

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**VALIDACIÓN DE TRES ÍNDICES DE DETERIORO ESTRUCTURAL EN
BASE A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO**

CRISTÓBAL EDUARDO MENDOZA ARÉVALO

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**VALIDACIÓN DE TRES ÍNDICES DE DETERIORO ESTRUCTURAL EN
BASE A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO**

**VALIDATION OF THREE STRUCTURAL DAMAGE INDICES BASED
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE SOIL**

CRISTÓBAL EDUARDO MENDOZA ARÉVALO

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**VALIDACIÓN DE TRES ÍNDICES DE DETERIORO ESTRUCTURAL EN
BASE A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO**

Memoria para optar al título profesional de: Ingeniero Agrónomo.

CRISTÓBAL EDUARDO MENDOZA ARÉVALO

	Calificaciones
PROFESOR GUÍA	
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0
PROFESORES EVALUADORES	
Sr. Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,5
Sr. Jaime Araya C. Ingeniero Agrónomo, MS, PhD.	6,5

Santiago, Chile

2014

ÍNDICE

	Págs.
RESUMEN	1
Palabras claves	1
ABSTRACT	2
Key words... ..	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivos.....	4
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Sitio de estudio y método de muestreo	5
Pruebas físicas y mecánicas	6
Diseño experimental y análisis estadísticos	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Caracterización general de los suelos	9
Densidad aparente, densidad real y número poroso	9
Granulometría	10
Distribución de tamaño de poros	12
Estabilidad de agregados	13
Propiedades mecánicas	14
Límites de consistencia	14
Resistencia tensil	15
Índices de desarrollo estructural	17
Validación de los índices	18
CONCLUSIONES	23
BIBLIOGRAFÍA	24
APÉNDICES	28
ANEXO	33

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Págs.
Cuadro 1. Densidad aparente, densidad real y número poroso de los tratamientos evaluados mediante métodos de laboratorio.	9
Cuadro 2. Granulometría para cada Fase de Serie de suelo y manejo	10
Cuadro 3. Distribución del tamaño de poros de lo tratamientos	12
Cuadro 4. Razón de dispersión y variación del diámetro medio de los agregados para cada uno de los tratamientos	13
Cuadro 5. Límites de consistencia (g de agua/100 g de suelo) para cada suelo.	14
Cuadro 6. Resistencia tensil de los agregados evaluadas bajo dos tensiones mátricas....	15
Cuadro 7. Índices de desarrollo estructural asociado a la resistencia de los agregados ..	17
Figura 1. Clases texturales obtenidas a través del triángulo textural (USDA).....	11
Figura 2. Relación entre el índice de desarrollo estructural I1 y la prueba de estabilidad de microagregados mediante la razón de dispersión	18
Figura 3. Relacion entre el índice de desarrollo estructural I2 y las pruebas de estabilidad de agregados mediante la variación del diámetro medio de agregados y la razón de dispersión.	20
Figura 4. Relación entre el índice de desarrollo estructural I3 y la prueba de estabilidad de microagregados mediante la razón de dispersión	21

AGRADECIMIENTOS

Debo comenzar agradeciendo a mi familia por enseñarme desde pequeño que una de las cosas más importantes en la vida es la educación, gracias por brindarme el apoyo y por su incondicional amor.

A mi mamá Angélica por creer en mí durante todos mis años de estudio y por su incomparable apoyo, mi padre Miguel, hermanos Adrián y Diego por estar siempre preocupados e interesados en mi desarrollo como profesional.

A mi polola Evelyn, que estuvo dispuesta siempre para dar algún consejo o una simple palabra de aliento.

A mis amigos Ricardo Chereau, Natalia Herrera, Álvaro Romero, Mauro Morales y Javier Sereño, que constantemente estuvieron preocupados de mis estudios, gracias por su amistad y ser tan leales en todo momento.

A mi profesor guía Oscar Seguel, especialmente por la paciencia y buena disposición que siempre demostró hacia mi persona, cada vez que tuve alguna pregunta estuvo dispuesto a contestarla, igualmente a Hugo Pérez que siempre compartió su conocimiento, gracias por su amabilidad y en especial por la buena acogida que me proporcionaron en el laboratorio de física de suelos de la Universidad de Chile.

Agradezco a todos mis compañeros de universidad que establecieron vínculos conmigo; Sebastián Silva, Ignacio Álvarez, Javier Mendoza, Javier Cerda, Leonardo Castillo, Pablo Cortes, entre otros.

Y finalmente agradezco a mis abuelos Cosme, Carlos, María y Doris, gracias por todo su apoyo y motivación, sin ustedes todo hubiese sido más complicado.

RESUMEN

Se validaron índices de estabilidad mecánica en suelos con distinto grado de desarrollo estructural. Para ello se utilizaron muestras del horizonte A (0-10 cm) de los suelos Batuco (BTC, Sodic Haploxererts), Mapocho (MPC, Fluventic Haploxerolls), Rungue (RUG, Vertic Haploxerolls) y Santiago (STG, Entic Haploxerolls), todos bajo condiciones de alta y baja intensidad de uso. Se hizo una caracterización física básica de cada condición de manejo y evaluó la densidad aparente, densidad real, textura, porosidad, distribución del tamaño de poros y la estabilidad de agregados. Además se hicieron pruebas mecánicas para determinar los límites de consistencia y la resistencia tensil. En esta validación, tanto los agregados naturales como artificiales por amasado se equilibraron a capacidad de campo (-33 kPa) y secos al aire (-3000 kPa), y se hicieron pruebas de consolidación no confinada con drenaje libre (“crushing test”). Los índices propuestos se validaron contra la estabilidad de los agregados, evaluada con la variación del diámetro medio de los agregados y con la relación de dispersión.

El contenido de arcilla varió entre 12 y 41%. Los sitios sometidos a labranza presentaron densidad aparente alta, menor estabilidad de los agregados y porosidad gruesa en relación a los sitios poco intervenidos. La resistencia tensil de los agregados artificiales (amasados) fue mayor a la de los agregados naturales en ambas condiciones de equilibrio mátrico. A -33 kPa no se generaron diferencias entre suelos ni entre manejos, y la condición seca al aire presentó mayor sensibilidad al uso y a las propiedades del suelo. Los resultados permitieron seleccionar tres índices de desarrollo estructural, que presentaron una buena correlación con la estabilidad de los agregados al agua, por lo que es posible utilizar pruebas mecánicas sencillas para evaluar la calidad estructural de los suelos.

Palabras claves: Propiedades físicas del suelo, estabilidad de agregados, resistencia tensil, agregación.

ABSTRACT

In this work some mechanical stability indices were validated in soils with different levels of structural development. We collected superficial soil samples (0-10 cm) of Batuco (BTC, Sodic Haploxererts) Mapocho (MPC, Fluventic Haploxerolls) Rungue (RUG, Vertic Haploxerolls) and Santiago (STG, Entic Haploxerolls) soil series, all with low and high intensity of management. A basic physical characterization of each management condition was performed, evaluating the bulk density, particle density, texture, pore size distribution and aggregate stability, besides mechanical tests were carried out to determine Atterberg limits and tensile strength.

To develop the indices, both natural and artificial aggregates (remoulded by kneading) were equilibrated at field capacity (-33 kPa) and air dry (-3000 kPa), performing unconfined and free-drained consolidation tests (Crushing test). The proposed indices were validated against the aggregate stability evaluated as the mean weight diameter method and the dispersion ratio method.

The clay content varied between 12 and 41%. Plowed sites showed high values of bulk density and lower aggregate stability and coarse porosity in relation to untilled sites. The tensile strength of artificial aggregates (kneaded) was higher than that of natural aggregates in both pore water pressures. No differences between soils or managements were found in samples equilibrated at -33 kPa; besides, air dried samples showed a high sensibility to soil properties and use. The results allowed selecting three indices of structural development, showing a good correlation with aggregate stability to water, being possible to use simple mechanical tests to assess the structural quality of the soil.

Key words: Soil physical properties, aggregate stability, tensile strength, aggregation.

INTRODUCCIÓN

Un agregado es un grupo de partículas primarias que se cohesionan entre sí con mayor fuerza que otras partículas del suelo (Kemper y Rosenau, 1986), y la estructura es la forma que adquiere esta unión en el perfil del suelo, junto con la relación con otros agregados (Hillel, 1998). La formación misma tiene tres etapas: la floculación de las partículas, su cementación y, finalmente, la soltura del material por la actividad biológica (Gavande, 1972). Dexter (1988) señala que en la mayoría de los suelos la estructura tiende a ser jerárquica, ya que las partículas de arcilla floculan y forman dominios estables, los que a su vez se agrupan en microagregados, que se ordenan en agregados y crean unidades cada vez mayores. Este punto es importante, ya que la resistencia de un agregado frente a una acción mecánica (resistencia tensil) es una función de su tamaño y mientras mayor sea éste, menor será el promedio de su resistencia tensil (Braunack *et al.*, 1979) y más se parecerá a la resistencia de la matriz del suelo, debido a la mayor frecuencia de planos de falla en las unidades de mayor tamaño (Hallet *et al.*, 2000).

Los procesos mediadores en la formación de la estructura de un suelo se relacionan principalmente con la contracción e hinchamiento del material, producto de los ciclos de secado y humedecimiento estacionales (Semmel *et al.*, 1990; Blazejczak *et al.*, 1995), así como con mecanismos basados en materiales orgánicos (exudados de raíces y de microorganismos del sustrato) los que son responsables de la estabilización de los agregados del suelo (Oades, 1993; Watts y Dexter, 1998).

Se ha observado que a mayor número de ciclos de secado y humedecimiento del suelo, el porcentaje relativo de agregados de diámetros menores (2 a 5 mm) tiende a aumentar. Sin embargo, la intensidad del secado es fundamental para explicar la estructuración final. Así, a mayor intensidad de ciclos de secado e igual número de éstos, se producen menores diferencias en parámetros físicos respecto a su condición inicial, y propiedades como la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la resistencia tensil de agregados son menores en relación a ciclos de menor intensidad de secados. Esto se debe a que el agua actúa como un medio de lubricación que permite el mejor arreglo de las partículas, las que resultan en un agregado más denso y resistente (Semmel *et al.*, 1990). Finalmente, la formación de agregados de tamaño pequeño promueve en la matriz suelo un proceso de friabilización, esto es, una menor resistencia del volumen total de suelo como consecuencia de la mayor abundancia de poros entre los agregados (Dexter, 1988).

Así, el grado de desarrollo estructural de un suelo reflejará la interacción entre las propiedades del material, el clima, la acción de los organismos y las prácticas de manejo, estas últimas fundamentales para explicar la mantención de la estabilidad estructural o la pérdida de agregación por mal manejo (Krummelbein y Horn, 2013).

La estabilidad de agregados depende fundamentalmente de la materia orgánica asociada a la arcilla bajo la forma de humus estable y que afecta sus propiedades físicas (Oades, 1993). Sin embargo, también son importantes las raíces y las hifas de los hongos, las

que enlazan las partículas del suelo (Elmholt *et al.*, 2008). Por este motivo, el principal factor de pérdida de materia orgánica y deterioro de la estabilidad estructural es la labranza excesiva en condiciones inadecuadas de humedad (Ellies *et al.*, 1993). Las alteraciones en la cantidad y calidad de la materia orgánica no se detectan en el corto plazo, pero sí la estabilidad estructural (Haynes, 2000), una variable que se transforma en un indicador temprano de los cambios en la estructura (Theng *et al.*, 1989). Entre los métodos para determinar la estabilidad mecánica de suelos o agregados aislados destacan las pruebas de consolidación, cuyo resultado es la tensión de precompresión o capacidad de soporte del suelo para muestras confinadas, y la resistencia tensil para muestras no confinadas, que ofrecen un buen índice de estabilidad (Horn, 1993; Horn y Baumgäntl, 1999). La resistencia mecánica de un material depende, entre otros factores, de la textura, la estructura, los contenidos de agua y materia orgánica, el tipo de arcilla y la cantidad y tipo de agentes cementantes (Horn, 1993).

En las pruebas de consolidación, mientras mayor es el contenido de materia orgánica, a una misma tensión aplicada, la relación de vacíos (y la porosidad) del suelo es mayor (menor compactibilidad y mayor capacidad de soporte), y este efecto es más acentuado cuando la materia orgánica está levemente humificada (Zhang y Hartge, 1995) y favorece así la estabilidad del suelo. Más aún, si la resistencia de un suelo con distintos contenidos de materia orgánica es comparada a una misma porosidad o densidad aparente, ésta será siempre mayor mientras mayor sea el contenido de materia orgánica. De esta forma, la resistencia evaluada en condiciones secas y húmedas determina una mayor estabilidad (menor variación) mientras mayor sea el contenido de materia orgánica (Stock y Downes, 2008).

Se pueden generar índices para medir la estabilidad mecánica de agregados, los que se relacionan con el grado de desarrollo estructural del suelo (Seguel y Orellana, 2008). Estos índices han sido evaluados en un Mollisol franco arenoso (Hernández, 2010), y se requiere validarlos en un amplio espectro de suelos, para comprobar que un suelo con mayor desarrollo estructural, asociado a una mayor estabilidad de agregados, presentará una menor variación en sus propiedades mecánicas evaluadas a distintas tensiones mátricas.

Los objetivos de este estudio fueron:

- Evaluar tres índices de estabilidad mecánica en suelos con distinto grado de desarrollo estructural.
- Validar los índices a través de pruebas de estabilidad de agregados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio y método de muestreo

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, durante 2013.

Se colectaron muestras de suelo del horizonte A de pedones ubicados en la Región Metropolitana, pertenecientes a cuatro Fases de Series de suelo con distintas clases texturales, para evaluar así el efecto de la textura sobre la estabilidad de los agregados. De acuerdo a CIREN (1996), los suelos seleccionados y sus principales características son:

- Serie Batuco (BTC), miembro de la Familia arcillosa sobre franca gruesa, calcárea, térmica de los Sodic Haploxererts (Vertisol), de origen lacustrino, textura superficial arcillo limosa. Presenta un suelo estratificado, profundo, con características vérticas en sus primeros horizontes, que descansa sobre material aluvial, heterogéneo en composición. La alcalinidad de esta Serie es alta y constituye una de las limitantes serias para un uso agrícola intensivo; se sitúa en topografías planas con una pendiente inferior a 1%. Se muestreó entre las coordenadas 33°16'42" S, 70°48'56" O y 33°16'43" S, 70°48'43" O.
- Serie Mapocho (MPC), miembro de la Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol), de origen aluvial, textura superficial franco arcillo limosa, que se sitúa en antiguas terrazas aluviales con topografías planas; es un suelo bien estructurado, con estructuras de bloques angulares finos y medios, de muy buen arraigamiento y buena porosidad. Se muestreó entre las coordenadas 33°30'11" S, 70°49'35" O y 33°30'20" S, 70°49'29" O.
- Serie Rungue (RUG), miembro de la Familia fina, mixta, térmica de los Vertic Haploxerolls (Mollisol), de origen aluvio coluvial, moderadamente profunda, textura arcillosa, que se ubica en planos ligeramente inclinados (piedmonts), con un ligero microrelieve. Pendientes dominantes de 1 a 3 %. Es un suelo que no presenta reacción al ácido clorhídrico en el pedón, sólo con reacciones puntuales donde existen fragmentos de rocas calcáreas. Se muestreó entre las coordenadas 33°08'51" S, 70°47'37" O y 33°08'55" S, 70°47'39" O.
- Serie Santiago (STG), miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (Mollisol), de origen aluvial, ligeramente profundo que se presenta en una topografía plana de abanico aluvial y textura franco arenosa. Tiene una reacción violenta al ácido clorhídrico en los primeros 15 cm, que en profundidad se hace moderada hasta los 70 cm y ligera en el substrato, y con sectores sin reacción. El suelo posee buen drenaje y sólo

ocasionalmente se presentan sectores de drenaje moderado. Se muestreó entre las coordenadas 33°34'19" S, 70°38'13" O y 33°34'11" S, 70°37'53" O.

Las muestras de suelo se obtuvieron en el horizonte superficial (0-10 cm), y en cada Serie de suelos se seleccionaron sitios con uso intensivo y no intensivo, distantes menos de 50 m entre sí, para contrastar un posible deterioro estructural. Cada Fase de la Serie de suelos constituyó un tratamiento, mientras que los usos del suelo constituyeron los subtratamientos, correspondientes a un suelo intervenido (labranza, tránsito intensivo) y otro en condición poco intervenida, de manera de contrastar una condición bien estructurada de una degradada.

Para la Serie Batuco, las muestras de uso intensivo se obtuvieron en un suelo arado, mientras que las muestras sin intervención se colectaron desde una pradera natural ubicada al margen del humedal de Batuco, que presentaba afloramientos salinos en la superficie (Apéndice 1). En la Serie Mapocho la situación intervenida correspondió a suelos arados y a la huella del tractor, con un historial de manejo agrícola intenso, en tanto la sin degradación se obtuvo bajo árboles aledaños al sector anterior. En la Serie Rungue la situación intervenida se asignó a la zona de huella de vehículos, y la no intervenida se obtuvo bajo árboles de espino (*Acacia caven* Molina). Finalmente, en la Serie Santiago el suelo disturbado se obtuvo de un predio con manejo bajo cero labranza, mientras que el no disturbado desde praderas de uso recreativo.

Dentro de cada Fase y manejo, se seleccionaron en forma aleatoria tres sectores, los que constituyeron repeticiones, en las que se tomaron muestras de suelo en cilindros y de matriz disturbada, además de agregados individuales, con los cuales se hicieron las evaluaciones en laboratorio.

Pruebas físicas y mecánicas

Se llevó a cabo una caracterización física básica de cada condición de manejo, descrita por Dane y Topp (2002), mediante la medición de la densidad aparente por los métodos del cilindro y del terrón, la densidad real por el método del picnómetro, la textura mediante el hidrómetro de Bouyoucos y la curva característica o de retención de agua mediante el uso de una cama de arena (con tensiones de hasta 6 kPa) y ollas y platos de presión entre -33 y -1500 kPa.

Al mismo tiempo, se evaluó la estabilidad de los macroagregados por tamizaje seco y húmedo (Hartge y Horn, 2009), la estabilidad de los microagregados según la relación de dispersión (Seguel *et al.*, 2003) y los límites de consistencia (límite líquido y límite plástico) según Das (1997).

Para las propiedades mecánicas se seleccionaron agregados mediante tamizaje en una condición friable, de diámetros entre 2 y 4 cm. Los agregados individuales a su vez se equilibraron a -33 kPa y -3000 kPa (capacidad de campo y seco al aire, respectivamente), para posteriormente hacer las pruebas de consolidación no confinada con drenaje libre las que consistieron en la determinación de la resistencia tensil de los

agregados a través del crushing test, mediante el método propuesto por Dexter (1988) y Blazejczak *et al.* (1995), el que consiste básicamente en la compresión de agregados entre dos barras paralelas, aplicando cargas crecientes hasta su ruptura (Apéndice 1). Las pruebas tuvieron 20 repeticiones para cada unidad de muestreo y equilibrio mátrico. Las evaluaciones a capacidad de campo (-33 kPa) y seco al aire (-3000 kPa) pretenden simular la condición invierno-verano, de manera de contrastar el comportamiento seco-húmedo del suelo.

Como contramuestra, se repitieron las pruebas de consolidación con material de suelo amasado y re-equilibrado a las tensiones descritas, para simular una condición inicial no estructurada del suelo y generar un valor referencial de la resistencia previo a la estructuración (Blazejczak *et al.*, 1995). A través de estas muestras de suelo amasado se logra determinar un punto de comparación con respecto a suelos estructurados bajo usos o condiciones de degradación distintas (Watts y Dexter, 1998).

El amasado se hizo con un contenido de agua superior al límite líquido, aplicando una fuerza tangencial con la palma de la mano hasta la desagregación completa, asegurando la ausencia de microagregados. Con ese material se rearmaron agregados de 2-4 cm de diámetro (Apéndice 1), los que se equilibraron a las tensiones descritas y sometieron a las pruebas de resistencia tensil. Se hicieron 20 repeticiones para cada suelo, uso y equilibrio mátrico.

Con los resultados se evaluaron tres índices de desarrollo estructural, seleccionados en base al trabajo previo de Seguel *et al.* (2012), y que permiten discriminar manejos contrastantes. El primer índice propuesto fue:

$$(R_{SA}-R_{CC})n/(R_{SA}-R_{CC})a \quad (1)$$

Donde R es la resistencia evaluada en condición seca al aire (SA) y a capacidad de campo (CC) para agregados naturales (n) y artificiales por amasado (a).

El segundo índice fue:

$$R_{CC}/R_{SA} \quad (2)$$

Donde R es la resistencia evaluada a capacidad de campo (CC) y seca al aire (SA) para agregados naturales.

Y el tercer índice fue:

$$(R_{SA})n/(R_{SA})a \quad (3)$$

Donde R es la resistencia evaluada en condición seca al aire (SA) para agregados naturales (n) y artificiales por amasado (a).

Como una manera de validar los índices, se utilizaron los resultados de estabilidad de agregados de muestras naturales, contra los cuales se correlacionaron.

Diseño experimental y análisis estadísticos

El diseño del experimento fue en parcela dividida, donde la parcela fue la Fase de suelo y la subparcela el manejo. Las unidades experimentales fueron las muestras de suelo tomadas en una superficie de 1 m² (con tres repeticiones) de las unidades cartográficas evaluadas, bajo dos manejos, con tratamientos correspondientes a agregados o cilindros pertenecientes a las distintas Fases y manejos de suelo. Para las propiedades generales se hicieron tres repeticiones, mientras que en las pruebas de consolidación se hicieron 20 repeticiones por combinación Fases de Serie-manejo.

Se calcularon los estadígrafos básicos (promedio, desviación estándar, coeficiente de variación) y se hicieron pruebas t de Student para comparar los manejos dentro de cada Fase de suelo ($\alpha < 0,05$). El índice de desarrollo estructural obtenido del ensayo se correlacionó mediante una regresión simple con los resultados de estabilidad al agua como una manera de validación de este índice.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización general de los suelos

Densidad aparente, densidad real y número poroso

El Cuadro 1 presenta los valores de densidad aparente (D_a) evaluada mediante el método del cilindro y del terrón, en función de dos condiciones de uso / manejo. Además se presenta la densidad real (D_r) y el número poroso (e), evaluado mediante la relación $e = D_r/D_a - 1$ (cm^3 de poros cm^{-3} de sólidos), utilizando la D_a por el método del cilindro.

Cuadro 1. Promedios ($\% \pm \text{DE}$) de densidad aparente (D_a) por el método del cilindro y del terrón (Mg m^{-3}), densidad real (D_r) por el método del picnómetro (Mg m^{-3}) y número poroso (e) (cm^3 de poros cm^{-3} de sólidos)

Tratamientos	D_a cilindro	D_a terrón (Mg m^{-3})	D_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	e
MPC Arado	1,32 ($\pm 0,16$) a	1,77 ($\pm 0,02$) a	2,66 ($\pm 0,06$) a	1,00 ($\pm 0,24$) a
MPC Nativo	0,93 ($\pm 0,03$) b	1,35 ($\pm 0,003$) b	2,34 ($\pm 0,01$) b	1,50 ($\pm 0,19$) b
STG Cero Labranza	1,21 ($\pm 0,12$)	1,88 ($\pm 0,10$)	2,63 ($\pm 0,04$)	1,18 ($\pm 0,22$)
STG Pradera	1,13 ($\pm 0,09$)	1,72 ($\pm 0,05$)	2,65 ($\pm 0,06$)	1,28 ($\pm 0,21$)
RUG Huella	1,43 ($\pm 0,11$) a	1,64 ($\pm 0,09$)	2,39 ($\pm 0,06$)	0,68 ($\pm 0,15$) a
RUG Nativo	1,06 ($\pm 0,01$) b	1,69 ($\pm 0,05$)	2,31 ($\pm 0,05$)	1,18 ($\pm 0,06$) b
BTC Arado	1,12 ($\pm 0,19$)	1,46 ($\pm 0,07$) a	2,34 ($\pm 0,07$) a	1,13 ($\pm 0,37$) a
BTC Nativo	1,28 ($\pm 0,03$)	1,83 ($\pm 0,07$) b	2,51 ($\pm 0,13$) b	0,97 ($\pm 0,12$) b

D_a : Densidad aparente; D_r : Densidad real; e : Número poroso; MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Letras distintas indican diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre manejos de un mismo suelo.

La densidad aparente se relaciona con la porosidad total del suelo y con su condición estructural, y es un índice importante para evaluar el manejo del suelo, ya que refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire (Warrick, 2002). Si bien la densidad aparente no refleja la calidad del sistema poroso (tamaño de los poros y su continuidad), es útil para hacer comparaciones de un mismo sitio sometido a distintos manejos (Ellies, 1995).

En relación a los métodos utilizados para obtener la D_a , se aprecia que los valores obtenidos por el método del terrón fueron mayores, debido a que, a diferencia del método del cilindro, que confina un volumen de suelo que contiene los agregados y el espacio entre ellos, la densidad obtenida por el método del terrón no considera el espacio entre los agregados (Sandoval *et al.*, 2012). A su vez, las densidades de los suelos sin intervención tendieron a ser menores en todas las Series, excepto BTC nativo, que presentó una D_a mayor que su símil bajo uso agrícola, el que se había arado recientemente.

La D_r es una propiedad que depende del tipo de suelo (material parental, mineralogía) y de sus compuestos orgánicos (Lal y Shukla, 2004), y un valor de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ es ampliamente aceptado para suelos minerales con dominancia de silicatos. Tanto la Serie RUG como la Serie BTC presentaron D_r menores a lo esperado, lo que podría depender del tipo de arcilla dominante.

Para la densidad real se presentaron diferencias significativas entre manejos en las Series MPC y BTC. Para el MPC, el suelo nativo presentó una D_r menor que el sitio arado, debido probablemente a que los sistemas no intervenidos poseen altos contenidos de materia orgánica, la que disminuye la D_r del suelo (Burés, 1997), debido a que la densidad de las partículas orgánicas alcanza valores de $1,0$ a $2,0 \text{ Mg m}^{-3}$ (Das, 1997; Skopp, 2002).

La densidad real de la Serie STG se mantuvo constante en ambos manejos. Por otro lado, la zona no labrada de la Serie BTC presentó una D_r mayor que en su símil arado, lo que se podría deber a un cambio en el tipo de sales o bien a una mayor cantidad de minerales filosilicatados con presencia de Mg^{+2} y Fe^{+2} (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Los suelos bajo intervención presentaron valores más bajos de número poroso (e), debido principalmente a que el laboreo genera cambios en la distribución en la porosidad, especialmente en los macroporos. Si bien la labranza inicialmente genera un aumento en la porosidad total, con los eventos de tránsito posteriores lo primero en colapsar son los poros gruesos, debido a la menor cantidad de puntos de apoyo, y así sucesivamente con los poros que siguen en rango de tamaño, lo que produce un colapso jerárquico de la porosidad. La excepción se produce en BTC, donde el suelo nativo presentó un menor número poroso que su símil arado, lo cual podría estar relacionando al efecto del sodio, que sella los poros en la superficie.

Granulometría

El Cuadro 2 presenta la distribución de tamaño de partículas para las cuatro Series de suelo. La clase textural según el método de laboratorio utilizado se presenta en la Figura 1. Cabe destacar que cada Serie de suelo tiene un origen pedogénico distinto, que a su vez se ve modificado por variados factores.

La organización estructural del suelo es consecuencia del arreglo de las partículas. Así, la textura del suelo es un elemento esencial que establece y define propiedades permanentes en el largo plazo (Sandoval *et al.*, 2012). La Serie MPC presentó clases texturales francas para ambos manejos (Figura 1), lo que posiblemente se debe a su origen aluvial y a su ubicación en terrazas; los suelos de esta Serie presentaron los menores valores promedio de arcilla.

Cuadro 2. Promedios (% DE) de partículas primarias evaluadas para los suelos del estudio, bajo distinto manejo.

Tratamientos	A (%)	a	L
MPC Arado	24,8 ($\pm 0,9$)	34,6 ($\pm 1,1$)	40,6 ($\pm 1,9$)
MPC Nativo	12,7 ($\pm 1,7$)	46,4 ($\pm 2,8$)	40,9 ($\pm 1,1$)
STG Cero Labranza	22,4 ($\pm 3,5$)	42,0 ($\pm 9,3$)	35,7 ($\pm 5,8$)
STG Pradera	18,1 ($\pm 4,3$)	42,6 ($\pm 10,7$)	39,3 ($\pm 13,3$)
RUG Huella	27,5 ($\pm 8,2$)	32,8 ($\pm 7,0$)	39,7 ($\pm 1,5$)
RUG Nativo	32,5 ($\pm 7,3$)	28,6 ($\pm 5,3$)	38,9 ($\pm 4,3$)
BTC Arado	40,5 ($\pm 1,2$)	21,3 ($\pm 3,1$)	38,2 ($\pm 1,9$)
BTC Nativo	25,8 ($\pm 2,3$)	13,2 ($\pm 2,8$)	61,0 ($\pm 1,3$)

A: arcilla; a: arena; L: limo; MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco.

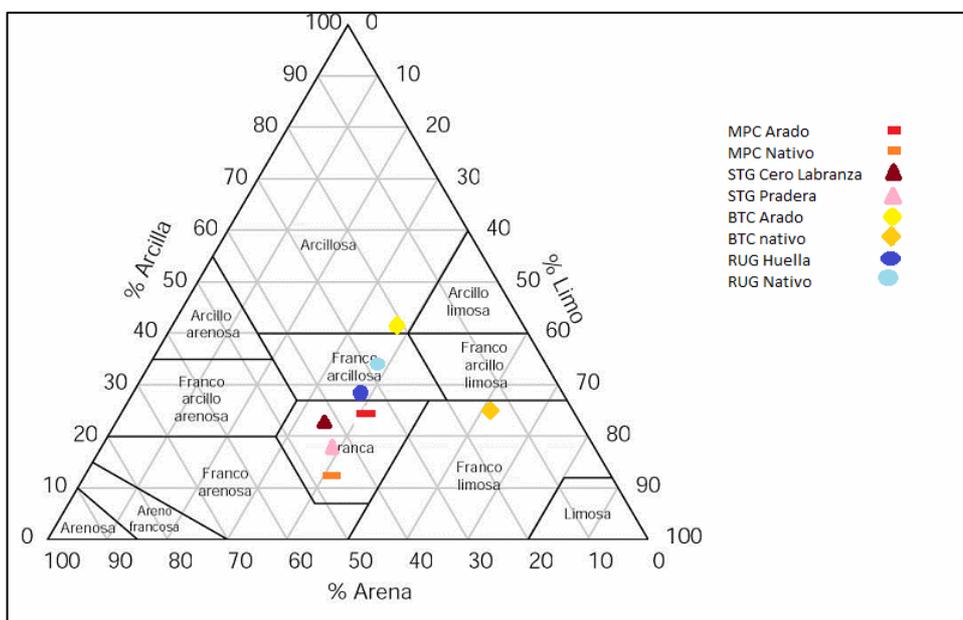


Figura 1. Clases texturales obtenidas a través del triángulo textural (USDA). Se presentan ambos manejos para cada Serie de suelo.

La Serie STG, al igual que MPC, es de origen aluvial y del Orden de los Mollisoles, por lo cual se asume un buen contenido de MO. En los resultados obtenidos (Cuadros 1 y 2) no se notaron grandes diferencias entre los manejos, ya que el uso de cero labranza evita la mezcla de horizontes e incrementa el contenido de carbono orgánico del suelo, en relación a la labranza convencional (Acevedo *et al.*, 2002), y previene la pérdida de partículas sólidas por arrastre de agua de los riegos con la misma eficiencia de la de una pradera permanente (Reicosky, 2002). La Serie RUG no presentó diferencias entre tratamientos; ambos sitios se encontraban en la clase franco arcillosa.

La Serie BTC presentó una variación textural entre manejos, debido a la dispersión de las muestras del sitio nativo por el alto contenido salino, que provocó una floculación de

las partículas al tamaño limo. El sobrenadante salino se eliminó en laboratorio, pero aún así se evidenció floculación de partículas, lo que resultó en una clase textural franco limosa en el BTC nativo en comparación con la clase textural arcillosa del sitio arado. La distribución granulométrica para cada suelo y manejo se detalla en el Apéndice 2.

Distribución de tamaño de poros

Para determinar la distribución del tamaño de los poros se obtuvieron curvas de retención de agua con muestras no disturbadas (Apéndice 3). Estas se generaron al someter las muestras a distintas tensiones, de manera que si un suelo saturado con agua se equilibra a -6 kPa, se puede determinar el volumen de poros de drenaje rápido (PDR), en tanto entre -6 y -33 kPa se determinan los poros de drenaje lento (PDL). El volumen de agua retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, es decir entre -33 y -1500 kPa, determina el volumen de agua útil (PAU), que corresponde aquella disponible para los cultivos, mientras que los poros de agua inútil corresponden al remanente, es decir, el contenido de agua retenida a -1500 kPa (Paggliai y Vignossi, 2002). Los resultados se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Promedios (% \pm DE) de distribución del tamaño de poros (cm^3 agua/100 cm^3 suelo), de los diversos suelos y manejos.

Tratamientos	PDR	PDL	PAU	PAI
MPC Arado	15,6 (\pm 7,3)	4,2 (\pm 0,4)	14,1 (\pm 1,5)	15,4 (\pm 1,8)
MPC Nativo	20,1 (\pm 4,8)	4,8 (\pm 0,5)	15,8 (\pm 1,6)	18,6 (\pm 4,7)
STG Cero Labranza	8,0 (\pm 0,6)	13,3 (\pm 0,2) a	19,2 (\pm 8,0)	9,7 (\pm 1,0) a
STG Pradera	8,7 (\pm 3,2)	8,3 (\pm 1,0) b	13,9 (\pm 6,2)	17,8 (\pm 1,3) b
RUG Huella	7,5 (\pm 2,3) a	5,3 (\pm 0,5)	14,3 (\pm 1,1)	35,9 (\pm 5,3) a
RUG Nativo	16,6 (\pm 2,0) b	3,6 (\pm 0,5)	11,4 (\pm 2,7)	27,6 (\pm 0,6) b
BTC Arado	14,2 (\pm 6,1) a	6,1 (\pm 1,4)	19,1 (\pm 3,3)	19,3 (\pm 3,1) a
BTC Nativo	4,6 (\pm 0,6) b	2,5 (\pm 1,0)	14,1 (\pm 2,9)	35,5 (\pm 5,3) b

PDR: Poros de drenaje rápido ($> 50\mu\text{m}$); PDL: Poros de drenaje lento ($50\text{-}10\mu\text{m}$); PAU: Poros de agua útil ($10\text{-}0,2\mu\text{m}$); PAI: Poros de agua inútil ($<0,2\mu\text{m}$). MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Letras distintas indican diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre manejos de un mismo suelo.

En términos generales, las diferencias en las porosidades de drenaje en las distintas Series se deben a la intervención agrícola, la cual genera una destrucción y/o colapso de la estructura e induce una pérdida de la heterogeneidad natural (Ellies y Hartge, 1990; Ellies *et al.*, 1994). La excepción fue la Serie Batuco, cuyo sitio nativo presentó un estado de dispersión por sodio (CIREN, 1996), lo que explica el bajo monto de porosidad estructural. Cabe recalcar que la porosidad funcional es sumamente importante para los cultivos, que necesitan un mínimo de 10 a 12 % de macroporosidad (PDR) para asegurar una adecuada renovación del aire del suelo (Richards, 1983).

En los poros de drenaje rápido se encontraron diferencias significativas entre manejos de los suelos Batuco y Rungue. El BTC arado tuvo más poros estructurales que el

nativo, lo que confirma que este último se vio afectado por el alto contenido de sodio, el cual selló los poros en la superficie.

En RUG fue claro el efecto de los manejos. La huella en un sector con tráfico constante genera una compactación en los primeros horizontes y una pérdida de macroporosidad, aunque los poros de agua aprovechable (PAU) no tuvieron diferencias significativas entre tratamientos. Los dos suelos con alto contenido de arcilla (RUG y BTC) presentaron diferencias significativas en la retención de agua a -1500 kPa (PAI), pero los resultados no corresponden al contenido de arcilla, por lo que debiesen ser resultado del manejo.

La Serie STG presentó diferencias significativas para los PDL (que fue mayor en el sitio con cero labranza) y los PAI (mayor en los sitios bajo pradera). Considerando la similitud textural de ambos sitios (Cuadro 2), la menor cantidad de poros de drenaje y la mayor cantidad de PAI en el sitio bajo pradera podrían deberse a un relleno de poros por grupos orgánicos al humificarse la MO (Ellies, 1988).

MPC no presentó diferencias significativas entre manejos. Esta Serie tiene un alto contenido de poros de drenaje rápido, relacionado en el sitio arado a la soltura mecánica y en el sitio nativo a la estabilidad estructural.

Estabilidad de los agregados

Ambas pruebas de estabilidad evalúan el efecto dispersante del agua, por lo que los índices menores reflejan mayor estabilidad. Los resultados se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Razón de dispersión (RD; % \pm DE) y variación del diámetro medio de los agregados (VDMA, mm), para cada manejo.

Tratamientos	RD(%)	VDMA (mm)
MPC Arado	49,1 (\pm 12,0)	7,93 (\pm 1,36) a
MPC Nativo	32,8 (\pm 4,4)	0,70 (\pm 0,07) b
STG Cero Labranza	40,4 (\pm 1,4) a	3,38 (\pm 1,73) a
STG Pradera	16,8 (\pm 8,5) b	0,09 (\pm 0,01) b
RUG Huella	33,6 (\pm 5,3)	4,78 (\pm 1,65)
RUG Nativo	34,1 (\pm 6,6)	3,73 (\pm 1,11)
BTC Arado	81,3 (\pm 10,5)	5,79 (\pm 1,59)
BTC Nativo	93,3 (\pm 2,4)	3,65 (\pm 1,27)

MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Letras distintas indican diferencias significativas entre manejos para un mismo suelo ($\alpha < 0,05$).

En relación a los microagregados, la RD no presentó diferencias entre tratamientos, a excepción de STG, que en donde cero labranza presentó una RD mayor que en la pradera, la que tuvo un valor $< 30\%$, un suelo muy estable de acuerdo a Berryman *et al.* (1982). Esta estabilidad se debe al efecto de las raíces de las praderas, las que exudan

sustancias orgánicas que aglutinan las partículas (Brady y Weil, 2000); además, las raíces fasciculadas de las gramíneas envuelven y forman una malla alrededor de los agregados, que aumenta su estabilidad. La Serie MPC mantuvo una tendencia a una mejor estabilidad en el sitio nativo, aunque sin diferencias significativas, pero el índice RD no fue sensible en los suelos con altos contenidos de arcilla.

Con respecto a los macroagregados los suelos estructurados poseen una mayor cohesión y ángulo de fricción que los con materiales homogeneizados (Horn, 1988). Este efecto es más notorio cuando la estructuración se ha producido por ciclos de desecamiento y humedecimiento (Krummelbein y Horn, 2013), ya que los períodos de humectación y secado del suelo causan el ordenamiento de las partículas debido a procesos de contracción y dilatación generados por los meniscos de agua.

En cada una de las Series, los suelos con mayor intervención presentaron una mayor VDMA (menor estabilidad), lo que refleja la pérdida de la calidad estructural por efecto de la intervención antrópica (Franzluebbers, 2009). Los valores de VDMA fueron en general altos en ambos manejos de las Series BTC y RUG (contenidos de arcilla mayores a 25%) y en el sitio arado de la Serie MPC, donde la labranza, la que destruye los agregados cada temporada, genera una pérdida en la estabilidad estructural del suelo (Six, 2004).

Propiedades Mecánicas

Límites de consistencia

Los límites de consistencia de Atterberg relacionan los contenidos de agua en los que el suelo se comporta como un líquido, un material plástico, friable o duro (Kézdi, 1979). El factor agua afecta el comportamiento mecánico del suelo y según su contenido el suelo pasa por rangos de comportamiento y llega incluso a comportarse como un líquido que fluye, con lo que pierde su sustentación. El uso de los límites líquido y plástico permite determinar el rango óptimo de contenido de agua para la labranza, y demuestra el efecto de la materia orgánica de aumentar el rango óptimo de friabilidad en el suelo (Mitchell *et al.*, 1995; Le Bissonnais y Arrouays, 1997). Los resultados obtenidos del límite líquido (LL) y límite plástico (LP) y su correspondiente índice plástico (IP) se presentan en el Cuadro 5. En cada suelo y tipo de uso se encontró una gran variabilidad. Las rectas generadas con el álabe de Casagrande, las que permiten derivar el LL, se presentan en el Apéndice 4.

Cuadro 5. Promedios ($\% \pm DE$) de los límites de consistencia (g de agua/100g de suelo) para cada suelo sometido a distintos manejos.

Tratamientos	LL	LP	IP
MPC Arado	30,7 ($\pm 1,6$)	18,7 ($\pm 1,1$)	12,0
MPC Nativo	45,6 ($\pm 4,8$)	37,8 ($\pm 5,6$)	7,7
STG Cero Labranza	23,9 ($\pm 0,7$)	21,3 ($\pm 0,2$)	2,7
STG Pradera	36,8 ($\pm 1,2$)	33,7 ($\pm 3,2$)	3,1
RUG Huella	56,3 ($\pm 8,6$)	32,0 ($\pm 3,6$)	24,3
RUG Nativo	57,6 ($\pm 3,3$)	33,7 ($\pm 6,6$)	23,8
BTC Arado	41,0 ($\pm 4,5$)	28,3 ($\pm 5,7$)	12,8
BTC Nativo	63,3 ($\pm 13,4$)	25,6 ($\pm 3,1$)	37,8

LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice plástico (LL-LP). MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco.

El sitio arado de la Serie MPC presentó un LL de 31% y un LP de 19%, lo cual da un rango de comportamiento plástico de un 12%. Comparativamente, el suelo nativo presentó límites de consistencia mayores, pero con un comportamiento plástico menor, que resultó también en un índice plástico (IP) menor. En el mismo sitio, Vargas (2014) determinó contenidos de MO de 4,99% para el sitio arado y 8,04% para el sector sin arar, por lo que los mayores índices de consistencia en el sitio nativo responden a la mayor microagregación y retención de agua promovidas por la materia orgánica.

Ambos manejos de la Serie STG presentaron los valores de IP menores entre todos los suelos, lo que implica que estos sitios tienen un comportamiento friable amplio, por lo cual se puede deducir que la cero labranza tiene un efecto protector del suelo similar al de una pradera permanente. En ambos sitios se observó el efecto de la materia orgánica, la que mejora la capacidad de retención de agua, acerca los límites y disminuye el rango en que se comporta como plástico. Este efecto fue observado por Stock y Downes (2008), quienes demostraron que el incremento de la materia orgánica en el suelo favorece un comportamiento mecánico más estable en un rango amplio de humedad.

El suelo de la Serie RUG, con gran contenido de arcilla, presentó una alta retención de agua en ambos límites de consistencia, con un amplio diferencial, lo que determina índices plásticos altos en ambas condiciones de uso, característico de suelos con dominancia de arcillas 2:1 (Fredlung y Rahardjo, 1993).

Debido a su alto contenido de arcilla, el suelo BTC tiende a aumentar el contenido de agua en el rango en el que el suelo se comporta como plástico, especialmente en el sitio nativo. Dada la naturaleza sódica del suelo (CIREN, 1996), que genera una dispersión de las partículas minerales, su índice plástico aumentó por sobre 30%, lo que generó una mayor capacidad para deformarse, compactarse y sellarse, al producirse un taponamiento del sistema poroso.

Resistencia tensil

El Cuadro 6 presenta la resistencia tensil de los agregados bajo dos condiciones, agregación natural y agregados artificiales a partir de un suelo amasado. La evaluación a capacidad de campo (-33 kPa) y seco al aire (-3000 kPa) pretende simular la condición en invierno y verano, de manera de contrastar el comportamiento húmedo-seco del suelo, mientras que el material amasado simula una condición inicial (no estructurada) como valor referencial de la resistencia previo a la estructuración.

Cuadro 6. Promedios (\pm DE) de resistencia tensil (kPa) de agregados evaluados bajo dos condiciones (agregados naturales y post-amasados) y dos tensiones mátricas (-33 kPa y seco al aire).

Tratamientos	Resistencia (kPa)			
	Natural		Amasado	
	-33 kPa	Seco Aire	-33 kPa	Seco Aire
MPC Arado	12,3 (\pm 0,9)	395,4 (\pm 12,0)a	33,9 (\pm 2,2)	917,0 (\pm 44,3)a
MPC Nativo	12,9 (\pm 0,2)	118,2 (\pm 14,1) b	25,7 (\pm 2,8)	660,2 (\pm 55,8) b
STG Cero Labranza	13,4 (\pm 3,4)	194,0 (\pm 100,7)	34,9 (\pm 1,7)	710,6 (\pm 53,3) a
STG Pradera	17,7 (\pm 2,1)	134,9 (\pm 91,5)	31,3 (\pm 4,4)	423,2 (\pm 223,3) b
RUG Huella	13,1 (\pm 5,9)	599,5 (\pm 185,2)a	32,0 (\pm 5,4)	1008,4 (\pm 40,9)
RUG Nativo	7,4 (\pm 1,0)	154,5 (\pm 27,9) b	33,6 (\pm 3,8)	1059,0 (\pm 41,0)
BTC Arado	11,0 (\pm 5,8)	371,9 (\pm 91,2)a	31,0 (\pm 0,5)	712,0 (\pm 223,4)
BTC Nativo	17,5 (\pm 6,8)	460,6 (\pm 267,6) b	36,0 (\pm 11,3)	786,5 (\pm 189,3)

MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Letras distintas indican diferencias significativas entre manejos para un mismo suelo ($\alpha < 0,05$).

El suelo posee la particularidad de organizar sus partículas primarias en agregados, los que corresponden a las unidades estructurales básicas. El arreglo de las partículas primarias en agregados produce un comportamiento físico mecánico distinto entre éstos y la matriz del suelo, debido a que entre los agregados se define un sistema poroso secundario (Fuentes *et al.*, 2013). Esta diferencia se traduce en una mayor resistencia en el agregado que en la matriz, ya que esta última presenta una porosidad interagregada de mayor tamaño y continuidad, lo que resulta en un aumento de zonas con debilidad mecánica (Horn, 1993). Este punto es importante, ya que la resistencia tensil de un agregado es función de su tamaño, de modo que mientras mayor sea éste, menor será el promedio de su resistencia tensil (Seguel y Horn, 2006) y más parecida será a la resistencia de la matriz del suelo. Esto se explica por la mayor frecuencia de planos de falla en la unidades de mayor tamaño (Hallet *et al.*, 2000). En el presente estudio el tamaño de los agregados se estandarizó para evitar el efecto jerárquico del suelo.

La posibilidad de arreglo de las partículas es mayor mientras más cerca de la saturación ocurran los ciclos de humectación y secado, debido a que el agua actúa como medio de transporte y lubricación. Por ejemplo, al someter un suelo arcillo limoso con distintos contenidos de agua a una carga externa, se genera una menor relación de vacíos, con mayor área de contacto, cuando el suelo está húmedo, lo que resulta en una mayor

resistencia tensil del agregado (Paz y Guérif, 2000). Sin embargo, en este estudio se aplicó un único ciclo de secado post amasado, ordenando las partículas del suelo en función de su tensión interna.

Los suelos naturales evaluados a -33 kPa no presentaron diferencias entre manejos y tuvieron un comportamiento homogéneo y con resistencia baja en comparación con las muestras secas al aire, las que tuvieron diferencias entre las condiciones de uso. El proceso de secado causa una disminución de los meniscos de agua en el suelo y concentra agentes cementantes en los puntos de contacto, lo que ligan las partículas y entrega resistencia a los agregados (Horn *et al.*, 1995). Así mismo, en las muestras a -33 kPa el agua actúa como lubricante y logra una menor fricción entre las partículas sólidas, lo que favorece la deformación y reacomodo frente a las presiones externas.

Así, al llevar el suelo a una condición de amasado, se aprecia un aumento considerable de la resistencia de los agregados, principalmente en la condición seca al aire, ya que el primer secado del suelo causa una fuerte contracción de los meniscos de agua entre las partículas sólidas, sin que existan poros estructurales gruesos ni estructuración jerárquica (Watts y Dexter, 1998). Los ciclos de humedecimiento y secado posteriores generarán la friabilización del suelo y una disminución de la resistencia (Dexter, 1988). La pradera del suelo STG fue la que menos aumentó la resistencia post-amasado en valor absoluto de los agregados naturales, lo que se puede relacionar con los altos contenidos de MO, característica de sistemas estables de baja intervención antrópica.

En la situación seca al aire, las condiciones de mayor intervención presentaron mayor resistencia tensil. Esto se atribuye principalmente a que estos suelos han sido sometidos a cargas (tensiones) externas. Por esto mismo, las tensiones que han afectado los suelos bajo labranza o tránsito, sumadas a su granulometría, constituyen el factor más relevante en la variación de la resistencia. La excepción la constituye BTC nativo, que por efecto dispersante del sodio no logra un ordenamiento adecuado entre las partículas. En términos generales, el diferencial seco-húmedo es menor en sistemas de baja intensidad de uso, lo que es atribuido a un mejor desarrollo estructural (Seguel y Orellana, 2008), producto de contenidos mayores de MO y en formas más estables (Fuentes *et al.*, 2013). Destaca asimismo RUG en condición amasada, cuyos valores de resistencia en seco se maximizaron en relación a los otros suelos y se igualaron entre manejos.

Índices de desarrollo estructural

El Cuadro 7 presenta los índices de desarrollo estructural asociados a la resistencia tensil de los agregados, en una condición de estructuración natural asociada al manejo y una condición amasada, con nivel de estructuración mínima; a su vez, cada resistencia fue evaluada bajo dos condiciones mátricas (seco al aire y -33 kPa).

Cuadro 7. Índices promedio (\pm DE) de desarrollo estructural asociados a la resistencia tensil de los agregados. Los índices se presentan en las ecuaciones 1 a la 3.

Tratamientos	Índices		
	I1	I2	I3
MPC Arado	0,434 (\pm 0,01)	0,031 (\pm 0,01)	0,431 (\pm 0,01)
MPC Nativo	0,168 (\pm 0,03)	0,110 (\pm 0,01)	0,181 (\pm 0,03)
STG Cero Labranza	0,268 (\pm 0,14)	0,077 (\pm 0,03)	0,273 (\pm 0,14)
STG Pradera	0,274 (\pm 0,06)	0,178 (\pm 0,11)	0,304 (\pm 0,05)
RUG Huella	0,596 (\pm 0,17)	0,023 (\pm 0,01)	0,590 (\pm 0,16)
RUG Nativo	0,143 (\pm 0,02)	0,048 (\pm 0,01)	0,145 (\pm 0,22)
BTC Arado	0,617 (\pm 0,40)	0,029 (\pm 0,01)	0,602 (\pm 0,38)
BTC Nativo	0,688 (\pm 0,58)	0,041 (\pm 0,01)	0,673 (\pm 0,57)

MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco.

La estructura es una propiedad dinámica, que sufre cambios temporales entre las época del año, y que dependen también del manejo, del material parental y del período que ha sido sometido a ciclos de humectación y secado. El secado es un proceso de suma importancia, ya que la evolución de la estructura se da a través del aumento de estos ciclos (Horn, 1988) y por medio de éstos se genera el concepto de jerarquía de agregación (Hallet *et al.*, 2000). En consecuencia, el suelo forma un cuerpo que se ordena en forma jerárquica, donde el motor que une las partículas y le da estabilidad al sistema son los meniscos de agua, los que se van contrayendo en torno a puntos de contacto, de manera que a medida que hay más de estos puntos de contactos entre los agregados se genera una mayor resistencia y estabilidad en el sistema (Horn *et al.*, 1995). Este proceso de estructuración generará un suelo conformado por unidades densas, bien diferenciadas, que dejarán un sistema poroso funcional entre los agregados (Semmel *et al.*, 1990), que es lo que principalmente se busca en un suelo con fines agrícolas.

El grado de desarrollo estructural de un suelo refleja la interacción con los factores de formación, entre los que destacan el material parental, el clima y la acción de los organismos, además de las prácticas de manejo (Krummelbein y Horn, 2013). Los índices propuestos buscan reflejar la relación con el grado de desarrollo estructural del suelo (Seguel y Orellana, 2008). Para determinar estos índices de desarrollo estructural se relacionaron los promedios de las pruebas de resistencia tensil, tanto para agregados naturales como artificiales hechos por amasado del suelo y se evaluaron a distinta tensión mátrica. Así, considerando a los contenidos de materia orgánica y de arcilla como factores de agregación, en tanto que la presencia de sodio actúa en sentido contrario y favorece la dispersión, el desarrollo estructural debiese ser mayor en los sitios de baja intervención y en los suelos sin presencia de sodio. Sin embargo, las pruebas de estabilidad de micro y macro agregados (Cuadro 4) no coincidieron, demostrando la compleja interacción de factores al momento de explicar la dinámica de estructuración (Six *et al.*, 2004).

En general los índices I1 e I3 en el Cuadro 7 presentan una relación directa con los manejos, con un aumento claro en el índice en una situación intervenida. Para el índice I2 la tendencia fue inversa, y suelos no intervenidos presentaron índices mayores.

Validación de los índices

Para validar los índices, se los correlacionó con las pruebas de estabilidad de agregados.

Para el índice $(R_{SA}-R_{CC})n/(R_{SA}-R_{CC})$ de la ecuación 1, se encontró una relación sólo con la prueba de la razón de dispersión (RD), que se presenta en la Figura 2.

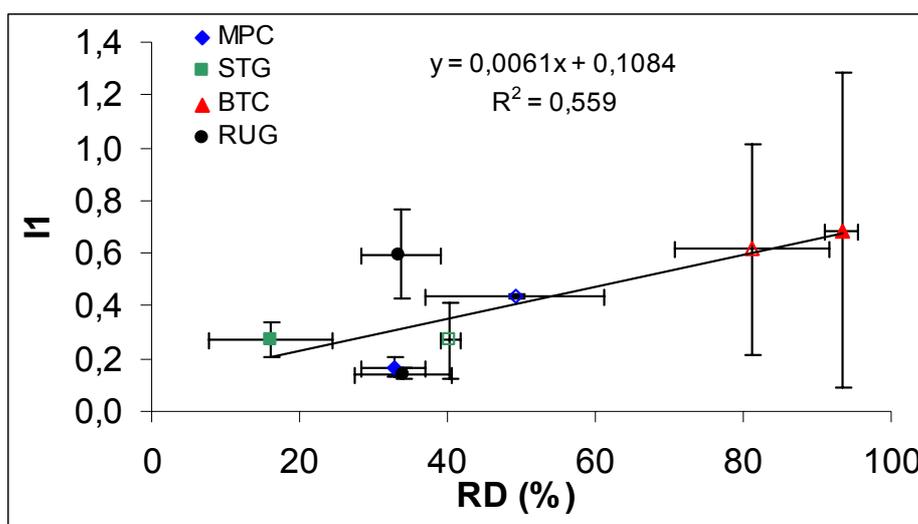


Figura 2. Relación entre el índice de desarrollo estructural I1 (ecuación 1) y la prueba de estabilidad de microagregados de la razón de dispersión (RD). MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Símbolo vacío: sitio intervenido; símbolo lleno: sitio no intervenido.

Los suelos más estables (menor RD) se relacionaron con valores menores de I1, como los de Santiago y Mapocho, que se ajustaron bien a una recta, mientras que Batuco, con índice de dispersión mayor (Cuadro 4), se ubicó con valores mayores de I1. Se logró un ajuste significativo para los suelos, con un R de 0,747 ($\alpha \leq 0,05$).

En los sitios de la Serie Santiago, la diferencia entre los valores de I1 no fue significativa. El contraste se hizo visible en la RD, donde la mayor estabilidad se logró en el sitio muestreado en pradera, donde las raíces persistentes durante todo el año le dan un efecto positivo a los agregados y generan un suelo más estable en comparación con el suelo intervenido bajo cero labranza.

Por otro lado, los suelos Mapocho y Rungue respondieron mejor al índice, ya que los suelos sin intervención tendieron a tener un menor valor de I1, lo cual se relaciona a una estabilidad mayor en comparación con su par intervenido. El sitio intervenido del suelo Rungue escapó al ajuste lineal, pues la huella de tránsito en la que se tomaron las

muestras sobre un suelo con pradera mediterránea anual era reciente, de la última temporada. Es decir, el sitio bajo la huella aún conservaba buenos niveles de materia orgánica, similares a los del sector no intervenido, por lo que la prueba de microestabilidad de agregados no fue sensible para discriminar los manejos, que el índice I1 separó adecuadamente. Mapocho presentó diferencias significativas en su densidad aparente (Cuadro 1), lo que se asocia directamente al manejo, donde se generó una menor estabilidad debido al uso de maquinaria. Lo mismo ocurrió con Rungue, donde el paso reciente de vehículos creó una huella compacta en superficie.

Para Batuco, el sitio no intervenido presentó el índice mayor, que se asocia a un menor desarrollo estructural, consistente con la RD (mayor, peor estabilidad). Sin embargo, a medida que la RD aumentó (y la estructura empeoró), la variabilidad del I1 fue mayor. En este mismo sitio, la resistencia de los agregados naturales del sector no intervenido fue ligeramente mayor que su par bajo labranza, pero en condición amasada esta tendencia se invirtió en una mayor I1 en el sitio sin intervención. Esto indicaría que, a pesar de tener una mayor concentración de sodio en superficie, en el sitio nativo primaría el efecto de la materia orgánica y la ausencia de labranza para explicar una mayor estabilidad mecánica (Fuentes *et al.*, 2013).

Es importante señalar que a medida que la estabilidad aumenta al disminuir la RD disminuye, la variabilidad de I1 disminuye. Mediante las pruebas de resistencia tensil se determinó que un suelo llevado a una estructuración inicial a través del re-arreglo de agregados mediante el amasado, generó una mayor resistencia en el agregado (Watts y Dexter, 1998), por lo que el paso repetido de los tractores genera en el suelo un efecto similar, produciendo un aumento de la resistencia de los agregados.

El índice $I2 = R_{CC}/R_{SA}$ se asoció con ambas pruebas de estabilidad (Figura 3).

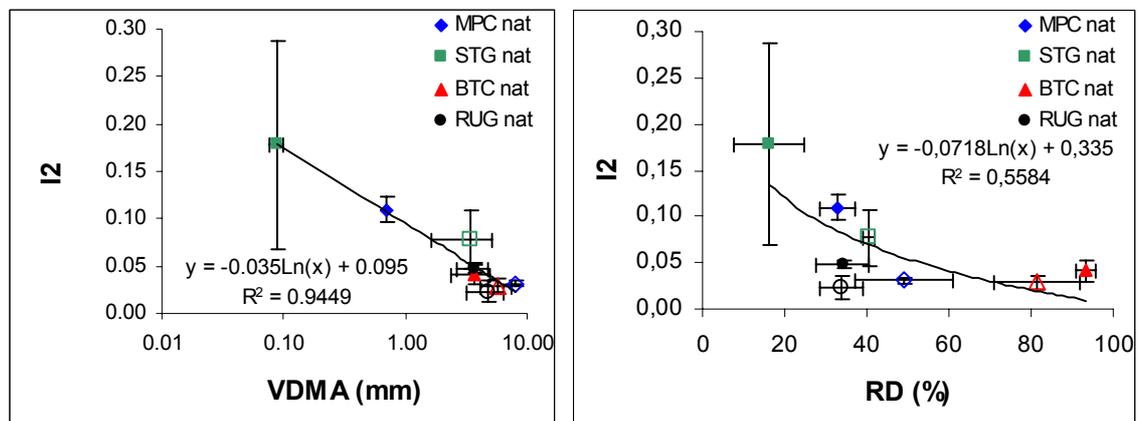


Figura 3. Relación entre el índice de desarrollo estructural I2 y las pruebas de estabilidad de agregados mediante la variación del diámetro medio de los agregados (VDMA) y la razón de dispersión (RD), para todos los suelos. MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Símbolo vacío: sitio intervenido; símbolo lleno: sitio no intervenido.

La acción del índice I2 fue significativa, con valores mayores en situaciones no intervenidas, lo cual era de esperar, pues estos suelos están mejor estructurados. Se

aprecia que el índice generó un mejor resultado con una variación del diámetro medio de los agregados (VDMA) que facilitó el ajuste lineal, con un R de 0,97 ($\alpha \leq 0,001$), en comparación con la prueba de estabilidad RD, donde se obtuvo un R de 0,74 ($\alpha \leq 0,05$). Sin embargo en ambos casos se verifica una tendencia a un mejor grado de desarrollo estructural en suelos con un I2 mayor.

En los agregados húmedos naturales, los suelos nativos tienden a tener una mayor estabilidad, debido al alto contenido de MO, la que genera una mayor cohesión, promovida por la humificación y su comportamiento hidrófobo (Zhang y Hartge, 1995; Hallet *et al.*, 2001), que desacelera la humectación y genera mayor resistencia. Por ello, los suelos intervenidos por labranza excesiva producirán pérdidas de materia orgánica y deterioro de la estabilidad al agua (Ellies *et al.*, 1994), generando destrucción de agregados y un menor desarrollo estructural.

Las muestras de suelo bajo intervención tuvieron valores más altos de densidad aparente (Cuadro 1), a excepción del suelo de Batuco, donde el suelo nativo presentó una densidad aparente mayor. Según CIREN (1996) los suelos de esta Serie presentan contenidos de sodio en los primeros centímetros de hasta $13,8 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$, lo que genera dispersión y disminuye el desarrollo de los poros interagregados. La resistencia tensil resultante, asociada a las características inherentes del suelo, al manejo y a los factores de formación, generó I2 crecientes a medida que aumentó la estabilidad, lo que indica que la resistencia mecánica evaluada en seco y en húmedo presenta una menor variación que en suelos degradados, acorde a lo observado por Stock y Downes (2008) en un mismo suelo y por Fuentes *et al.* (2013) en suelos de distinto origen.

El suelo de la Serie Mapocho presentó variaciones entre condiciones de uso bastante acentuadas, debido a que el sitio intervenido había sido sometido a una aradura reciente que causó alteraciones en su estructura. Para la Serie Santiago también se evidenciaron diferencias, las que se relacionaron directamente con el sitio de muestreo. Una pradera proporciona al sistema suelo un mejor desarrollo estructural, en comparación a su par intervenido (cero labranza), tanto así que el índice I2 entre ambos tratamientos presentó un diferencial mayor, asociado a su estabilidad. Farías (2009), quien evaluó propiedades físicas de un sitio con presencia de bosque esclerófilo y lo comparó con su par transformado en viña encontró un resultado similar. Tras siete años de uso agrícola, el diferencial seco-húmedo de la resistencia tensil de agregados fue en ese estudio hasta 14 veces mayor en seco, mientras que en el sitio nativo la resistencia evaluada en seco fue solamente 5 veces mayor que en la condición en húmedo.

En Rungue y Batuco se apreció una menor estabilidad tanto para macro como micro agregados, lo que generó índices menores. Esto se asoció a que el índice I2 incluye directamente en el denominador el valor de resistencia de los agregados secos al aire, los que alcanzaron valores mucho mayores en las situaciones menos estructuradas. Estos agregados tienen una mayor capacidad de carga, debido a las presiones externas ejercidas por el tráfico de maquinaria y a la baja cantidad de poros gruesos en el sitio Batuco nativo (Horn, 1993). En el suelo Rungue las diferencias se generaron entre tratamientos, relacionado con una fuerte compactación en superficie, producida por el constante tráfico en la muestra evaluada bajo intervención. Este aumento en la resistencia en seco se debe a que el peso ejercido desplaza las partículas del y generan

una mayor cantidad de puntos de contactos, lo que resulta en una menor cantidad de planos de falla y en una mayor fuerza entre los agregados (Horn, 2003).

El tercer índice $(R_{SA})_n/(R_{SA})_a$ se asoció solo con la razón de dispersión (RD). Los resultados se presentan en la Figura 4.

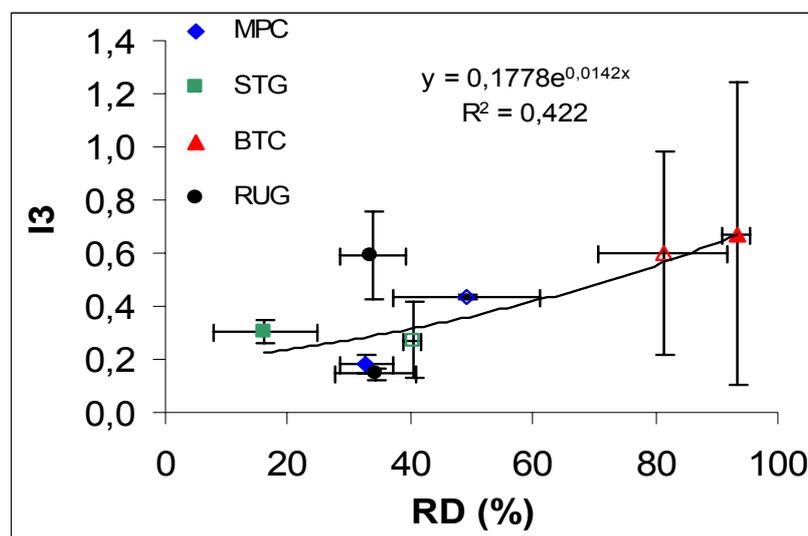


Figura 4. Relación entre el índice de desarrollo estructural I3 y la prueba de estabilidad de agregados mediante razón de dispersión (RD). MPC: Serie Mapocho; STG: Serie Santiago; RUG: Serie Rungue; BTC: Serie Batuco. Símbolo vacío: sitio intervenido; símbolo lleno: sitio no intervenido.

El índice presentó una tendencia exponencial, con un R de 0,649 ($\alpha \leq 0,1$). Los suelos estables presentan un índice menor, mientras que los suelos de menor grado estructural presentan uno mayor.

En forma consistente con los otros índices y con la prueba de estabilidad de agregados, el sitio nativo de la Serie Batuco presentó un índice mayor. Esto se puede relacionar a que el suelo nativo presenta agregados de mayor resistencia, debido a un alto contenido de arcilla y a una baja porosidad gruesa en comparación con el suelo bajo aradura, dependiente del efecto del sodio, el que actúa como medio de dispersión y disminuye la agregación. En el caso del sitio arado, este problema no se presenta debido al desplazamiento de sales por el agua de riego.

En resumen, cada índice fue afectado por el manejo, en forma consistente con las pruebas de estabilidad, en las que I1 e I3 disminuyeron a medida que aumentó la estabilidad. Por su parte, el índice I2 presentó la tendencia inversa, donde los suelos con buena estructura se asociaron a índices mayores.

Fuentes *et al.* (2013) propusieron un índice R_m/R_a , donde R_m es la resistencia de la matriz del suelo y R_a la resistencia de los agregados, ambos evaluados en condición seca. Este índice se correlacionó de forma positiva y directa con la densidad aparente, la cual actuó como un indicador de deterioro estructural, y se llegó a la conclusión que

cuando mayor es la densidad aparente mayor es la fuerza de la matriz del suelo en relación a los agregados, como resultado de un menor número de planos de falla asociados con la disposición más densa y el menor espacio de poros interagregados. Estos investigadores concluyeron que la relación R_m/R_a es un buen índice de deterioro estructural, aún cuando en suelos como Batuco sin intervención se promovió el desarrollo de agregados más pequeños a pesar que las arcillas expandibles estaban presentes en cantidades significativas, obteniéndose valores más bajos de índice.

En términos generales, debido a la alta variabilidad para determinar de forma específica los índices validados, es relevante el historial de humectación y secado de los suelos, el que se asocia a diversos factores, entre los cuales destacan la condición climática, el manejo, el historial de cargas a las que han sido sometidos los suelos y la presencia de materia orgánica y cationes como el sodio, este último particularmente importante para los suelos de la Serie Batuco.

En consecuencia, se deduce que en los sitios intervenidos hay pérdida de propiedades intrínsecas del suelo, lo que puede llevar a problemas en los manejos culturales con efecto sobre el rendimiento de los cultivos, por lo que es necesario establecer con mayor detalle las condiciones en las que estos índices pueden ser aplicados.

CONCLUSIONES

A partir de pruebas mecánicas sencillas es posible generar índices de desarrollo estructural. Sin embargo, la variabilidad y alta sensibilidad de los índices dependen de las características intrínsecas y de las condiciones de manejo del suelo, por lo que su aplicabilidad aún debe estudiarse con mayor detalle.

En relación a las Fases de Series de suelos estudiadas, el sitio de la huella del tractor y aquellas con sectores arados tuvieron la mayor pérdida de estabilidad, con pérdidas de porosidad funcional (pruebas físicas) y altas resistencias en estado seco (pruebas mecánicas), que llegaron a producir problemas de compactación y/o pérdida estructural asociados al paso de la maquinaria.

Los índices I1 e I3 se correlacionaron con las pruebas de estabilidad de agregados de forma positiva y directa; en el índice I2 los resultados también se correlacionaron, pero en forma directa y negativa. En este estudio, los índices reaccionaron a las condiciones de manejo (con o sin intervención), y cada suelo presentó características inherentes que reflejan la complejidad en la interpretación de los resultados. Por ello es necesario continuar estudiando otros factores de los que también depende el desarrollo estructural de un suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., J. Reyes, E. Martínez y P. Silva. 2002. Cero labranza y propiedades de un suelo aluvial de Chile central. Proceedings del IX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Talca, Chile. Boletín 18: 78-81.
- Berryman, C., D. Davies, C. Evans, M. Harrod, A. Hughes, R. Skinner, R. Swain, and D. Soane. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. Formerly Advisory Paper N°18. Reference Book 441. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Sweden. 116 p.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Aerotécnicas F. L (Madrid). 342 h.
- Blażejczak, D., R. Horn, and J. Pytka. 1995. Soil tensile strength as affected by time, water content and bulk density. *Int. Agrophysics* 9: 179-188.
- Brady, N., and R. Weil. 2000. Elements of the nature and properties of soils. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. USA. 559 p.
- Braunack, M.V., J.S. Hewitt, and A.R. Dexter. 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.* 30: 653-667.
- Casanova, M., O. Salazar, O. Seguel, and W. Luzio. 2013. The soils of Chile. World Soils Book Series. 185 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1996. Estudio agrológico Región Metropolitana: Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Pub. CIREN N° 115, Santiago, Chile. 425 p.
- Dane, J.H., and G.C. Topp. 2002. Methods of soil analysis. Part 4: Physical methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI. 1692 p.
- Das, B. 1997. Soil mechanics laboratory manual. Engineering Press. Austin, Texas. 151 p.
- Dexter, A.R. 1988. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. Pp: 35-52 In: Drescher, R. Horn, and M. de Boodt (ed.), Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement.
- Ellies, A. 1988. Mechanical consolidation in volcanic ash soils. pp 87-92. In: Drescher, J., R. Horn, and M. de Boodt (eds.), Impact of water and external forces on soil structure. Catena Verlag. Germany.
- Ellies, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque*, 16: 101-110.
- Ellies, A. and M. Hartge. 1990. Changes in soil structure as caused by land use after clearing virgin forest. *Z. F. Bodenkunde und Pflanzenernährung*. 153: 389-393.
- Ellies, A., C. Ramírez y R. MacDonald. 1993. Cambios en la porosidad de un suelo producto de su uso. *Turrialba*, 43(1): 72-76.
- Ellies, A., C. Ramírez y H. Figueroa. 1994. Cambios morfológicos estacionales del espacio poroso en un Hapludand. *Agro Sur*, 22(1): 23-32.
- Elmholt, S., P. Schjonning, L.J. Munkholm, and K. Debosz. 2008. Soil management effects on aggregate stability and biological binding. *Geoderma*, 144: 455-467.
- Farías, E. 2009. Cambio en las propiedades físicas de un suelo en laderas cultivadas con vid (*Vitis vinifera*). Memoria Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 39 p.
- Franzluebbers, A.I. 2009. Linking soil organic carbon and environmental quality through conservation tillage and residue management. pp: 263-289. In: Lal, R.,

- and R.F. Follet (eds.), Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. 2nd ed. SSSA Special Publication 57, Madison, WI, USA.
- Fredlund, D.G., and H. Rahardjo. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc, New York, USA. 517 p.
- Fuentes, I., Seguel, O., and M. Casanova. 2013. Elasto-plastic behaviour of soil aggregates and the soil matrix as a function of physical properties in three soils of Central Chile. pp: 72-88. *In: Krummelbein, J., R. Horn, and M. Pagliai. (eds.), Soil degradation. Catena Verlag. Germany.*
- Gavande, S.A. 1972. Física de suelos, principios y aplicaciones. Centro Regional de Ayuda Técnica (A.I.D.). Mexico- B. Aires. 152 p.
- Hallet, P., A. Dexter, N. Bird, and J. Seville. 2000. Scaling of the structure and strength of soil aggregates. pp: 22-31. *In: R. Horn, J. van der Akker, and J. Arvindsson (eds.), Subsoil compaction. Distribution, processes and consequences. Advances in Geocology 32.*
- Hallet, P., T. Baumgartl, and I. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 184-190.
- Hartge, K., und R. Horn. 2009. Die Physikalische Untersuchung von Böden. Praxis, Messmethoden, Auswertung. 4te ed. Stuttgart, Germany: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 178 p.
- Haynes, R.J. 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem*, 32: 211-219.
- Hernández, R. 2010. Índice de degradación estructural en función de las propiedades físico-mecánicas de un Entic Haploxeroll. Proyecto de Memoria Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. No publicado.
- Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego, USA. 771 p.
- Horn, R. 1988. Compressibility of arable land. pp. 53-71. *In: Drescher, J., R. Horn, and M. de Boodt (eds.), Impact of water and external forces on soil structure. Catena Supplement 11. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.*
- Horn, R. 1993. Mechanical properties of structured unsaturated soils. *Soil Technology*, 6: 47-75.
- Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structure on saturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116: 77-88.
- Horn, R., T. Baumgartl, R. Kayser, and S. Baasch. 1995. Effect of aggregate strength on strength and stress distribution in structured soils. pp.: 31-52. *In: Hartge, K., and B. Steward (eds.), Soil structure. Its development and function. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, USA.*
- Horn, R., and T. Baumgartl. 1999. Dynamic properties of soils. pp: A19 - A52. *In: M. Sumner (ed.), Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA.*
- Kemper, W.D., and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. American Society of Agronomy. S.S.S.A. Methods of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph N 9 (2nd ed.).
- Kézdi, A. 1979. Soil physics. Selected topics. Developments in Geotechnical Engineering 25. Elsevier, Amsterdam. 160 p.
- Krummelbein, J., and R. Horn. 2013. Cycles of soil structure. Pp: 183-198. *In: Krummelbein, J., R. Horn, and M. Pagliai (eds.), Soil degradation. Catena Verlag. Germany.*

- Lal, R., and M.K. Shukla. 2004. Principles of soil physics. Part II. Soil mechanics. Marcel Dekker. New York, USA.
- Le Bissonnais, Y., and D. Arrouays. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science*, 48: 39-48.
- Mitchell, A.R., T.R. Ellsworth, and B.D. Meek. 1995. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26: 2655-2666.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56: 377-400.
- Pagliai, M., and N. Vignozzi. 2002. The soil pore systems as an indicator of soil quality. Pp: 71-82. In: Pagliai, M., and R. Jones (eds.), Sustainable land management - environmental protection. A soil physical approach. Advances in Geocology 35.
- Paz, A., and J. Guérif. 2000. Influence of initial packing density, water content and load applied during compaction on tensile strength of dry soil structural units. Pp: 55-63 In: R. Horn, J. van den Akker, and J. Arvidsson (eds.), Subsoil compaction. Distribution, processes and consequences. Advances in Geocology 32: 55-63.
- Reicosky, D.C. 2002. Long-term effect of moldboard plowing on tillage - induced CO₂ loss. pp. 87-96. In: J.M. Kimble, R. Lal, and R.F. Follet (eds.), Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil. Lewis Publishers. Papers from Symposium held on July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Richards, D. 1983. The grape root systems. *Horticultural Reviews*, 5: 127-168.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, N°5. 80 p.
- Seguel, O., and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting – drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169: 221-232.
- Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63(3): 287-299.
- Seguel, O. y I. Orellana. 2008. Propiedades mecánicas y su relación con el manejo y la génesis de suelos derivados de cenizas volcánicas. *AgroSur*, 36(2): 82-92.
- Seguel, O., R. Hernández, and M. Casanova. 2012. Structural degradation index in function of mechanical properties in an Entic Haploxeroll. Proc. 19th ISTRO Conference and IV SUCS Meeting. Striving for sustainable high productivity. 24-28 September, Montevideo, Uruguay.
- Semmel, H., R. Horn, U. Hell, A.R. Dexter, G. Osmond, and E. D. Schulze. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology*, 3: 113-129.
- 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 & Tillage Research*, 79: 7-31.
- Skopp, J.M. 2002. Physical properties of primary particles. pp.: 1-15. In: Warrick, A.W. (ed.), Soil physics companion. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA.
- Stock, O., and N. Downes. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil & Tillage Research*, 99: 191-201.

- Tarbutck, E. y F. Lutgens. 2005. Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física. Pearson Education. Madrid, España. 710 p.
- Theng, B.K.G., K.R. Tate, and P. Sollings. 1989. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. Pp: 5-31. *In*: D.C. Coleman, J.M. Oades, and G. Uehara (eds.), Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Honolulu, Hawaii.
- Vargas, D. 2014. Evaluación de uso del minidisco infiltrómetro para la determinación *in situ* de la hidrofobia de suelos. Memoria Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 59 p.
- Warrick, A.W. 2002. Soil physics companion. CRC Press LLC. Florida, U.S.A. 389 p.
- Watts C.W., and A.R. Dexter. 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science*, 49: 73-84.
- Zhang, H.Q., and K.H. Hartge. 1995. Mechanical properties of soils as influenced by the incorporation of organic matter. Pp: 93-108. *In*: K. Hartge, and B. Steward (eds.), Soil structure. Its development and function. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, USA.

APÉNDICES

Apéndice 1. Fotografías

1.1 Suelos de la Serie Batuco con presencia de afloramientos salinos.



1.2 Dispositivo para prueba de resistencia tensil (*Crushing test*, izquierda), aplicada a los agregados de suelo y prensa hidráulica (derecha) aplicada a los agregados de suelo amasados secos al aire.



1.3 Detalles de la fractura del agregado.

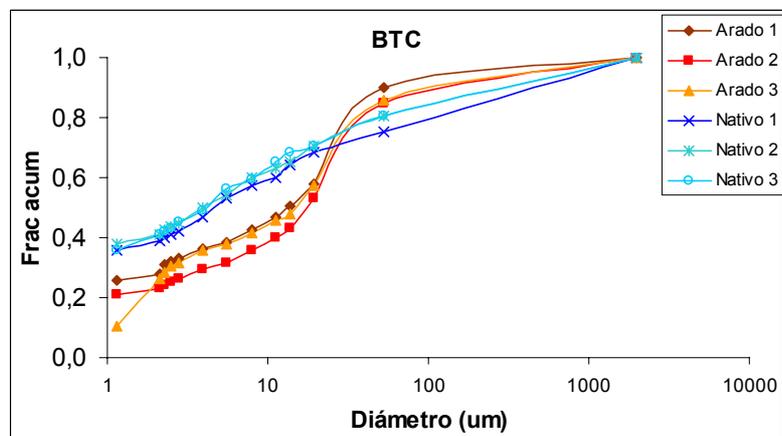
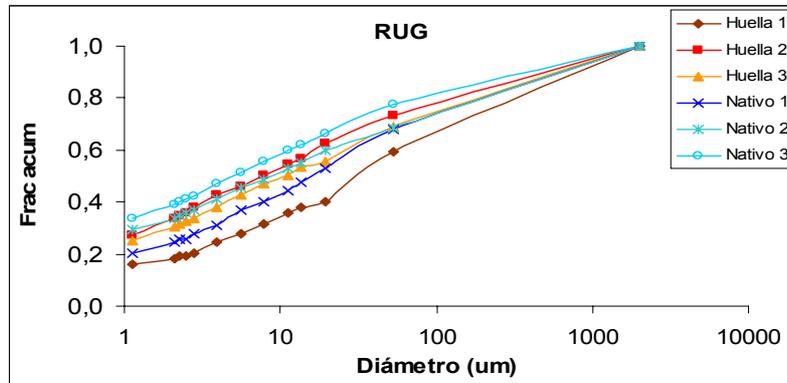
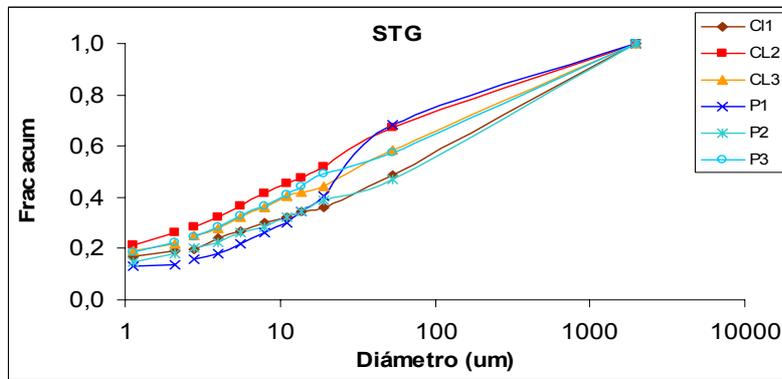
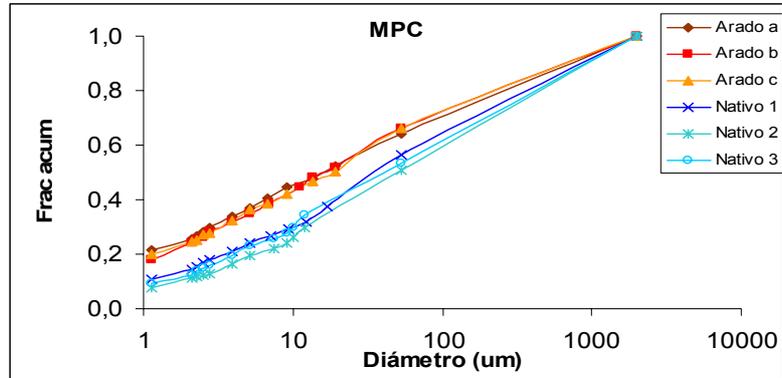


1.4 Suelo amasado.



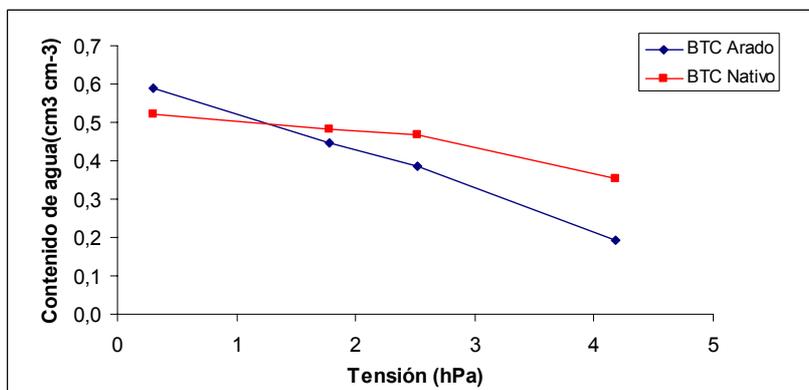
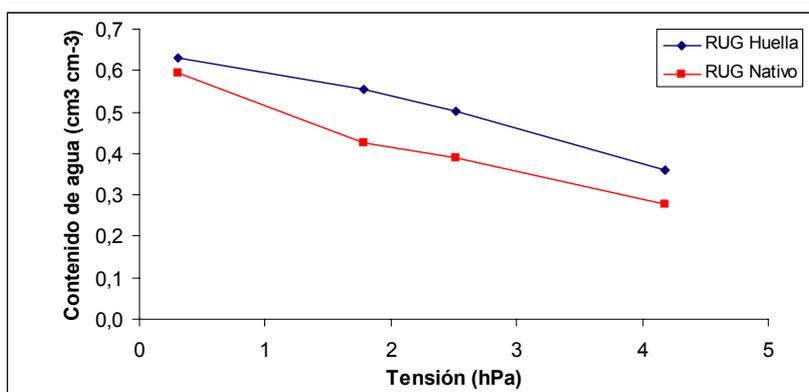
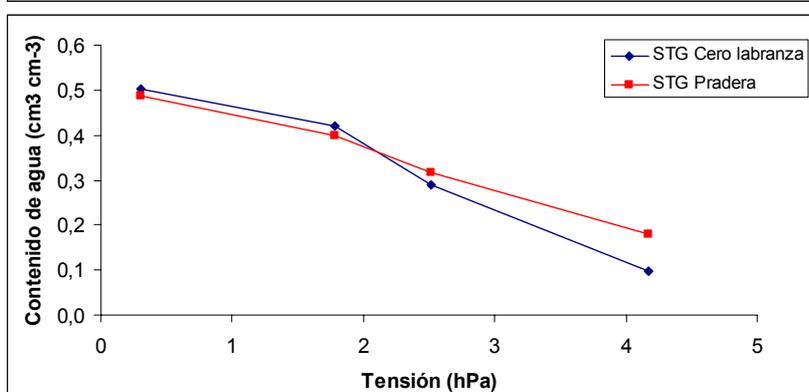
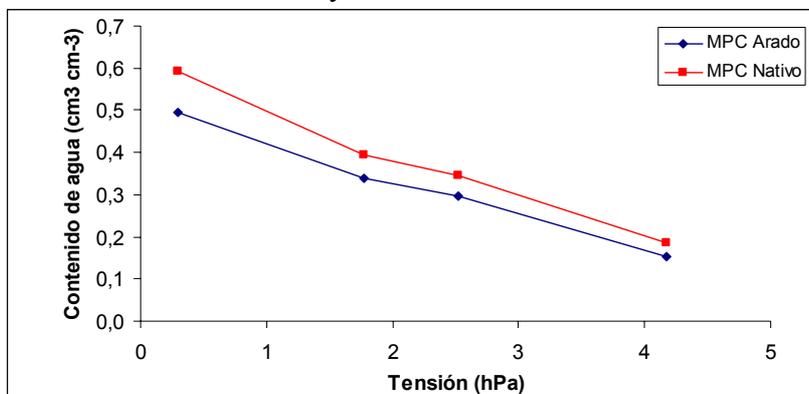
Apéndice 2

Distribución granulométrica de los suelos en condiciones de degradación y sin ella.



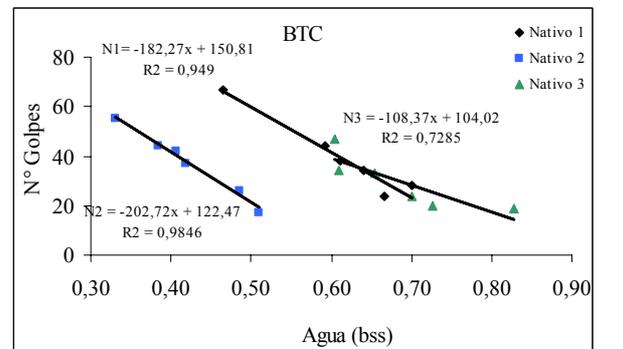
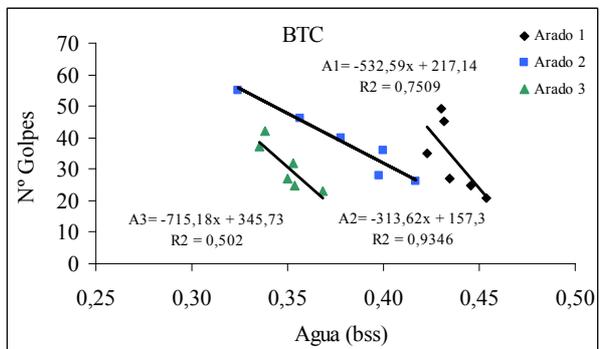
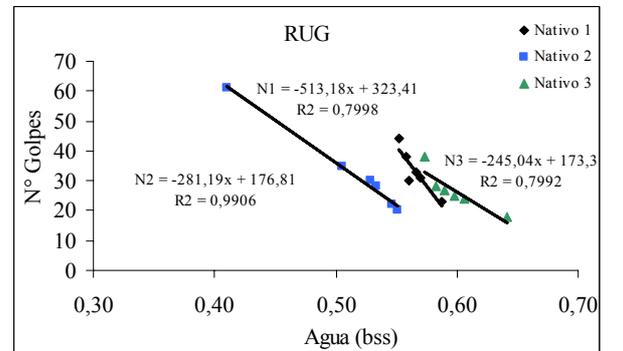
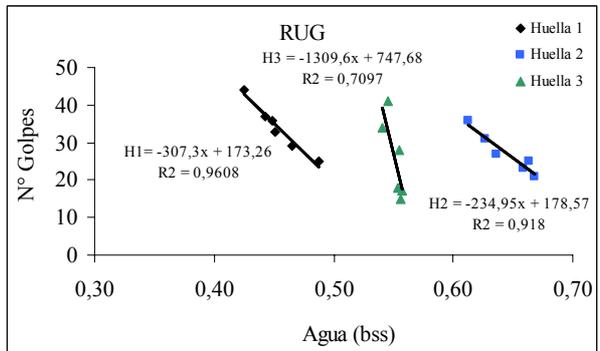
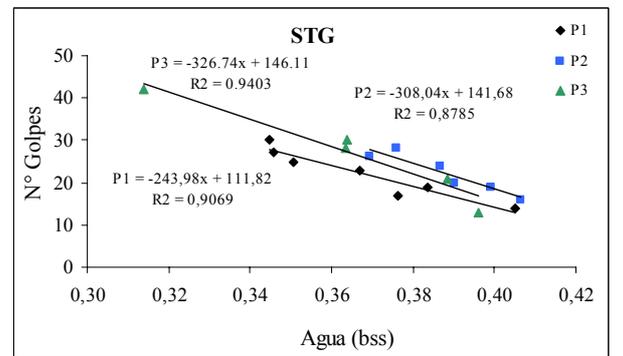
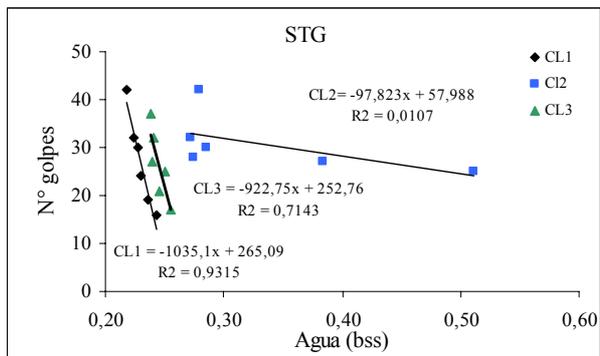
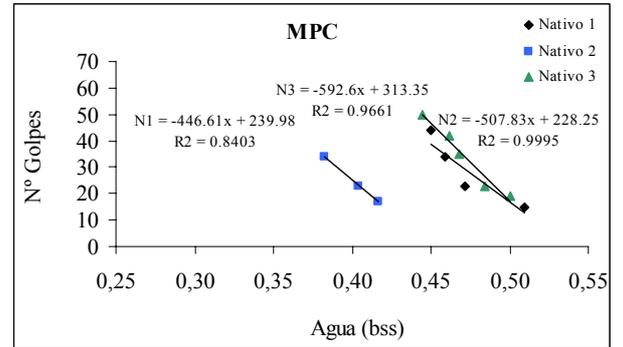
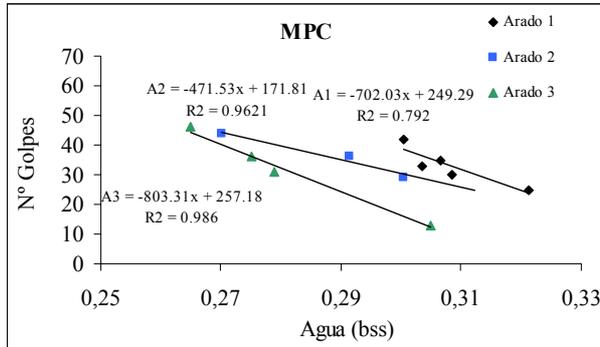
Apéndice 3

Curvas características o de retención de agua en el suelo en condiciones de degradación y sin ella.



Apéndice 4

Límite Líquido.



ANEXO 1. Descripción de las Series de suelo

SERIE MAPOCHO, franco arcillo limoso

Símbolo Cartográfico: MPC

Caracterización General

La Serie Mapocho es miembro de la Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls (Mollisol).

Suelos de origen aluvial, profundos, que ocupan la posición de terrazas antiguas del río Mapocho. El horizonte A es de color pardo oscuro en la superficie y pardo grisáceo oscuro en profundidad en el matiz 10YR; la textura franco arcillo limosa o arcillo limosa; bien estructurado, generalmente estructurada de bloques angulares finos y medios, moderados; de muy buen arraigamiento y muy buena porosidad. Los horizontes B1 y B2 son de colores pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR; textura arcillo limosa; estructura de bloques medios que pasan de moderados a fuertes en profundidad; el arraigamiento es bueno y la porosidad abundante.

El horizonte B3 es de color pardo oscuro en la matiz 5YR; textura franco arcillo limosa o arcillo limosa; estructura de bloques subangulares finos, moderados y de buen arraigamiento.

Características Físicas y Morfológicas del Pedón

Profundidad (cm)

0-21 A ₁₁	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco arcillo limosa a franco arcillosa; ligeramente plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques angulares medios, moderados que se parten en bloques angulares finos, moderados. Raíces finas comunes a abundantes; poros finos abundantes. Límite lineal, gradual.
21-46 A ₁₂	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, con 10% de pardo rojizo oscuro (8.5YR 4/2) en húmedo; franco arcillosa; ligeramente plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques angulares medios, moderados que se parten en bloques angulares finos, moderados. Raíces finas comunes a abundantes; poros finos abundantes. Límite lineal, gradual.
46-67 B ₁	Pardo rojizo (5YR 3.5/2) en húmedo; franco arcillo limosa; ligeramente plástica y adhesiva, friable a firme; estructura de bloques angulares medios, moderados. Raíces finas comunes, algunas raíces gruesas; poros finos abundantes. Límite lineal, gradual.
67-82 B ₂	Pardo rojizo oscuro (5YR 4/2) en húmedo; franco arcillosa; ligeramente plástico y adhesivo; firme; estructura de bloques angulares medios, fuertes. Raíces finas, medias y gruesas comunes; poros finos abundantes. Nódulos de arcillas de 0.5 cm de diámetro, escasos. Límite lineal, abrupto.

82-90 Extra	Pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo; areno francosa muy fina, no plástico y no adhesivo; suelto, grano simple. Raíces medias escasas; poros medios y gruesos comunes. Límite lineal, abrupto.
90-130 B ₃	Pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo y pardo rojizo (5YR 4/2) en húmedo; franco arcillo limosa a franca; ligeramente plástico y adhesivo; friable; estructura de bloques subangulares finos, moderados. Raíces medias escasas hasta 120 cm; poros finos y medios muy abundantes; no hay moteados.

Serie						
Mapocho	Profundidad (cm)	0-21	21-46	46-67	67-82	82-90
	Materia Orgánica (%)	3,3	0,9	0,5	0,3	0,2

Contenido de Materia Orgánica a distintas profundidades.

SERIE SANTIAGO, franco arenosa

Símbolo Cartográfico: STG

Caracterización General

La Serie Santiago es un miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esqueletal, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (Mollisol). Suelos de origen aluvial, ligeramente profundos que se presentan en una topografía plana, con o sin microrelieve, en una posición de un gran cono aluvial que se extiende por decenas de kilómetros en ambas márgenes del río Maipo. El horizonte Ap es de color pardo oscuro en el matiz 10YR ó 7.5YR; textura franco arenosa fina y estructura de bloques subangulares finos, débiles. El horizonte B es de color pardo oscuro en el matiz 7.5YR; textura franco arenosa y estructura de bloques subangulares finos, débiles. El horizonte C1 es de color pardo oscuro en el matiz 7.5YR y pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR; textura franco arenosa; estructura de bloques subangulares medios y gruesos, débiles. El horizonte C2 corresponde a un substrato de gravas y piedras con una matriz arenosa escasa (10 a 20%) donde penetran las raíces hasta los 100 cm aproximadamente.

Características Físicas y Morfológicas del Pedón

Profundidad (cm)

0-15 A _p	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arenosa fina; no plástico y ligeramente adhesivo; friable; estructura de bloques subangulares finos, débiles y 20% de granular fina, débil. Raíces finas y medias abundantes; poros finos y medios abundantes. Límite lineal, claro.
15-35 B	Pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo; franco arenosa; no plástico y ligeramente adhesivo; muy friable; estructura de bloques subangulares finos, débiles y algo de granular fina, débil. Raíces finas abundantes; poros finos y medios abundantes. Gravitas finas

aisladas de 1 a 2 cm de diámetro. Límite ondulado, abrupto.

35-70 IIC ₁	Pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo con 20 a 40% de pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) en húmedo; franco arenosa; no plástico y no adhesivo; muy friable; estructura de bloques subangulares medios y gruesos, débiles. Raíces finas y medias comunes; poros finos y medios abundantes. Con gravas medias y finas que representan entre 40 y 60% en volumen. Algunas piedras aisladas. Límite lineal, abrupto.
70-120 Y más IIC ₂	Substrato de gravas y piedras con 10 a 20% de matriz franco arenosa (7.5YR 4/4) en húmedo; suelto. Raíces penetran hasta 100 cm.

Serie				
Santiago	Profundidad (cm)	0-15	15-35	35-70
	Materia Orgánica (%)	3,3	1,2	0,9

Contenido de Materia Orgánica a distintas profundidades.

SERIE RUNGUE, arcillosa

Símbolo Cartográfico: RUG

Caracterización General

La Serie Rungue es un miembro de la Familia fina, mixta, térmica de los Vertic Haploxerolls (Mollisol). Suelos de origen aluvio coluvial, moderadamente profundos, en posición de plano ligeramente inclinado (piedmont), con un ligero microrelieve. El horizonte A es de color negro a pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR intergradando al 10YR; textura arcillosa; estructura de bloques angulares medios o gruesos, fuertes, existiendo una macro estructura de grandes bloques o cubos, producto de condiciones vérticas. El horizonte C1 es de color pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR intergradando hacia el matiz 10YR; textura arcillosa; estructura prismática fina fuerte, cerosidades de arcilla abundantes. El horizonte C2 es de color pardo rojizo oscuro; textura arcillosa; estructura maciza; cerosidades de arcilla comunes. El horizonte C3 es de color pardo oscuro a pardo rojizo oscuro intergradando entre matices 7.5YR y 5YR; textura arcillosa; estructura maciza. Existen gravas angulares finas y fragmentos de gravas en todo el pedón, ellas son finas y fluctúan de escasas a comunes.

Características Físicas y Morfológicas del Pedón

Profundidad (cm)

0-15 A ₁₁	Pardo rojizo oscuro (5YR 2/2) a negro (5YR 2/1 a 10YR 2/1) ambos en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; duro, muy firme; estructura de grandes bloques de 25 por 25 y 15 cm de
-------------------------	--

15-43 A ₁₂	profundidad, que se parten en bloques angulares medios o gruesos, fuertes. Raíces finas comunes principalmente por caras de agregados; poros finos muy abundantes. Gravilla abundante. Gravillas y fragmentos de gravas escasas. Límite lineal, abrupto. Pardo rojizo oscuro (5YR 2/2) a pardo muy oscuro (10YR 2/2) ambos en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; duro, muy firme; estructura de bloques angulares medios y gruesos, fuertes. Raíces finas comunes principalmente por caras de bloques; poros finos muy abundantes. Gravillas angulares finas y fragmentos de gravas abundantes. Límite lineal, gradual.
43-66 C ₁	Pardo rojizo oscuro (5YR 2.5/2) a pardo muy oscuro (10YR 2/2) ambos en húmedo; arcillosa; plástico y muy adhesivo; duro, muy firme; estructura prismática fina, fuerte. Raíces finas comunes; poros finos muy abundantes. Cerosidades de arcillas abundantes, continuas, gruesas. Gravillas angulares y fragmentos de gravas abundantes. Límite lineal, gradual.
66-98 C ₂	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/2), con 15% de pardo oscuro (7.5YR 3/2) ambos en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; duro, muy firme; estructura prismática fina, fuerte. Raíces finas escasas; poros finos muy abundantes. Cerosidades de arcillas abundantes, quebradas y continuas, moderadas. Gravillas y fragmentos de gravas abundantes. Límite lineal, claro.
98-120 y más C ₃	Pardo rojizo oscuro (5YR 3/2) a pardo oscuro (7.5YR 3/2) ambos en húmedo; arcillosa; plástico y adhesivo; muy firme; macizo. Raíces finas ocasionales, débiles; poros finos abundantes. Fragmentos de gravas frescas y meteorizadas, predominando las primeras.

Serie						
Rungue	Profundidad (cm)	0-15	15-43	43-66	66-98	98-120
	Materia Orgánica (%)	4,5	2,1	1,2	0,9	0,5

Contenido de Materia Orgánica a distintas profundidades.

SERIE BATUCO, arcillo limosa

Símbolo Cartográfico: BTC

Caracterización General

La Serie es un miembro de la Familia arcillosa sobre franca gruesa, calcárea, térmica de los Sodic Haploxererts (Vertisol). Suelo de origen lacustrino, estratificado, profundo, que presenta características vérticas en sus primeros horizontes; de textura superficial arcillo limosa y de color pardo en el matiz 10YR; en profundidad la textura es franco

arcillo arenosa, de color pardo amarillento oscuro en el matiz 10YR. Se presenta cementado por carbonato de calcio en profundidad.

Características Físicas y Morfológicas del Pedón

Profundidad (cm)

2-0	Acumulación de restos orgánicos y raíces de espesor variable.
0-5	Vario, dominante pardo grisáceo (10YR 3/4) en húmedo; franco
A ₁	arcillo limosa; muy plástico y muy adhesivo; extremadamente duro en seco, muy firme en húmedo; estructura laminar. Raíces finas abundantes; poros finos y medios comunes. Manchas de color negro (10YR 2/1) pequeñas, abundantes. Límite ondulado, abrupto.
5-24	Pardo (7.5YR 4/2) en seco, pardo oscuro (7.5YR 3/2) en húmedo;
C ₁	arcillo limosa; extremadamente duro en seco, muy firme en húmedo; estructura prismática gruesa, fuerte. Raíces finas y medias comunes; poros finos y medios comunes. Grava fina angular, escasa. Cerosidades en la cara de los agregados, continuos, delgados. Límite ondulado, claro.
24-51	Pardo a rojizo oscuro (7.5YR 3/2 a 5YR 3/2) en seco, pardo a
C ₂	pardo rojizo oscuro (7.5YR 3/2 a 5YR 3/3) en húmedo; arcillo limosa; muy plástico y muy adhesivo; muy firme en húmedo; macizo. Raíces finas comunes; poros finos y medios comunes. Grava fina escasa; acumulación de carbonato en la mitad inferior de la estrata. Slickensides abundantes. Límite lineal, difuso.
51-63	Pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo; franco limosa a
C ₃	franco arcillo limosa; muy plástico y adhesivo; firme en húmedo; estructura de bloques subangulares medios y finos, débiles. Raíces finas y medias escasas; poros finos y medios abundantes. Estrata que presenta características de fragipan en su mitad inferior y fragmentos de duripan. Límite ondulado, claro.
63-90	Pardo (10YR 3/3) en húmedo; arena media; no plástico y no
C _{4ca}	adhesivo; blando en seco, muy friable en húmedo; grano simple. Raíces finas escasas. Grava redondeada fina, abundante. Oxidaciones prominentes, abundantes. Concreciones de carbonato de calcio arriñonadas, hasta 3 cm, comunes. Estrata cementada por carbonato de calcio. Límite lineal, claro.
90-120	Pardo amarillento oscuro (10YR 3/4) en húmedo; arenosa; no
	plástico y no adhesivo; blando en seco, muy friable en húmedo; grano simple. Raíces finas presentes; poros gruesos y medios muy abundantes. Oxidaciones abundantes. Concreciones de carbonato de calcio arriñonadas, hasta 3 cm. Límite lineal, claro.

120-140

Pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; franco arcillo limosa; plástico y adhesivo; duro en seco, ligeramente firme en húmedo; macizo. Grava fina redondeada, escasa. Oxidaciones pequeñas, difusas, comunes. Concreciones de carbonato de calcio, de hasta 3 cm de diámetro, frecuentes.

Serie						
Batuco	Profundidad (cm)	0-5	5-24	24-51	51-63	63-90
	Materia Orgánica (%)	4,8	1,2	0,3	0,3	0,3

Contenido de Materia Orgánica a distintas profundidades.