



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA  
NATURALEZA**

**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**

**DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA**

---

**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN Y MOVIMIENTO DEL AGUA DEL SUELO EN  
DOS MICROCUENCAS DEL SECTOR ALTO LOICA, REGIÓN METROPOLITANA,  
CHILE**

Memoria para optar al Título

Profesional de Ingeniero Forestal

**KATE EVELYN MC INNES JARA**

Profesor Guía: Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz. Ingeniero Forestal, MS, PhD.

---

**Santiago, Chile**

**2010**

# UNIVERSIDAD DE CHILE

## FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA

### EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN Y MOVIMIENTO DEL AGUA DEL SUELO EN DOS MICROCUENCAS DEL SECTOR ALTO LOICA, REGIÓN METROPOLITANA, CHILE

Memoria para optar al Título

Profesional de Ingeniero Forestal

**KATE EVELYN MC INNES JARA**

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Juan Pablo Fuentes Espoz	7,0	.....
Prof. Consejero Sr. Gabriel Mancilla Escobar	7,0	.....
Prof. Consejero Sr. Manuel Ibarra Martínez	6,8	.....

*Para las personas más importantes de mi vida*

*Mis padres y mi hermano*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a mi profesor guía Juan Pablo Fuentes Espoz, ya que sin su constante apoyo y sin sus valiosas enseñanzas no habría podido finalizar este hermoso proyecto de memoria de título.

Agradezco también sinceramente a los profesores Manuel Ibarra y Gabriel Mancilla, quienes dispusieron de su tiempo para aconsejarme y corregir mis errores, lo que permitió la realización de un mejor documento.

Al Centro del agua para zonas áridas y semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC), por el apoyo tecnológico y financiero otorgado.

A “Hualo” por su ayuda en la toma de muestras en terreno y a mi amiga Constanza Jiménez por su ayuda tanto en terreno como en la extensa y laboriosa etapa de laboratorio.

Un especial agradecimiento a las personas más importantes de mi vida “Mis padres y mi hermano James”, quienes con mucho sacrificio, esfuerzo y amor me educaron y entregaron las herramientas necesarias para que saliera adelante en esta larga y difícil tarea de convertirme en una profesional.

A mi madrina por apoyarme siempre en los momentos más difíciles y más trascendentes de mi vida.

A Felipe, por su paciencia y amor incondicional y porque me apoyo y dio fuerzas en todo momento.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
Propiedades físicas del suelo.....	2
Retención de agua en los suelos.....	3
Movimiento del agua en el suelo.....	3
Conductividad hidráulica y funciones de pedotransferencia.....	5
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos.....	6
2. MATERIAL Y MÉTODO.....	7
2.1. Materiales.....	7
2.1.1. Área de estudio.....	7
2.1.1.1. Características del área de estudio.....	7
2.1.1.2. Características de las microcuencas.....	8
2.2. Método.....	10
2.2.1. Fase de campo.....	10
2.2.1.1. Selección de los puntos de muestreo.....	10
2.2.1.2. Toma de muestras.....	11
2.2.2. Fase de laboratorio.....	12
2.2.2.1. Determinación de la densidad aparente y distribución del tamaño de las partículas.....	12
2.2.2.2. Determinación del contenido de gravas y materia orgánica.....	13
2.2.2.3. Construcción de las curvas características de humedad.....	13
2.2.2.4. Determinación de la conductividad hidráulica saturada y no saturada.....	16
2.2.2.5. Variabilidad espacial.....	16
2.2.3. Análisis estadístico de los datos.....	16
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	18
3.1. Propiedades físicas y químicas de las microcuencas en estudio.....	18
3.1.1. Análisis de variabilidad espacial.....	19
3.1.1.1. Análisis de la variabilidad espacial de la textura.....	20
3.1.1.2. Análisis de la variabilidad espacial de la densidad aparente.....	21
3.2. Propiedades hidráulicas.....	21
3.2.1. Retención de agua.....	21
3.2.1.1. Contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.....	24
3.2.2. Conductividad hidráulica.....	26

3.2.2.1. Conductividad hidráulica saturada.....	26
3.2.2.1.1. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada .....	27
3.2.2.2. Conductividad hidráulica no saturada.....	28
4. CONCLUSIONES.....	30
5. BIBLIOGRAFÍA .....	32

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos de control de erosión y de forestación realizados en la microcuenca MCT, sector Alto Loica, R.M., Chile.....	9
Cuadro 2. Cantidad de puntos muestreados por zona geográfica y por microcuenca.....	16
Cuadro 3. Hipótesis nula y alternativa, estadístico de prueba y región crítica de las pruebas estadísticas “Suma de rangos de Wilcoxon” y “T-student”.....	17
Cuadro 4. Parámetros estadísticos de las propiedades físicas y químicas de las microcuencas en estudio. ....	18
Cuadro 5. Coeficientes de variación de las propiedades del suelo en estudio. ....	19
Cuadro 6. Porcentajes promedios y diferenciales de arena, limo y arcilla de cada zona geográfica de las microcuencas en estudio. ....	20
Cuadro 7. Valor medio de $\rho b$ de cada zona topográfica de las microcuencas en estudio....	21
Cuadro 8. Valor promedio estimado de cada uno de los parámetros del modelo Van-Genuchten, para cada una de las microcuencas en estudio.....	23
Cuadro 9. Valores promedio de conductividad hidráulica saturada y cercana a saturación para las dos microcuencas en estudio.....	26
Cuadro 10. Valores medios y coeficientes de variación de la conductividad hidráulica saturada, según ubicación topográfica, de las microcuencas MCT y MST. ....	27
Cuadro 11. Valores promedio de conductividad hidráulica en los puntos CDC y PMP, obtenida mediante los programas RETC y SPAW. ....	28

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital de las microcuencas (1 y 2) en estudio. Sector Alto Loica, RM, Chile. ....	7
Figura 2. Microcuenca con tratamientos de control de erosión (zanjas de infiltración) y forestación, sector Alto Loica, R.M, Chile. (Fotografía cortesía de J.P Fuentes).....	8
Figura 3. Microcuenca sin tratamientos de control de erosión y/o forestación, sector Alto Loica, R.M, Chile. (Fotografía cortesía de J.P Fuentes). ....	9
Figura 4. Diagrama esquemático de la ubicación de los puntos de muestreo en una microcuenca. T1 a T4 corresponden a los transectos a generar. ....	10
Figura 5. Muestreador de núcleos de suelo Eijkelkamp. ....	11
Figura 6. Cilindros extraídos en un punto de muestreo. ....	11
Figura 7. Muestra alterada de suelo superficial (0-5 cm) para la determinación de la distribución del tamaño de partículas y contenido de materia orgánica. ....	12
Figura 8. Olla de presión (Soil Moisture Equipments, USA). ....	15
Figura 9. Curvas medias de retención de humedad de MCT y MST, obtenidas a partir del ajuste de los valores experimentales al modelo de Van-Genuchten. ....	22
Figura 10. Curvas medias de retención de agua para las microcuencas MCT (izquierda) y MST (derecha). ....	24
Figura 11. Contenidos de agua retenidos a 0,033 Mpa de las dos microcuencas en estudio, obtenido por 3 métodos diferentes (Experimental, SPAW y RETC). ....	24
Figura 12. Contenidos de agua retenidos a 1,5 Mpa de las dos microcuencas en estudio, obtenido por 2 métodos diferentes (SPAW y RETC). ....	25



## RESUMEN

En Chile, la erosión de suelos constituye una problemática socioeconómica y medioambiental grave. Como resultado, varias prácticas de conservación se han aplicado para disminuir la degradación de las tierras. La eficacia de estas prácticas, particularmente a nivel edáfico, deben ser evaluadas en el tiempo. Este estudio realiza un análisis comparativo de algunas propiedades hidráulicas del suelo (es decir, retención y movimiento de agua) en dos microcuencas históricamente degradadas (microcuencas gemelas) localizadas en el sector de Alto Loica (Región Metropolitana de Chile). Prácticas de conservación de suelos, tales como zanjas de infiltración y forestación, fueron establecidas en una de las microcuencas en 1993, mientras que la otra se mantuvo sin prácticas de conservación.

Cilindros de suelo inalterados de volumen conocido, así como muestras de suelo perturbadas de los primeros 5 cm de suelo se tomaron con el fin de determinar la densidad aparente, distribución del tamaño de partículas, contenido de gravas, materia orgánica y contenidos de agua del suelo a potenciales hídricos del suelo en el rango de  $2,5 \times 10^{-4}$  a 0,4 Mpa. La conductividad hidráulica ( $k$ ) a tres diferentes potenciales de agua del suelo, en los primeros 5 cm de suelo fue calculada basándose en las propiedades del suelo previamente determinadas mediante los programas computacionales SPAW y RETC. Además un análisis de variabilidad espacial de estas propiedades fue realizado para cada una de las microcuencas.

La mayoría de las propiedades hidráulicas y del suelo determinadas no presentaron diferencias significativas entre las microcuencas. Tras 17 años transcurridos desde la implementación de las prácticas de conservación, no ha sido un tiempo suficiente para generar efectos positivos en la infiltración y en la capacidad de retención de agua del suelo. Sin embargo la retención de agua en el suelo cercana a saturación y la conductividad hidráulica en condiciones no saturadas tuvieron un incremento ligero en la microcuenca conservada. Al parecer las prácticas de conservación de suelo, en particular la forestación, provocan un incremento en materia orgánica de la superficie del suelo, que finalmente permite un cambio positivo en las propiedades hidráulicas.

### Palabras claves

Conductividad hidráulica, erosión, prácticas de conservación y retención de agua.

## **ABSTRACT**

In Chile, soil erosion constitutes a serious environmental and socioeconomic problem. As a result, several conservation practices have been applied in order to diminish the degradation of the land. The efficacy of these practices, particularly at an edaphic level, should be evaluated in time. This study makes a comparative analysis of some soil hydraulic properties (i.e. retention and movement of water) in two historically-degraded watersheds (twin watersheds) located at Alto Loica (Metropolitan Region of Chile). Soil conservation practices, such as infiltration channels and forestation, were established in one of the watersheds in 1993; meanwhile the other one was maintained with no conservation practices.

Intact soil cores of known volume as well as perturbed soil samples from the top 5-cm were taken in order to determine bulk density, particle size distribution, gravel content, soil organic matter and soil water contents at soil water potentials ranging from  $2,5 \times 10^{-4}$  to 0,4 Mpa. The hydraulic conductivity (k) at three different soil water potentials, of the top 5 cm of soil was calculated based in the previously determined soil properties by using the computational programs SPAW and RETC. In addition, an analysis of the spatial variability of these properties was made for each one of the watersheds.

Most of the determined soil and hydraulic properties did not present significant differences between watersheds. It seems that after 17 years of the implementation of conservation practices, has not been sufficient to generate positive effects in the infiltration and capacity of soil water retention. However, soil water retention near saturation and the hydraulic conductivity under unsaturated conditions had a slightly increment in the most conserved watershed. It seems that, soil conservation practices, particularly forestation, causes an increment in soil organic matter at the soil surface, which finally allows a positive change in these hydraulic properties.

## **Key Words**

Conservation practices, erosion, hydraulic conductivity and water retention.

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos naturales indispensables para el ser humano, puesto que en él se desarrollan las más importantes actividades productivas de tipo agrícola, ganaderas y forestales, que permiten al hombre sobrevivir y desarrollarse (González y Pérez, 2002). No obstante, este recurso ha sido mal utilizado y sobreexplotado originando severos problemas de erosión, que implican la pérdida física del suelo, la potencial presencia de zanjas y cárcavas y bajos rendimientos de los cultivos tradicionales (CONAF-JICA, 1999).

En Chile, los procesos erosivos representan una gran problemática para el sector silvoagropecuario, al afectar aproximadamente la mitad (46%) del territorio nacional (Francke *et al.*, 1999). Es por esto que desde ya hace unas décadas, aunque en forma aislada, se desarrollan en el país prácticas de conservación de aguas y suelos, que tienden a disminuir el escurrimiento superficial y por ende la cantidad de suelo perdido.

Un proyecto emblemático ejecutado en el país y que involucró prácticas de conservación de aguas y suelos fue el Proyecto de Manejo de Cuencas “Control de Erosión y Forestación en Cuencas Hidrográficas de la Zona Semiárida de Chile”, suscrito entre los gobiernos de Chile y Japón, a través de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) entre los años 1993 y 1999. El objetivo del proyecto, fue contribuir al mejoramiento de la calidad de vida y el ambiente de los habitantes de la zona semiárida de Chile a través del desarrollo y demostración tecnológica en temas de control de erosión, forestación y viverización. (CONAF-JICA, 1998).

El proyecto ha generado valiosos antecedentes técnicos y económicos respecto a los métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas (Francke *et al.*, 2003). Sin embargo, hay que destacar que estas obras no tienen como fin el recuperar las propiedades del suelo mismo, sino que pretenden mitigar el efecto de la escorrentía superficial y la cantidad de suelo perdido, entre otros objetivos. Al respecto Pizarro *et al.* (2004) señalan que, la mayoría de las obras de conservación ejecutadas en el país responden por lo general a demandas sociales de la población a eventos acaecidos, como: desbordes de ríos, deslizamientos de tierras, cortes de caminos, generación de cárcavas, entre otros y por otro lado a situaciones de cesantías, ya que estas obras son consideradas por las autoridades como absorbedoras de mano de obra en áreas rurales. Sólo en la medida en que se favorezca la forestación y ésta se vea complementada con prácticas conservacionistas se puede pretender un mejoramiento paulatino de las propiedades edáficas, pero es un proceso bastante lento y difícil de ser observable a un corto plazo<sup>1</sup>.

Este estudio, pretende determinar y comparar algunas de las propiedades físicas del suelo relacionadas a la retención y movimiento del agua en el medio edáfico, en dos microcuencas del sector Alto Loica, que formaron parte del proyecto CONAF-JICA. De esta manera se pretende evaluar el efecto que han tenido las técnicas y prácticas de conservación, particularmente en términos de mantención del recurso hídrico en el sistema

---

<sup>1</sup> Comunicación personal con el profesor Gabriel Mancilla Escobar, Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

edáfico, en zonas caracterizadas por tener problemáticas de erosión de suelos muy complejas y de larga data.

### **Propiedades físicas del suelo**

Las propiedades físicas de un suelo según lo expuesto por Honorato (2000) son aquellas relacionadas con su organización estructural y que corresponden a su arquitectura. Estas propiedades influyen sobre las propiedades químicas y biológicas del suelo; en el crecimiento de los árboles y plantas a través de sus efectos sobre la aireación, penetración y retención de agua; en la estabilidad y en la productividad de los sistemas (Bocic *et al.*, 1976; Stevenson 1982, citado por Gallegos, 1998). Entre las propiedades más importantes se encuentra la textura, que corresponde a la cantidad o proporción relativa de los diferentes tipos o clases de tamaño de las partículas que constituyen el suelo (Donoso, 1994). La textura afecta a todas las demás propiedades físicas del suelo e influye en aspectos tan importantes como la fertilidad, la susceptibilidad a la erosión, la retención de humedad y la facilidad de circulación del agua (Honorato, 2000). Según Gavande (1986), suelos de textura gruesa tienen baja capacidad de retención de agua y una elevada permeabilidad, en cambio suelos de textura fina, tienen una alta capacidad de retención y baja capacidad de infiltración.

La estructura, que hace referencia al arreglo, orientación y organización que tienen las partículas en el suelo (Hillel, 1971), es un factor determinante en el crecimiento de las plantas influyendo directa e indirectamente en las relaciones suelo-agua y suelo-aire (Bocic *et al.*, 1976). Entre sus propiedades más importantes se destacan: la capacidad estructural, que se define como la capacidad de un suelo para formar terrones espontáneamente sin la intervención del hombre y la estabilidad estructural; que representa la capacidad de los granos de conservar su forma cuando éstos se humedecen y de permitir a su vez el libre paso del agua en el suelo (Gavande, 1986). Kay (1999), establece que la perturbación de la estructura trae como consecuencias procesos de degradación como: compactación y cementación, que disminuyen la productividad de los sistemas. Honorato (2000) en relación a esto, señala que la compactación del suelo afecta a la porosidad (porción de volumen del suelo no ocupado por sólidos), destruyendo principalmente los macroporos que constituyen el espacio donde ocurre el movimiento del agua y del aire. Ellies (2000) menciona, que un deterioro de la estructura y porosidad conlleva varias consecuencias, entre las cuales destaca: un aumento de la resistencia a la penetración de las raíces, dificultad en las labores de labranza, reducción de la capacidad de sostén del suelo y detrimento de la capacidad de almacenamiento de agua y de aire del suelo.

La densidad aparente es otra de las propiedades físicas del sistema edáfico, que se define como la relación existente entre la masa de los sólidos y el volumen total ocupado por éstos (Blake y Hartage, 1986). Esta propiedad depende directamente de la estructura del suelo, por lo tanto en su determinación deben tomarse muestras de suelo mínimamente alteradas. La textura y el contenido de materia orgánica son otros factores que influyen en la densidad aparente y por regla general, se establece, que suelos de textura fina y con mayor contenido de materia orgánica tienen densidades aparentes más bajas que suelos de textura gruesa con bajos contenidos de materia orgánica. Esto último, debido a que la materia orgánica reduce los valores de densidad aparente, al facilitar la agregación de las partículas del suelo, por lo

tanto, mejorando la porosidad de éste. Valores bajos de densidad aparente indican suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de las raíces (Donoso, 1994). Por el contrario valores altos implican compactación de los suelos y resistencia mecánica al enraizamiento (Bocic, 1972; Honorato, 2000).

### **Retención de agua en los suelos**

El agua que se infiltra en los suelos es en parte retenida en el espacio poroso, el resto del agua se transfiere hacia estratas más profundas o hasta el nivel freático. Se considera que la capacidad de retención de agua del suelo es una característica inherente y dependiente de las propiedades físicas: textura, estructura y porosidad (Honorato, 2000).

La retención de agua en los suelos se puede determinar mediante las curvas características de humedad, las cuales son generadas a partir de la relación existente entre los contenidos volumétricos de agua del suelo y los potenciales necesarios para extraer dichos contenidos de agua (Salgado, 2001). En estas curvas, en general, sucede que la cantidad de agua retenida a valores de tensión cercanos a saturación y hasta 0,1 Mpa depende de la estructura del suelo y a valores de tensión superiores a 0,1 Mpa de la textura del suelo. La compactación es otro factor que influye en la curva característica de humedad. Ésta provoca una disminución de la porosidad total y reduce el volumen de los grandes inter-agregados del suelo, lo que significa que el contenido de agua a saturación y la pérdida de agua con la aplicación de una baja succión se reducen (Hillel, 1971).

### **Movimiento del agua en el suelo**

El movimiento del agua ocurre cuando existen diferencias de potencial entre diferentes puntos del sistema suelo (Gavande, 1972). Para la mayoría de los investigadores, este movimiento depende del gradiente de potencial y de la facilidad que presente el flujo a través del medio por el cual se desplaza (Singer y Moons, 2000). Su comprensión es de gran utilidad en estudios de drenaje, recuperación de suelos y calidad del medio ambiente (Núñez, 1985 y Gavande, 1986). Según Mourgues (s/f), la facilidad de movimiento que tenga el agua en el suelo impedirá que gran parte del agua de lluvia escurra y por ende a su vez se genere erosión.

Para el análisis del movimiento de agua en el suelo se deben considerar dos situaciones: el movimiento bajo condiciones saturadas y el movimiento en condiciones no saturadas.

El movimiento de agua en un suelo saturado es descrito por la ley de Darcy (Ecuación 1), que expresa que el flujo se origina producto de una diferencia de potenciales, en la dirección del punto de mayor potencial al punto de menor potencial (Salgado, 2001). Esta ley establece que la velocidad del flujo es directamente proporcional a la diferencia de potenciales y a la conductividad del medio (conductividad hidráulica), e inversamente proporcional a la distancia existente entre los dos puntos (Gavande, 1986).

$$J_w = \frac{Q}{A} = -K \times \Delta\Psi / L \quad [1]$$

Donde:

$J_w$  = densidad de flujo de agua (cm seg<sup>-1</sup>)

$Q$  = Volumen del flujo a través de la muestra de suelo (cm<sup>3</sup> seg<sup>-1</sup>)

$A$  = Área transversal (cm<sup>2</sup>)

$K$  = Constante de proporcionalidad o conductividad hidráulica del medio (cm seg<sup>-1</sup>)

$\Delta\psi/L$  = Gradiente hidráulico

$L$  = longitud del medio en el cual se efectúa el flujo de agua (cm<sup>2</sup>)

Por su parte el flujo insaturado se produce cuando los poros están parcialmente rellenos con agua y representa la situación más frecuente de terreno (Honorato, 2000). El movimiento de agua en estas condiciones es explicada por la ecuación de flujo combinado, que se origina por la combinación de las ecuación de Darcy y de Continuidad (Hillel, 1980). Existen diversas derivaciones y formas de dicha ecuación, siendo una de las más comunes y simples; la descrita por la Ecuación 2. De la ecuación se desprende que el flujo de agua depende del gradiente de potencial y de la conductividad hidráulica. Esta última, característica resultante de las propiedades cuantitativas y cualitativas del sistema poroso (Ellies, 1989).

$$J_w = -K(\Psi_m) \left( \frac{d\Psi g}{dz} + \frac{d\Psi m}{dz} \right) \quad [2]$$

Donde:

$K(\psi_m)$  = Conductividad hidráulica como función del potencial mátrico del suelo ( $\psi_m$ ).

$g$  = aceleración de gravedad.

$d\psi_m/dz$  = gradiente de potencial.

## Conductividad hidráulica y funciones de pedotransferencia

La conductividad hidráulica ( $K$ ) es aquella propiedad que expresa la habilidad y/o capacidad de un suelo para transmitir agua (Dirksen y Klute, 1986). Es una propiedad difícil de medir con exactitud y varía no solo entre los diferentes tipos de suelos, sino también, en un mismo suelo en función del contenido de humedad que presente (Dirksen, 1999). La conductividad hidráulica es entonces afectada por todos aquellos factores que influyen en el potencial mátrico del suelo, entre los cuales cabe mencionar la textura y estructura, el contenido de materia orgánica y la presencia de grietas originadas ya sea por actividad biológica o por la formación de raíces (Núñez, 1985). La compactación del suelo, es otro factor que puede alterar la conductividad y por tanto el movimiento del agua en el suelo, ya que destruye los grandes poros del suelo y su conectividad (Fuentes *et al.*, 2004).

La conductividad hidráulica es una de las propiedades físicas del suelo que es muy compleja de determinar en condiciones de campo. Por tanto su medición o estimación por la vía de funciones de pedotransferencia resulta ser una opción muy útil, particularmente en la modelación de fenómenos relacionados al flujo y transporte de agua en los suelos. Existe una extensa cantidad de funciones, modelos y métodos que han sido publicados en la literatura científica para determinar la conductividad hidráulica, así como otros parámetros hidráulicos. Saxton y Rawls (2006) han generado un método empírico de estimación, basado principalmente en la textura del suelo y en la materia orgánica, que además incorpora parámetros de densidad aparente, contenido de gravas y salinidad de manera de crear un sistema de predicción más amplio.

Otro método de estimación de la conductividad hidráulica se basa en el ajuste de ecuaciones a valores medidos de retención de agua (curva característica de humedad). Las curvas de retención generadas tienen parámetros de estimación con un significado físico relacionado a los contenidos de agua, potencial de entrada de aire y distribución del tamaño de poros. En este sentido, uno de los métodos de predicción más utilizados a nivel mundial corresponde al de Mualem-Van Genuchten (Van Genuchten, 1980), el cual es considerado una aproximación relativamente simple, que contiene tres parámetros de estimación independientes. Este método considera el análisis de las curvas características de humedad (Ecuación 3).

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \alpha h^n \right]^{(1/n - 1)} \quad [3]$$

Donde:

$\theta$  = contenido de agua volumétrico.

$h$  = potencial de agua.

$\alpha$  = inverso del potencial de entrada de aire.

$n$  = parámetro asociado con la distribución del tamaño de poros.

$\theta_r$  y  $\theta_s$  = contenidos de agua residual y a saturación, respectivamente.

### **Objetivo general**

Evaluar la retención y movimiento del agua, en los primeros 5 cm de suelo, en dos microcuencas con y sin prácticas de conservación, en el sector de Alto Loica, Región Metropolitana, Chile.

### **Objetivos específicos**

- Determinar la densidad aparente y distribución del tamaño de las partículas en cada una de las microcuencas en estudio.
- Evaluar la retención de agua en cada una de las microcuencas, por medio de la construcción de curvas características de humedad.
- Determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada en función de los parámetros anteriores utilizando funciones de pedotransferencia.
- Comparar los parámetros de densidad aparente, distribución del tamaño de partículas, retención de humedad y conductividad hidráulica de las dos microcuencas, de manera de determinar la posible contribución de las prácticas de conservación de suelos y aguas establecidas en ellas.



## 2. MATERIAL Y MÉTODO

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Área de estudio

El estudio se efectuó en dos microcuencas de la localidad “Alto Loica” (34° latitud sur, 71°30' longitud oeste) perteneciente administrativamente a la Comuna de San Pedro, Provincia de Melipilla, Región Metropolitana; cuya ubicación dista 120 Km al suroeste de la ciudad de Santiago (Tokugawa y Vargas, 1996).



Fuente: Google Earth, 2010.

Figura 1. Imagen satelital de las microcuencas (1 y 2) en estudio. Sector Alto Loica, RM, Chile.

#### 2.1.1.1. Características del área de estudio

Alto Loica es una zona agrícola y ganadera, que se destaca principalmente por la producción de frutillas y la ganadería ovina y bovina. Su clima, es de tendencia mediterránea con verano seco prolongado y lluvias invernales (Tokugawa y Vargas, 1996).

La precipitación y temperatura media anual que presenta es 400 mm y 13,6° C, respectivamente (CONAF-JICA, 1999). Su vegetación natural es del tipo Esclerófilo degradado, en donde se presentan especies como: el Litre (*Lithraea caustica*), Quillay (*Quillaja saponaria*), Romerillo (*Baccharis linearis*), Trevo (*Trevoa trinervis*) y Boldo (*Peumus boldus*) (Tokugawa y Vargas, 1996; CONAF-JICA, 1999). Alto Loica, presenta severos procesos erosivos, que en general se han originado de la deforestación, la sobreutilización ganadera y agrícola, los incendios forestales y el uso de su suelo sin considerar su aptitud (Francke et al., 2003).

#### 2.1.1.2. Características de las microcuencas

Las dos microcuencas de este estudio formaron parte del proyecto Cuencas CONAF/JICA, suscrito por los gobiernos de Chile y Japón durante los años 1993 y 1998.

La primera de las microcuencas (figura 2) es la denominada por este estudio como MCT, abreviación que significa “Microcuenca con tratamientos”, ya que representa la microcuenca sometida a tratamientos de forestación y de control de erosión. Posee alturas que van desde los 275 a los 325 m.s.n.m. y pendientes que no superan el 25% (Fuentes, 2008). Algunas de las técnicas de conservación y especies que se encuentran en esta microcuenca, se detallan a continuación en el cuadro 1.



Figura 2. Microcuenca con tratamientos de control de erosión (zanjas de infiltración) y forestación, sector Alto Loica, R.M, Chile. (Fotografía cortesía de J.P Fuentes).

Cuadro 1. Tratamientos de control de erosión y de forestación realizados en la microcuenca MCT, sector Alto Loica, R.M., Chile.

<b>Tratamientos de conservación de suelos y aguas</b>	<b>Tratamientos de forestación y especies empleadas</b>
Zanjas de infiltración	Cortaviento ( <i>Eucalyptus camaldulensis</i> , <i>globulus</i> y <i>nitens</i> , <i>Pinus canariensis</i> , <i>pinea</i> y <i>radiata</i> ).
Canales de desviación	
Diques de postes de madera	Conservación de ladera ( <i>Acacia caven</i> y <i>dealbata</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i> y <i>globulus</i> , <i>Pinus radiata</i> ).
Diques de estructuras gavionadas	Galería en ribera ( <i>Acacia caven</i> , <i>Populus alba</i> y <i>nigra</i> , <i>Quillaja saponaria</i> , <i>Maytenus boaria</i> ).
Tratamientos de cubierta con caña de maíz	Bosque ganadero ( <i>Acacia capensis</i> , <i>melanoxylon</i> y <i>saligna</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i> y <i>globulus</i> ).

Fuente: CONAF-JICA, 1999.

La segunda microcuenca (figura 3) se denomina microcuenca MST o Testigo y representa la microcuenca de comparación del proyecto, en donde no se presenta ningún tipo de técnica de control de erosión u de forestación. En ella, sólo es posible observar cárcavas aún activas y una estación de aforo para el registro de la precipitación y escorrentía. Presenta alturas que oscilan entre los 300 y 350 m.s.n.m. y pendientes que tampoco superan el 25% (Fuentes, 2008).



Figura 3. Microcuenca sin tratamientos de control de erosión y/o forestación, sector Alto Loica, R.M, Chile. (Fotografía cortesía de J.P Fuentes).

## 2.2. Método

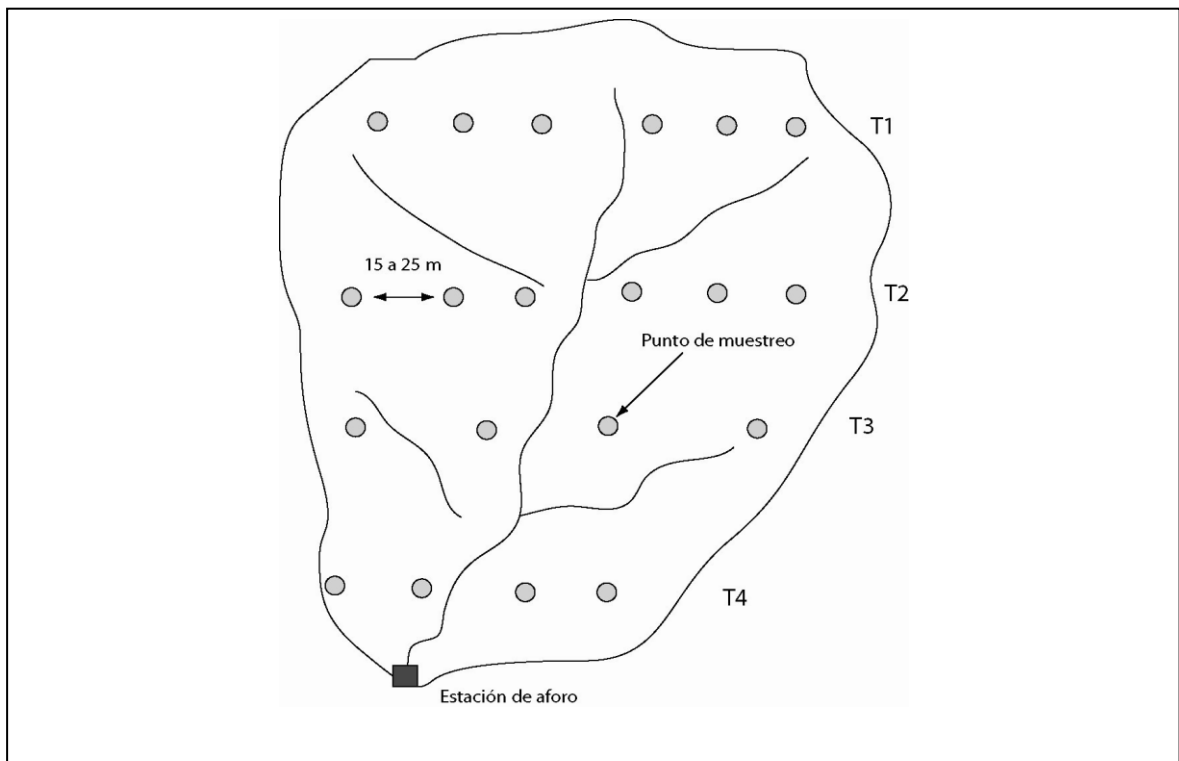
El estudio se dividió en dos fases: campo y laboratorio.

### 2.2.1. Fase de campo

#### 2.2.1.1. Selección de los puntos de muestreo

Se realizaron cuatro transectos normales a la pendiente de cada microcuenca y en cada uno de ellos, se establecieron un número variable de puntos de muestreo de manera de representar la mayor superficie de las microcuencas. Dentro de cada transecto, los puntos de muestreo se distanciaron en función del ancho de la sección transversal de la microcuenca (entre 15-25 m) y de la existencia de suelo, vegetación y obras de conservación presentes. El número total de puntos de muestreo fue de 50, realizando 25 puntos en cada una de las microcuencas.

En la figura 4, se observa en forma esquemática los transectos y los puntos de muestreo realizados en las microcuencas.



Fuente: Elaboración propia, 2010.

Figura 4. Diagrama esquemático de la ubicación de los puntos de muestreo en una microcuenca. T1 a T4 corresponden a los transectos a generar.

### 2.2.1.2. Toma de muestras

Se extrajeron muestras de suelo de volumen conocido ( $98,125 \text{ cm}^3$ ) y mínimamente alteradas de los primeros 5 cm de suelo superficial. Para esto se utilizó un muestreador de núcleos de suelo Eijkelkamp (figura 5), el cual inserta los cilindros mediante un sistema de percusión manual. Se consideró la extracción de dos cilindros por cada punto de muestreo seleccionado (figura 6). Además, en cada punto se tomaron muestras alteradas de suelo superficial (0-5 cm) (figura 7) de aproximadamente 500 g de peso para la determinación de la distribución del tamaño de partículas y contenido de materia orgánica.



Figura 5. Muestreador de núcleos de suelo Eijkelkamp.



Figura 6. Cilindros extraídos en un punto de muestreo.



Figura 7. Muestra alterada de suelo superficial (0-5 cm) para la determinación de la distribución del tamaño de partículas y contenido de materia orgánica.

## 2.2.2. Fase de laboratorio

### 2.2.2.1. Determinación de la densidad aparente y distribución del tamaño de las partículas

Los cilindros con muestras de suelo fueron transportados al laboratorio de suelos Ventura Matte, de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile. Allí, se determinó la densidad aparente por el método del cilindro descrito por Blake y Hartage (1986), en que muestras de volumen conocido son secadas a 105° C hasta llegar a peso constante y posterior cálculo de la densidad mediante la ecuación:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} \quad [4]$$

En donde:

$\rho_b$  : densidad aparente de la muestra de suelo.

$m_s$ : masa de suelo seca a 105°C.

$V_t$ : volumen total de la muestra de suelo (volumen del cilindro).

La distribución del tamaño de las partículas (arena, limo y arcilla) se determinó a partir de las muestras alteradas de 500 g de peso por el método de Bouyoucos. Este método, implica someter las muestras de suelo a la acción de un agente dispersante y a agitación mecánica. Posteriormente, la densidad de la suspensión suelo-agua es determinada con un hidrómetro calibrado. Finalmente las lecturas entregadas por el hidrómetro a diferentes intervalos de tiempo, permiten calcular los porcentajes de las diferentes fracciones de suelo (Dewis y Freitas, 1970).

#### 2.2.2.2. Determinación del contenido de gravas y materia orgánica

El contenido de materia orgánica se obtuvo de manera indirecta, determinando el carbono orgánico por el método de oxidación con dicromato en medio ácido (Sadzawka *et al.* 2006). Este método, consiste en oxidar una muestra pequeña de suelo con dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ). El exceso de dicromato que se utiliza para destruir la materia orgánica, posteriormente, se determina valorando con una solución de sulfato amonio ferroso. Finalmente, los porcentajes de carbono orgánico y materia orgánica se calculan a partir de las ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

$$\%C.O = \frac{V_1 - V_2}{S} \times N \times 0,399 \times fh \quad [5]$$

Donde:

$V_1$  = ml  $FeSO_4$  gastados en titular el blanco.  
 $V_2$  = ml  $FeSO_4$  gastados en titular la muestra.  
 $N$  = normalidad del sulfato ferroso.  
 $S$  = peso en gramos de la muestra seca al aire.  
 $fh$  = factor de corrección por humedad.

$$\%M.O = \%C.O \times 1,724 \quad [6]$$

Donde:

$\% C.O$  = porcentaje de carbono orgánico.

1,724 = Factor de conversión (empírico) de porcentaje de carbono orgánico a porcentaje de materia orgánica.

Por su parte, el contenido de gravas se obtuvo determinando el porcentaje de partículas superiores a 2 mm que contenía cada muestra de suelo seco.

#### 2.2.2.3. Construcción de las curvas características de humedad

Las curvas características de humedad se construyeron a partir de las relaciones contenido de humedad volumétrico ( $\theta$ ) y potencial de agua ( $\psi$ ). Para esto, a cada una de las 50 muestras de suelo inalteradas se les determinó el contenido de humedad a potenciales de  $2,5 \times 10^{-4}$ ;  $1 \times 10^{-3}$ ;  $3,16 \times 10^{-3}$ ;  $6,31 \times 10^{-3}$ ;  $1 \times 10^{-2}$ ;  $3 \times 10^{-2}$ ;  $7 \times 10^{-2}$ ; 0,1; 0,2; 0,4 Mpa. Para

los potenciales de agua entre  $2,5 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-2}$  Mpa el agua de poros fue extraída mediante succión utilizando una caja de arena o Sandbox modelo 08.01, Eijkelkamp, Holanda) hidráulicamente conectada a las muestras de suelo inalteradas. En cambio, para potenciales de agua entre  $3 \times 10^{-2}$  y 0,4 Mpa el agua de poros fue extraída mediante olla de presión (figura 8) (Soil Moisture Equipments, USA).

Es importante destacar, que los cambios de tensión tanto en el sandbox como en la olla de presión se realizaban una vez que las muestras lograban equilibrarse, es decir, cuando dos a tres lecturas en peso húmedo de una muestra eran constantes y/o cuando la diferencia en gramos de agua era inferior a 0,2 g. Este equilibrio se logró, en la mayoría de los casos, alrededor de 15 días de iniciado el proceso de aplicación de la tensión requerida.

Posteriormente, los datos obtenidos fueron tabulados y utilizados para determinar la densidad aparente y los contenidos de agua gravimétrico y volumétrico. Estos cálculos se explican a continuación como:

- Cálculo del contenido de humedad gravimétrico

El contenido de humedad gravimétrico ( $\theta_g$ ) se determinó sometiendo las muestras de suelo a un horno a temperatura de  $105^\circ\text{C}$ , durante 24 horas. Las muestras son pesadas en una balanza antes y después del secado para obtener sus correspondientes pesos húmedos y secos (Forsythe, 1975). Con estos pesos, se calcula finalmente el  $\theta_g$  con la siguiente ecuación:

$$\theta_g = \frac{(PH - PS)}{PS} \times 100 \quad [7]$$

Donde:

PH= peso húmedo de la muestra de suelo (g).

PS= peso seco de la muestra de suelo (g).

- Cálculo del contenido de humedad volumétrico

Con la densidad aparente y el contenido de humedad gravimétrico se determinaron los contenidos de humedad volumétricos necesarios para la construcción de las curvas características de humedad, por medio de la ecuación 8.

$$\theta_v = \theta_g \times \rho_b \quad [8]$$

Donde:

$\theta_v$  = contenido de humedad volumétrico (%)

$\theta_g$  = contenido de humedad gravimétrico (%)

$\rho_b$  = densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )



Finalmente para la construcción completa de la curva característica de humedad, los valores de humedad volumétricos, obtenidos experimentalmente, se ajustaron al modelo paramétrico de Van-Genuchten (1980) con el programa computacional RETC. El modelo se expresa a continuación como:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{1 - \frac{1}{n}}} \quad [9]$$

Donde:

$\theta_r$  = contenido de agua residual.

$\theta_s$  = contenido de humedad a saturación.

$\alpha$  y  $n$  = parámetros asociados a la forma de la curva.

$m = 1 - 1/n$ .

$h$  = potencial de agua expresado como cm de columna de agua.



Figura 8. Olla de presión (Soil Moisture Equipments, USA).

#### 2.2.2.4. Determinación de la conductividad hidráulica saturada y no saturada

La conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) y no saturada se determinó a partir de los programas computacionales SPAW (Soil- Plant- Air- Water) y RETC (Retention Curve Program for Unsaturated Soils) respectivamente; que se basan en funciones de pedotransferencia para el desarrollo de sus análisis.

RETC (versión 6.0) describe las propiedades hidráulicas de los suelos mediante la evaluación de la retención de agua. Para este propósito el programa utiliza varios modelos paramétricos, entre ellos el modelo de Van Genuchten, para representar a la curva de retención de humedad y los modelos de distribución del tamaño de partículas de Mualem y Burdine para predecir la conductividad hidráulica.

Por su parte, el programa SPAW (versión 6.02.75) desarrollado por Saxton y Rawls (2006) estima, entre otras propiedades, el contenido y movimiento del agua de los suelos. El programa cuenta con una subrutina de cálculo de las “propiedades características del agua del suelo”. Esta subrutina o subprograma permite estimar la conductividad y la capacidad de retención de agua basándose en datos de textura, materia orgánica, contenido de gravas, salinidad y compactación.

#### 2.2.2.5. Variabilidad espacial

Para el análisis de variabilidad espacial se designaron 3 zonas que representasen la parte alta, media y baja de las microcuencas en estudio. En el cuadro 2, se exponen la cantidad de puntos de muestreo que se designaron por zona y por cada una de las microcuencas.

Cuadro 2. Cantidad de puntos muestreados por zona geográfica y por microcuenca.

Microcuenca	Zonas según ubicación geográfica			Total de puntos muestreados
	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	
MCT	9	9	7	25
MST	10	8	7	25

#### 2.2.3. Análisis estadístico de los datos

Como primer paso del análisis se efectuó la comprobación de la normalidad de los datos, obtenidos tanto en terreno como en laboratorio. La prueba Shapiro-Wilk fue la escogida para realizar esta tarea, por su simplicidad y porque es recomendada para muestras pequeñas ( $n < 50$ ).

Posteriormente con los resultados de la prueba de normalidad, se realizaron pruebas de comparación de medias para verificar la existencia de diferencias significativas en los parámetros físicos e hidráulicos de las microcuencas en estudio. La prueba t-Student fue aplicada para el caso de la densidad aparente, puesto que cumplía con el supuesto de normalidad y la prueba no paramétrica “Suma de rangos de Wilcoxon” fue ejecutada en todos los demás casos: distribución del tamaño de partículas, contenido de gravas y

materia orgánica, conductividad hidráulica saturada y no saturada ( $\psi = 0,033$  y  $1,5$  Mpa), contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, debido a que es un procedimiento alternativo que no toma en cuenta la distribución de donde provienen los datos (Walpole y Myers, 2000). En el cuadro 3, se observan las hipótesis (nula y alternativa), estadísticos de pruebas y las regiones críticas de ambas pruebas.

Cuadro 3. Hipótesis nula y alternativa, estadístico de prueba y región crítica de las pruebas estadísticas “Suma de rangos de Wilcoxon” y “T-student”.

Datos	Suma de rangos de Wilcoxon	T-student
$H_0$	$\mu_0 = \mu_1$	$\mu_1 = \mu_2$
$H_1$	$\mu_0 \neq \mu_1$	$\mu_1 \neq \mu_2$
Estadístico de prueba	$\mu_1 = w_1 - \frac{n_i}{2} * (n_i + 1)$ Donde: $w_1 =$ Suma de rangos de la muestra i $n_i =$ Tamaño de la muestra i.	$T_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{Y}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{Sp * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$
Región crítica	$\mu \leq$ Valor crítico de la prueba suma de rangos de wilcoxon.	$T_0 > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2} \quad \text{o}$ $T_0 < -t_{\frac{\alpha}{2}, n_1 + n_2 - 2}$

Para la evaluación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas e hidráulicas de las microcuencas, se ejecutó la prueba de comparación de medias Kruskal-Wallis, una prueba no paramétrica que se utiliza para probar si  $k$  muestras provienen de una misma población (Walpole y Myers, 2000).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Propiedades físicas y químicas de las microcuencas en estudio

Los parámetros estadísticos de textura, densidad aparente, contenido de grava y materia orgánica se exponen en el cuadro 4. Es posible apreciar que, los suelos de ambas microcuencas se caracterizan por tener altos contenidos de arena (83,1% en MCT y 85,1% en MST) y bajos contenidos de limo (8% promedio aproximado para ambas microcuencas) y de arcilla (8,3% en MCT y 6,8% en MST). Con estos valores, y por medio del triángulo textural, se determinó que la mayoría de los puntos muestreados en las dos microcuencas correspondían a la clase textural Arenosa-Francosa, a excepción de dos puntos de MST que pertenecían a la clase textural Arenosa. Esto concuerda con el informe final del proyecto “Control de erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile” (1998), que establece que más de la mitad del material edáfico analizado de los suelos de la comuna de San Pedro tienen una textura gruesa. Según Gavande (1972), suelos de textura gruesa poseen baja capacidad de retención de agua y una elevada permeabilidad. Los análisis estadísticos respecto de esta propiedad, determinaron que las microcuencas presentaban diferencias en los porcentajes promedios de arena y de arcilla (p-valores = 0,05% y 0,04%). Resultado que no significa un cambio de clase textural, sino que permite dar cuenta de que las componentes texturales han sido afectadas por la erosión.

Cuadro 4. Parámetros estadísticos de las propiedades físicas y químicas de las microcuencas en estudio.

Propiedades del suelo	MCT		MST	
	Media	S	Media	S
Arena (%)	83,1	1,8	85,1	1,9
Limo (%)	8,5	1,1	8,1	0,9
Arcilla (%)	8,3	1,4	6,8	1,4
Gravas (%)	16	5,6	18,7	5,4
$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,6	0,1	1,66	0,1
M.O (%)	2,04	1,4	1,61	1,2

**MCT:** Microcuenca con tratamiento de conservación y forestación.

**MST:** Microcuenca sin ningún tipo de tratamiento.

**S:** Desviación estándar.

Los valores promedios de densidad aparente en general son altos y se aproximan a 1,7 g/cm<sup>3</sup>, valor similar al determinado por Ellies (1985), citado por Honorato (1993) para suelos de la provincia de Melipilla. Según Thompson y Troeh (2002), estos valores corresponden a los de un suelo compactado. La diferencia en  $\rho_b$  entre las microcuencas es de apenas 0,06 g/cm<sup>3</sup>, valor que permite concluir que no hay diferencias importantes. La prueba estadística t-Student respalda esto, con un p-valor de 5,5%. No obstante, esta diferencia aún no significativa estadísticamente, puede ser causa de la forestación y de las obras de conservación llevadas a cabo en MCT, las cuales han permitido una pequeña mejoría de esta propiedad.

Los contenidos de grava más altos se registraron en MST, determinándose un valor promedio porcentual de 18,7% para esta microcuenca versus un 16% para MCT. Los análisis estadísticos arrojaron la existencia de diferencias significativas, respaldándose en un p-valor de 0,8%.

Los contenidos de materia orgánica en general fueron bajos, sin embargo, la materia orgánica más alta se encontró en los suelos de la microcuenca con obras de conservación (MCT= 2,04% versus MST= 1,61%), situación que se esperaba producto de las prácticas de forestación realizadas en ella. No obstante, los análisis estadísticos establecieron que no se aprecian diferencias significativas (p-valor= 8,42%).

El hecho de que muchas de las propiedades analizadas no presenten diferencias significativas, puede ser atribuido a que la recuperación de los suelos es un proceso bastante lento. Según Fuentes *et al.* (2004) la recuperación de las propiedades físicas, degradadas principalmente por actividades de labranza, precisa de un tiempo no menor a 27 años. En este caso, sólo han transcurrido 17 años desde la instalación de las prácticas de conservación de suelos y aguas en MCT, tiempo no suficiente según lo señalado.

En forma complementaria a lo anteriormente expuesto, se realizó en las microcuencas un análisis de variabilidad espacial, cuyos resultados se exponen a continuación.

### 3.1.1. Análisis de variabilidad espacial

La variabilidad de las propiedades físicas y químicas está representada por los coeficientes de variación (cuadro 5). Como se observa, las propiedades con mayor variabilidad fueron M.O, arcilla y limo, presentando coeficientes de variación de 69,89%, 20,80% y 12,21%, respectivamente. Esta condición puede deberse a que la M.O y las partículas más finas del suelo son las propiedades que se ven mayormente afectadas por la acción de la erosión. Aggassi (1997), citado por Urrutia (2000) señala que, la M.O es considerada como el segundo factor más importante que afecta la erosión después de la textura. Las propiedades restantes, es decir, densidad aparente y arena registraron los valores más bajos de variabilidad (6,79% y 2,46%, respectivamente).

Cuadro 5. Coeficientes de variación de las propiedades del suelo en estudio.

Propiedades del suelo	Coefficiente de variación (%)
$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	6,79
M.O (%)	69,89
Arena (%)	2,46
Limo (%)	12,21
Arcilla (%)	20,8

### 3.1.1.1. Análisis de la variabilidad espacial de la textura

Se determinaron los valores medios y los diferenciales ( $\Delta$ ) de arena, limo y arcilla de cada zona geográfica de las microcuencas MCT y MST. Estos valores, se presentan a continuación en el cuadro 6 y se aprecian gráficamente en el apéndice I.

Cuadro 6. Porcentajes promedios y diferenciales de arena, limo y arcilla de cada zona geográfica de las microcuencas en estudio.

Tipo textural	Microcuenca	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	Promedio
% Arena	MCT	83,6	83,1	82,6	83,1
	MST	85,5	84,4	85,2	85,1
$\Delta$ =MCT-MST		-1,9	-1,3	-2,7	-2
% LIMO	MCT	8,6	8,2	8,9	8,5
	MST	8,2	7,8	8,3	8,1
$\Delta$ =MCT-MST		0,4	0,4	0,6	0,5
% Arcilla	MCT	7,9	8,7	8,5	8,4
	MST	6,3	7,8	6,5	6,9
$\Delta$ =MCT-MST		1,6	0,9	2	1,5

En el cuadro 6 es posible apreciar, que los porcentajes promedio de arena de todas las zonas de MST superan a los porcentajes de las zonas de MCT y esto se demuestra con el diferencial ( $\Delta$ ), que indica que MST tiene un 2% promedio más de arena que MCT. Por otro lado, MCT presentó porcentajes de limo y de arcilla más altos que MST. MST en promedio ha perdido un 0,5% partículas de limo y un 1,5% de partículas del tamaño de arcilla. Los análisis estadísticos determinaron sólo diferencias en los porcentajes promedio de arena y de arcilla (p-valores < 5%). La pérdida de las partículas finas (arcillas) en esta microcuenca es un indicador de los efectos que trae consigo la erosión. Esto debido, a que la erosión hídrica transporta partículas del suelo de un lugar a otro, por lo que las partículas pequeñas son las más afectadas en dicho proceso, quedando las partículas más gruesas (las arenas) finalmente<sup>2</sup>. En la microcuenca con tratamientos de conservación ha ocurrido lo contrario, al parecer, la cobertura vegetal y las labores de conservación de suelos y aguas realizadas en ella, han evitado una mayor pérdida de las partículas más finas.

La prueba no paramétrica Kruskal Wallis determinó con un nivel de confianza del 95%, que no existen diferencias entre las zonas topográficas de cada microcuenca, respecto a las componentes texturales. Los resultados de esta prueba se exponen en el Apéndice II.

<sup>2</sup> Comunicación personal con el profesor J.P. Fuentes Espoz, Departamento de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

### 3.1.1.2. Análisis de la variabilidad espacial de la densidad aparente

Los valores promedio de densidad aparente para cada zona topográfica de las microcuencas, se indican en el cuadro 7 y en el apéndice III se exponen gráficamente.

Cuadro 7. Valor medio de  $\rho_b$  de cada zona topográfica de las microcuencas en estudio.

$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	Promedio
MCT	1,58	1,62	1,62	1,61
MST	1,64	1,65	1,72	1,67
$\Delta = (MCT-MST)$	-0,06	-0,03	-0,1	-0,06

Se observa (cuadro 7), que todas las zonas presentan valores altos de  $\rho_b$ , lo que deriva en suelos con baja porosidad. En este caso, se alcanzaron valores de hasta un 48% de porosidad. Según Baver (1973), la densidad aparente y la porosidad son propiedades que se ven seriamente afectadas por el laboreo continuo de los suelos. Por lo tanto, estos valores pueden ser atribuidos a la compactación existente en los suelos de las microcuencas, sobre todo de la microcuenca testigo, producto del laboreo histórico del suelo de Alto Loica y particularmente por el sobrepastoreo. Además, se suma la pérdida de los horizontes superiores más ricos en materia orgánica, que también han influido en que se presenten valores altos de densidad aparente. Donoso (1994) al respecto, señala que la M.O contribuye a rebajar los valores de  $\rho_b$  al facilitar la granulación de los suelos.

Otra situación que cabe destacar, es el incremento de los valores de densidad aparente desde la parte alta de las microcuencas hacia la parte baja de ellas, especialmente en la microcuenca MST. Comportamiento que puede ser causa de que muchos de los puntos de muestreo del presente estudio fueron obtenidos de las zonas bajas de ambas microcuencas, en donde los suelos estaban claramente más compactados que los de las zonas altas, dando origen a cárcavas de gran magnitud. Además las zonas planas a través de los tiempos, han sido cultivadas por el hombre más intensamente que las zonas altas. No obstante a estos hechos, la prueba Kruskal-Wallis determinó que no existen diferencias significativas en  $\rho_b$  entre las zonas de cada microcuenca. Los resultados de esta prueba se exponen en el apéndice IV.

## 3.2. Propiedades hidráulicas

### 3.2.1. Retención de agua

Las curvas características de humedad son generadas a partir de la relación existente entre los contenidos volumétricos de agua del suelo y los potenciales necesarios para extraer dichos contenidos de agua (Salgado, 2001). En la figura 9, se presentan las curvas medias de retención de humedad (obtenidas a partir de los valores promedios de  $\theta_v$  en cada tensión aplicada) de las dos microcuencas en estudio, determinadas con el programa RETC a partir de los contenidos volumétricos experimentales.

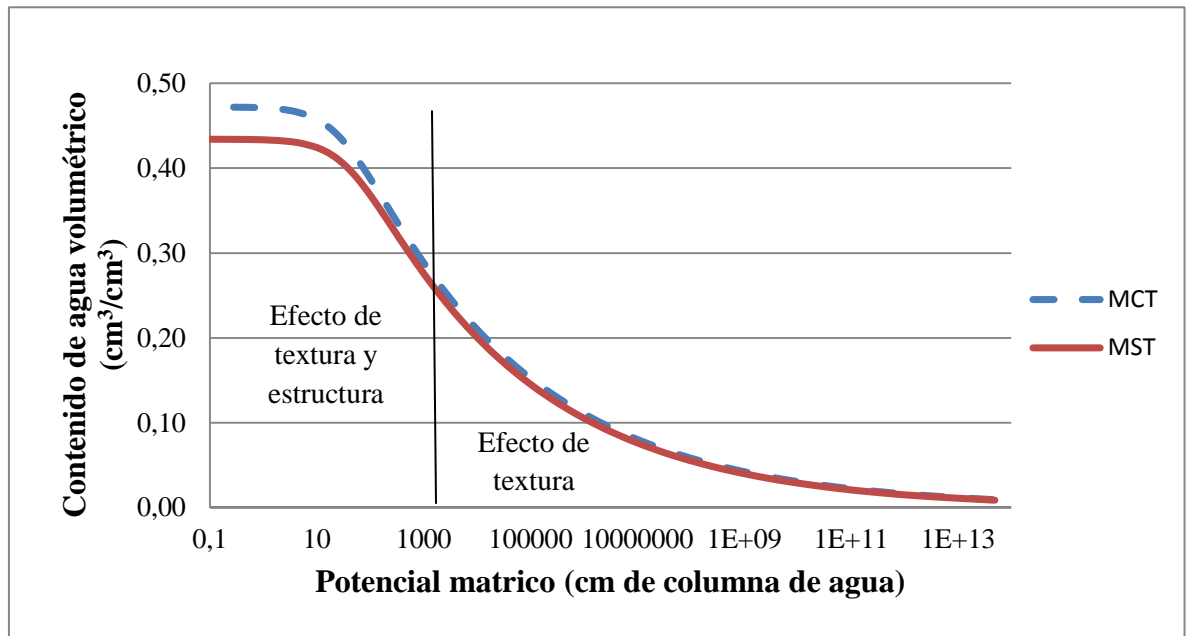


Figura 9. Curvas medias de retención de humedad de MCT y MST, obtenidas a partir del ajuste de los valores experimentales al modelo de Van-Genuchten.

El gráfico indica, que a potenciales menores a 1000 cm de columna de agua (condiciones cercanas a saturación) el flujo de agua de la microcuenca con tratamientos de conservación (MCT) supera al de la microcuenca sin tratamientos de conservación (MST). Esto implica que, desde el punto de vista de la conservación, MCT tendrá una mejor opción de infiltrar agua durante eventos de precipitación de alta intensidad. En potenciales mayores a 1000 cm de columna de agua, se observa, que las curvas de las dos microcuencas no presentan grandes diferencias sino un comportamiento bastante similar.

Porta et. al. (1994) señalan que, la retención de agua en el suelo en el rango de baja succión (0 a 10 m) se encuentra fuertemente influenciada por la estructura del suelo y que a potenciales mayores, ésta depende mucho más de la superficie específica de las partículas que de la estructura. Esto, permitiría concluir que las obras de conservación llevadas a cabo en MCT, han mejorado en alguna medida la estructura del suelo de esta microcuenca y por consiguiente se aprecia una mejoría de su capacidad de retención en condiciones de saturación.

La presencia de una mayor cantidad de partículas de arcilla en MCT también puede estar contribuyendo a que se presenten contenidos de agua superiores. De acuerdo a Kramer (1974); Stolzy y Juri (1982), citados por Porta et al. (1994), las arcillas retienen más agua que los otros tipos texturales por la mayor superficie específica que presentan, que les permite absorber una mayor cantidad de agua.

Por otro lado, en el cuadro 8 se aprecia el valor promedio estimado de cada uno de los parámetros del modelo Van-Genuchten ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$  y  $\theta_r$ ) de las microcuencas en estudio. Estos valores, fueron obtenidos por el programa RETC con la función de optimización no lineal



de mínimos cuadrados. Se observa además (cuarta columna), los valores promedios establecidos por Rawls *et al.* (1982) para suelos de textura Areno-francosa.

Cuadro 8. Valor promedio estimado de cada uno de los parámetros del modelo Van-Genuchten, para cada una de las microcuencas en estudio.

Parámetro	MCT	MST	Valores para suelos de textura areno francosa (Rawls <i>et al.</i> , 1982)
$\theta_s$	0,47217	0,4341	0,401
$\alpha$	0,33974	0,2482	0,115
$n$	1,1389	1,1398	1,474
$\theta_r$	(*)	(*)	0,035

$\alpha$  y  $n$ : parámetros asociados a la función de Van Genuchten.

$\theta_s$ : contenido de humedad de suelo a saturación.

$\theta_r$ : contenido residual de humedad del suelo.

(\*): valores cercanos a cero.

Del análisis del cuadro 8 se concluye que, los valores promedios de los parámetros de ambas microcuencas son bastante similares y se asemejan a los valores establecidos por Rawls *et al.* (1982) para suelos de textura Areno-francosa. La excepción, es el parámetro  $\alpha$ , cuyos valores difieren entre microcuencas y con aquellos establecidos por Rawls *et al.* (1982). Las variaciones entre parámetros se atribuyen, por lo general, al número, distribución y forma de los poros que constituyen el suelo.

En MCT el parámetro  $n$  presentó valores en el rango de 1,11 y 1,41, el parámetro  $\alpha$  entre 0,08 y 0,98 y  $\theta_s$  entre 0,43-0,54  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ . En la microcuenca testigo (MST)  $n$  osciló entre 1,12 y 1,87,  $\alpha$  entre 0,03 y 0,96 y el parámetro  $\theta_s$  se ajustó al intervalo 0,35 y 0,58  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ . El contenido de agua residual,  $\theta_r$ , mostró en la totalidad de los casos valores iguales a cero.

En la figura 10, se presentan por separado las curvas medias de retención de humedad de las dos microcuencas en estudio. De ellas es posible concluir a simple vista, que existe un buen ajuste entre los valores determinados por el modelo y los valores experimentales (símbolos). Esto se corrobora con los coeficientes de determinación obtenidos (0,9764 para MCT y 0,9854 para MST), valores cercanos a 1 que indican una buena correlación.

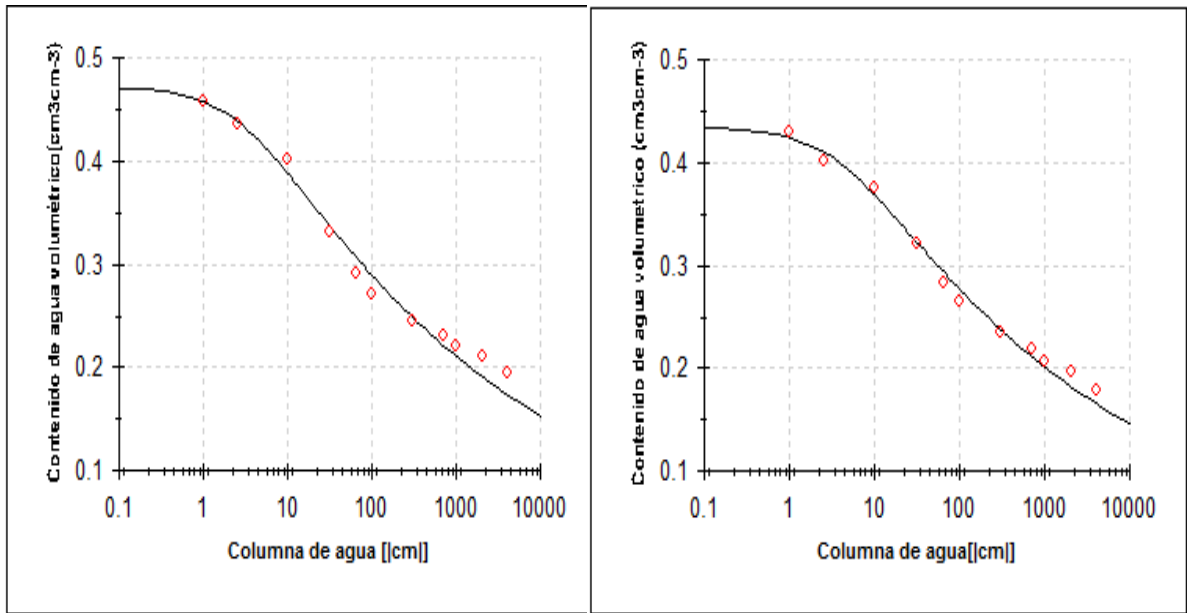


Figura 10. Curvas medias de retención de agua para las microcuencas MCT (izquierda) y MST (derecha).

### 3.2.1.1. Contenido de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente

En la figura 11 se representan gráficamente los valores promedios de agua retenidos a 0,033 Mpa (punto denominado capacidad de campo, CDC), obtenidos experimentalmente y por medio de los programas computacionales RETC y SPAW.

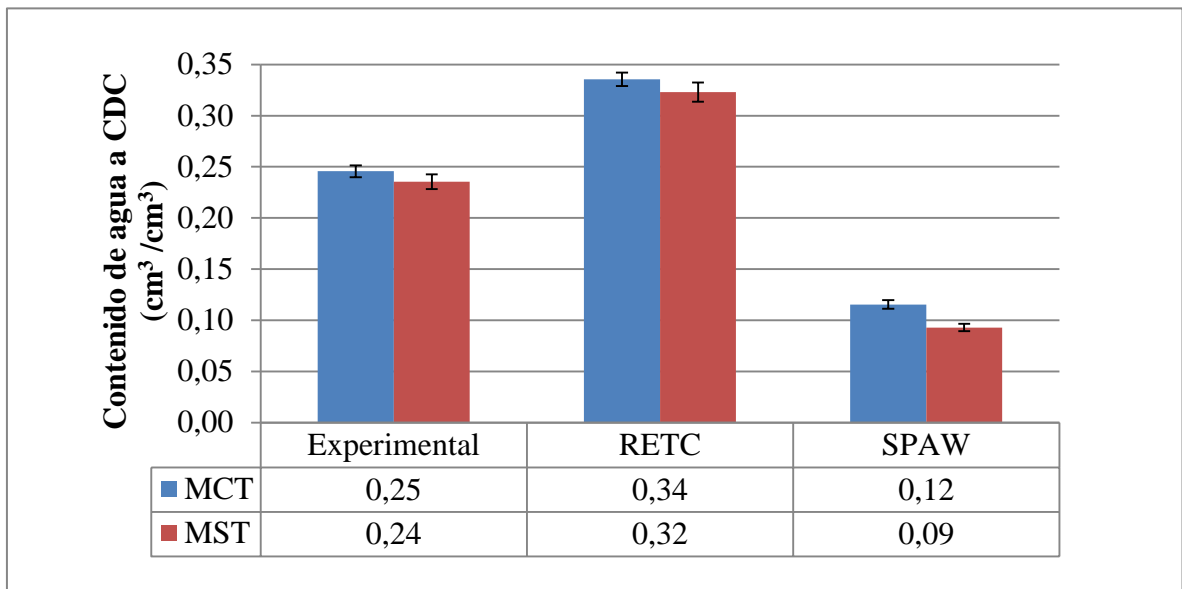


Figura 11. Contenidos de agua retenidos a 0,033 Mpa de las dos microcuencas en estudio, obtenido por 3 métodos diferentes (Experimental, SPAW y RETC).

En la figura se observa que, los valores medios de contenido de agua determinados con el programa RETC son superiores a los obtenidos experimentalmente y que, por el contrario, los contenidos de agua arrojados por el programa SPAW son inferiores a los valores experimentales.

Otro aspecto importante de mencionar, es el hecho, que los contenidos de agua a capacidad de campo de MCT son superiores a los de la microcuenca testigo, en los tres métodos utilizados (Experimental, RETC y SPAW). No obstante, esta diferencia en contenido de agua no es significativa para las microcuencas en los métodos experimental y RETC. Las barras de error estándar ratifican esto, ya que los errores de MCT se interceptan con los de MST en los métodos experimental y RETC.

La prueba suma de rangos de Wilcoxon también corrobora lo anterior. Establece con un nivel de confianza del 95%, que los valores medios de contenido de agua a CDC experimentales y obtenidos por medio del programa RETC no difieren significativamente entre microcuencas (p-valores superiores al 5%). Para el caso del programa SPAW, esta prueba estadística determina todo lo contrario, es decir, establece que sí existen diferencias en los contenidos de agua, sobre la base de un p-valor inferior al 5% (ver apéndice V).

En la figura 12, se exponen gráficamente los valores medios de agua retenidos a 1,5 Mpa (punto de marchitez permanente, PMP), obtenidos a través de los programas computacionales RETC y SPAW.

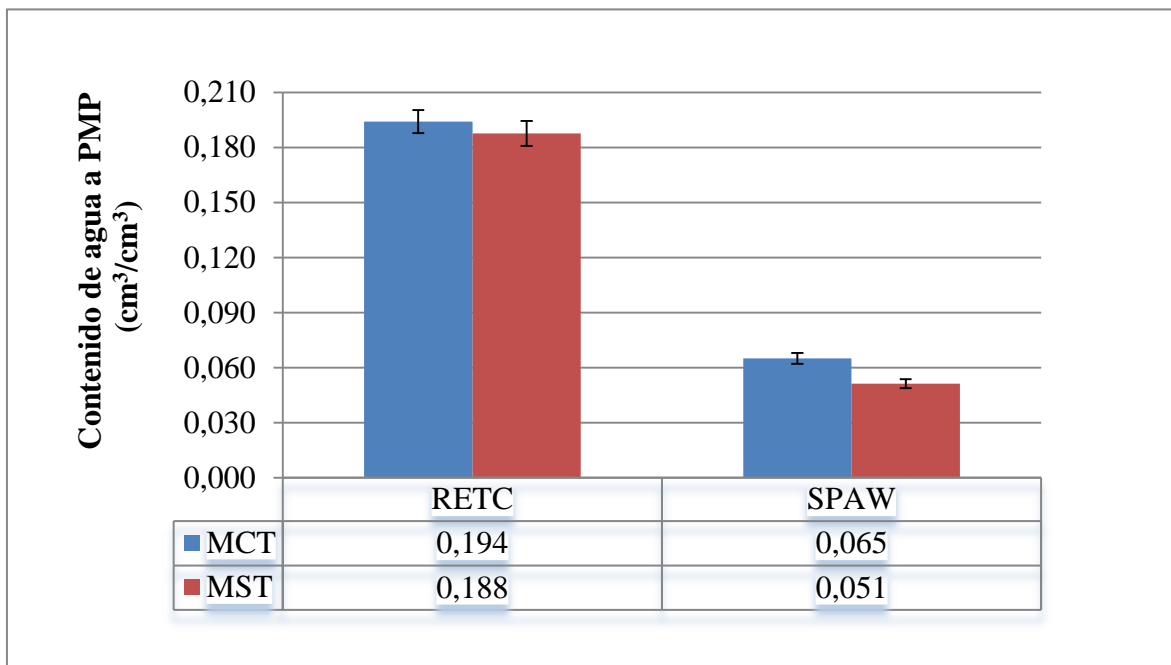


Figura 12. Contenidos de agua retenidos a 1,5 Mpa de las dos microcuencas en estudio, obtenido por 2 métodos diferentes (SPAW y RETC).

En esta figura se observa, que los valores de retención de agua en el punto de marchitez permanente, arrojados por el programa RETC, son superiores a los obtenidos con el

programa SPAW. Enseguida también se aprecia, que los valores promedios de MCT superan a los de MST en los dos métodos (RETC y SPAW). La prueba “Suma de rangos de Wilcoxon” determinó (con un nivel de confianza del 95%), que los contenidos de agua obtenidos con el programa RETC no presentan diferencias significativas y que sólo los valores obtenidos con el programa SPAW diferían estadísticamente. Esto sobre la base de los p-valores que se detallan en el apéndice V.

### 3.2.2. Conductividad hidráulica

#### 3.2.2.1. Conductividad hidráulica saturada

En el cuadro 9, se aprecian los valores medios de conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) de las dos microcuencas en estudio (MCT y MST), obtenidos con el programa computacional SPAW. Este programa, como se mencionó, determina la  $K_s$  a través de funciones de pedotransferencia que se basan en propiedades del suelo fácilmente disponibles, como: textura, materia orgánica y densidad aparente. Enseguida, se observan los datos experimentales de conductividad hidráulica cercanos a saturación ( $h=-0,1$  cm), obtenidos por Jiménez (2010) con un infiltrómetro de tensión GUELPH adaptado con un permeámetro de disco.

Cuadro 9. Valores promedio de conductividad hidráulica saturada y cercana a saturación para las dos microcuencas en estudio.

Microcuenca	C. hidráulica saturada ( $K_s$ ) cm/día		$\Delta = (K_s \text{ SPAW} - K_s \text{ Experimental})$
	SPAW	Experimental (-0,1 cm)	
MCT	108	62,4	45,615
MST	105,7	60,5	45,237

En general, los valores promedios de  $K_s$  determinados con el programa SPAW superan a los valores experimentales obtenidos por Jiménez (2010). En MCT y MST esta diferencia es de 45,6 y 45,2 cm/día, respectivamente. Sin embargo, hay que destacar el hecho que los valores experimentales corresponden a valores de conductividad en una tensión de 0,1 cm y no en el punto de saturación, lo cual explica esta diferencia.

Por otro lado, se observa, que los valores de  $K_s$  de la microcuenca MCT son ligeramente superiores a los valores de MST. No obstante, es una diferencia mínima que permite concluir anticipadamente, que no existen diferencias significativas entre las microcuencas. Para corroborar esto, se realizó la prueba de comparación de medias t-Student, la cual determinó con un nivel de confianza del 95%, que no existen pruebas suficientes para rechazar la hipótesis nula  $H_0$  que indica que los valores medios de  $K_s$  de las dos microcuencas son iguales (p-valor = 83,69 %).

Los párrafos anteriores permiten dar cuenta, que el tiempo transcurrido desde la instalación de las obras de conservación en MCT no ha sido suficiente para mejorar su conductividad hidráulica en condiciones de saturación. Esto, fundamentándose en que la microcuenca MCT registra casi los mismos valores de  $K_s$  que la microcuenca MST.

### 3.2.2.1.1. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada

En el cuadro 10, se presenta los valores medios de  $K_s$  de las dos microcuencas en estudio, según ubicación topográfica.

Cuadro 10. Valores medios y coeficientes de variación de la conductividad hidráulica saturada, según ubicación topográfica, de las microcuencas MCT y MST.

Microcuenca	Zona topográfica	$K_s$ (cm/día)	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	% Cobertura
MCT	Alta ladera	118,6 (29,9)	1,58	43,27
	Media ladera	108,8 (26,1)	1,62	36
	Baja ladera	93,4 (45,9)	1,62	28
MST	Alta ladera	117,4 (35,6)	1,64	15,29
	Media ladera	103,7 (43,5)	1,65	12,99
	Baja ladera	91,4 (44,3)	1,72	11,7

( ): % Coeficientes de variación

Se observa, en general, una alta variabilidad de  $K_s$  sobre todo en la microcuenca testigo (MST) cuyos coeficientes de variación se encuentra entre el 35,6 % y el 44,3%. Se aprecia también, que las zonas de baja ladera de MCT y de MST registran las mayores variaciones de  $K_s$  (45,9 y 44,3% respectivamente) y que las zonas de media y de alta ladera de MCT presentan los menores coeficientes de correlación (26,1% y 29,9, respectivamente). La explicación de este suceso, sería que la conductividad hidráulica es una propiedad altamente variable, tanto espacial como temporalmente.

Bastos y Oliveira (2003), indican que la conductividad hidráulica saturada y cercana a saturación presenta en general una alta variabilidad.

Ellies *et al.* (1997), señalan que la conductividad hidráulica saturada al ser dependiente del sistema poroso varía fuertemente de un sitio a otro, inclusive en sitios muy próximos entre sí y según las distintas orientaciones del suelo.

Fuentes *et al.* (2004) señalan que, la variación de la conductividad es producto de varios procesos y/o actividades, tales como: el crecimiento y la descomposición de las raíces, procesos de congelación y descongelación, actividades de los microorganismos del suelo y labores agrícolas.

Se observa además, que la conductividad hidráulica saturada varía según la ubicación topográfica. En este caso, los mayores valores de  $K_s$  se alcanzan en las zonas altas de las laderas de las microcuencas MCT y MST y los menores valores se registran en las zonas bajas. La explicación de estos resultados, pueden ser atribuidos al hecho que los menores valores de densidad aparente y los mayores porcentajes de cobertura arbórea se registraron en las zonas altas de las microcuencas (ver cuadro 12).

Rodríguez (2009) en su memoria de título “Efecto de las propiedades físicas de un suelo granítico en su conductividad hidráulica saturada” evaluó el efecto de la pendiente en la  $K_s$ . En sus ensayos observó, al igual que en este estudio, que la tendencia de la  $K_s$  era aumentar a medida que se acrecentaba la posición en la ladera. Concluyó entonces, que los mayores valores de  $K_s$  coincidían con el mayor contenido de materia orgánica encontrado en la parte alta de las laderas.

Por otra parte Aoki y Sereno (2005) determinaron en sus ensayos, que los valores altos de conductividad hidráulica registrados en las zonas de alta y media ladera de un suelo Haplustol de la región central de la provincia de Córdoba (Argentina), eran producto del transporte de partículas finas desde las zonas altas a las zonas bajas de la microcuenca. Con esto último concluyeron que, en las zonas bajas se producía una sedimentación y acumulación de partículas del tamaño de limo y arcilla y en las zonas altas se manifestaba todo lo contrario, la presencia de partículas más gruesas que favorecían la conductividad.

### 3.2.2.2. Conductividad hidráulica no saturada

Los valores de conductividad hidráulica en los puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron obtenidos a partir de los modelos computacionales SPAW y RETC. En el cuadro 11, se aprecian dichos valores para las dos microcuencas en estudio.

Cuadro 11. Valores promedio de conductividad hidráulica en los puntos CDC y PMP, obtenida mediante los programas RETC y SPAW.

Punto	Tipo Microcuenca	Conductividad hidráulica (cm/ día)			
		RETC	CV (%)	SPAW	CV (%)
CDC	MCT	4,14E-03	146,2	1,21E-06	199,9
	MST	6,86E-02	399,7	6,32E-07	318,8
PMP	MCT	5,19E-07	166,3	5,13E-11	172,7
	MST	3,11E-05	473,2	2,47E-11	328,3

Al analizar la conductividad hidráulica en el punto CDC (cuadro11), el modelo RETC arroja valores promedio de 0,0041 y 0,068 cm/día para las microcuencas MCT y MST, respectivamente. Mientras, el modelo SPAW tiende a valores de conductividad cercanos a cero para ambas microcuencas. Esto, se acentúa más a potenciales de agua mayores (PMP), debido a que los poros de transmisión de agua son casi nulos.

Los diferentes valores de conductividad arrojados por ambos programas, pueden ser causa de las variables de entrada que exigen cada uno ellos. SPAW basa su estimación principalmente en datos de textura y materia orgánica e incorpora además, parámetros de densidad aparente, contenido de gravas y salinidad, obviando la arquitectura de poros. RETC por su parte, además de los datos texturales exige valores medidos de retención de humedad del suelo a distintas tensiones, los cuales tienen en sí una representatividad del tamaño y arquitectura de poro.

En el cuadro además se observa, que los valores promedios de conductividad arrojados por un mismo programa son diferentes para ambas microcuencas. En el caso de RETC en CDC y PMP, MST presenta una conductividad mayor que MCT y para el caso SPAW todo lo contrario, es decir, MCT presenta una conductividad superior a MST. Estos resultados, se atribuyen a los distintos valores de contenido de humedad que presentan ambas microcuencas; ya que según Dirksen y Klute (1986), bajo condiciones de suelo insaturado la conductividad hidráulica depende del contenido de agua del suelo. Por el contrario Ellies (1989) señala, que la conductividad hidráulica en fase no saturada depende de la tensión con la cual se encuentre retenida el agua, es decir, de la sección de poros que conducen el agua.

La prueba estadística suma de rangos de Wilcoxon respalda lo anteriormente expuesto, es decir, establece que existen diferencias significativas de conductividad hidráulica a 0,033 y 1,5 Mpa entre las microcuencas con los dos métodos utilizados. Respaldándose, en los p-valores arrojados, los cuales son inferiores a un 5% (Apéndice VI).

#### 4. CONCLUSIONES

Con respecto a las propiedades físicas, se puede concluir que:

Los 17 años transcurridos desde la implementación de las prácticas de conservación, no es un tiempo suficiente que permita mejorar las propiedades físicas y químicas de un suelo que ha sufrido las consecuencias de la erosión. Esto, sobre la base de que en los suelos de las microcuencas en estudio no se aprecian diferencias significativas en cuanto a densidad aparente, materia orgánica, contenido de gravas y porcentaje de partículas del tamaño de limo.

La pérdida de partículas finas (arcillas) de la microcuenca MST es producto de los efectos perjudiciales que trae consigo la erosión, ya que cuando se originan los procesos erosivos las partículas finas junto con la materia orgánica son las primeras que se exportan y/o erosionan. Esto último, a su vez es causa, de la ausencia de una cubierta vegetal protectora del suelo.

La deforestación, el laboreo continuo de la tierra y el sobrepastoreo llevado a cabo en Alto Loica, ha originado que los suelos de las dos microcuencas presenten problemas de compactación y por ende valores altos de densidad aparente, sobre todo en la microcuenca MST.

Las propiedades que registraron mayor variabilidad (MO, arcilla y limo) son las propiedades que se ven mayormente afectadas por la acción de la erosión.

La distribución del tamaño de partículas y la densidad aparente no se ven afectadas por la topografía.

Con respecto a la retención de agua del suelo, se concluye que:

Las obras de conservación llevadas a cabo en MCT han mejorado en alguna medida la retención de agua en condiciones cercanas a saturación. No obstante (en base al programa RETC), la capacidad de retención a 0,033 y 1,5 Mpa no se ha visto significativamente mejorada por estas obras de conservación. Esto, sobre la base de que las microcuencas no presentan diferencias estadísticas.

Con respecto a la conductividad hidráulica saturada y no saturada, se concluye que:

La topografía afecta la conductividad hidráulica saturada. Los mayores valores de  $K_s$  se observan en la parte alta de las microcuencas y los menores valores, en la parte baja. Esto, puede ser atribuido al hecho, que los menores valores de densidad aparente y los mayores porcentajes de cobertura arbórea se registran en las zonas altas de ambas microcuencas.

Los diferentes valores de conductividad hidráulica no saturada arrojados por los programas RETC y SPAW, son debido a las diferentes variables de entrada que exigen cada uno de ellos. SPAW basa su estimación principalmente en datos de



textura y materia orgánica e incorpora además, parámetros de densidad aparente, contenido de gravas y salinidad. RETC por su parte, además de datos texturales exige valores medidos de retención de humedad del suelo a distintas tensiones.

Bajo condiciones insaturadas las obras de conservación, especialmente la forestación, han mejorado la conductividad hidráulica de los suelos de la microcuenca MCT.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- AOKI, A y SERENO, R. 2005. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. [en línea] Agricultura técnica 65(3) pp.295-305. <www.scielo.cl>. [consulta: 10 de marzo de 2010].
- BASTOS, M y OLIVEIRA, S. 2003. Densidad de probabilidad como herramienta en la caracterización de la conductividad hidráulica saturada de los suelos. [en línea]. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. VII Escuela Latinoamericana de física de suelos. pp.29-34. <www.unesdoc.unesco.org>. [consulta: 20 de Junio de 2010].
- BAVER, L.y GARDNER, W.R., 1973. Física de Suelos. Primera edición en español, Ediciones Uteha. México. 525 p.
- BLAKE, G. y HARTAGE, K. 1986. Bulk Density. pp: 363.375.In: Klute, A. (Ed). Methods of Soil analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2<sup>nd</sup> ed. ASA and SSSA, Madison, WI. V4. 1. 1.188 p.
- BOCIC, P. 1972. Variación físico química de un suelo forestal en relación al tipo de cubierta vegetal. Memoria de título Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía. Universidad de Concepción. Chillán. Chile. 113 p.
- BOCIC, P., FERNÁNDEZ, B. y ROCUANT, L. 1976. Efecto de la cubierta vegetal en las propiedades químicas y físicas de los suelos forestales. III Suelos serie Santa Bárbara. Boletín Técnico N° 59, Depto. Suelos, Esc. Agronomía. Universidad de Concepción. 68 p.
- CONAF/JICA. 1998. Proyecto “Control de Erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile”. Informe Final. Santiago.
- CONAF/JICA. 1999. Proyecto “Control de Erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile”. Informe Contrapartes Nacionales. Santiago.
- DEWIS, J. y FREITAS, F. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos N° 10. FAO, Roma, Italia. 252 p.
- DIRKSEN, C. y KLUTE, A.1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In: Klute, A. (Ed). Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2<sup>nd</sup> ed. ASA and SSSA, Madison, WI. V4. 1. pp. 687-691.
- DIRKSEN, C. 1999. Soil Physics Measurements. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany. 154 p.
- DONOSO, C. 1994. Ecología forestal: el bosque y su medio ambiente. Cuarta edición. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 369 p.
- ELLIES, A. y MAC DONALD, R. 1989. Las propiedades físico-mecánicas en los suelos que afectan su drenaje. Revista Sociedad chilena de la ciencia del suelo 9. pp.46-63.

- ELLIES, A; GREZ, R y RAMÍREZ, C. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Revista Agro Sur* 25(1). pp.51-56.
- ELLIES, A. 2000. La degradación física del suelo. *Revista Sociedad chilena de la ciencias del suelo* 14. pp.86-93.
- FORSYTHE, W. 1975. Física de Suelos. Ed. IICA. pp.157-170.
- FRANCKE, S., VARGAS, R., WILLIAMS, E., PINTO, M. y BARRÍA, B. 1999. Recuperación de suelos degradados en el Marco de la nueva Ley de Fomento Forestal. CONAF, Santiago de Chile. 11 p.
- FRANCKE, S., MARÍN, J. y VARGAS, R. 2003. Control de erosión y forestación en cuencas hidrográficas de la zona semiárida de Chile. *Revista Sociedad Chilena de Ciencias del Suelo* 19. pp.35-48.
- FUENTES, J. P., FLURY, M. y BEZDICEK, D. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till and no till. *Soil Science Society of América Journal* 68. pp.1679-1688.
- FUENTES, A. 2008. Efecto de las técnicas de conservación de suelos y aguas sobre el balance hídrico superficial en microcuencas experimentales de la localidad Alto Loica, Provincia de Melipilla, R.M. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Departamento de Geografía. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 82 p.
- GALLEGOS, A. 1998. Estudio sobre la pérdida de la estabilidad de los agregados del suelo como consecuencia de la erosión hídrica. Facultad de Cs. Forestales. Dpto. de Silvicultura. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 43 p.
- GAVANDE, S. 1972. Física de suelos, Principios y Aplicaciones. Primera Edición. Editorial Limusa- Wiley. México. 351 p.
- GAVANDE, S. 1986. Física de Suelos, Principios y Aplicaciones. 5ª ed. México. Editorial Limusa- Wiley. México. 351 p.
- GONZÁLEZ, J. y PÉREZ, C. 2002. Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, Chillán. 196 p.
- HILLEL, D. 1971. The state of water in the soil. En: *Soil and Water: Physical principles and processes*. New York Academic press .288 p.
- HILLEL, D. 1980. *Fundamental of soil physics*. New York, Academic Press. 385 p.
- HONORATO, R. 1993. Manual de Edafología. Primera edición. Universidad Católica de Chile. Editorial Universitaria. 195 p.

- HONORATO, R. 2000. Manual de Edafología. Cuarta edición. Universidad Católica de Chile. Editorial Universitaria. 267 p.
- JÍMENEZ, C. 2010. Conductividad hidráulica del suelo en dos microcuencas del sector Alto Loica, R.M., Chile. Facultad de Cs. Forestales y Conservación de la Naturaleza. Dpto. de Silvicultura. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 37 p.
- KAY, B. D. 1999. Soil structure. *In: Handbook of Soil Science*. Sumner, M. E. (ed). CRC Press Inc., Boca Raton. FL. USA. pp.229-276.
- MOURGUES, V. [s.a]. El suelo sus características y clasificación. Publicación N° 11 del Departamento de Conservación del Medio Ambiente.
- NÚÑEZ, J. 1985. Fundamentos de edafología. 2ª. Ed. Edit. UNED, San José. 184 p.
- PIZARRO, R., SANGÜESA, C., JUAN, F., GARCÍA, J. 2004. Revisión y Análisis de Prácticas Tradicionales de Conservación de Aguas y Suelos en Zonas Áridas y Semiáridas de Chile Central. Talca, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. 72 p.
- PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid. 792 p.
- RAWLS, W., BRAKENSIEK, D. y SAXTON, K. 1982. Estimation of soil properties. *Trans. of the ASAE* 25. pp.1316-1321.
- RODRÍGUEZ, O. 2009. Efecto de las propiedades físicas de un suelo granítico en su conductividad hidráulica saturada. Universidad de Concepción. Chillán. Chile. 38 p.
- SADZAWKA, A. , CARRASCO, M.A. , GREZ, R. , MORA, M. , FLORES, H. y NEAMAN, A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Instituto de Investigaciones agropecuarias. Serie Actas INIA N° 64, Santiago, Chile. 161 p.
- SALGADO, E. 2001. Curso relación suelo-agua-planta. Ediciones Universitarias, Universidad Católica de Valparaíso. Santiago. Chile. 179 p.
- SAXTON, K. y RAWLS, W. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70. pp.1569-1578.
- SINGER, M. y MOONS, D. 2000. Soils and Introduction. Cuarta edición. Edit. Prentice hall. 527 p.
- THOMPSON, L y TROEH, F. 2002. Los suelos y su fertilidad. Cuarta edición. Editorial Reverté. Barcelona. España. 639 p.
- TOKUGAWA, K. y VARGAS, R. 1996. Informe intermedio de control de erosión. Proyecto CONAF/ JICA. Santiago. Chile. 110 p.

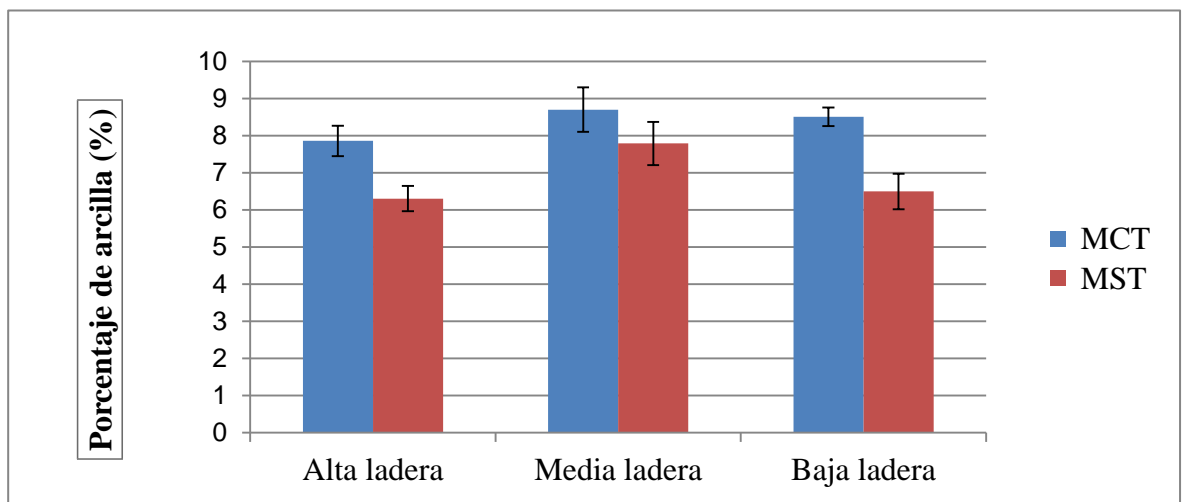
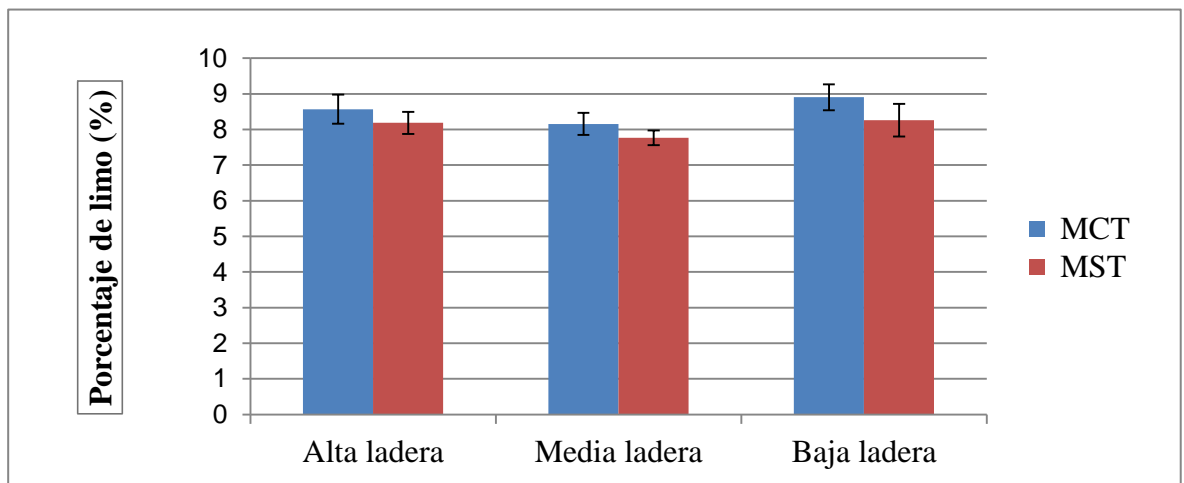
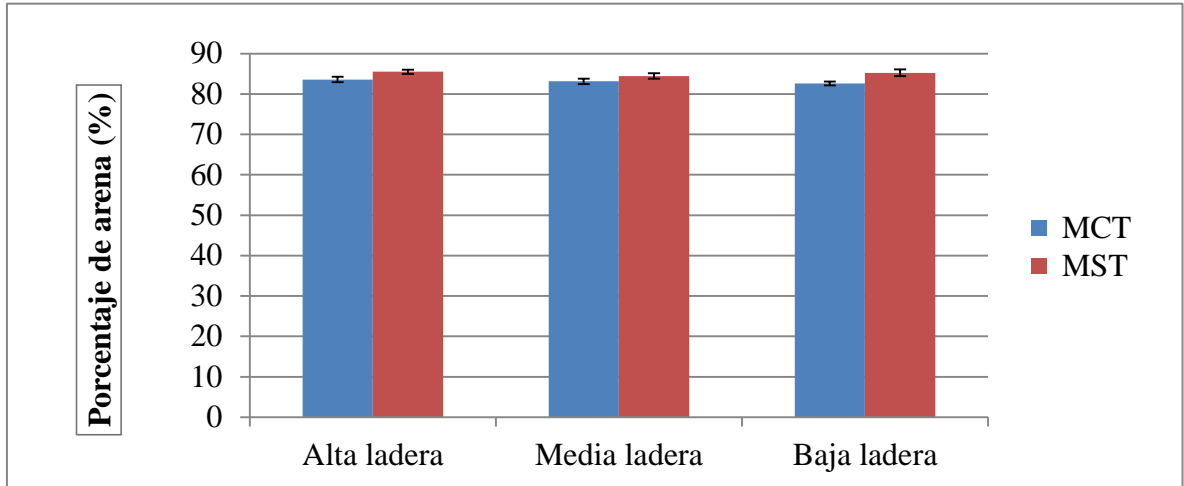
URRUTIA, C. 2000. Efecto del uso de obras de conservación sobre las características del suelo y el rendimiento de maíz y zorgo en el sur de Honduras. Honduras. 60 p.

VAN-GENUCHTEN, M. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of América Journal 44. pp.892-898.

WALPOLE, R y MYERS, R. 2000. Probabilidad y estadística. Cuarta edición. Editorial Mc Graw-Hill. México. 797 p.

## APÉNDICES

**APÉNDICE I: Porcentajes promedios de arena, limo y arcilla, para cada zona geográfica de las microcuencas en estudio de la Localidad Alto Loica, R.M., Chile.**

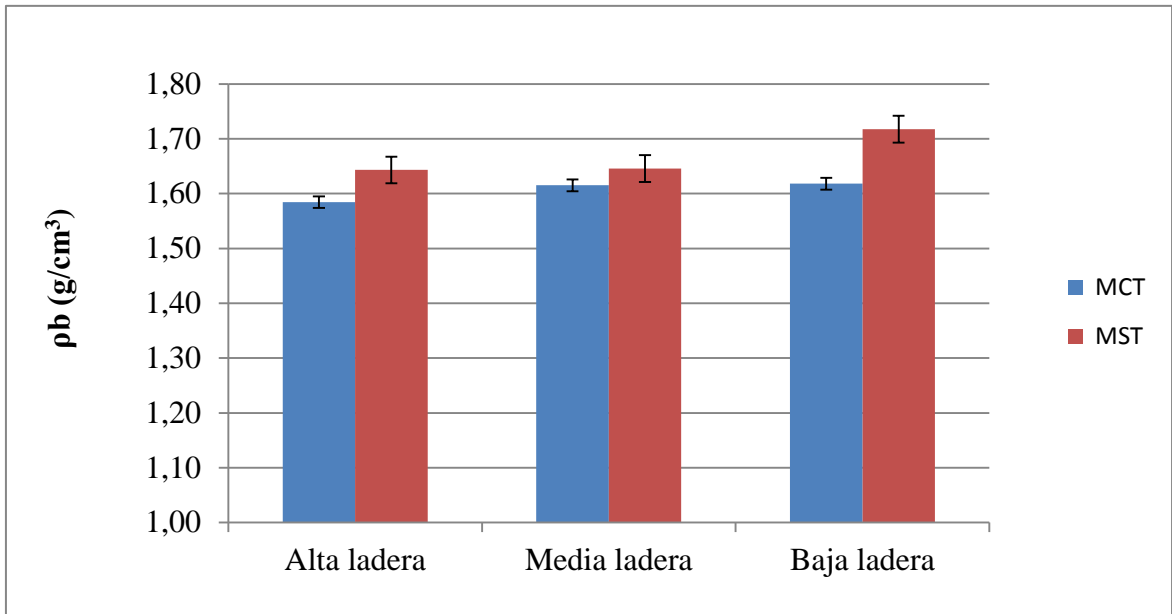


**APÉNDICE II: Resultados de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, para MCT y MST.**

DATOS MCT	Arena			Limo			Arcilla		
	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera
N	9	9	7	9	9	7	9	9	7
% Promedio	84	83	83	9	8	9	8	9	9
Suma de rangos	132	117	76	124	94	107	96	128	101
Región Crítica ( $h > \chi\alpha$ )	5,991			5,991			5,991		
H	1,055			1,861			1,417		

DATOS MST	Arena			Limo			Arcilla		
	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera
N	10	8	7	10	8	7	10	8	7
% Promedio	86	84	85	8	8	8	6	8	6
Suma de rangos	142	89	94	146	73	106	101	142	82
Región Crítica ( $h > \chi\alpha$ )	5,991			5,991			5,991		
H	0,809			3,284			5,099		

**APÉNDICE III: Valores promedio de densidad aparente para cada zona topográfica de las microcuencas en estudio.**





**APÉNDICE IV: Resultados de la prueba estadística Kruskal-Wallis para la propiedad densidad aparente.**

DATOS MCT	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )		
	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera
N	9	9	7
Promedio	1,58	1,62	1,62
Suma de rangos	106	122	97
Región Crítica ( $h > \chi\alpha$ )	5,991	5,991	5,991
H	0,3944	0,3944	0,3944

DATOS MST	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )		
	Alta ladera	Media ladera	Baja ladera
N	10	8	7
Promedio	1,64	1,65	1,72
Suma de rangos	114	99	112
Región crítica	5,991	5,991	5,991
H	1,6934	1,6934	1,6934

**APÉNDICE V: Valores p determinados por la prueba estadística “Suma de rangos de Wilcoxon”, para los valores promedios de humedad a capacidad de campo y punto de marchites permanente.**

<b>Método</b>	<b>p-valores en CDC (%)</b>
Experimental	12,6
RETC	10,35
SPAW	0,004

<b>Método</b>	<b>p-valores en PMP (%)</b>
RETC	18,88
SPAW	0,004

**APÉNDICE VI: Valores P arrojados por la prueba estadística suma de rangos de Wilcoxon para la conductividad hidráulica insaturada.**

<b>Conductividad hidráulica</b>	<b>P-valores (%)</b>	
	<b>RETC</b>	<b>SPAW</b>
CDC	1,79	0,85
PMP	1,52	0,19