

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE SUELO
EN LÍNEAS DE PIEDRAS CON APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL DE CAPRINO**

CRISTIAN MANUEL CARRASCO GUAJARDO

SANTIAGO – CHILE

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE SUELO
EN LÍNEAS DE PIEDRAS CON APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL DE CAPRINO**

**EVALUATION OF PHYSICAL AND HYDRAULIC SOIL PROPERTIES IN
STONE-LINES WITH GOAT MANURE APPLICATION**

CRISTIAN MANUEL CARRASCO GUAJARDO

SANTIAGO – CHILE

2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS E HIDRÁULICAS DE SUELO
EN LÍNEAS DE PIEDRAS CON APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL DE CAPRINO**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo.

CRISTIAN MANUEL CARRASCO GUAJARDO

	Calificaciones
Profesores Guías	
Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, M.S.	6,7
Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,8
Profesores Evaluadores	
Yasna Tapia F. Ingeniera en Alimentos, Dra.	6,4
Julio Haberland A. Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	6,2

SANTIAGO – CHILE

2017

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres Alejandra Guajardo y Manuel Carrasco por todo su amor, trabajo, esfuerzo y dedicación, quienes a lo largo de mi vida han logrado enriquecerme de grandes valores y han podido comprender, entender y apoyar todas mis decisiones. Sin duda este logro es con ustedes y para ustedes. También a mis hermanos y abuelos.

A mis profesores guías. Al profesor Manuel Casanova por toda la paciencia, comprensión, compromiso y por incentivar a ser un buen profesional. Al profesor Oscar Seguel por todo el apoyo, motivación, dedicación y compromiso, sin duda un gran docente que deja muy claro su gran cariño por la enseñanza y gran parte de este trabajo se debe a su apoyo y orientación. A Don Hugo, porque parte del trabajo de laboratorio, es gracias a su tiempo dedicado y a sus enseñanzas prácticas.

A los grandes amigos que se lograron cultivar en la universidad, que en el fondo no existe necesidad de nombrarlos, ya que cada uno sabe y entiende los lazos que se lograron formar durante este pequeño ciclo de la vida. Sin duda cada uno de ustedes forma parte de mí y de mi realización como persona durante este tiempo.

A la organización AltoAndino de la cual formé parte y los grandes amigos que se lograron formar en ella. Una etapa hermosa en mi vida universitaria, que me hizo comprender mi formación como profesional, en la cual pude ver y entender lo valioso que es la sabiduría de las comunidades indígenas y su importancia para el futuro.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general	6
Objetivos específicos.....	6
MATERIALES Y MÉTODO	7
Sitio de estudio	7
Tratamientos y diseño de experimento.....	8
Propiedades de suelo evaluadas.....	10
Análisis estadístico	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
Propiedades generales del suelo.....	12
Textura.....	12
Densidad y materia orgánica	13
Distribución de tamaño de poros.....	14
Estabilidad de agregados	16
Propiedades hidráulicas del suelo	17
Repelencia al agua.....	17
Conductividad hidráulica	18
CONCLUSIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	24
ANEXOS	30

RESUMEN

Dadas las necesidades de contrarrestar los procesos de desertificación y principalmente detener los procesos de erosión en laderas, que afectan fuertemente a la Región de Coquimbo, se estableció un ensayo en la comunidad agrícola Angostura de Gálvez (31° 26' LS y 71° 33' LO) consistente en tres líneas de piedras dispuestas en una ladera con exposición ecuatorial, donde se establecieron plantas de *Atriplex nummularia*. Se controlaron como tratamiento las condiciones: T0: zona de escorrentía entre líneas de piedra; T1: suelo en línea de piedra sin plantas; T2 suelo en línea de piedras con *A. nummularia*; T3: suelo en línea de piedras con *A. nummularia* y estiércol de caprino (4 Mg ha⁻¹) y T4: zona bajo la línea de piedras. Se evaluaron algunas propiedades físicas e hidráulicas del suelo superficial. Se concluye que T3 muestra diferencias estadísticas con respecto a los otros tratamientos: como consecuencia del incremento en materia orgánica, disminuyó la densidad aparente, aumentaron los poros de drenaje rápido y se incrementó el índice de repelencia, mostrando también una mejora en la estabilidad de macro agregados frente a procesos de humectación. La conductividad hidráulica saturada fue mayor en la zona de escorrentía (T0), seguido de T3, aunque no se presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto de los tratamientos.

Palabras Claves: erosión en laderas, agregación de suelo, conductividad hidráulica, *Atriplex nummularia*.

ABSTRACT

To counteract the desertification processes and to stop the erosion processes on hillsides, that affects the Coquimbo Region, in the northern Chile, a trial was established in the Angostura de Gálvez agricultural community (31° 26 'SL and 71° 33' WL). The trial consists of three stone lines arranged in a hillside with equatorial exposition, where plants of *Atriplex nummularia* L. were established. As treatments were controlled the conditions: T0: area of runoff between stone lines; T1: soil in stone line without plants; T2 soil in stone line with *A. nummularia*; T3: soil in stone line with *A. nummularia* and goat manure (4 Mg ha⁻¹) and T4: area under the stone line. Some physical and hydraulic properties of the surface soil were evaluated. It was concluded that T3, showed the best results with respect to the other treatments: as a consequence of the increase in organic matter, the bulk density decreased, the pores of fast drainage increased and the water-repellency index increased, showing also an improvement in macro aggregate stability depending on the wetting processes. The saturated hydraulic conductivity was higher in the runoff area (T0), followed by T3, although there were no statistical significant differences compared with the other treatments.

Keywords: hillside erosion, soil aggregation, hydraulic conductivity, *Atriplex nummularia*.

INTRODUCCIÓN

La preocupación en el mundo por la erosión de los suelos ha aumentado considerablemente, siendo este tipo de degradación la más común y generalizada (Wakindiki y Ben-Hur, 2002), dado que el suelo como recurso natural es de suma importancia, que cumple un rol como nicho ecológico y es un factor fundamental en la producción de alimentos (Blanco y Lal, 2008). La erosión según Morgan (2005) es un proceso que consta de tres fases, en el desprendimiento de las partículas de suelo, su transporte por agentes erosivos como el viento y el agua, además de una tercera fase que es la depositación del material. Si bien la erosión natural es un mecanismo que participa en la formación de suelos y es casi imperceptible en lugares que no son intervenidos, la actividad humana la acelera de manera drástica, rompiendo con el equilibrio y la dinámica de los sistemas naturales (Blanco y Lal, 2008).

Entre los procesos de degradación de los suelos, la erosión hídrica es la que más superficie afecta a nivel mundial, con 1.100 millones de hectáreas involucradas, lo que representa el 56% del total de los suelos degradados en el mundo (Oldeman, 1994). En Chile la situación no es muy distinta: el relieve del país lo hace muy susceptible a la erosión, debido a que el 80% del territorio nacional está constituido por cerros y montañas (Pérez y González, 2001). Además, cabe destacar que sólo el 6% de la superficie del territorio es arable, de las cuales sólo un 1% no tiene limitaciones (Universidad de Chile, 2010). Según un estudio de CIREN (2010), del total de suelo disponible para actividad silvoagropecuaria, el 64% presenta algún grado de erosión, siendo el 49% del total una erosión entre moderada y muy severa. Otro factor determinante, sobre todo en las zonas semiáridas del país, son las condiciones pluviométricas, donde el gran porcentaje de las lluvias cae en invierno, cuando el suelo no presenta una cubierta vegetal que evite el impacto directo de la gota de lluvia, aumentando su erosividad (Pérez y González, 2001; CIREN, 2010). Por otro lado, las características del suelo determinan su erodabilidad, entendida como la susceptibilidad que tiene un suelo a sufrir procesos de erosión y por lo tanto corresponde a una propiedad compleja, que está determinada por una amplia gama de parámetros relacionados entre sí, de los cuales se puede destacar la materia orgánica (MO), la estructura y la granulometría de los suelos (Bonilla y Johnson, 2012). Los procesos erosivos afectan las propiedades biológicas, químicas y físicas del suelo; particularmente, estas últimas se ven afectadas por un cambio en las relaciones agua-aire, afectando especialmente la retención de agua (Blanco y Lal, 2008).

En la Región de Coquimbo, el nivel de desertificación es uno de los más altos a nivel nacional (Osorio y Oyarce, 2010). La agricultura intensiva de secano, la utilización de tierras poco aptas para el cultivo, el sobrepastoreo y la deforestación, en conjunto con el acelerado cambio climático, ha traído como consecuencia un marcado proceso de desertificación, donde sus efectos han afectado principalmente a las comunidades agrícolas, las cuales debido a la falta de capital para invertir en tecnologías que recuperen suelos degradados, han profundizado la situación de pobreza, con todos los problemas humanos y ecológicos que pueden derivar de ella (Torrice, 1994; Medina, 2006).

Dadas las problemáticas descritas y la necesidad urgente para un plan de desarrollo sustentable en estas zonas rurales, la conservación de suelos y aguas busca medidas que limiten o eviten la erosión, además de la posibilidad de poder recuperar suelos ya degradados, a través de un aumento en el aprovechamiento del agua, que a su vez se vea reflejado en un mayor desarrollo de biomasa en superficie y por ende la conservación del suelo (Mekonnen, 2015). Existen numerosas técnicas de protección del suelo, las cuales buscan actuar sobre la cubierta vegetal, sobre el control de la escorrentía, o sobre los factores topográficos. Una estrategia de control de erosión es el uso de estructuras físicas, que según Blanco y Lal (2008) están diseñadas para lograr controlar la escorrentía y la erosión en los campos cuando los métodos biológicos por sí solos no son suficientes.

Las estructuras mecánicas o físicas son utilizadas en terrenos severamente afectados por erosión y por lo general van acompañados de alguna práctica biológica. Estas técnicas de conservación están diseñadas en particular para interceptar y reducir la velocidad de la escorrentía, aumentar la tasa de infiltración, sedimentar la mayor cantidad de partículas y promover la formación de terrazas naturales con el tiempo (Blanco y Lal, 2008).

Las líneas de piedra es una técnica física, la cual consiste en un pequeño muro de fragmentos de roca ordenados a lo largo de una curva de nivel en las laderas (Council of Agriculture, 1995; Gebremichael *et al.*, 2005). Son barreras semipermeables que permiten el paso del exceso de escorrentía, logrando una estructura mucho más estable y no dependiente de la intensidad de las precipitaciones (Critchley *et al.*, 1992). Por otra parte, disminuyen la velocidad de la escorrentía superficial, reduciendo así su poder erosivo y aumentando la infiltración del agua, de manera que también logran reducir considerablemente las pérdidas de nutrientes (Wakindiki y Ben-Hur, 2002).

Los impactos que producen las líneas de piedra se pueden clasificar en el corto y largo plazo. En el corto plazo se reduce la longitud de la pendiente y se generan pequeñas zonas de retención de escorrentía y sedimentos. Los efectos a mediano y largo plazo son la reducción en el ángulo de la pendiente mediante la formación de terrazas de banco y el desarrollo de una cubierta vegetal más estable (Blanco y Lal, 2008). Nyssen *et al.* (2007) demostraron que en promedio las líneas de piedra de 3 a 20 años de edad disminuyen las pérdidas de suelo en un 68%; también que en promedio, el gradiente de la pendiente se reduce en un 1% cada 3 años. Por otra parte, el contenido de agua aumenta considerablemente a ambos lados de la línea de piedras, teniendo un efecto de larga duración (Gebremichael *et al.*, 2005). Las líneas de piedras son muy utilizadas por los agricultores en el mundo, por su bajo costo de inversión y su fácil implementación; la única limitante que se puede llegar a presentar es la disponibilidad de fragmentos de roca en el lugar para su construcción (Critchley *et al.*, 1992).

Respecto a las técnicas biológicas, las más utilizadas son los cultivos de cobertura, uso de mulch de residuos vegetales y aplicación de enmiendas orgánicas (Morgan, 2005). Estas pueden tener un contacto directo con el suelo y en general poseen un efecto tampón, evitando cambios bruscos por estreses externos y aumentando la resiliencia; también pueden cumplir un efecto protector de la superficie del suelo, interceptando las gotas de lluvia (Blanco y Lal, 2008). Además, las raíces de los cultivos cumplen una función importante en la

estructuración del suelo, ya que mejoran la estabilidad de los agregados, mediante los exudados de sus raíces y también aumentan la porosidad del suelo y los contenidos de materia orgánica, una vez que la raíz ha muerto y ha sido descompuesta por los microorganismos (Horn y Smucker, 2005).

Dada las características de las comunidades agrícolas presentes en el secano costero de la Región de Coquimbo, donde actualmente la mayor actividad agrícola está dada por la ganadería caprina (Medina, 2006), el estiércol es una muy buena alternativa como acondicionador de suelo, ya que se encuentran fácilmente disponible y en gran cantidad. Las enmiendas de estiércol benefician las propiedades físicas del suelo, ya que disminuyen la densidad aparente y la resistencia a la penetración, aumentan la porosidad gruesa, favorecen la infiltración y aumentan la retención de agua y la estabilidad de agregados (Seguel *et al.*, 2003; Seguel *et al.*, 2013).

Junto a las enmiendas, es beneficioso involucrar a especies vegetales forrajeras, tanto para el beneficio del ganado como para la salud del suelo (Mekonnen, 2015). A partir del año 1975 se desarrolló un proceso de forestación en el secano de la IV Región, en el cual se han combinado tanto especies nativas como introducidas (Peña, 2006; CONAF, 2008). Las especies del género *Atriplex* (*Atriplex spp*) han sido muy utilizadas en la rehabilitación de suelos degradados en zonas áridas, dando muy buenos resultados dada su adaptabilidad a condiciones adversas (Chisci *et al.*, 2001; Marqués *et al.*, 2005); además, cumplen una función nutricional importante en el ganado doméstico, otorgando un gran aporte proteico en los meses donde las cabras y ovejas más lo requieren (CONAF, 2008). De este modo, generar sistemas agropastoriles asociados a prácticas de conservación de suelos, resultan muy atractivos para las regiones semiáridas de Chile, de modo de subsanar las actuales condiciones y tratar de amortiguar los procesos de desertificación.

En el presente trabajo, se plantea como hipótesis que la acción conjunta de la línea de piedras con enmiendas orgánicas generará un efecto sinérgico sobre las propiedades físicas del suelo, generando un aumento de la infiltración y del almacenamiento de agua.

Objetivo general

Evaluar el efecto del *A. nummularia* y el estiércol de caprino aplicado sobre líneas de piedras en las propiedades físicas de un suelo en el norte semiárido de Chile.

Objetivos específicos

- Evaluar algunas propiedades físicas del suelo sobre y bajo la línea de piedras y en la zona de escorrentía entre líneas de piedras.
- Evaluar el efecto del estiércol de caprinos como mejorador de las propiedades físicas en relación a un suelo sin enmienda.

MATERIALES Y MÉTODO

Sitio de estudio

El estudio se realizó en una unidad demostrativa de prácticas de conservación de suelos y aguas, asociada al “Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental de Suelos Agropecuarios”, ubicada en la Comunidad Agrícola Angostura de Gálvez, en la Comuna de Canela, Provincia del Choapa, IV Región de Coquimbo (31° 26' LS y 71° 33' LO) durante el año 2015.

El sitio de estudio está ubicado en el interfluvio costero de las cuencas de los ríos Choapa y Limarí, en una posición de cerros caracterizado por Pouget *et al.* (1996) como *Cordillera de la Costa y Serranías Costeras (SEC)*. Se trata de cordones de cerros y serranías de altitud media (100 y 900 m) situados en la zona costera de la Región, con pendientes medias que van del 30 al 50% (Casanova *et al.*, 2011).

Los suelos del lugar son de origen coluvial, derivados de granito y que no están asociados a ninguna Serie de suelos actualmente, pero existen similitudes con la Serie Mincha (CIREN, 2005), que presenta en superficie clases texturales franco arenosas y a los 40 cm de profundidad ya aparece la estrata de origen granítico. Según la CNR (1993), el área corresponde a una unidad cartográfica de Misceláneo Cerro, descrita como suelos no arables, con limitaciones muy severas por erosión y con una superficie cubierta por cárcavas profundas donde sólo se presenta a la vista el subsuelo y en muchas áreas es visible el material parental.

La ladera utilizada en el estudio presenta exposición norte o ecuatorial, donde en el pasado existieron prácticas agrícolas de secano (siembra de trigo con labranza tradicional), pero en los últimos años el suelo ha estado sin intervención, sólo con pastoreo esporádico de caprinos y ovinos.

La zona presenta un clima semiárido, con precipitaciones concentradas en los meses de Junio y Julio que alcanzan una media anual de 132 mm, con una estación seca de 10 meses y una evapotranspiración potencial anual (ETP) de 874 mm. Dada la influencia costera, la nubosidad matinal es común, la temperatura media anual es de 15°C, la media máxima en el mes de enero de 24,8°C y la media mínima en el mes de Julio de 6,4°C (Uribe *et al.*, 2012).

Los análisis de suelo se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos y en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas, ambos pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Tratamientos y diseño de experimento

El sitio del ensayo corresponde a una ladera con tres líneas de piedras construidas en el año 2011 (Figura 1), en cada una de las cuales se establecieron las unidades experimentales (5 m x 1 m), en un diseño de bloques completamente aleatorizado. Para la construcción de las líneas de piedras, se trazaron curvas con nivel de ingeniero a una equidistancia de 2 m, posteriormente se hicieron zanjas de aproximadamente 10 cm de profundidad y 20 cm de ancho, las cuales fueron llenadas con fragmentos de rocas de las cercanías, logrando una altura de 30 cm sobre la superficie del suelo.



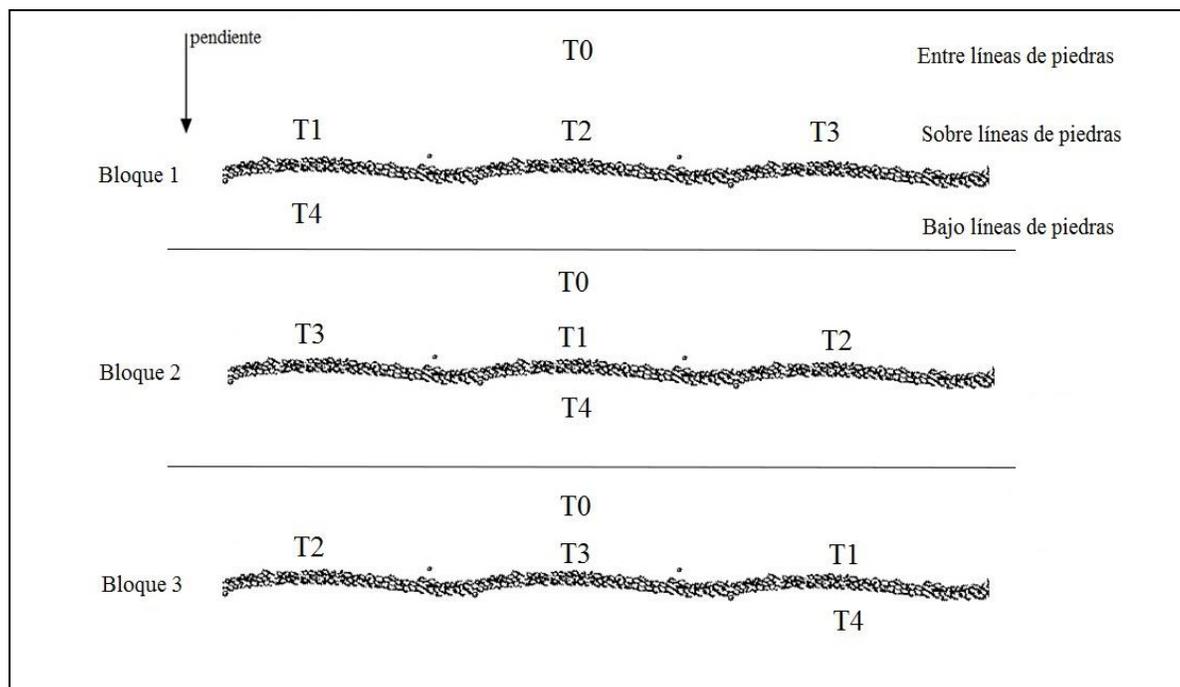
Figura 1. A. Vista general del ensayo, B. Vista de la línea de piedras central.

Se aplicó estiércol de caprinos durante el 2011 en dosis de 4 Mg ha^{-1} en la parte superior de las líneas de piedras y de forma manual, incorporándolas en los primeros 15 cm en las unidades experimentales que contemplaron la aplicación de enmienda. Posteriormente se establecieron plantas de un año de *Atriplex nummularia* L., sobre y bajo las líneas de piedras, distanciadas a 2 m. Cada línea fue segmentada en tres partes, donde se establecieron los tratamientos detallados en el Cuadro 1 y esquematizados en la Figura 2.

Cuadro 1. Tratamientos del ensayo

Tratamiento	Características
T0	Suelo en la zona entre líneas de piedras
T1	Suelo sobre la línea de piedras
T2	Suelo con plantas sobre la línea de piedras
T3	Suelo con plantas y estiércol sobre la línea de piedras
T4	Suelo bajo la línea de piedras

El T0 corresponde al testigo (zona de aporte de escorrentía y sedimentos) y está ubicado a 5 m por sobre la línea de piedras en la parte central. Además, T1, T2 y T3 están ubicados aleatoriamente sobre las líneas de piedras y T4 se ubica bajo las líneas de piedras, específicamente bajo el tratamiento T1, de manera de cuantificar el efecto sobre y bajo las líneas de piedras (Figura 2). Cada tratamiento posee tres repeticiones, distribuidos en los tres bloques, resultando un total de 15 unidades experimentales.

**Figura 2.** Distribución de los tratamientos sobre las líneas de piedras.

Propiedades de suelo evaluadas

En marzo de 2015 se tomaron muestras de suelo superficial y se evaluaron las siguientes propiedades físicas: densidad real (D_r) por el método del picnómetro, densidad aparente (D_a) por los métodos del terrón y el cilindro, textura mediante el hidrómetro de Bouyoucos, todos métodos descritos por Dane y Topp (2002). También se evaluó la estabilidad de macroagregados (<30 mm) por el método del tamizado en seco y húmedo (Hartge y Horn, 2009) y la estabilidad de microagregados (1 a 2 mm) mediante la relación de dispersión (Berryman *et al.*, 1982).

Se caracterizó la distribución de tamaño de poros mediante la curva característica, obtenida en muestras no disturbadas mediante cama de arena y tanto platos como ollas a presión (Sandoval *et al.*, 2012). Así, de acuerdo a Pagliai y Vignozzi (2002), se clasificaron los poros en drenaje rápido (> a 50 μm , retención entre saturación y -6 kPa), de drenaje lento (10-50 μm , retención entre -6 y -33 kPa), de agua útil (0,2-10 μm , retención entre -33 y -1500 kPa) y de agua inútil (< 0,2 μm , retención a -1500 kPa).

En muestras no disturbadas y secas al aire, se determinó la hidrofobia mediante el Índice de Repelencia (R) en laboratorio, según la metodología propuesta por Tillman *et al.* (1989), que usa agua y etanol como líquidos infiltrantes a -1 hPa de presión de suministro. Este índice se determina mediante la relación:

$$R = 1,95 \left(\frac{Se}{Sw} \right) \quad (1)$$

donde Se corresponde a la sorptividad con etanol y Sw a la sorptividad con agua destilada; el valor 1,95 es una constante que resulta de las propiedades del agua y el etanol, como la viscosidad y la tensión superficial. De esta forma, suelos con valores de $R > 1,95$ se consideran hidrófobos (Tillman *et al.*, 1989).

Además, se midió el contenido de materia orgánica (MO) mediante el método de calcinación descrito por Sadzawka *et al.* (2006).

Las muestras para los análisis en laboratorio se tomaron a una única profundidad (0-10 cm) debido que los procesos erosivos se generan por fenómenos de escorrentía dependientes de las características superficiales del suelo.

Finalmente, a principios de Agosto de 2015, se midió en terreno la conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) mediante minidisco infiltrómetro, a presiones de suministro de -1, -2, -4 y -6 hPa. Se empleó arena fina como material de contacto bajo el infiltrómetro, que permitió subsanar la rugosidad de la superficie que puede existir en el suelo (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000). Para el procesamiento de los datos se utilizó el método descrito por Zhang (1997), que recomienda intervalos de medición cada 30 s durante 10 min para cada tensión evaluada. El método requiere la medición de la infiltración acumulada (cm), la cual se grafica en función

de la raíz cuadrada del tiempo, para cada tensión, permitiendo realizar un ajuste cuadrático del tipo:

$$I = (C_1 t + C_2 \sqrt{t}) \quad (2)$$

donde C_1 y C_2 son parámetros de ajuste relacionados a la conductividad hidráulica y a la sorptividad del suelo respectivamente. La K_{ns} se calcula entonces a partir de:

$$K_{ns} = C_1/A \quad (3)$$

donde C_1 es la curvatura del ajuste cuadrático y A es un valor que explica la adsorción mátrica, por lo que depende de la textura del suelo (Anexo 1). Para este estudio, los valores de A utilizados corresponden a los suelos de clase textural Franco arenosa.

Como último paso se graficó la K_{ns} en función de la tensión de suministro, haciendo un ajuste lineal para estimar la conductividad hidráulica saturada (K_s) mediante el intercepto de la recta a la tensión cero.

Análisis estadístico

El diseño corresponde a bloques completamente al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones cada uno. Los resultados de los tratamientos se compararon mediante un análisis de varianza (ANDEVA) con un 95% de confianza, aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Duncan ($\alpha \leq 5\%$). Para el caso de la K_s , se compararon las pendientes obtenidas del ajuste de K_{ns} en función de la tensión mediante la prueba t de Student.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades generales del suelo

Textura

La textura juega un rol fundamental en la erodabilidad de los suelos (Morgan, 2005). Dependiendo de la granulometría, los suelos pueden ser más o menos erodables; así, las partículas grandes son más resistentes al transporte debido a la mayor fuerza requerida para arrastrarlas, mientras que las partículas finas poseen una mayor superficie de contacto entre ellas, lo que les confiere una mayor cohesividad. Esto no ocurre en las partículas de tamaño medio (limo y arenas finas), que no poseen cohesividad ni masa relevante, lo que en muchos casos las convierte en las más susceptibles a agentes erosivos (Bonilla y Johnson, 2012). En el Cuadro 2 se presenta el análisis mecánico de los suelos de cada tratamiento y su correspondiente clase textural (USDA).

Cuadro 2. Resumen de la granulometría superficial (0-10 cm) de cada tratamiento.

Tratamientos	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural (USDA)
	----- (%)-----			
T0	71,5 ($\pm 0,03$)	16,7 ($\pm 1,16$)b	11,8 ($\pm 1,16$)	Fa
T1	70,4 ($\pm 1,75$)	16,1 ($\pm 1,00$)ab	13,5 ($\pm 1,02$)	Fa
T2	70,4 ($\pm 1,75$)	16,4 ($\pm 0,58$)b	13,2 ($\pm 1,54$)	Fa
T3	70,7 ($\pm 2,93$)	15,8 ($\pm 1,17$)ab	13,5 ($\pm 1,75$)	Fa
T4	73,8 ($\pm 0,58$)	14,4 ($\pm 0,58$)a	11,8 ($\pm 1,16$)	Fa

Promedios (\pm desviación estándar); letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

Los tratamientos no tuvieron diferencias estadísticamente significativas para la arena y la arcilla, pero sí se encontraron diferencias significativas en los contenidos de limo, donde el mayor contenido se encontró en los tratamientos T0 y T2 y el menor contenido en el T4. Sin embargo, esta diferencia ($< 3\%$) no es relevante, de manera que todos los tratamientos presentaron clase textural franco arenosa.

La erodabilidad no depende solamente de la textura del suelo, sino que es el conjunto de propiedades que interactúan, como la estabilidad de agregados, la resistencia al corte, la capacidad de infiltración, el contenido de materia orgánica y las características químicas del suelo (Morgan, 2005).

Los contenidos de arena mayores a 70% obtenidos en todos los tratamientos, permitirían deducir *a priori* una presencia de agregados débiles y características hidráulicas del suelo correspondientes a alta conductividad hidráulica y baja retención de agua (Rawls *et al.*, 2003). A su vez Rawls *et al.* (2003) indican que los suelos de textura gruesa muestran efectos

más notorios sobre la retención de agua, como consecuencia del aumento en los contenidos de carbono orgánico, en comparación a suelos de textura fina.

Densidad y materia orgánica

La densidad aparente (D_a) es bastante utilizada como parámetro para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, su resistencia mecánica y el estado de compactación (Warrick, 2002). Alteraciones en D_a generan cambios en la estructura del suelo debido a la relación que existe con la porosidad total, siendo una propiedad altamente sensible al contenido de materia orgánica (MO) y al manejo del suelo (Osunbitan *et al.*, 2005). En el Cuadro 3 se muestran los resultados de MO, D_a y densidad real (D_r) para los distintos tratamientos.

Cuadro 3. Contenido de materia orgánica, densidad aparente (D_a) y densidad real (D_r).

Tratamientos	Materia orgánica (%)	D_a cilindro	D_a terrón -----($Mg\ m^{-3}$)-----	D_r
T0	1,39 ($\pm 0,23$)b	1,61 ($\pm 0,05$)b	1,75 ($\pm 0,08$)	2,72 ($\pm 0,03$)ab
T1	1,13 ($\pm 0,24$)b	1,62 ($\pm 0,06$)b	1,76 ($\pm 0,09$)	2,76 ($\pm 0,03$)c
T2	1,53 ($\pm 0,15$)b	1,58 ($\pm 0,01$)b	1,74 ($\pm 0,08$)	2,69 ($\pm 0,01$)a
T3	2,14 ($\pm 0,21$)a	1,38 ($\pm 0,01$)a	1,70 ($\pm 0,08$)	2,73 ($\pm 0,01$)bc
T4	1,28 ($\pm 0,62$)b	1,58 ($\pm 0,12$)b	1,75 ($\pm 0,07$)	2,74 ($\pm 0,01$)bc

Promedios (\pm desviación estándar); letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

Los contenidos de MO de los tratamientos estuvieron relacionados con la aplicación de la enmienda orgánica, encontrándose diferencias significativas entre T3 y el resto de los tratamientos. El segundo valor más alto corresponde al T2, el cual pudo tener un incremento importante de la hojarasca proveniente del *A. nummularia*, ya que según Bienes *et al.* (2009) las plantas de *A. halimus* generan un mulch de 1 cm en 5 años. Aún así *A. halimus* tiene una producción más reducida de materia seca en comparación a *A. nummularia* (Lailhacar *et al.*, 1995), por lo que es de esperar que en el corto plazo el tratamiento T2 se diferencie del testigo.

Los contenidos de MO se encuentran dentro de los valores esperables en los suelos de la zona costera del Norte Chico de Chile, que generalmente no superan el 2% en promedio (Luzio *et al.*, 2010). Es interesante observar que el contenido de MO es mayor en la zona de aporte (T0) que en el tratamiento T1, esto puede deberse a que el tratamiento T1 corresponde a una zona de acumulación de sedimentos, en el cual existía una baja presencia de especies vegetales, no así el T0, que representa a una zona menos intervenida y con una mayor presencia de especies herbáceas.

Los valores D_a evaluada mediante el método del cilindro se encuentran dentro de los rangos observados para suelos con clase textural franco arenosa, que van de 1,4 a 1,8 $Mg\ m^{-3}$

(Sandoval *et al.*, 2012), pero que varían notablemente dependiendo del manejo. Al respecto, sólo T3 mostró diferencias significativas con respecto al testigo. Estas diferencias eran de esperarse, debido a que el aporte de MO tiene un efecto sobre la estructuración del suelo, generando una mayor porosidad total (Seguel *et al.*, 2013). En este sentido, los valores de porosidad total para T3 considerando D_{cilindro} es cercano al 50%, mientras que en los otros tratamientos no superan el 43%.

Las diferencias de la $D_{\text{terrón}}$ no fueron estadísticamente significativas para ningún tratamiento, pero se puede observar una relación muy estrecha con respecto a la D_{cilindro} , donde los valores más bajos fueron para el T3 y el más alto para T1.

Cabe destacar que las diferencias entre D_{cilindro} y $D_{\text{terrón}}$ están dadas por el espacio poroso entre los agregados, que se incluye en el método del cilindro, no así para el método del terrón, que no incluye este espacio, entregando valores más altos (Brady y Weil, 2000). En el caso del T3, el espacio poroso entre agregados (Exped), dado por la relación $\text{Exped} = 1 - (D_{\text{cilindro}}/D_{\text{terrón}})$, corresponde al 19%, mientras que para el resto de los tratamientos no supera el 10%. El T3 pudo tener un gran diferencial debido a la mayor cantidad de porosidad gruesa que le aporta el estiércol (Hartge y Horn, 2009).

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en D_r entre los diferentes tratamientos. El T1 fue el que presentó el mayor valor ($2,76 \text{ Mg m}^{-3}$) y el valor más bajo se encontró en el tratamiento T2 ($2,69 \text{ Mg m}^{-3}$) valor que pudo haber estado influenciado por la presencia de material orgánico fresco proveniente de la capa de hojarasca que aporta la planta de *A. nummularia* en superficie, debido a que presenta una menor densidad en comparación a las partículas minerales (Seguel *et al.*, 2003). Independientemente de las diferencias estadísticas, los tratamientos se encuentran dentro del rango para suelos de origen granítico, que va de los $2,33$ a $2,94 \text{ Mg m}^{-3}$ (Sandoval *et al.*, 2012).

Distribución de tamaño de poros

La proporción y funcionalidad de los poros le confieren al suelo la capacidad de transportar y almacenar fluidos como el agua y el aire, por lo que una adecuada distribución de los diferentes tamaños de poros es fundamental para el óptimo funcionamiento del recurso. El Cuadro 4 presenta la distribución de los tamaños de poros para los distintos tratamientos.

Cuadro 4. Distribución de poros por tamaño para los distintos tratamientos.

Tratamientos	Tipos de poros			
	PDR (>50 μm)	PDL (50-10 μm)	PAU (10-0,2 μm)	PAI (<0,2 μm)
	------(%)-----			
T0	17,3 ($\pm 2,3$)b	9,7 ($\pm 0,3$)b	7,3 ($\pm 0,4$)a	5,5 ($\pm 0,4$)ab
T1	15,8 ($\pm 1,9$)b	10,0 ($\pm 0,8$)b	8,9 ($\pm 2,0$)a	5,7 ($\pm 0,7$)ab
T2	17,6 ($\pm 3,3$)b	8,8 ($\pm 2,9$)b	5,9 ($\pm 2,1$)a	6,5 ($\pm 1,1$)b
T3	22,8 ($\pm 1,1$)a	5,4 ($\pm 2,6$)a	10,2 ($\pm 3,0$)a	6,2 ($\pm 0,3$)ab
T4	17,6 ($\pm 3,8$)b	10,3 ($\pm 0,8$)b	9,5 ($\pm 3,9$)a	5,0 ($\pm 0,5$)a

PDR: Poros de drenaje rápido; PDL: Poros de drenaje lento; PAU: Poros de agua útil; PAI: Poros de agua inútil. Promedios (\pm desviación estándar); letras distintas en sentido vertical indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

Los poros de drenaje rápido y lento favorecen el flujo rápido de agua, asegurando la renovación del aire del suelo; en tanto, los poros de agua útil aseguran el suministro de agua para las plantas, mientras que los poros de agua inútil son los que retienen el agua a tensiones mayores al punto de marchitez permanente, no estando fácilmente disponible para las funciones fisiológicas de los cultivos (Hartge y Horn, 2009).

Para los PDR hubo diferencias estadísticamente significativas entre T3 y el resto de los tratamientos (Cuadro 4), con un valor mayor a 20%, que de acuerdo a Pagliai y Vignozzi (2002) lo califican como un suelo muy poroso. Este aumento significativo en T3 se debe a la capacidad de la MO en generar mayor cantidad de porosidad gruesa, tal como lo determinaron Seguel *et al.* (2013) con aplicaciones de estiércol de caprino en suelos de textura fina.

Para los PDL también se observan diferencias estadísticas significativas, pero en este caso el T3 fue el que presentó el menor valor. Dependiendo del arreglo de los agregados y su relación con la MO, parte de la porosidad gruesa (PAU) puede corresponder a la porosidad de la enmienda; así, las partículas más finas de esta podrían estar rellenando los espacios intra-agregados (10-50 μm), haciendo disminuir los PDL e incrementando la retención de agua (Brady y Weil, 2000). Sin embargo, en este caso no se generaron diferencias estadísticamente significativas en los PAU, donde todos los tratamientos clasifican según Reynolds *et al.* (2009) como suelos pobres para el crecimiento de las raíces, a excepción del T3, que clasifica como un suelo con limitaciones. Para el caso de la capacidad de aire, definida como la suma de PDR y PDL, dada la clase textural gruesa del suelo y de acuerdo a la clasificación de Reynolds *et al.* (2009), todos los tratamientos clasifican en un nivel aceptable para el desarrollo de los cultivos (>14%).

Finalmente, los tratamientos presentaron valores de PAI entre 5,0% a 6,5%, los que se encuentran dentro del rango esperado para suelos de textura franco arenosa (Warrick, 2002), ya que estos poros (<0,2 μm) responden a las altas tensiones de retención de agua, lo que se debe principalmente a la adsorción a superficies sólidas, que dependen de la textura del suelo y de la superficie específica de las partículas (Yoon *et al.*, 2007).

Estabilidad de agregados

Los agregados forman un papel fundamental en la estructura del suelo, ya que mantienen la porosidad y proveen estabilidad contra la erosión, por lo que las pruebas de estabilidad pueden ser utilizadas como indicadores de susceptibilidad a la degradación de los suelos (Barthès y Roose, 2002). En el Cuadro 5 se presentan los resultados promedio de la estabilidad de macroagregados (VDMP), y microagregados (RD), para cada tratamiento. Ambos métodos corresponden a pruebas de dispersión en agua, por lo que el menor valor denota la mayor estabilidad.

Cuadro 5. Variación del diámetro medio ponderado (VDMP) y relación de dispersión (RD). Promedios (\pm desviación estándar).

Tratamientos	VDMP	RD
	----(cm)----	----(%)----
T0	1,51 ($\pm 0,73$)	65,7 ($\pm 7,74$)
T1	2,10 ($\pm 1,36$)	60,8 ($\pm 9,80$)
T2	1,43 ($\pm 0,54$)	62,3 ($\pm 3,98$)
T3	1,15 ($\pm 0,82$)	67,2 ($\pm 5,76$)
T4	1,07 ($\pm 0,86$)	67,4 ($\pm 10,87$)

La estabilidad de macroagregados del suelo frente a procesos de humedecimiento, ya sea de origen natural como la lluvia o antrópica como el riego, puede ser estimada a través de la variación del diámetro ponderado (VDMP) de los agregados entre un tamizaje en seco y otro en húmedo. Según este principio, mientras menor sea la variación en el diámetro de las fracciones acumuladas (valores menores de VDMP), más estable será el suelo (Hartge y Horn, 2009). La habilidad de los agregados para resistir a los procesos de humedecimiento está dada principalmente por la tasa de humedecimiento del agregado y la resistencia de las uniones de las partículas que lo componen, características que están controladas principalmente por los agentes estructuradores del suelo, tales como la MO y la arcilla (Kay y Angers, 2000).

Sin bien los tratamientos no mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto al testigo, los tratamientos ubicados sobre la línea de piedras siguieron una lógica esperada. El tratamiento T3 presentó el menor VDMP, mejorando considerablemente con respecto al testigo, debido principalmente a la adición de MO en forma de estiércol, resultados que también fueron observados por Seguel *et al.* (2013). Según Abiven *et al.* (2009) las aplicaciones de estiércol tienen un efecto a largo plazo sobre la estabilidad estructural, otorgándole un aumento de hidrofobicidad al agregado, lo que limita su humedecimiento violento, previniendo la ruptura por escape de aire (Chenu *et al.*, 2000). El mayor valor de VDMP se observa en T1, el cual corresponde a la zona de acumulación de sedimentos, caracterizado por el contenido de MO más bajo, determinante de la estabilidad de los agregados en los procesos de humectación.

Al correlacionar los datos de MO con VDMP, se genera una relación lineal del tipo:

$$VDMP = 2,836 - 0,8324(MO) \quad (4)$$

con $r = 0,89$ ($p < 0,05$), en la que T4 se excluye de la tendencia, mostrando una alta estabilidad con bajo nivel de MO, lo que podría responder a un mayor nivel de contacto partícula a partícula por el pisoteo habitual de la zona.

En cuanto a la estabilidad de microagregados, la relación de dispersión (RD) es un parámetro que permite determinar la estabilidad de los agregados entre 1 y 2 mm de diámetro, al comparar un análisis de sedimentación con y sin dispersante químico.

Los valores más alto de RD se aprecian en T4 y T3, en tanto en T1 se obtuvo el valor menor (más estable). Cabe destacar la alta variabilidad de las mediciones, lo que impidió obtener diferencias estadísticamente significativas. De acuerdo a Berryman *et al.* (1982) todas las situaciones corresponden a suelos poco estables ($RD > 30\%$). Los resultados no muestran una coherencia con la literatura, ya que el aumento de la MO debería repercutir en un mayor aumento en la estabilidad de los microagregados, aunque en ciclos cortos de humectación y secado desde el momento de la aplicación de la enmienda, los resultados son más evidentes a nivel de macroagregados, requiriendo los microagregados un mayor tiempo de residencia de la enmienda para lograr efectos significativos (Six *et al.*, 2004).

Propiedades hidráulicas del suelo

Repelencia al agua

La materia orgánica puede provocar repelencia al agua en suelos, lo que se conoce como hidrofobia; esta condición podría generar problemas de infiltración y distribución irregular del agua en el perfil de suelo (Ellies *et al.*, 1995), lo que en casos extremos, causa escorrentía superficial excesiva y arrastre de sedimentos. Este fenómeno hidrofóbico se debe a que los grupos orgánicos apolares que cubren las partículas minerales, generan una menor adhesión del agua hacia los sólidos (Bachmann y Van der Ploeg, 2002). El contenido de agua del suelo, el pH, la acción radicular de las plantas, la textura y la actividad microbiana, son también factores que determinan la presencia de hidrofobia en los suelos (Müller y Deurer, 2011; Hallet, 2007). En el Cuadro 6 se presentan los resultados del índice de repelencia (R) para cada tratamiento a partir de mediciones de sorptividad con agua y etanol.

Cuadro 6. Repelencia al agua de los tratamientos expresada en términos de R, en que valores $\geq 1,95$ denotan repelencia. Promedios (\pm desviación estándar).

Tratamientos	R
T0	1,80 ($\pm 0,70$)
T1	1,92 ($\pm 0,52$)
T2	2,59 ($\pm 0,74$)
T3	2,39 ($\pm 1,23$)
T4	1,93 ($\pm 0,81$)

Los tratamientos no tuvieron diferencias estadísticamente significativas, no obstante, T0, T1 y T4 presentaron un comportamiento hidrófilo, de acuerdo a Hallett *et al.* (2001). La condición hidrófila les confiere a los suelos una baja estabilidad frente a procesos de humectación bruscos, ya que las moléculas bipolares del agua entran al agregado en forma violenta, disgregándolo con facilidad, lo que podría promover la ocurrencia de una mayor erosión por escorrentía (Lado *et al.*, 2004).

Para T2 y T3, el valor de R se encuentra en el rango de 2 a 4, valores que son considerados como una repelencia subcrítica, favoreciendo el humedecimiento lento del suelo (Hallett *et al.*, 2001) sin afectar la humectación. T2 presentó el mayor valor de R, atribuible a la acción de las raíces mediante la liberación de exudados y al aporte considerable de hojarasca de *A. nummularia* en la superficie del suelo, ya que ambas condiciones tienden a aumentar la hidrofobicidad del suelo (Doerr *et al.*, 2000). La actividad y composición microbiana que presenta el suelo, también es un factor que puede determinar el grado de repelencia al agua, ya que una comunidad microbiana más grande y diversa, posiblemente aumente la descomposición de las sustancias orgánicas hidrófobas, por medio de microorganismos especializados (Roper, 2004; Müller y Deurer, 2011). En el caso de T3, la enmienda orgánica pudo haber aumentado la población microbiana, diferenciándose levemente de T2.

Una hidrofobia subcrítica ($2,0 < R < 4,0$) resulta provechosa, ya que promueve agregados más estables a los procesos de humectación y evita la formación de costras en superficie, reduciéndose con ello la erosión (Blanco, 2011). Además, Bachmann *et al.* (2001) evidencian que los suelos que poseen una capa más hidrófoba en la superficie del suelo, forman una barrera capilar que reduce la evaporación del agua, lo que resultaría beneficioso en zonas áridas y semiáridas.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (K) es una propiedad del suelo que se relaciona con el movimiento del agua hacia las raíces de las plantas, la entrada de agua al suelo y el flujo de agua de drenaje (Dirksen, 1999). Esta propiedad está relacionada con factores extrínsecos, como el tráfico, vegetación y uso del suelo, además de factores intrínsecos, como la textura,

la estructura y la distribución de tamaño de poros del suelo (Jury y Horton, 2004). Todos estos factores hacen de la K una propiedad altamente variable.

La conductividad hidráulica en fase saturada (K_s) corresponde a la capacidad de un suelo saturado para transmitir agua y ocurre cuando el agua no está bajo tensión y todos o la mayoría de los poros están completamente llenos de agua. Esta condición consiste principalmente en un movimiento relativamente rápido a lo largo de los macroporos y un movimiento lento a través de los poros más pequeños (Iversen *et al.*, 2001). Por otro lado, la conductividad hidráulica en fase no saturada (K_{ns}) ocurre cuando los poros están sólo parcialmente llenos de agua, dependiendo en gran medida del gradiente hidráulico y de la sección media de los poros conductores.

En la Figura 3 se muestran gráficamente las K_{ns} promedio en función de las tensiones de suministro para cada tratamiento, con un ajuste lineal expresado en ecuaciones detalladas en el Cuadro 7.

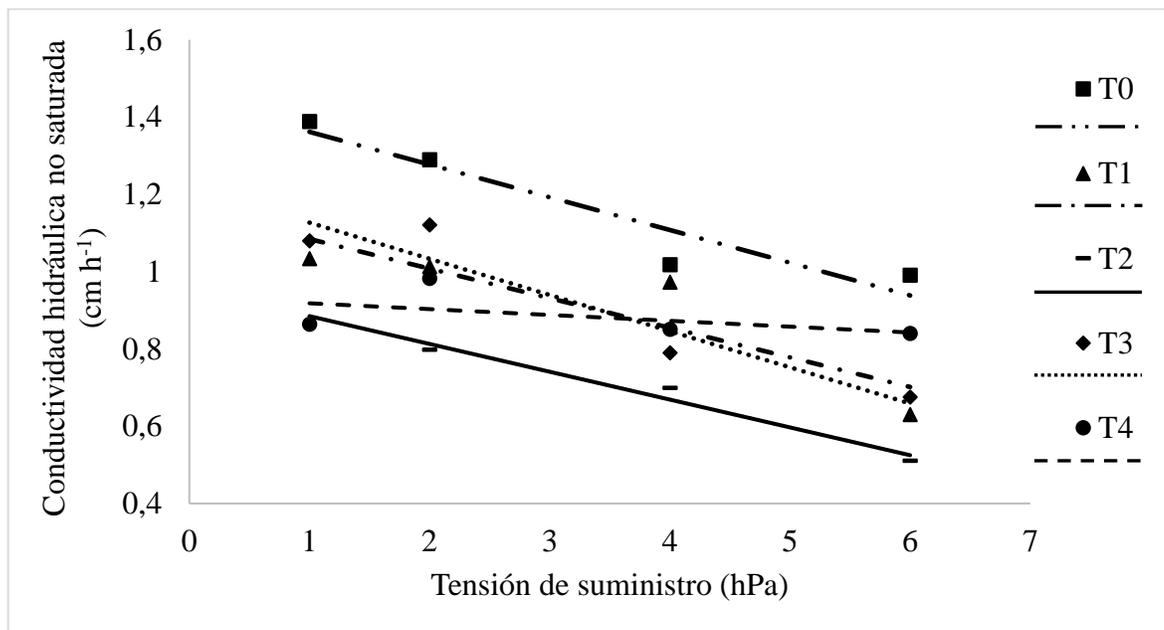


Figura 3. Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) promedio en función de la tensión de suministro de agua para cada tratamiento.

Cuadro 7. Ajuste de regresión lineal de las Kns promedio en función de la tensión de suministro de agua para cada tratamiento con sus respectivos P-valor.

Tratamiento	Kns (cm h ⁻¹)	P-Valor	r
T0	T0=-0,084x + 1,4464	0,0507	0,95
T1	T1=-0,0766x + 1,161	0,1052	0,89
T2	T2=-0,072x + 0,9569	0,1131	0,98
T3	T3=-0,0936x + 1,2205	0,0475	0,95
T4	T4=-0,0151x + 0,933	0,4921	0,50

Como se puede observar en la Figura 3, las Kns promedios para cada tratamiento siguen un orden lógico respecto a la tensión de suministro, ya que disminuyen a medida que la tensión aumenta. Esto se debe principalmente a la sensibilidad que tiene esta variable a las fuerzas internas dependiente de la atracción matricial del sistema poroso, pero a la vez se afecta por las fuerzas externas que modifican la funcionalidad del sistema poroso, como el laboreo del suelo y el tránsito de animales y personas como agentes compactadores del suelo (Nissen et al., 2006). En el Cuadro 7 se pueden ver los P-Valor del ajuste lineal, donde la única recta significativa corresponde al T3, la cual manifiesta la mayor pendiente respecto al resto de los tratamientos. Esto responde a una mayor sensibilidad a las tensiones internas del suelo, debido a la mejora en la estructura y funcionalidad que le entrega la materia orgánica al suelo (Dörner *et al.*, 2010). Por otro lado, la recta de T4 es la que mostró la menor significancia, dada la baja pendiente (poca sensibilidad a las tensiones), atribuible a la zona de mayor tránsito ubicada bajo la línea de piedras, que es donde generalmente se transita para la observación de los tratamientos sobre la línea de piedras.

En el Cuadro 8 se presentan los valores de la conductividad hidráulica saturada (Ks) obtenidos mediante el intercepto con el eje Y de las rectas de cada tratamiento, que determinan la conductividad hidráulica a tensión de suministro 0.

Cuadro 8. Conductividad hidráulica saturada (Ks) e intervalo de confianza (LI: límite inferior, LS: límite superior) con un 95% de significancia para cada tratamiento.

Tratamiento	Ks	LI	LS
	----- cm h ⁻¹ -----		
T0	1,45	1,04	1,85
T1	1,16	0,82	1,50
T2	0,96	0,64	1,27
T3	1,22	0,89	1,55
T4	0,93	0,71	1,16

Siguiendo los criterios de clasificación propuestos por Schoeneberger *et al.* (2012), las Ks (Cuadro 8) se encuentran dentro del rango moderadamente alto (0,360 a < 3,60 cm h⁻¹). Se destaca la variabilidad que existe dentro de las mediciones, que se ve reflejada en los rangos entregados en los intervalos de confianza, siendo una característica esperable en las

propiedades de flujo, las cuales presentan una alta variabilidad espacial y temporal (Jury y Horton, 2004). El valor más alto de K_s fue para T0, el cual corresponde a la zona de menor intervención, donde la continuidad y funcionalidad del sistema poroso probablemente no ha sido afectada. Bauzá (2009) determinó en un suelo franco arenoso del secano costero de Chile, que la K_s en suelos que no son intervenidos, tienen un efecto más constante en el largo plazo, en comparación a suelos que son removidos constantemente. Esta condición está dada principalmente a que en suelos que sufren procesos de homogenización pierden la funcionalidad del sistema poroso, debido al reordenamiento de las partículas y a la disminución de MO que conlleva a una baja estabilidad de los agregados (Six *et al.*, 2004; Horn y Smucker, 2005). El segundo valor más alto es para T3, donde el mayor contenido de materia orgánica aportado por el estiércol, mejoró las características físicas del suelo, mejorando con ello la funcionalidad del sistema poroso. Seguel *et al.* (2003) observaron mejoras en las propiedades de flujo, en un suelo franco arenoso con aplicación de estiércol de bovino, donde la infiltración de agua mostró notables mejoras en comparación a otras enmiendas orgánicas.

Son variados los estudios que demuestran la efectividad de las líneas de piedras en acumular sedimentos y amortiguar los efectos de la escorrentía en zonas semiáridas (Gebrenichael *et al.*, 2005; Nyssen *et al.*, 2007; Nyssen *et al.*, 2009; Vancampenhout *et al.*, 2012). Analizando de manera más global los resultados que fueron obtenidos en el presente estudio, se puede dimensionar la importancia de complementar las líneas de piedras (estructura mecánica de conservación de suelos) con la utilización de medidas biológicas. Mekonnen *et al.* (2015) recopilaron varios estudios que dan cuenta de la importancia y beneficios que existen al complementar las estructuras de acumulación de sedimentos, con medidas biológicas que ayuden a su estabilización.

En el presente estudio, el T1 (zona de acumulación de sedimentos) fue el que peor calidad física mostró, incluso peores que las observadas en T0 (zona de aporte de sedimentos), condiciones que en el futuro podrían afectar el funcionamiento de las líneas de piedras. Según un estudio realizado por Lesschen *et al.* (2008) en el sudeste de España, donde analizaron terrazas de cultivo que están abandonadas, advierten de la importancia que tiene la estabilización de estas estructuras con cubiertas vegetales, dado que la gran mayoría de las terrazas en el largo plazo, con eventos climáticos adversos, colapsan, generando problemas erosivos aún mayores. Por otro lado, el T2 no se diferenció estadísticamente con respecto a T1, pero sí se pudo observar mejoras en el contenido de MO, que se tradujo en una mejora en la estabilidad de macroagregados y el aumento en la hidrofobicidad a un nivel subcrítico, mejoras que son atribuidas a los efectos de la planta de *A. nummularia* sobre el suelo. Chisci *et al.* (2001) encontraron mejoras en la estabilidad de agregados y la porosidad del suelo utilizando plantas de *Atriplex halimus* en conjunto con plantas del género *Hedysarum spp.*, las que ayudaron al control de la escorrentía. Por otro lado, Marqués *et al.* (2005) evidenciaron la disminución de la producción de sedimentos por escorrentía al utilizar *Atriplex halimus* en conjunto con una enmienda orgánica, manifestando el efecto sinérgico que poseen ambas para el control de la erosión por escorrentía. El T3 se diferenció estadísticamente de T2 y del resto de los tratamientos en el contenido de MO, la D_a y el aumento de los PDR, así como también se evidenció mejoras en los PAU, en la estabilidad

de macroagregados, en el índice de repelencia al agua R a un nivel subcrítico y la Ks, dejando de manifiesto los efectos a largo plazo que entrega el estiércol de caprino sobre las propiedades físicas del suelo, donde en conjunto con *A. nummularia*, ayudaron a mejorar la calidad y funcionalidad del suelo.

CONCLUSIONES

De los resultados de las propiedades físicas e hidráulicas de suelos en las líneas de piedras, evaluadas a los cuatro años de su establecimiento, se puede concluir que:

Las líneas de piedras como una medida física de conservación de suelos, disminuyen la pendiente de la ladera, alterando la dinámica de arrastre de sedimentos provocados por la escorrentía superficial. Sin embargo, la condición sobre y bajo las líneas de piedras, no presentan grandes diferencias si no se hacen manejos de aplicación de enmiendas.

La enmienda de estiércol de caprino marcó la diferencia en los tratamientos, ya que en conjunto con *A. nummularia* disminuyó la densidad aparente, aumentó el contenido de materia orgánica y aumentó la porosidad gruesa. Si bien no se identificaron diferencias significativas en las otras variables, cabe destacar la mejora que hubo en la hidrofobia del suelo en T3, donde se obtuvo una repelencia subcrítica que le confiere la capacidad de un humedecimiento lento, la que también se ve demostrada con una mejora en la estabilidad de macroagregados a los procesos de humectación.

El estiércol de caprino mostró ser una medida biológica efectiva en conjunto con *A. nummularia*, ya que las líneas de piedras por sí solas no mostraron una seguridad de estabilidad, las que en el futuro podrían verse afectada por efectos climáticos adversos. Por tanto, el estiércol de caprino, que es de fácil acceso para las comunidades de la IV Región, resulta ser una muy buena alternativa para poder recuperar la funcionalidad del suelo que es acumulado en las líneas de piedras, además de complementar con especies vegetales como *Atriplex nummularia* que permiten ser utilizadas por el ganado como forraje, pudiendo en el largo plazo, subsanar el fuerte proceso de desertificación que afecta a la Región.

BIBLIOGRAFÍA

- Abiven, S.; S. Menasseri and C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1): 1-12.
- Angulo-Jaramillo, R.; J. Vandervaere; S. Roulier; J. Thony; J. Gaudet and S. Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil and Tillage Research*, 55(1): 1-29.
- Bachmann, J.; R. Horton and R. Van der Ploeg. 2001. Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6): 1599-1607.
- Bachmann J. and R. Van der Ploeg. 2002. A review on recent developments in soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4): 468-478.
- Barthès B. and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47(2): 133-149.
- Bauzá, F. 2009. Evaluación de las propiedades físicas de un suelo con manejo agroforestal y cosecha de agua en el secano interior de la zona central de Chile. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 24 h.
- Berryman, C.; D. Davies; C. Evans; M. Harrod; A. Hugues; R. Skinner and D. Soane. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Sweden. 116 p.
- Bienes, R., Jiménez, R., Ruiz, M., García-Estríngana, P., y Marqués, M. 2009. Influencia de la cubierta vegetal arbustiva y la longitud de la ladera sobre la densidad aparente del suelo. En: Avances en estudios sobre desertificación, Universidad de Murcia. Murcia, España. pp. 179-182.
- Blanco, H. 2011. Does no-till farming induce water repellency to soils?. *Soil Use and Management*, 27(1): 2-9.
- Blanco, H. and R. Lal. 2008. Principles of soil conservation and management. Germany: Springer Verlag. 620 p.
- Bonilla, C. and Johnson, O. 2012. Soil erodability mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189: 116-123.

Brady, N. and R. Weil. 2000. Elements of the nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 559 p.

Casanova, M.; O. Seguel; O. Salazar e I. Homer. 2011. Informe: Convenio de ejecución entre la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile y el Servicio Agrícola y Ganadero, para el establecimiento de una unidad demostrativa de prácticas asociadas al “Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental de Suelos Agropecuarios”. Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 27 p.

Chenu, C.; Le Bissonnais, Y.; and Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*. 64(4): 1479-1486.

Chisci, G.; P. Bazzoffi; M. Pagliai; R. Panini; S. Pellegrini and N. Vignozzi. 2001. Association of sulla and atriplex shrub for the physical improvement of clay soils and environmental protection in central Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 84(1): 45-53.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 2005. Estudio agrológico de la IV Región. Publicación 129. Santiago, Chile: CIREN. 300 p.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: informe final – diciembre 2010. Santiago, Chile: CIREN. 290 p.

CNR (Comisión Nacional de Riego), Chile. 1993. Estudio de suelos del valle del río Choapa y sus tributarios (Sector Illapel – terrazas litorales), Atlas de estudios. Santiago, Chile: CNR. 209 p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal), Chile. 2008. Caracterización de los cultivos y residuos de vegetales derivados de la cosecha de productos forestales y agrícolas en Chile. Santiago, Chile: CONAF. 71 p.

Council of Agriculture. 1995. Soil conservation handbook. Taiwan, China: Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region, Book Series N° 11. 445 p.

Critchley, W.; C. Reij and A. Seznec. 1992. Water Harvesting for Plant Production: Volume II: Case Studies and Conclusions for Sub-Saharan Africa. World Bank Technical Paper No. 157. Washington D.C.: The World Bank. 133 p.

Dane, J. H. and G. C. Topp. 2002. Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. Soil Science Society of America. Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.

- Dirksen, CH. 1999. Soil physics measurements. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany. 154 p.
- Doerr, S.; R. Shakesby and R. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1): 33-65.
- Dörner, J.; D. Dec; X. Peng and R. Horn. 2010. Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma*, 159(1): 189-197.
- Ellies, A.; R. Grez y C. Ramírez. 1995. Potencial de humectación y estabilidad estructural de suelos sometidos a diferentes manejos. *Agricultura Técnica*, 55(3-4): 220-225.
- Gebrennichael, D.; J. Nyssen; J. Poesen; J. Deckers; G. Govers and J. Moeyersons. 2005. Effectiveness of stone bunds in controlling soil erosion on cropland in the Tigray highlands, Northern Ethiopia. *Soil Use and Management*, 21(3): 287-297.
- Hallett, P., T. Baumgartl and I. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Journal of Soil Science*, 65(1): 184–190.
- Hallett, P. 2007. An introduction to soil water repellency. En: Proceeding of the 8th international symposium on adjuvants for agrochemicals. Publisher: International Society for Agrochemical Adjuvants (ISAA), Columbus, Ohio, USA. 13 p.
- Hartge, K. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart, Germany, 178 p.
- Horn, R. and A. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research*, 82(1): 5-14.
- Iversen, B; P. Moldrup; P. Schjonning and P. Loll. 2001. Air and water permeability in differently textured soil at two measurement scales. *Soil Science*, 166(10): 643-659.
- Jury, W. and R. Horton. 2004. Soil physics. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 370 p.
- Kay, B. and D. Angers. 2000. Soil Structure. pp: A229-A276. In: Sumner, M. (Ed.). Handbook of Soil Science. University of Georgia, Athens. Taylor and Francis Group. 249 p.
- Lado, M.; M. Ben-Hur and I. Shainberg. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6): 1992-1999.

Lailhacar, S.; H. Rivera; H. Silva y J. Caldentey. 1995. Rendimiento de leña y recuperación al corte en diferentes especies y procedencias arbustivas del género *Atriplex*. *Revista de Ciencias Forestales (Chile)*, 10(1-2): 85-97.

Lesschen, J.; L. Cammeraat and T. Nieman. 2008. Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment. *Earth, Surface Processes and Landforms*, 33(10): 1574-1584.

Luzio W.; M. Casanova y O. Seguel. 2010. Suelos de Chile. Luzio W.(Ed). Universidad de Chile. 346 p.

Marqués, M.; L. Jiménez; R. Pérez-Rodríguez; S. García-Ormaechea and R. Bienes. 2005. Reducing water erosion in a gypsic soil by combined use of organic amendment and shrub revegetation. *Land Degradation & Development*. 16(4): 339-350.

Medina, A. 2006. Alternativas de desarrollo rural sustentable para una comunidad agrícola tradicional en proceso de desertificación: El Divisadero, Comuna de Punitaqui, IV Región de Coquimbo. Memoria Geógrafo. Santiago, Chile: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. 168 h.

Mekonnen, M.; S. Keesstra; L. Stroosnijder; J. Baartman and J. Maroulis. 2015. Soil conservation through sediment trapping: a review. *Land Degradation & Development*, 26(6): 544-556.

Morgan, R. 2005. Soil Erosion and conservation. 3^{ed}. Blackwell Publishing. Oxford. 304 p.

Müller, K and M. Deurer. 2011. Review of the remediation strategies for soil water repellency. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 144(1): 208-221.

Nyssen, J.; K. Descheemaker; N. Haregeweyn; M. Haile; J. Deckers and J. Poesen (Eds.). 2007. Lessons learnt from 10 years research on soil erosion and soil and water conservation in Tigray. Tigray Livelihood papers No. 7. Mekelle: Zala-Daget Project, Mekelle University. 53 p.

Nyssen, J.; W. Clymans; J. Poesen; I. Vandecasteele; S. De Baets; N. Haregeweyn and J. Deckers. 2009. How soil conservation affects the catchment sediment budget-a comprehensive study in the north Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(9): 1216-1233.

Nissen J., C. Quiroz, O. Seguel, R. Mac Donald y A. Ellies. 2006. Flujo hídrico no saturado en Andisoles. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(1): 9-19.

Oldeman, L. R. 1994. The global extent of soil degradation. (p.99-118). In: Greenland, D.J. and I. Szabolcs (eds). Soil resilience and sustainable land use. Wallingford. 561 p.

Osorio, M. y Oyarce, N. 2010, jun. Análisis socioeconómico de la desertificación en la Región de Coquimbo. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 6(1): 45-52.

Osunbitan J.; D. Oyedele and K. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research*. 82(1): 57-64.

Pagliai, M. and N. Vignozzi. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. (cap. 2, pp.69-80). In: Pagliai, M. and R. Jones. Sustainable Land Management-Environmental Protection. Advances in Geocology. 598 p.

Peña, C. 2006. Caracterización y evaluación de los objetivos de forestación de las plantaciones de *Atriplex nummularia* Lindl., bonificadas mediante D.L 701 de 1974 en cuatro comunidades agrícolas de la IV Región de Coquimbo. Memoria Ingeniero Forestal. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 48 h.

Pérez, C. y González, J. 2001. Diagnóstico sobre el estado de degradación del recurso suelo en el país. Chillán, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín N° 15, 194 p.

Pouget, M-J.; Caviedes, E.; Hamelin, P.; Remy, D.; Mathieu, R.; Lira, V. y Álvarez, D. 1996. Ambiente árido y desarrollo sustentable. La Provincia de Limarí. Universidad de Chile-ORSTOM. 107 p.

Rawls, W.; Y. Pachepsky; J. Ritchie; T. Sobecki and H. Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116(1): 61-76.

Reynolds, W.; C. Drury; C. Tan; C. Fox and X. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3): 252-263.

Roper. M. 2004. The isolation and characterization of bacteria with the potential to degrade waxes that cause water repellency in sandy soils. *Soil Research*, 42(4): 427-434.

Sadzawka, A.; M.A. Carrasco; R. Grez; M. Mora; H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de Análisis Recomendados para suelos de Chile. Santiago, Chile: Instituto de Investigación Agropecuaria. 164 p.

Sandoval M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Publicación N° 5, Chillán: Universidad de Concepción. 80 p.

Schoeneberger, P.; D. Wysocki and E. Benham. 2012. Field book for describing and sampling soils. Version 3.0 Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 140 p.

Seguel, O.; V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003, jul.-sep. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63(3): 287-297.

Seguel, O.; C. Baginsky; A. Contreras; J. I. Covarrubias; C. González and L. Poblete. 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(3): 690-705.

Six, J.; H. Bossuyt; S. Degryze and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1): 7-31.

Tillman R.W.; D.R. Scotter; M.G Wallis and B.E. Clothier. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research*, 27(4): 637-644.

Torrico, J. 1994, mar. Un problema que avanza: Desertificación en la IV Región. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 10(1): 28-33.

Universidad de Chile. 2010. Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile 2008. Santiago, Chile: U. Chile. 508 p.

Uribe, J.M.; R. Cabrera.; A. De la Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 232 p. Color.

Vancampenhout, K.; J. Nyssen; D. Gebremichael; J. Deckers; J. Poesen; M. Haile and J. Moeyersons. 2006. Stone bunds for soil conservation in the northern Ethiopian highlands: Impacts on soil fertility and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 90(1): 1-15.

Wakindiki, I.I.C and M. Ben-Hur. 2002. Indigenous soil and water conservation techniques: effects on runoff, erosion, and crop yields under semi-arid conditions. *Australian Journal of Soil Research*, 40(3): 367-379.

Warrick, A. (Ed.). 2002. Soil physics companion. CRC Press. Boca Raton. USA. 109 p.

Yoon, Y., J. Kim and S. Hyun. 2007. Estimating soil water retention in a selected range of soil pores using tension disc infiltrometer data. *Soil and Tillage Research*, 97(1): 107-116.

Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4): 1024-1030.

ANEXOS

Anexo 1.

Valores del índice de corrección (A) en función de la tensión de suministro para 12 clases texturales del suelo.

Clase textural	A			
	Presión de suministro (hPa)			
	-1	-2	-4	-6
Arenoso	2,40	1,73	0,89	0,46
Areno francoso	2,79	2,43	1,84	1,40
Franco arenoso	3,89	3,91	3,95	4,00
Franco	5,72	6,27	7,53	9,05
Limoso	8,18	8,71	9,90	11,24
Franco limoso	7,37	7,93	9,19	10,64
Franco arcillo arenoso	3,52	4,24	6,15	8,92
Franco arcilloso	6,11	6,64	7,86	9,30
Franco arcillo limoso	8,09	8,51	9,41	10,41
Arcillo arenoso	3,57	4,09	5,36	7,04
Arcillo limoso	6,17	6,36	6,76	7,18
Arcilloso	4,10	4,30	4,74	5,22