

Cuadro B. Prueba de Tukey para valores de Estrés Crítico de Corte Hidráulico mediante observación ($\alpha=0,05$)

Diferencias significativas (**)	Prueba de Tukey (95%)		
Prueba de hipótesis entre tratamientos			
	T2	T3	T4
T1			**
T2			**
T3			**