



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**RELACIONES ENTRE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN PASTA  
SATURADA Y EN DISTINTAS SUSPENSIONES SUELO:AGUA. ZONA  
CENTRAL DE CHILE.**

**RELATIONSHIPS AMONG ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN SATURATED  
PASTE AND IN DIFFERENT SOIL:WATER SUSPENSIONS: CENTRAL ZONE  
OF CHILE**

Actividad Formativa Equivalente a Tesis para optar al grado de Magíster en Manejo de  
Suelos y Aguas

**JUAN ELMER BAUTISTA MAMANI**

Directores de Tesis  
MANUEL CASANOVA PINTO  
YASNA TAPIA FERNÁNDEZ

Profesores consejeros  
MARCO PFEIFFER JAKOB  
OSVALDO SALAZAR GUERRERO

SANTIAGO - CHILE  
2020

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

RELACIONES ENTRE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN PASTA SATURADA Y  
EN DISTINTAS SUSPENSIONES SUELO:AGUA. ZONA CENTRAL DE CHILE.

RELATIONSHIPS AMONG ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN SATURATED  
PASTE AND IN DIFFERENT SOIL:WATER SUSPENSIONS: CENTRAL ZONE OF  
CHILE

Actividad Formativa Equivalente a Tesis presentada como parte de los requisitos para  
optar al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

**JUAN ELMER BAUTISTA MAMANI**

Calificaciones

DIRECTOR DE TESIS/AFE

Manuel Casanova Pinto  
Ingeniero Agrónomo, MSc.

Yasna Tapia Fernández  
Ingeniero de Alimentos MSc Dra.

6,2

PROFESORES CONSEJEROS

Marco Pfeiffer Jakob  
Ingeniero Agrónomo, MSc, Ph.D.

5,1

Oswaldo Salazar Guerrero  
Ingeniero Agrónomo, MSc, Ph.D.

6,3

Santiago, Chile

2020

*A mis queridos padres  
Sabas Bautista y Gerarda Mamani  
que con amor y sabiduría supieron guiarnos.*

*A mi querida esposa Yanet Mirian  
a mis amados hijos  
Sabas Mario y Amaya Marcela  
que me brindan su amor y comprensión.*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer a mis directores, especialmente al profesor Manuel Casanova Pinto por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia de guiarme en el proceso de todo el desarrollo de cada una de las etapas de la AFE. Así también a la profesora Yasna Tapia Fernández por su amable apoyo brindado en el asesoramiento y la disposición del laboratorio de Química de Suelo y Agua, del cual quedo agradecido.*

*A mis profesores del Magister de Manejo de Suelos y Aguas, Manuel Casanova, Óscar Seguel, Julio Haberland, Marco Pfeiffer, Cristián Kremer y Rodrigo Fuster, quienes me brindaron el conocimiento académico y sus experiencias.*

*Al Programa Nacional de Beca y Crédito Educativo PRONABEC-PERÚ, programa que brindan la oportunidad de realizar estudios de Postgrado.*

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	3
Salinidad y salinización de suelos.....	3
Métodos de medición de la salinidad de los suelos.....	5
Conductividad eléctrica.....	7
OBJETIVOS .....	9
Objetivo general .....	9
Objetivos específicos .....	9
MATERIALES Y MÉTODO .....	10
Descripción del lugar .....	10
Muestreo y características físicas y químicas de los suelos .....	11
Procedimiento para la medición de la conductividad eléctrica.....	12
Análisis estadístico.....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
CONCLUSIONES .....	22
LITERATURA CITADA.....	23
APÉNDICE I.....	28
APÉNDICE II .....	29
APÉNDICE III .....	31
ANEXO I .....	35

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clases de salinidad de suelos, en base a conductividad eléctrica del extracto (CEe).....	4
Cuadro 2. Ubicación geográfica de los sitios de estudio. ....	11
Cuadro 3. Suspensiones suelo:agua para la determinación de la conductividad eléctrica del suelo en laboratorio y en campo ( <i>in situ</i> ). ....	13
Cuadro 4. Promedio y desviación estándar de algunas propiedades físicas de los suelos (0-20 cm, n= 5).....	15
Cuadro 5. Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) y de suspensiones suelo:agua, en siete suelos de la Región Metropolitana (n= 5), medidas en laboratorio e <i>in situ</i> .....	16
Cuadro 6. Valores de pH del extracto de saturación (pHe) y de suspensiones suelo:agua (pH <sub>x:x</sub> ), en siete suelos de la Región Metropolitana (n= 5).....	16
Cuadro 7. Modelos de regresión lineal paso a paso (stepwise) de conductividad eléctrica para todos los suelos de la zona estudiada (n= 35). ....	20
Cuadro 8. Modelos de regresión lineal paso a paso (stepwise) de conductividad eléctrica para todos los suelos de la zona estudiada, diferenciados en tres rangos texturales. ....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de del área de estudio y de los sitios de muestreo.....	10
Figura 2. Ejemplo de muestreo de suelo en una unidad cartográfica perteneciente a una de las Series de suelo consideradas. ....	12
Figura 3. Diagrama de flujo para la determinación de la conductividad eléctrica en pasta saturada (CEe, izquierda) y, como ejemplo, la determinación de la conductividad eléctrica en una relación volumétrica suelo:agua de 1:5 (CE <sub>1:5</sub> , derecha).	13
Figura 4. Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de saturación y la cantidad de partículas diferenciadas por tamaño.....	15
Figura 5. Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de saturación y la de suspensiones suelo:agua (base masa/volumen y volumen/volumen medida en laboratorio; y volumen/volumen, medida <i>in situ</i> ), en siete suelos de la Región Metropolitana (n= 5). ....	17
Figura 6. Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de saturación y de las suspensiones suelo:agua (base masa/volumen y volumen/volumen medida en laboratorio; y volumen/volumen, medida <i>in situ</i> ), diferenciada por rango de textura de suelos de la Región Metropolitana (n= 5). ....	19

## RESUMEN

Como alternativa a la medición de la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe), se midió la conductividad eléctrica (CE) en suspensiones, con 5 repeticiones y distintas relaciones suelo:agua, en siete suelos de Chile Central (cuatro Mollisoles, dos Vertisoles y un Entisol). Se evaluaron las relaciones entre la CEe y la CE en soluciones suelo:agua en base masa/volumen y volumen/volumen en laboratorio ( $CE_{1:1\text{ m/v}}$ ,  $CE_{1:2,5\text{ m/v}}$ ,  $CE_{1:5\text{ m/v}}$ ,  $CE_{1:1\text{ v/v}}$ ,  $CE_{1:2,5\text{ v/v}}$ ,  $CE_{1:5\text{ v/v}}$ ), así como también volumen/volumen en terreno o *in situ* ( $CE_{1:1\text{ v/v is}}$ ,  $CE_{1:2,5\text{ v/v is}}$ ,  $CE_{1:5\text{ v/v is}}$ ). Se evaluó también la relación entre las distintas CE medidas y algunas propiedades de los suelos (textura, pH, contenido de agua a saturación, a 33 y a 1500 kPa). Los resultados permiten estimar que para identificar suelos salinos en la zona de estudio ( $CEe > 4\text{ dS/m}$ ), se debería alcanzar (dS/m):  $CE_{1:1\text{ m/v}} > 2,35$ ;  $CE_{1:2,5\text{ m/v}} > 1,20$ ;  $CE_{1:5\text{ m/v}} > 0,72$ ;  $CE_{1:1\text{ v/v}} > 2,27$ ;  $CE_{1:2,5\text{ v/v}} > 1,28$ ;  $CE_{1:5\text{ v/v}} > 0,74$ ;  $CE_{1:1\text{ v/v is}} > 2,48$ ;  $CE_{1:2,5\text{ v/v is}} > 1,33$  y  $CE_{1:5\text{ v/v is}} > 0,74$ . Finalmente, de las variables seleccionadas por el análisis de regresión múltiple paso a paso, el limo es la que se repite en todos los modelos con signo negativo, seguido del pH de la suspensión suelo:agua (1:1<sub>m/v</sub>; 1:2,5<sub>m/v</sub> y 1:2,5<sub>v/v</sub>; 1:5<sub>v/v</sub>) y también con signo negativo. Indicando las variables regresoras que mejor explican los modelos.

**Palabras clave:** Salinidad de suelo, mediciones *in situ* y laboratorio, ecuaciones de regresión paso a paso.

## ABSTRACT

As an alternative to measuring the electrical conductivity of the saturated paste extract (ECe), the electrical conductivity (EC) in suspensions was measured, with three different soil:water ratios and 5 repetitions, in seven soils in Central Chile (four Mollisols, two Vertisols and one Entisol). The relationships between the ECe and the EC in soil:water solutions were evaluated on mass/volume and volume/volume basis at laboratory ( $EC_{1:1\ m/v}$ ,  $EC_{1:2.5\ m/v}$ ,  $EC_{1:5\ m/v}$ ,  $EC_{1:1\ v/v}$ ,  $EC_{1:2.5\ v/v}$ ,  $EC_{1:5\ v/v}$ ), as well as volume/volume in the field or in situ ( $EC_{1:1\ v/v\ is}$ ,  $EC_{1:2.5\ v/v\ is}$ ,  $EC_{1:5\ v/v\ is}$ ). The relationship between the different measured EC and some soil properties (texture, pH, water content at saturation, at 33, and at 1500 kPa) was also evaluated. The results allow estimating that to identify saline soils in the study area ( $ECe > 4\ dS/m$ ), the following should be reached (dS/m):  $EC_{1:1\ m/v} > 2.35$ ,  $EC_{1:2.5\ m/v} > 1.20$ ,  $CE_{1:5\ m/v} > 0.72$ ,  $CE_{1:1\ v/v} > 2.27$ ,  $CE_{1:2.5\ v/v} > 1.28$ ,  $CE_{1:5\ v/v} > 0.74$ ,  $CE_{1:1\ v/v\ is} > 2.48$ ,  $CE_{1:2.5\ v/v\ is} > 1.33$  and  $CE_{1:5\ v/v\ is} > 0.74$ . Finally, of the variables selected by the stepwise regression analysis, the silt is the most selected in all the models with a negative sign, followed by the pH of the soil:water suspension (1:1<sub>m/v</sub>; 1:2,5<sub>m/v</sub> and 1:2,5<sub>v/v</sub>; 1:5<sub>v/v</sub>) and also with a negative sign. Indicating the regressor variables that best explain the models.

**Key words:** soil salinity, *in situ* and laboratory measurements, stepwise regression equations.

## MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### Salinidad y salinización de suelos

La salinidad es la propiedad de los suelos que da cuenta de la presencia de sales en ellos y se refiere a la concentración total de sal en la solución del suelo (es decir, la fase líquida acuosa del suelo y sus solutos) que consiste en sales solubles y fácilmente disolubles, incluidas especies cargadas, solutos no iónicos y iones que se combinan para formar iones pareados (Corwin, 2003). Los principales elementos químicos catiónicos que originan salinidad en la solución del suelo son principalmente  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  en distintas combinaciones con  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ .

Las sales solubles son un rasgo natural del paisaje, estando presentes generalmente en pequeñas cantidades en todos los suelos, aguas y rocas. Además del contenido original de sal soluble en agua, los recursos suelo en las zonas áridas y semiáridas también se encuentran bajo la grave amenaza de la salinización secundaria. Siendo uno de los problemas ambientales más antiguos, la salinización ha sido considerada como una de las siete vías principales hacia la desertificación y un proceso importante de degradación de la tierra (Hardie y Doyle, 2012). Este proceso es principalmente el resultado del gran contraste de los factores del ciclo hidrológico (escasas precipitaciones y evaporación intensa), los niveles poco profundos de las aguas subterráneas y las actividades agrícolas irracionales, como las operaciones agrícolas extensivas y las obras de riego por inundación (Douaoui *et al.*, 2006; Ma *et al.*, 2018). En síntesis, si bien puede ser desarrollada naturalmente, la salinidad resulta de preocupación cuando se incrementa aceleradamente al ser inducida por el ser humano, adquiriendo una connotación de degradación no erosiva de carácter químico de los suelos.

Las principales fuentes de sales en el suelo es la meteorización geoquímica de las rocas de los estratos superiores de la Tierra, los depósitos atmosféricos y actividades antropogénicas como fuentes secundarias (Corwin y Yemoto, 2017). A menudo es causada por un manejo incorrecto de los recursos hídricos, y se ve agravada tanto por el cambio climático como por las sequías extremas (Vargas *et al.*, 2018). La acumulación excesiva de sales en los suelos o salinización es uno de los problemas más graves que enfrenta la agricultura en las regiones áridas y semiáridas del mundo (Qadir *et al.*, 2000).

Como un fenómeno multifactorial y complejo, puede desarrollarse de diferentes maneras en diferentes zonas y regiones. Se estima que unos 950 millones de hectáreas están sometidas a la salinización del suelo a escala mundial, y la zona afectada se está expandiendo a una velocidad de 2 millones de hectáreas por año (Abbas *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2019). En Chile, Pla (2021) informa que las zonas más afectadas por problemas de salinidad ocurren en las regiones semiáridas y áridas regadas, desde el Norte de Santiago hasta la frontera con Perú (aprox. 27.000 km<sup>2</sup>), con aguas que suelen ser de mala calidad (sales solubles, cloruros y boro y residuos tanto industriales como mineros).

Este proceso de acumulación de sales solubles en la solución suelo se caracteriza por la presencia de sales en exceso no solo en la superficie del suelo sino en la zona de raíces, afectando la productividad de los cultivos agrícolas, particularmente aquellos que son sensibles a este problema (Pisinaras *et al.*, 2010; Hardie y Doyle, 2012). Es especialmente de preocupación cuando el agua de drenaje no es suficiente para evitar que las aguas salinas asciendan en el perfil de suelo (Pitman y Lauchli, 2002).

La reducción de los rendimientos de los cultivos debido a la creciente salinidad es una amenaza para la agricultura en todo el mundo y requiere un seguimiento cuidadoso y decisiones de manejo de la tierra (Matthees *et al.*, 2017).

El grupo de suelos afectados por sales incluye a aquellos que contienen sales, o sus iones, solubles en por lo menos uno de sus horizontes y en cantidades que están por encima del umbral de toxicidad (concentración máxima permisible de sales que no suprime el crecimiento de las plantas). Incluye también suelos con cantidades excesivas de sodio intercambiable, siendo comunes en las regiones áridas y semiáridas, aunque no se limitan a ellas. No obstante, no hay unanimidad internacional en la clasificación de los suelos afectados por sales (SSS, 2014). La Base Referencial de Suelos (IUSS Working Group WRB 2015), diferencia a los suelos salinos de los sódicos como Solonchaks y Solonetz, respectivamente. Por otra parte, la Taxonomía de Suelos (USDA, 2014) incluye a ambos normalmente a nivel de Grandes Grupos que tienen horizontes subsuperficiales nátricos y/o salinos en Alfisoles, Aridisoles, Inceptisoles, Mollisoles y Vertisoles; además, se han clasificado en varios Subgrupos basados en la presencia, profundidad y naturaleza de duripanes (Chhabra, 2004).

Sin embargo, hay muchos factores que pueden afectar la respuesta de las plantas a la salinidad del suelo. Entre ellos figuran la especie y la edad de las plantas (hábito de enraizamiento), el contenido de agua del suelo, el anegamiento del suelo, el clima, la estructura del suelo y el estado de los nutrientes (Northcote y Skene, 1972). Por lo tanto, los suelos salinos se definen mejor como aquellos que contienen suficientes sales solubles para limitar el crecimiento de las especies no halófitas (Daubenmire, 1974) o afectar negativamente la infraestructura (Hardie y Doyle, 2012).

Independientemente del sistema de clasificación se definen distintas clases de salinidad (Cuadro 1). La unidad de medida internacional estándar para la conductividad eléctrica es el decisiemens por metro (dS/m) corregida a una temperatura de 25°C y medida en un extracto de saturación de una pasta de suelo.

**Cuadro 1. Clases de salinidad de suelos, en base a conductividad eléctrica del extracto (CEe).**

Clases de salinidad	CEe, (dS/m)	Efectos en rendimiento de plantas
No salino	< 2	Insignificantes
Muy ligeramente salino	2 a < 4	Restricciones en cultivos sensibles
Ligeramente salino	4 a < 8	Restricciones en muchos cultivos
Moderadamente salino	8 a < 16	Satisfactorios solo en cultivos tolerantes
Fuertemente salino	≥16	Satisfactorios solo en cultivos muy tolerantes

Al respecto, históricamente un valor de CEE > 4 dS/m implicaba clasificar al suelo como salino y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) era la principal medida de la sodicidad, pero este ha demostrado ser poco fiable en suelos que contienen minerales silicatados de sodio o grandes cantidades de NaCl. Por lo tanto, en general, se define a los suelos salinos como aquellos que tienen un contenido de sal >0,1% o una CEE >4 dS m<sup>-1</sup>, a los suelos sódicos como aquellos que tienen un RAS >13 y a los suelos salino-sódicos como poseedores de una CEE >4 dS m<sup>-1</sup> y una RAS >13 (SSM, 2017).

De acuerdo a Ullman (2013), dependiendo de la especie cultivada, hoy en día se denota como suelo salino a aquel cuya CEE es > 1,5 dS/m (cultivos sensibles), es > 3 dS/m (moderadamente sensibles), es > 6 dS/m (moderadamente tolerantes) y es > 10 dS/m (tolerantes).

Estos suelos son bastante complejos y variables en diferentes zonas agrícolas (Datta *et al.*, 2019). Se requiere una evaluación de estos suelos salinos para decidir las prácticas de manejo más apropiadas (Herrero *et al.*, 2015; Kargas *et al.*, 2018) y la manera de poder habilitarlos para la producción cuando sea factible.

La salinidad del suelo es un indicador de evaluación eficaz de la salinización del suelo y varía mucho en su dimensión temporal y espacial (Ding y Yu, 2014; Gorji *et al.*, 2015). Esto sugiere que sólo la vigilancia dinámica puede proporcionar una comprensión suficiente de la situación actual de salinización del suelo, de manera que sea posible una restauración efectiva del suelo y la recuperación de la tierra.

La mitigación y el control de la salinidad excesiva del suelo es uno de los principales desafíos en la agricultura del siglo XXI, particularmente donde se utiliza el riego. Superar este desafío requiere la cuantificación, inventario, mapeo y monitoreo eficientes y precisos de la salinidad del suelo (Pisinaras *et al.*, 2010).

A fin de vigilar los cambios en la extensión de las tierras afectadas por sales en el tiempo o de predecir el efecto de la salinidad del suelo en el crecimiento de las plantas o el rendimiento de los cultivos, es necesario medir la salinidad del suelo de manera fiable, repetible y rentable (SSS, 2014). De acuerdo con Khorsandi y Yazdi (2011), el monitoreo de la salinidad del suelo puede lograrse más efectivamente si es realizada por los propios agricultores, mediante métodos de fácil aplicación.

### **Métodos de medición de la salinidad de los suelos**

A nivel de laboratorio, la determinación de la salinidad del suelo implica tres enfoques diferentes: i) la medición de la masa de los sólidos disueltos totales (SDT) o sales solubles totales (SST), ii) la conductividad eléctrica (CE) de los extractos de agua del suelo, o iii) la proporción y composición de las especies salinas mediante espectrofotometría (Corwin y Yemoto, 2017).

*Sales solubles totales (SST)*: fue un término popular para expresar la salinidad del suelo, y todavía lo utilizan algunos laboratorios, con unidades en mg/L. La conductividad de una solución acuosa está directamente relacionada con la cantidad de sal presente en la solución, aunque la relación varía ligeramente según los tipos o especies de iones presentes. En general, la conductividad es ligeramente menor para los iones de mayor tamaño que para los iones de menor tamaño en las mismas concentraciones (sulfato tiene menos conductividad que el cloruro). La conversión también está influenciada por el peso atómico de los iones presentes en la solución salina, por lo que variará con el tipo de sales presentes (Sonon *et al.* 2012).

*Sólidos disueltos totales (SDT)*: se refiere a las sales, minerales, metales, cationes o aniones disueltos en un extracto de saturación del suelo, compuesto principalmente por sales inorgánicas que consisten en los principales cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ), los principales aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ ) y pequeñas cantidades de materia orgánica hidrosolubles. Estas sustancias inorgánicas y orgánicas se disuelven en el agua en forma molecular, ionizada o microgranular en suspensión. En general, la concentración de SDT es la suma de los cationes y aniones del agua, con unidades en  $\text{mg kg}^{-1}$ . Debido a que algunos coloides no se eliminan por filtración y la composición del residuo difiere del material disuelto inicialmente presente en el agua, la definición es operativa.

A nivel de campo, la salinidad del suelo se mide generalmente mediante mediciones geoespaciales de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa,  $\text{dS m}^{-1}$ ), que se calibran en función de la salinidad, porque la CEa es una medición rápida, fiable y fácil de tomar que se moviliza fácilmente (Corwin y Lesch, 2005). Su definición se indica más adelante.

*Sensores remotos (SR)*: es un método prometedor para la vigilancia y el trazado de mapas de diferentes propiedades del suelo en regiones remotas y cuestiones ambientales como la salinidad del suelo. En los dos últimos decenios, los SR han demostrado su capacidad para vigilar la salinidad del suelo a partir de las características de la superficie a diversas escalas (Allbed *et al.*, 2014; Kobayashi *et al.*, 2015; Ding y Yu, 2014).

A escalas intermedias (por ejemplo, columnas de lisímetro de suelo en parcelas, que van de 2 a  $200 \text{ m}^3$ ) se emplean extractores de solución de suelo, sensores de salinidad, sensores de capacitancia o reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR), reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), y combinaciones de CEa y extractos de solución de las muestras de suelo.

*Sensores de suelo basados en inducción electromagnética (IEM)*: otorgan una estimación común de la salinidad del suelo es la conductividad eléctrica aparente (CEa), utilizando un medidor portátil de inducción electromagnética (EM38 o EM31). Si bien la medición de la EM está fuertemente correlacionada con la salinidad, otros factores del suelo afectan a las lecturas (contenido de agua del suelo, contenido de arcilla, sodicidad y temperatura del suelo). El método tiene importantes limitaciones que impiden la posibilidad de realizar mediciones precisas en condiciones de sequedad o en suelos y materiales parentales con una composición de tamaño de partículas irregular.

## Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del suelo (CE), como variable de medición de la salinidad, se utiliza a menudo en la práctica para vigilar dinámicamente la salinización del suelo debido a su fuerte correlación con ella (Peng *et al.*, 2016). Se ha comprobado que los análisis tradicionales de CE son muy exactos, pero son lentos, discontinuos, costosos desde el punto de vista financiero y limitados en cuanto al espacio.

En particular, la CE es una medida de la cantidad de sales solubles de los suelos y considera aquellas sales más solubles que el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), aunque una pequeña cantidad de yeso disuelto puede también contribuir a la CE (SSM, 2017). La CE aparente del suelo, antes mencionada, es una medida de la conductividad global del suelo; es decir, una medida de cualquier material conductor dentro del volumen de medición y está influenciada, directa o indirectamente, por cualquier propiedad edáfica.

Una considerable confusión rodea la información de los valores de salinidad del suelo, así Hardie y Doyle (2012) proponen que se adopte la siguiente nomenclatura para informar sobre la salinidad del suelo. La determinación de la conductividad eléctrica por dilución suelo:agua 1:5 (por ejemplo) sin filtrar como  $\text{CE}_{1:5}$ , determinación por extractos de pasta saturada filtrados como  $\text{CE}_e$  y determinación por equivalente de pasta saturada en la que los valores de  $\text{CE}_{1:5}$  se multiplican por un coeficiente de textura (CT) como  $\text{CE}_{eq}$ .

La  $\text{CE}_e$ , se utiliza porque es la relación suelo:agua reproducible más baja para la que se puede extraer fácilmente del suelo suficiente extracto líquido con equipo de laboratorio común (bomba de vacío), pero también se utiliza porque esta relación suele relacionarse de manera previsible con el contenido de suelo:agua del campo (SSS, 2014). Numerosos autores (Datta *et al.*, 2019; He *et al.*, 2012; He *et al.*, 2015; Herrero *et al.*, 2015) indican que la  $\text{CE}_e$ , es el método estándar para las determinaciones de salinidad del suelo. Sin embargo, esta metodología involucra preparaciones de pastas saturadas, extracciones que requieren equipamiento, precisa de mucho tiempo y de habilidad para medir correctamente la salinidad del suelo (Hardie y Doyle, 2012); así entonces, es un método difícil y costoso para determinar la salinidad del suelo para una alta frecuencia de muestreo (Aboukila y Norton, 2017).

Por otra parte, debido a la relativa facilidad de los métodos de extracción suelo:agua, los resultados de CE pueden convertirse a valores equivalentes de  $\text{CE}_e$  mediante relaciones teóricas (Slavich y Petterson, 1993; Zhang *et al.*, 2005; Sonmez *et al.*, 2008; Khorsandi y Yazdi, 2011; He *et al.*, 2013; Monteleone *et al.*, 2016). Lamentablemente, la división de los solutos a través de las tres fases del suelo se ve influida por la relación suelo/agua a la que se realiza el extracto, por lo que es necesario normalizar la relación para obtener resultados que puedan aplicarse, interpretarse y compararse universalmente. Toda dilución por encima del contenido de agua del suelo introduce errores en la interpretación de los datos. Cuanto mayor sea la dilución, mayor será la desviación entre las relaciones iónicas de la muestra y la solución del suelo en condiciones de campo.

Las proporciones suelo: agua comúnmente utilizadas, aparte de la pasta de suelo saturado, son 1:1, 1:2,5 y 1:5, base masa/volumen (m/v). Estos extractos son más fáciles de preparar

que los extractos de pasta de saturación. Con excepción de los suelos arenosos, los suelos que contienen yeso y los suelos orgánicos, las concentraciones de sal y iones individuales se diluyen aproximadamente en la misma proporción entre las condiciones de campo y el extracto para todas las muestras, lo que permite conversiones entre los contenidos de agua utilizando factores de dilución. La conversión de CE de un extracto a otro se realiza comúnmente utilizando un simple factor de dilución. Por ejemplo, si el porcentaje de saturación gravimétrico ( $W_{sat}$ ) es del 100%, entonces  $CE_e = CE_{1:1} = 5 CE_{1:5}$ ; o si  $W_{sat} = 50\%$ , entonces  $CE_e = 2 CE_{1:1} = 10 CE_{1:5}$ . Sin embargo, esto no es recomendable, particularmente en suelos áridos y semiáridos, debido a las potenciales reacciones de disolución-precipitación que pueden ocurrir. En el mejor de los casos, el uso de un factor de dilución para convertir de un extracto a otro es una aproximación.

La medición de la CE en soluciones de relación suelo:agua (m/v) de 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), 1:2,5 ( $CE_{1:2,5}$ ) y 1:5 ( $CE_{1:5}$ ) es empleada con frecuencia para estimar la salinidad del suelo en varios países (Rayment y Lyons, 2010; Shirokova *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2011), resultando relativamente fácil de realizar (Matthees *et al.*, 2017; Sonmez *et al.*, 2008; He *et al.*, 2015), pero además permite ahorrar tiempo y dinero (Khorsandi y Yazdi 2011). Chi y Wang (2009), caracterizando suelos salinos en llanuras, indican factores de conversión entre  $CE_e$  y  $CE_{1:5}$ , los que aumentan en la medida que la textura del suelo varía de fina a media. La misma tendencia fue reportada tanto por Slavich y Petterson (1993) para  $CE_{1:5}$ , y por Sonmez *et al.* (2008) para  $CE_{1:1}$  y  $CE_{1:2,5}$ .

Modelos de regresión lineal entre la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada ( $CE_e$ ) y las conductividades eléctricas en relación suelo:agua ( $CE_{1:1}$ ,  $CE_{1:2,5}$  y  $CE_{1:5}$ ) masa/volumen reportan coeficientes de determinación altamente lineales con valores de:  $R^2 = 0,85$  a  $0,96$  para  $CE_{1:1}$  (Zhang *et al.*, 2005; Matthees *et al.*, 2017),  $R^2 = 0,92$  a  $0,98$  para  $CE_{1:2,5}$  (Aboukila y Norton, 2017; Sonmez *et al.*, 2008), y valores de  $R^2 = 0,93$  a  $0,98$  para  $CE_{1:5}$  (Kargas *et al.*, 2018; Sonmez *et al.*, 2008), lo que sugiere que los modelos desarrollados pueden predecir la salinidad de manera confiable en los suelos.

La medición de conductividad eléctrica de relación suelo:agua volumen/volumen ha sido poco investigada. Tapia *et al.* (2016), reportan el uso de la relación volumen/volumen para la determinación de  $CE_{1:5}$ , en zonas áridas del norte de Chile. Sin embargo, esta metodología no está estandarizada y su implementación permitiría a un agricultor en condiciones de campo, disponer de un resultado en forma fácil y aun en menor tiempo que la conductividad eléctrica obtenida de la relación masa/volumen obtenida en laboratorio.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Relacionar la conductividad eléctrica determinada en el extracto de pasta saturada (CEe) con la conductividad eléctrica medida en soluciones suelo:agua, para suelos con diferentes clases texturales.

### **Objetivos específicos**

Relacionar la conductividad eléctrica determinada en el extracto de pasta saturada (CEe) con la conductividad eléctrica medida en soluciones suelo:agua 1:1 (CE<sub>1:1</sub>), 1:2,5 (CE<sub>1:2,5</sub>) y 1:5 (CE<sub>1:5</sub>) en base masa/volumen, a nivel de laboratorio.

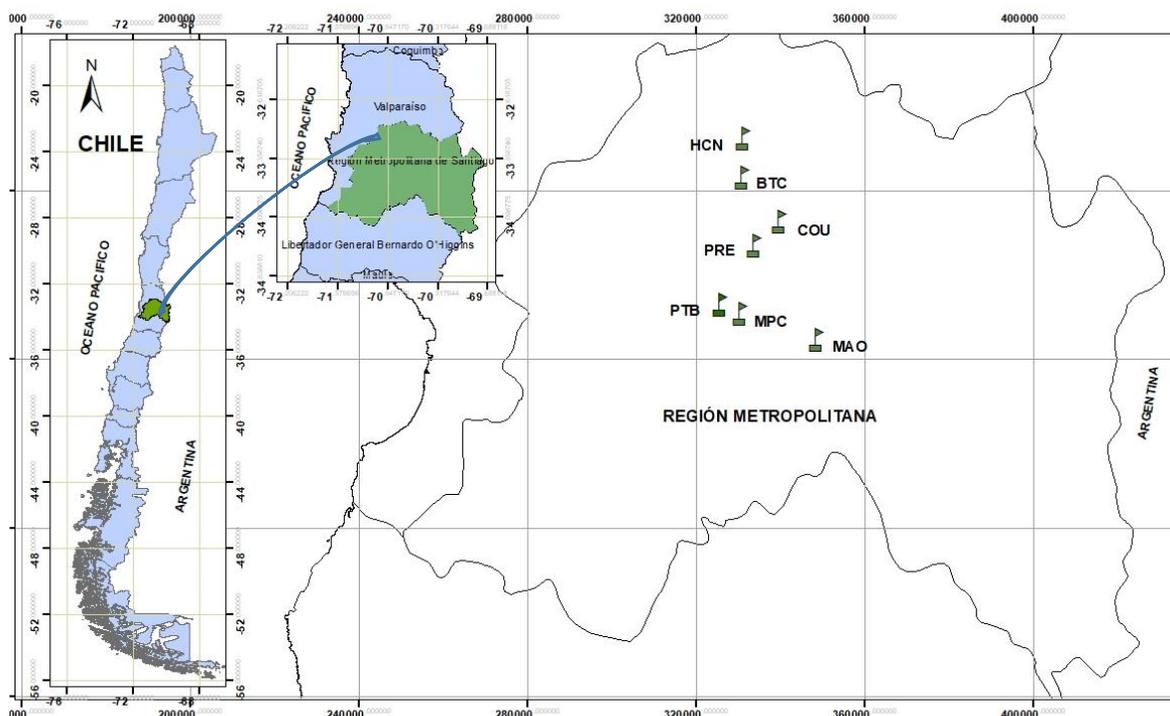
Relacionar la conductividad eléctrica determinada en el extracto de pasta saturada (CEe) con la conductividad eléctrica medida en soluciones suelo:agua 1:1 (CE<sub>1:1</sub>), 1:2,5 (CE<sub>1:2,5</sub>) y 1:5 (CE<sub>1:5</sub>) en base volumen/volumen, a nivel de laboratorio y campo.

Relacionar los valores de conductividad eléctrica determinados con distintos métodos y las propiedades de los suelos.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Descripción del lugar

El estudio se realizó en las localidades de Batuco, Lampa, Maipú y La Pintana en la Región Metropolitana (Figura 1). Se llevó a cabo entre los meses de octubre 2019 y enero de 2020. Geográficamente los sitios de estudio se ubican (Cuadro 2), en fases de las Series de suelos: Batuco, Cotuba, Peralillo, Maipo, Mapocho, Cuesta Barriga y Huechún (Anexo I). Los análisis de suelo se realizaron en los laboratorios de Física de Suelos y Química de Suelo y Agua, pertenecientes al Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.



**Figura 1.** Localización de del área de estudio y de los sitios de muestreo.

Climáticamente el área de estudio se encuentra dentro del Distrito 13-2: Santiago, con un clima templado cálido supratermal, caracterizado por un régimen de humedad semiárido (Csb2Sa). La temperatura varía entre un máximo de enero de 30 °C y un mínimo de julio de 4 °C. La precipitación media anual es de 371 mm y la ETP anual de 1474 mm (Santibáñez *et al.*, 2017).

**Cuadro 2.** Ubicación geográfica de los sitios de estudio.

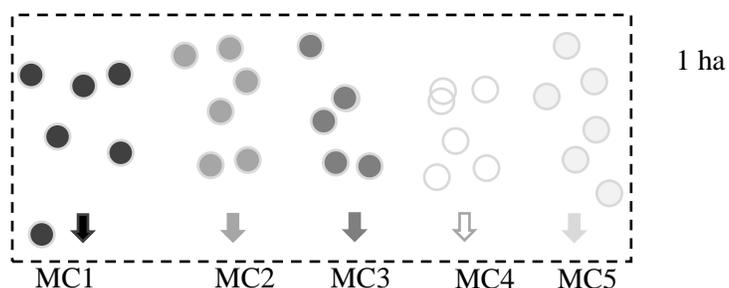
Nombre de la Serie de suelo	Identificación de sitios	Coordenadas (UTM)	
		Norte	Este
Batuco	BTC	6323272,19	330877,90
Cotuba	COU	6323272,19	339761,66
Peralillo	PRE	6307082,01	333668,76
Maipo	MAO	6284732,19	348571,80
Mapocho	MPC	6290922,70	330367,91
Cuesta Barriga	PTB	6293018,92	325691,68
Huechún	HCN	6332460,37	330988,87

En cada sitio se tomaron muestras para caracterizar en términos generales sus propiedades físicas y químicas. La textura se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucos, la densidad aparente con cilindros y el contenido de agua retenido a 33 (W<sub>33</sub>) y 1500 kPa (W<sub>1500</sub>) con dispositivos de presión (Sandoval *et al.*, 2011), así como también el contenido gravimétrico de agua de la pasta de saturación (W<sub>sat</sub>). En términos químicos se determinó a cada extracto y suspensión suelo:agua el pH potenciométricamente. El contenido de materia orgánica por oxidación con dicromato (Sadzawka *et al.*, 2006), no alcanzó a realizarse, aunque los valores informados por CIREN (1996) fluctúan entre 0,7% para Cotuba y 7,4% para Peralillo.

### Muestreo y características físico y químicas de los suelos

Las muestras de suelo utilizadas en este estudio fueron recolectadas de suelos con diferente clase textural, de acuerdo a las descripciones y analíticas indicadas por CIREN (1996).

Los puntos de muestreo se tomaron en forma aleatoria en una fase de las Series de suelos establecidas para el estudio, en sitios con una extensión de una hectárea. Se tomaron muestras a 0 - 20 cm de profundidad en 5 puntos que mezcladas constituyeron una muestra compuesta (MC) de 3 kg, lo que se repitió en 5 sectores de cada sitio (Figura 2).



**Figura 2.** Ejemplo de muestreo de suelo en una unidad cartográfica perteneciente a una de las Series de suelo consideradas.

### Procedimiento para la medición de la conductividad eléctrica

Los análisis de CE se realizaron con cinco repeticiones en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas. La CE se evaluó mediante el extracto de pasta saturada, en extracto y suspensiones de soluciones suelo:agua (1:1, 1:2,5 y 1:5), masa/volumen para laboratorio, y volumen/volumen para terreno (*in situ*) y laboratorio, pero sin tamizar ni filtrar; y complementariamente se midió el contenido inicial de agua en la muestra de suelo (laboratorio), cuyos resultados se despreciaron puesto que las muestras de suelo recolectadas se encontraron secas al aire por las condiciones ambientales de los sitios de muestreo.

**Extracto de pasta saturada.** La CE de cada muestra se determinó siguiendo a Sadzawka *et al.* (2006), preparando una pasta saturada de suelo con agua destilada que se filtra al vacío usando papel Whatman N°42; luego, en el extracto obtenido, mediante un conductivímetro de mesa se determina la CEe.

La preparación de la pasta saturada se realizó siguiendo los criterios para el punto de saturación los cuales son: a) Cuando se golpea al vaso contra el mesón no debe acumular agua en la superficie, b) La pasta brilla por reflejo de la luz, c) la pasta fluye lentamente cuando el vaso se inclina, d) la pasta se desliza libre y limpiamente de la cápsula (a excepción de suelos con alto contenido de arcilla)

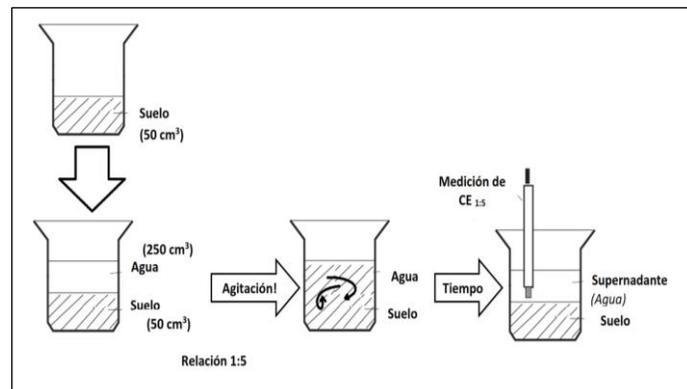
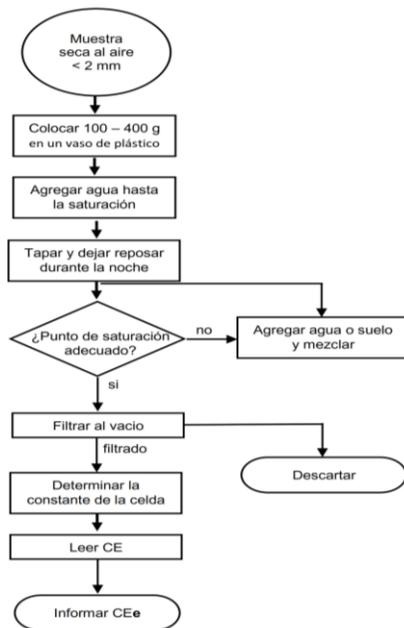
**Soluciones suelo:agua.** Las relaciones de suelo:agua empleadas, corresponden a las sugeridas por Soemez *et al.* (2008) y fueron preparadas tanto en base a masa/volumen como volumen/volumen (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Suspensiones suelo:agua para la determinación de la conductividad eléctrica del suelo en laboratorio y en campo (*in situ*).

Relación suelo: agua	Masa de suelo	Volumen de agua	Denominación	Determinación
	g	mL		
1:1	75	75	CE <sub>1:1 m/v</sub>	Laboratorio
1:2,5	30	75	CE <sub>1:2,5 m/v</sub>	
1:5	15	75	CE <sub>1:5 m/v</sub>	
	Volumen de suelo	Volumen de agua		
	mL			
1:1	125	125	CE <sub>1:1 v/v</sub>	Laboratorio
1:2,5	50	125	CE <sub>1:2,5 v/v</sub>	
1:5	50	250	CE <sub>1:5 v/v</sub>	
	Volumen de suelo	Volumen de agua		
	mL			
1:1	125	125	CE <sub>1:1 v/v is</sub>	<i>in situ</i>
1:2,5	50	125	CE <sub>1:2,5 v/v is</sub>	
1:5	50	250	CE <sub>1:5 v/v is</sub>	

CE<sub>1.1m/v</sub>, conductividad eléctrica en suspensión suelo:agua, masa/volumen; CE<sub>1.5v/v</sub>, conductividad eléctrica en suspensión suelo:agua, volumen/volumen.

En laboratorio, los vasos conteniendo las suspensiones se agitaron con bagueta 4 veces a intervalos de 30 minutos (Rhoades, 1982; Soemez *et al.*, 2008), para posteriormente medir la CE en las soluciones obtenidas por filtrado con papel Whatman N° 42 (CE<sub>1:1 m/v</sub>, CE<sub>1:2,5 m/v</sub> y CE<sub>1:5 m/v</sub>). En los vasos de medición *in situ* (CE<sub>1:1 v/v is</sub>, CE<sub>1:2,5 v/v is</sub> y CE<sub>1:5 v/v is</sub>) se midió en el supernadante luego de agitar por 5 minutos (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama de flujo para la determinación de la conductividad eléctrica en pasta saturada (CEe, izquierda) y, como ejemplo, la determinación de la conductividad eléctrica en una relación volumétrica suelo:agua de 1:5 (CE<sub>1:5</sub>, derecha).

## Instrumentos

En laboratorio se empleó un conductivímetro de mesa, marca HANNA modelo HI4321, en tanto que en campo (*in situ*) se empleó un conductivímetro portátil, marca HANNA modelo HI98130. El pHmetro de mesa utilizado fue de marca HANNA HI 3221.

## Análisis estadístico

El análisis estadístico para la evaluación de los métodos de medición de la conductividad eléctrica se realizó mediante análisis de correlación de Pearson entre todas las variables medidas, con valores  $p$  de 0,05 y/o 0,01.

Se definieron modelos de regresión lineal múltiple paso a paso (stepwise), empleando como variable dependiente la CEE o la  $CE_{x:x}$ , y como variables regresoras el contenido de partículas inferiores a 2 mm (arcilla, limo y arena), pH,  $W_{sat}$ ,  $W_{33}$  y  $W_{1500}$ . La ecuación del modelo de regresión lineal múltiple fue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$$

donde

$Y_i$  =  $i$ -ésima observación de la variable dependiente Y.

$x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$  =  $i$ -ésimo valor de las variables regresoras  $X_1, X_2, \dots, X_k$  o independientes.

$\beta_0$  = parámetro desconocido que representa la ordenada al origen de la recta (indica el valor esperado de Y cuando  $x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_k = 0$ )

$\beta_1, \dots, \beta_k$  = parámetros desconocidos que representan las tasas de cambio en Y frente al cambio unitario de  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , respectivamente.

$\varepsilon_i$  = término de error aleatorio.

Los rendimientos del modelo se evaluaron mediante estadísticos de asociación, como el coeficiente de determinación ( $R^2$  aj.). Además, se emplearon estadísticos basados en diferencias como el error cuadrático medio (ECM).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización general de los suelos

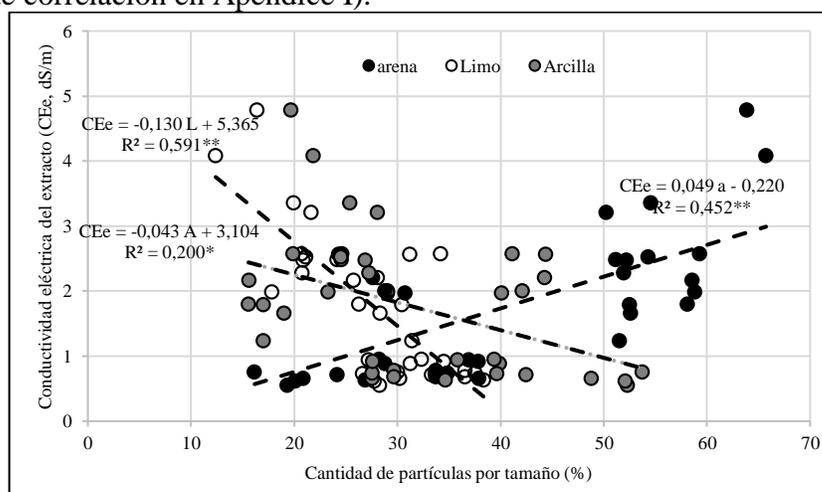
El Cuadro 4 incluye propiedades físicas generales de los suelos muestreados. Se agrupan en dos categorías texturales, arcillosos (textura fina) y francosos (textura moderadamente fina).

**Cuadro 4.** Promedio y desviación estándar de algunas propiedades físicas de los suelos (0-20 cm, n= 5).

Variable	Unidad	Suelos arcillosos			Suelo francosos			
		HCN	MPC	PRE	MAO	COU	BTC	PTB
A	%	49,91±4,53	42,43±1,88	37,90±2,44	28,43±1,13	26,27±1,61	22,05±2,40	16,86±1,41
L	%	29,94±2,18	30,34±2,45	31,17±4,73	35,94±1,36	21,74±1,41	17,47±3,32	28,45±2,48
a	%	20,15±2,89	27,23±2,74	30,92±4,23	35,63±2,11	51,98±1,50	60,48±4,41	54,69±3,39
Dac	Mg m <sup>-3</sup>	1,35±0,10	1,19±0,02	1,55±0,10	1,26±0,06	1,00±0,08	1,58±0,06	1,15±0,05
W <sub>33</sub>	%	37,08±9,67	26,60±0,77	23,28±1,39	19,92±2,01	45,47±6,87	22,59±2,23	22,59±1,75
W <sub>1500</sub>	%	26,16±0,95	21,74±1,53	15,23±2,41	13,19±1,53	27,96±3,05	14,43±2,60	13,73±1,05
W <sub>sat</sub>	%	65,72±1,15	59,48±1,44	51,46±4,41	46,79±2,34	75,05±2,45	48,08±4,85	61,69±2,12

A, arcilla; L, limo; a, arena; Dac: densidad aparente (cilindro); W<sub>33</sub>, W<sub>1500</sub> y W<sub>sat</sub>, contenido gravimétrico de agua a 33 kPa, 1500 kPa y a saturación, respectivamente.

Las relaciones más estrechas de propiedades de suelo con la conductividad eléctrica medida en extracto de saturación (CEe) quedan definidas por altos coeficientes de correlación de Pearson con la distribución de partículas por tamaño (Figura 4); principalmente significativos y negativos para arcilla y limo ( $p < 0,01$ ) y en menor grado ( $p < 0,05$ ) pero positivo para arena (ver matriz de correlación en Apéndice I).



**Figura 4.** Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de saturación y la cantidad de partículas diferenciadas por tamaño.

En el caso de la conductividad eléctrica medida en suspensiones suelo:agua ( $CE_{x:x}$ ), estas relaciones son claras solo para limo y arena, pero solo para algunas de ellas con arcilla (ver Apéndice I). La arcilla no muestra correlación significativa con  $CE_{1:1}$ , y solo con  $p < 0,05$  en otras suspensiones; en tanto, limo y arena se correlacionan más significativamente ( $p < 0,01$ ) con la CE.

El contenido gravimétrico de agua a saturación ( $W_{sat}$ ) no se correlaciona con CEE, pero si directamente con todas las suspensiones suelo:agua 1:1 ( $p < 0,05$ ), así como con las  $CE_{1:2,5m/v}$  y  $CE_{1:5m/v}$  ( $p < 0,01$ ). Por otra parte, el contenido volumétrico de agua a saturación ( $\theta_{sat}$ ) tampoco correlaciona con CEE, si con el contenido de arcilla ( $p < 0,05$ ) y claramente ( $p < 0,01$ ) con el pH de todas las suspensiones en base masa/volumen.

En el Cuadro 5 se indican la CEE y la  $CE_{x:x}$ , tanto en base a masa/volumen y volumen/volumen a nivel de laboratorio como medida en terreno (*in situ*) en base a volumen/volumen. De acuerdo al Apéndice I, existe una significativa ( $p < 0,01$ ) y positiva correlación entre CEE y  $CE_{xx}$  ( $r = 0,81$  a  $0,92$ ), así como entre las distintas  $CE_{x:x}$  ( $r = 0,83$  a  $0,99$ ).

**Cuadro 5.** Conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEE) y de suspensiones suelo:agua, en siete suelos de la Región Metropolitana ( $n = 5$ ), medidas en laboratorio e *in situ*.

Suelo	Laboratorio						<i>in situ</i> (campo)			
	CEE	$CE_{1:1 m/v}$	$CE_{1:2,5 m/v}$	$CE_{1:5 m/v}$	$CE_{1:1 v/v}$	$CE_{1:2,5 v/v}$	$CE_{1:5 v/v}$	$CE_{1:1 v/v is}$	$CE_{1:2,5 v/v is}$	$CE_{1:5 v/v is}$
	$dS m^{-1}$									
HCN	0,66±0,08	0,45±0,04	0,32±0,02	0,23±0,01	0,77±0,03	0,32±0,04	0,19±0,01	0,92±0,03	0,29±0,03	0,19±0,02
MPC	2,26±0,29	1,67±0,34	0,53±0,08	0,33±0,06	1,12±0,14	0,56±0,10	0,30±0,06	1,18±0,15	0,60±0,11	0,32±0,06
PRE	0,83±0,14	0,49±0,08	0,28±0,04	0,19±0,03	0,53±0,07	0,30±0,04	0,19±0,02	0,64±0,12	0,30±0,05	0,17±0,03
MAO	0,75±0,10	0,26±0,03	0,18±0,03	0,13±0,02	0,26±0,04	0,17±0,02	0,11±0,01	0,28±0,04	0,19±0,02	0,12±0,01
COU	2,60±0,35	1,71±0,19	1,04±0,10	0,59±0,06	1,76±0,24	1,00±0,10	0,57±0,08	1,95±0,12	1,06±0,112	0,57±0,07
BTC	3,36±1,12	1,48±0,47	0,74±0,17	0,45±0,08	1,63±0,60	0,99±0,39	0,54±0,17	1,73±0,48	1,04±0,35	0,58±0,19
PTB	1,73±0,33	0,84±0,19	0,46±0,09	0,29±0,06	0,68±0,19	0,43±0,08	0,30±0,06	0,69±0,13	0,40±0,10	0,25±0,06

(ver Cuadro 3 para las siglas)

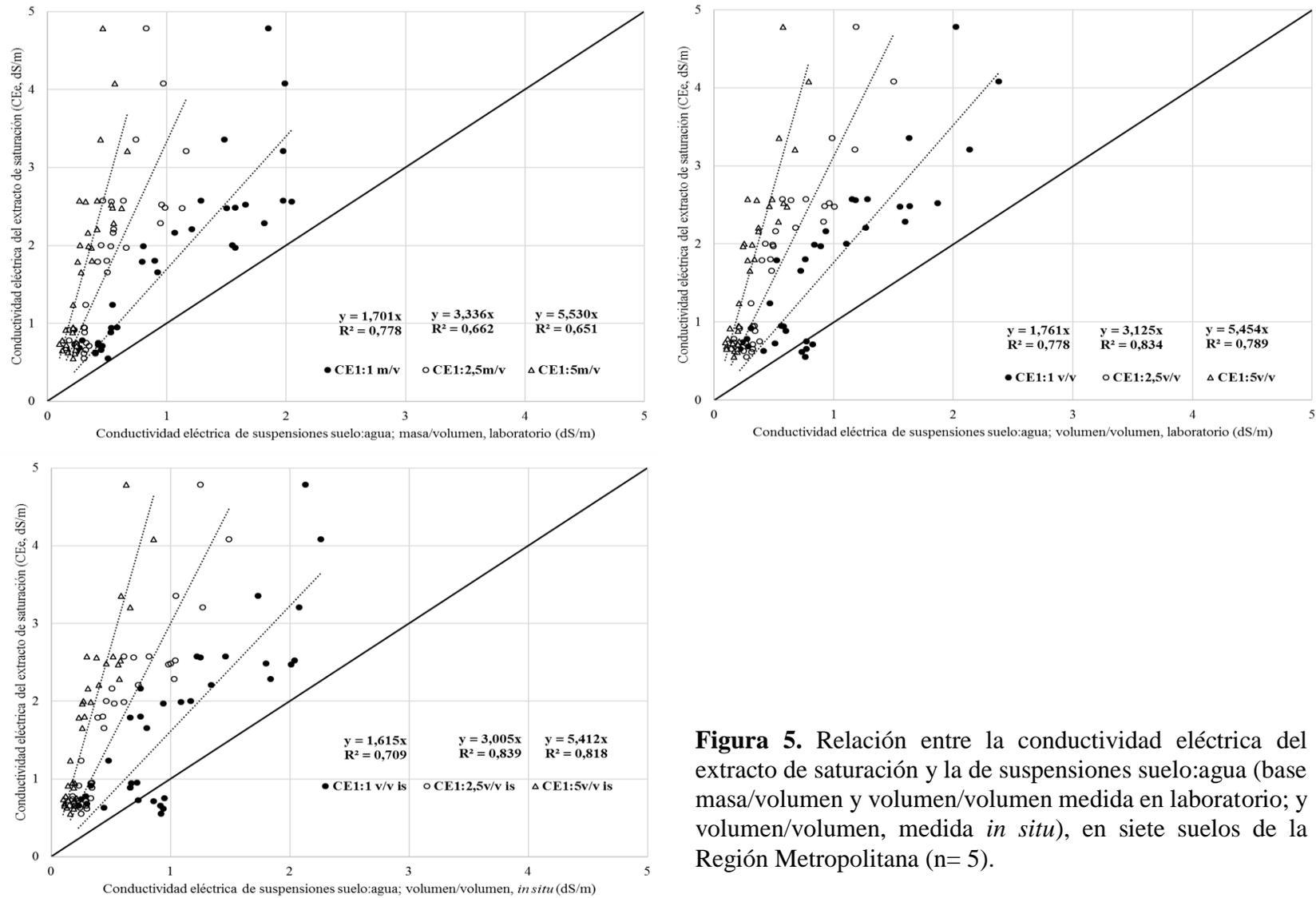
El Cuadro 6 en tanto incluye los valores de pH medidos en el extracto de la pasta saturada (pHe) así como en las distintas suspensiones suelo:agua ( $pH_{x:x}$ ), con las que correlaciona también positiva ( $r = 0,58$  a  $0,84$ ) y significativamente ( $p < 0,01$ ). Entre estos últimos pH, se advierte también elevada, positiva ( $r = 0,74$  a  $0,99$ ) y significativa ( $p < 0,01$ ) correlación.

**Cuadro 6.** Valores de pH del extracto de saturación (pHe) y de suspensiones suelo:agua ( $pH_{x:x}$ ), en siete suelos de la Región Metropolitana ( $n = 5$ ).

Suelos	pHe	$pH_{1:1 m/v}$	$pH_{1:2,5 m/v}$	$pH_{1:5 m/v}$	$pH_{1:1 v/v}$	$pH_{1:2,5 v/v}$	$pH_{1:5 v/v}$
HCN	8,55±0,23	8,27±0,15	8,29±0,14	8,41±0,21	7,83±0,17	8,20±0,21	8,52±0,33
MPC	8,01±0,05	6,62±0,07	6,65±0,14	6,63±0,08	6,22±0,26	6,24±0,12	6,36±0,11
PRE	8,29±0,07	7,89±0,17	7,98±0,09	8,00±0,07	7,47±0,17	7,73±0,12	7,88±0,10
MAO	8,44±0,06	7,24±0,16	7,18±0,17	7,14±0,16	7,79±0,20	7,99±0,14	8,12±0,16
COU	8,22±0,11	7,58±0,02	7,55±0,03	7,67±0,05	6,85±0,17	7,08±0,18	7,37±0,24
BTC	8,33±0,22	7,78±0,30	7,84±0,36	7,82±0,27	7,73±0,48	8,01±0,55	8,11±0,57
PTB	7,33±0,14	6,88±0,20	7,04±0,19	6,99±0,11	6,16±0,15	6,32±0,17	6,43±0,15

(ver Cuadro 3 para las siglas)

Al relacionar la CEE con las  $CE_{x:x}$ , observan valores de pendiente más altas cuando hay más dilución ( $CE_{1:5}$ ), mientras que el valor de pendiente baja se atribuye a una menor dilución ( $CE_{1:1}$ ), obedeciendo a la una mayor concentración de sales solubles para  $CE_{1:1}$ , en comparación con las mayores diluciones ( $CE_{1:2,5}$  y  $CE_{1:5}$ ).



**Figura 5.** Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de saturación y la de suspensiones suelo:agua (base masa/volumen y volumen/volumen medida en laboratorio; y volumen/volumen, medida *in situ*), en siete suelos de la Región Metropolitana (n= 5).

Considerando los 7 suelos analizados (n= 35), se tiene entonces que para identificar suelos salinos en la zona de estudio ( $CE_e > 4$  dS/m), se debería medir (dS/m) una:

$$\begin{array}{lll} CE_{1:1m/v} > 2,35, & CE_{1:2,5m/v} > 1,20 & y & CE_{1:5m/v} > 0,72 \\ CE_{1:1v/v} > 2,27, & CE_{1:2,5v/v} > 1,28 & y & CE_{1:5v/v} > 0,74 \\ CE_{1:1v/v\ is} > 2,48, & CE_{1:2,5v/v\ is} > 1,33 & y & CE_{1:5v/v\ is} > 0,74 \end{array}$$

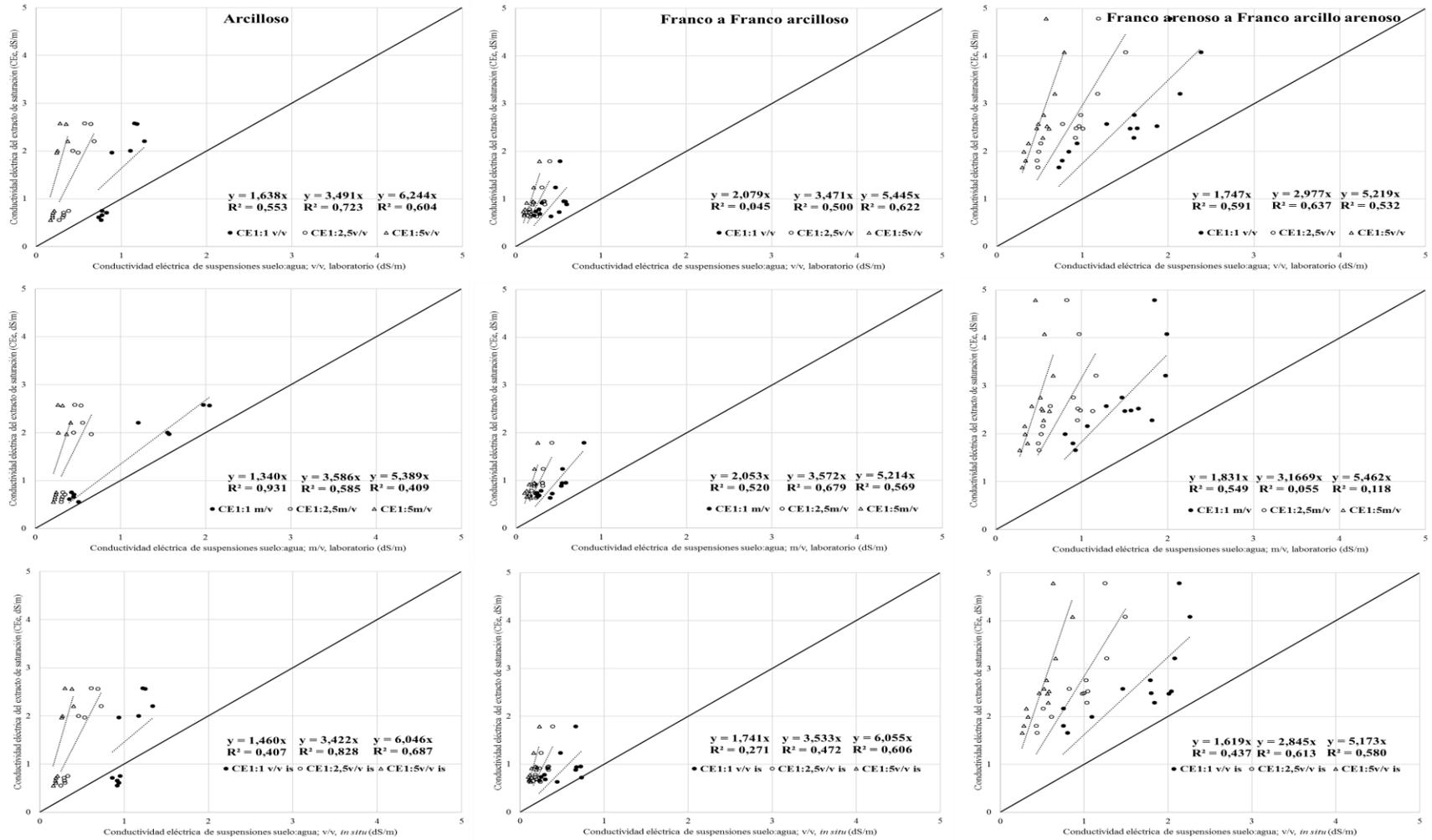
Diferenciando los suelos en tres rangos de textura, se aprecian las mismas tendencias que para todos los suelos (Figura 6) y valores similares a los informados por Sonmez *et al.* (2008). Sin embargo, hay mayor significancia en las regresiones de CE medidas en el rango de texturas finas y gruesas. Se tiene también que, para identificar suelos salinos ( $CE_e > 4$  dS/m) en la zona estudiada, se debería medir (dS/m):

-para suelos de textura fina (arcillosos)

$$\begin{array}{lll} CE_{1:1m/v} > 2,98, & CE_{1:2,5m/v} > 1,11 & y & CE_{1:5m/v} > 0,74 \\ CE_{1:1v/v} > 2,44, & CE_{1:2,5v/v} > 1,14 & y & CE_{1:5v/v} > 0,64 \\ CE_{1:1v/v\ is} > 2,74, & CE_{1:2,5v/v\ is} > 1,17 & y & CE_{1:5v/v\ is} > 0,66 \end{array}$$

-para suelos de textura gruesa (franco arenoso a franco arcillo arenosos)

$$\begin{array}{lll} CE_{1:1m/v} > 2,18, & CE_{1:2,5m/v} > 1,26 & y & CE_{1:5m/v} > 0,73 \\ CE_{1:1v/v} > 2,30, & CE_{1:2,5v/v} > 1,34 & y & CE_{1:5v/v} > 0,77 \\ CE_{1:1v/v\ is} > 2,47, & CE_{1:2,5v/v\ is} > 1,41 & y & CE_{1:5v/v\ is} > 0,77 \end{array}$$



**Figura 6.** Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de saturación y de las suspensiones suelo:agua (base masa/volumen y volumen/volumen medida en laboratorio; y volumen/volumen, medida *in situ*), diferenciada por rango de textura de suelos de la Región Metropolitana (n= 5).

## Conductividad eléctrica y las propiedades de los suelos.

La conductividad eléctrica es una de las propiedades del suelo, que está asociada con la naturaleza de la composición del suelo (distribución del tamaño de las partículas, mineralogía), la estructura (porosidad, distribución del tamaño de los poros, conectividad), el contenido de agua y la temperatura.

En el Cuadro 7, considerando los 7 suelos estudiados, se aprecia que el limo (0,05 a 0,002 mm) es la variable regresora que se repite en todos los modelos de regresión con signo negativo. La segunda variable que más retiene el procedimiento de stepwise es el pH de la suspensión suelo:agua y también con signo negativo; finalmente, aparece el contenido volumétrico de agua a saturación ( $\theta_{sat}$ ) en dos modelos y el contenido de arcilla (A) solo en uno con signo positivo.

**Cuadro 7.** Modelos de regresión lineal paso a paso (stepwise) de conductividad eléctrica para todos los suelos de la zona estudiada (n= 35).

<i>Modelos generales</i>	R <sup>2</sup> Aj	ECM
CEe = 8,04-0,14(L)-3,16( $\theta_{sat}$ )	0,66	0,40
CE <sub>1:1m/v</sub> = 7,66-0,08(L)-0,65(pH <sub>1:1m/v</sub> ) + 0,02(A)	0,69	0,13
CE <sub>1:2,5m/v</sub> = 2,49-0,05(L)-0,12(pH <sub>1:2,5m/v</sub> )	0,66	0,03
CE <sub>1:5m/v</sub> = 0,87-0,02(L)	0,65	0,01
CE <sub>1:1 v/v</sub> = 3,06-0,07(L)	0,67	0,11
CE <sub>1:2,5v/v</sub> = 2,42-0,05(L)-0,08(pH <sub>1:2,5v/v</sub> )	0,73	0,03
CE <sub>1:5v/v</sub> = 1,35-0,02(L)-0,04(pH <sub>1:5v/v</sub> )	0,78	0,01
CE <sub>1:1v/v is</sub> = 3,83-0,08(L)+ 4,24( $\theta_{1500}$ )-2,14( $\theta_{sat}$ )	0,78	0,08
CE <sub>1:2,5v/v is</sub> = 1,91-0,05(L)	0,71	0,04
CE <sub>1:5v/v is</sub> = 1,05-0,03(L)	0,74	0,01

(Detalles en Apéndice II y siglas en Cuadro 3)

Como una medida de la capacidad de un material para transmitir una carga eléctrica y una propiedad intrínseca del suelo, la conductividad eléctrica se correlaciona fuertemente con la textura y el tamaño de las partículas del suelo (Williams y Hoey, 1987), siendo baja en arenas, media en los limos y alta en las arcillas (Lund, 2008). Las arcillas son más conductoras en parte porque retienen más agua y también porque tienen una mayor superficie específica, lo que proporciona un mayor contacto entre partículas que las partículas más gruesas.

La conductividad eléctrica en los suelos depende principalmente de la cantidad de agua que queda en los poros (McCarter, 1984; Fukue *et al.*, 1999), observándose que la resistividad eléctrica de los suelos disminuye cuando aumenta el contenido de agua. Cuando hay una cantidad significativa de sales disueltas, ya sea en el agua de los poros o en una película de agua que rodea la partícula de suelo, los niveles de conductividad eléctrica aumentan (Rhoades y Corwin, 1990), de allí la retención de la variable  $\theta_{sat}$ .

Los valores de CE disminuyen a medida que aumenta el pH y viceversa (Provin and Pitt, 2012; Bruckner, 2012), lo que indica que la solubilización y la precipitación de los iones en la solución también dependen de las concentraciones de H<sup>+</sup> en la fase líquida (McBride y

Błasiak, 1979; Sousa *et al.*, 2007). Entonces, una posible razón de la relación negativa entre CE y pH es que los suelos están influenciados por el aumento de la solubilidad de los iones de  $\text{Ca}^{+2}$  en condiciones salinas, que llevan a una liberación de iones de hidrógeno (Al-Busaidi y Cookson, 2003).

Analizando los suelos diferenciados por rangos de textura (Cuadro 8), el procedimiento de stepwise arroja dos modelos no explicables para  $\text{CE}_{1:2,5 \text{ m/v}}$  en suelos arcillosos y francos a franco arcillosos, uno que selecciona a la variable arena con signo positivo y el otro que no selecciona variables regresoras, por tanto no son incluidos. Se repite la selección de limo como la variable más retenida (14 modelos), le siguen arcilla y pH (6 modelos), finalmente las constantes hídricas ( $\theta_{\text{sat}}$ , 4 modelos;  $\theta_{33}$ , 3 modelos;  $\theta_{1500}$ , 1 modelo).

**Cuadro 8.** Modelos de regresión lineal paso a paso (stepwise) de conductividad eléctrica para todos los suelos de la zona estudiada, diferenciados en tres rangos texturales.

<i>Suelos arcillosos (n= 10)</i>		R <sup>2</sup> Aj	ECM
CEe	= 7,22-7,25( $\theta_{\text{sat}}$ )	0,75	0,19
CE <sub>1:1m/v</sub>	= 7,84-0,94(pH <sub>1:1m/v</sub> )	0,78	0,10
CE <sub>1:2,5m/v</sub>	= -----	0,68	0,00
CE <sub>1:5m/v</sub>	= 0,83-0,08(pH <sub>1:5m/v</sub> )	0,47	0,00
CE <sub>1:1 v/v</sub>	= 0,86-0,02(L)+1,01( $\theta_{33}$ )	0,67	0,01
CE <sub>1:2,5v/v</sub>	= 2,44-0,21(pH <sub>1:1v/v</sub> )+0,01(A)	0,83	0,00
CE <sub>1:5v/v</sub>	= 0,81-1,46( $\theta_{\text{sat}}$ )+1,96( $\theta_{1500}$ )	0,69	0,00
CE <sub>1:1v/v is</sub>	= 1,98-1,17( $\theta_{\text{sat}}$ )	0,45	0,02
CE <sub>1:2,5v/v is</sub>	= 1,55-1,38( $\theta_{\text{sat}}$ )	0,61	0,01
CE <sub>1:5v/v is</sub>	= 0,73-0,60( $\theta_{\text{sat}}$ )	0,58	0,00
<i>Suelos francos a franco arcillosos (n= 12)</i>			
CEe	= 5,64-0,58(pHe)	0,62	0,04
CE <sub>1:1m/v</sub>	= 1,36-0,03(L)	0,32	0,02
CE <sub>1:2,5m/v</sub>	= -----	-	-
CE <sub>1:5m/v</sub>	= 0,43-0,01(L)	0,29	0,00
CE <sub>1:1 v/v</sub>	= 0,86-0,02(L)+1,01( $\theta_{33}$ )	0,67	0,01
CE <sub>1:2,5v/v</sub>	= 1,17-0,16(pH <sub>1:2,5v/v</sub> )+0,01(A)	0,83	0,00
CE <sub>1:5v/v</sub>	= 0,57-0,07(pH <sub>1:5v/v</sub> )+0,45( $\theta_{33}$ )	0,71	0,00
CE <sub>1:1v/v is</sub>	= 1,20-0,03(L)+1,37( $\theta_{33}$ )	0,76	0,01
CE <sub>1:2,5v/v is</sub>	= 0,64+0,01(L)	0,28	0,00
CE <sub>1:5v/v is</sub>	= 0,39-0,01(L)	0,41	0,00
<i>Suelos franco arenosos a franco arcillo arenosos (n= 13)</i>			
CEe	= 5,99-0,16(L)	0,52	0,38
CE <sub>1:1m/v</sub>	= 0,14+0,06(A)	0,29	0,12
CE <sub>1:2,5m/v</sub>	= -0,24+0,05(A)	0,65	0,02
CE <sub>1:5m/v</sub>	= -0,04+0,02(A)	0,61	0,01
CE <sub>1:1 v/v</sub>	= 3,34-0,09(L)	0,42	0,17
CE <sub>1:2,5v/v</sub>	= 2,04-0,05(L)	0,50	0,05
CE <sub>1:5v/v</sub>	= 1,02-0,02(L)	0,45	0,01
CE <sub>1:1v/v is</sub>	= 1,45-0,07(L)+0,07(A)	0,68	0,10
CE <sub>1:2,5v/v is</sub>	= 2,18-0,06(L)	0,54	0,03
CE <sub>1:5v/v is</sub>	= 1,19-0,03(L)	0,60	0,01

(Detalles en Apéndice III y siglas en Cuadro 3)

## CONCLUSIONES

Al relacionar la conductividad eléctrica en el extracto de pasta saturada (CE<sub>e</sub>) con la conductividad eléctrica medida en soluciones suelo:agua 1:1 (CE<sub>1:1</sub>), 1:2,5 (CE<sub>1:2,5</sub>) y 1:5 (CE<sub>1:5</sub>) estas resultaron altamente correlacionadas ( $r = 0,81$  a  $0,92$ ).

Al relacionar los valores de conductividad eléctrica determinados con distintos métodos a las propiedades de los suelos, los resultados estadísticos mostraron que la textura del suelo afecta la CE de los suelos estudiados, revelada por los altos coeficientes de correlación con algunas partículas. Estas correlaciones resultan negativas para arcilla y limo, en tanto para arena son positivas.

Así también las constantes hídricas no se correlacionan con la conductividad eléctrica de los distintos métodos, a excepción de la CE<sub>1:1v/v is</sub>; cabe mencionar que el pH<sub>v/v</sub> medido en la relación (1:1; 1:2,5 y 1:5) solo se correlaciona con la CE<sub>1:1v/v</sub> y la CE<sub>e</sub>, indicando que la conductividad eléctrica disminuye a medida que aumenta el pH.

Los modelos de regresión (stepwise) al integrar variables regresoras mejoran la predicción de la CE<sub>e</sub> y aquellas con los diferentes métodos. Así para identificar suelos salinos en la zona de estudio (CE<sub>e</sub> > 4 dS/m), se debería medir valores (dS/m) de:

$$CE_{1:1m/v} > 2,35, CE_{1:2,5m/v} > 1,20, CE_{1:5m/v} > 0,72,$$

$$CE_{1:1v/v} > 2,27, CE_{1:2,5v/v} > 1,28, CE_{1:5v/v} > 0,74,$$

$$CE_{1:1v/v is} > 2,48, CE_{1:2,5v/v is} > 1,33 \text{ y } CE_{1:5v/v is} > 0,74.$$

No obstante, se sugiere que las ecuaciones predictivas deben ser usadas con precaución, puesto que producirían errores debidos a la extrapolación. La advertencia es que las ecuaciones desarrolladas no se pueden usar para predecir la conductividad eléctrica equivalente a pasta saturada, cuando los valores de la conductividad eléctrica medida en las distintas relaciones suelo:agua se encuentren fuera de los rangos de conductividad eléctrica usadas en la evaluación.

**LITERATURA CITADA**

- Abbas, A., A. Khan, N. Hussain, H. Munir and S. Akbar. 2013. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and Chemistry of the Earth*, 55–57: 43-52
- Aboukila, E. F., and J. B. Norton. 2017. Estimation of saturated soil paste salinity from soil-water extracts. *Soil Science*, 182 (3): 107-113.
- Al-Busaidi, A.S. and P. Cookson. 2003. Salinity–pH Relationships in Calcareous Soils. *Agricultural and Marine Sciences*, 8(1): 41-46.
- Allbed, A., L. Kumar, P. Sinha. 2014. Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa Oasis based on remote sensing indicators and regression techniques. *Remote Sensing* 6: 1137-1157.
- Bruckner, M.Z. 2012. Water and Soil Characterization- pH and Electrical Conductivity, Microbial Life Educational Resources. Montana State University Bozeman, USA.
- Chhabra, R. 2004. Classification of Salt-Affected Soils. *Arid Land Research and Management* 19(1): 61-79.
- Corwin, D. L., and K. Yemoto. 2017. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. pp: 1-16. In: Logsdon, S. (ed.) *Methods of Soil Analysis*, vol. 2. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Corwin, D.L. 2003. Soil salinity measurement. pp. 852–857. In: B.A. Stewart and T.A. Howell (Eds.). *Encyclopedia of water science*. Marcel Dekker, New York. USA.
- Corwin, D. L. and S. M. Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture* 46 (1-3): 135–152
- Chi, C. and Z. Wang. 2009. Characterizing Salt-Affected Soils of Songnen Plain Using Saturated Paste and 1:5 Soil-to-Water Extraction Methods. *Arid Land Research and Management*, 24: 1-11.
- CIREN. 1996. Estudio agrológico Región Metropolitana. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación CIREN N° 116. Santiago, Chile.
- Datta, A., A. K. Mandal, and R. K. Yadav. 2019. Proper measurement of electrical conductivity and other parameters influence profile salinity and sodicity under different land uses. *Ecological Indicators*, 101: 1004-1006.
- Daubenmire, R.F. 1974. *Plants and environment.*, John Wiley and Sons, Canada.

- Ding J. and Yu, D. 2014. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan–Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Geoderma*, 235–236: 316–322.
- Douaoui, A.E.K., H. Nicolas and C. Walter. 2006. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 134: 217-230.
- Fukue, M., T. Minatoa, H. Horibe, and N. Taya. 1999. The micro-structure of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, 54(1–2): 43-53.
- Gorji, T., A. Tanik, and E. Sertel. 2015. Soil Salinity Prediction, Monitoring and Mapping Using Modern Technologies. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15: 507–512.
- Hardie, M., and R. Doyle. 2012. Measuring soil salinity. pp.: 415-425. In: Shabala, S., Cuin, T.A. (Eds.) *Methods in Molecular Biology* (Vol. 913). Springer Science+Business Media.
- He, Y., T. DeSutter, L. Prunty, D. Hopkins, X. Jia, and D. Wysocki, 2012. Evaluation of 1:5 soil to water extract electrical conductivity methods. *Geoderma*, 185–186: 12–17.
- He, Y., T. DeSutter, D. Hopkins, X. Jia, and D. Wysocki. 2013. Predicting E<sub>c</sub> of the saturated paste extract from value of EC<sub>1:5</sub>. *Canadian Journal of Soil Science*, 93: 585– 594.
- He, Y., T. DeSutter, D. Hopkins, D. Wysocki and D. E. Clay. 2015. Relationship between 1:5 soil/water and saturated paste extract sodium adsorption ratios by three extraction methods. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 681–687.
- Herrero, J., D. C. Weindorf and C. Castañeda. 2015. Two Fixed Ratio Dilutions for Soil Salinity Monitoring in Hypersaline Wetlands, *PLoS ONE*, 10: 1-18.
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports 106. FAO, Rome.
- Kargas, G., I. Chatzigiakoumis, A. Kollias, D. Spiliotis, I. Massas and P. Kerkides. 2018. Soil Salinity Assessment Using Saturated Paste and Mass Soil: Water 1: 1 and 1: 5 Ratios Extracts. *Water*, 10: 1-11.
- Khorsandi, F., and F. A. Yazdi. 2011. Estimation of saturated paste extracts' electrical conductivity from 1:5 soil/water suspension and gypsum. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42: 315-321.
- Kobayashi, S., H. Satone, E. Tan, H. Kurokochi, S. Asakawa, S. Liu, and T. Takano. 2015. Transcriptional responses of a bicarbonate-tolerant monocot, *Puccinellia*

*tenuiflora*, and a related bicarbonate-sensitive species, *Poa annua*, to NaHCO<sub>3</sub> stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 16: 496–509.

Lund, E.D. 2008. Soil Electrical Conductivity. pp: 137-146 In: Logsdon, S., D. Clay, D. Moore and T. Tsegaye (Eds.), *Soil Science. Step-by-Step Field Analysis*. Soil Science Society of America, Madison, WI. USA.

Ma, Q., Y. Wang, Y. Li, T. Sun and E. Milne. 2018. Carbon storage in a wolfberry plantation chronosequence established on a secondary saline land in an arid irrigated area of Gansu Province, China. *Journal of Arid Land* 10(2): 202–216.

Matthees, H., Y. He, R. Owen, D. Hopkins, B. Deutsch, and J. Lee. 2017. Predicting Soil Electrical Conductivity of the Saturation Extract from a 1:1 Soil to Water Ratio. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(18): 2148-2154.

Mcbride, M.B., and J.J. Blasiak. 1979. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acid soil. *Soil Science Society of America Journal*, 43: 866-70.

McCarter, W.J. 1984. The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Geotechnique*, 34(2): 263-267.

Monteleone, M., G. Lacolla, G. Caranfa, and G. Cucci. 2016. Indirect measurement of electrical conductivity and exchangeable cations on soil water extracts: assessing the precision of the estimates. *Soil Science*, 18: 465–471.

Northcote, K.H. and Skene, J.K.M. 1972. *Australian soils with saline and sodic properties*. Soil Publication No. 27, CSIRO, Australia.

Peng, J., A. Biswas, Q. Jiang, R. Zhao, J. Hua, B. Hua and Z. Shi. 2019. Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in southern Xinjiang Province, China. *Geoderma*, 337: 1309-1319.

Peng, J., W. Ji, Z. Ma, S. Li, S. Chen, L. Zhou and Z. Shi. 2016. Predicting total dissolved salts and soluble ion concentrations in agricultural soils using portable visible nearinfrared and mid-infrared spectrometers. *Biosystems Engineering* 152: 94–103

Pitman, M., and A. Lauchli, 2002. Global impacts of salinity and agricultural ecosystems. pp. 3–20 In: A. Lauchli and U. Lüttge (eds.), *Salinity: Environment–Plants–Molecules*, Kluwer Academics. U.S.A.

Pisinaras, V., V.A. Tsihrantzis, C. Petalas, and K. Ouzounis, 2010. Soil salinization in the agricultural lands of Rhodope District, northeastern Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*. 166: 79-94.

Pla, I. 2021. Overview of Salt-Affected Areas in Latin America: Physical, Social and Economic Perspectives. pp. 3-36. In: E. Taleisnik and R. S. Lavado (eds.), *Saline and Alkaline Soils in Latin America*. Springer Nature, Switzerland.

Provin, T. and J.L. Pitt. 2012. *Managing Soil Salinity*. Agricultural communication, The Texas A&M University System.

Qadir, M., A. Ghafoor, and G. Murtaza. 2000. Amelioration Strategies for Saline Soils: a review. *Land Degradation and Development*, 11: 501-521.

Rayment, G. E., and D. J. Lyons. 2010. *Soil Chemical Methods: Australasia*. CSIRO Publishing. Melbourne, Australia.

Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. pp. 167–179. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Second Edition*, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI, USA, Agronomy Monograph N° 9.

Rhoades, J.D., and D.L. Corwin. 1990. Soil electrical conductivity: Effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21: 837–860.

Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores y A. Neaman. 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Serie actas INIA-N°34. Instituto de Investigación Agropecuaria. Santiago, Chile.

Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas, y D. Rivera. 2011. *Métodos de Análisis Físicos de Suelos*. Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.

Santibáñez, F., P. Santibáñez, C. Caroca, y P. González. 2017. *Atlas Agroclimático de Chile: Tomo III, Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule*. Centro de Agricultura y Medio ambiente. Santiago, Chile.

Shirokova, Y., I. Forkutsa, and N. Sharafutdinova. 2000. Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia. *Irrigation and Drainage Systems*, 14: 199-205.

Slavich, P., and G. H. Petterson. 1993. Estimating the electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil:water suspensions and texture. *Australian Journal of Soil Research*, 31: 73-81.

Sonmez, S., D. Buyuktas, F. Okturen, and S. Citak. 2008. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. *Geoderma*, 144: 361 – 369.

Sonon, L. S., U. Saha and D. E. Kissel. 2015. *Soil Salinity Testing, Data Interpretation and Recommendations*. The University of Georgia, Cooperative Extension, College of Agricultural and Environmental Sciences, Circular No. 1019 (Published with Full Review).

Sousa D.M.G., L.N. Miranda, and S.A. Oliveira. 2007. Acidez do solo e sua correção. pp. 205-74. In: Novais R.F., V.V.H. Alvarez, N.F. Barros, R.L.F. Fontes, R.B. Cantarutti, J.C.L. Neves (Eds.), *Fertilidade do solo*. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

- SSS. 2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Tapia, Y., O. Díaz, E. Acuña, M. Casanova, O. Salazar and A. Masaguer. 2016. Phytostabilization of arsenic in soils with plants of the genus *Atriplex* established *in situ* in the Atacama Desert. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 1–11.
- Ullman, J.L. 2013. *Soil Salinity in Agricultural Systems: The Basics*. Agricultural & Biological Engineering, University of Florida. USA.
- USDA. 2014. Key to soil taxonomy. 12<sup>th</sup> Edition. United States Department of Agriculture, Soil Science Division Staff. Washington, D.C., USA.
- Vargas, R., E. I. Pankova, S. A. Balyuk, P. V. Krasilnikov, and G. M. Khasankhanova. 2018. *Handbook for Saline Soil Management*. FAO Publication. Roma.
- Wang, Y., Z. X. Wang, X. J. Lian, H. Xiao, L. Y. Wang, and H.D. He. 2011. Measurement of soil electrical conductivity and relationship between soluble salt content and electrical conductivity in Tianjin coastal area. *Tianjin Agricultural Science*, 17: 18-21.
- Williams, B.G. and A and D. Hoey D. 1987. The Use of Electromagnetic Induction to Detect the Spatial Variability of the Salt and Clay Contents of Soils *Australian Journal of Soil Research*, 25: 21-27.
- Zhang, H., J. L. Schroder, J. J. Pittman, J. J. Wang, and M. E. Payton. 2005. Soil salinity using saturated paste and 1:1 soil to water extract. *Soil Science Society of America Journal* 6: 1146–51.

## APÉNDICE I

## Matriz de correlación

	A	L	a	CEe	CE <sub>1:1m/v</sub>	CE <sub>1:2,5m/v</sub>	CE <sub>1:5m/v</sub>	CE <sub>1:1v/v</sub>	CE <sub>1:2,5v/v</sub>	CE <sub>1:5v/v</sub>	CE <sub>1:1v/v is</sub>	CE <sub>1:2,5v/v is</sub>	CE <sub>1:5v/v is</sub>	θ <sub>sat</sub>	θ <sub>33</sub>	θ <sub>1500</sub>	pHe	pH <sub>1:1m/v</sub>	pH <sub>1:2,5m/v</sub>	pH <sub>1:5m/v</sub>	pH <sub>1:1v/v</sub>	pH <sub>1:2,5v/v</sub>	pH <sub>1:5v/v</sub>	
A	1																							
L	<b>0,35</b>	1																						
a	<b>-0,92</b>	<b>-0,70</b>	1																					
CEe	<b>-0,45</b>	<b>-0,77</b>	<b>0,67</b>	1																				
CE <sub>1:1 m/v</sub>	-0,20	<b>-0,64</b>	<b>0,43</b>	<b>0,89</b>	1																			
CE <sub>1:2,5m/v</sub>	<b>-0,35</b>	<b>-0,79</b>	<b>0,61</b>	<b>0,82</b>	<b>0,85</b>	1																		
CE <sub>1:5m/v</sub>	-0,33	<b>-0,81</b>	<b>0,60</b>	<b>0,81</b>	<b>0,83</b>	<b>0,99</b>	1																	
CE <sub>1:1 v/v</sub>	-0,20	<b>-0,82</b>	<b>0,51</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,92</b>	<b>0,92</b>	1																
CE <sub>1:2,5v/v</sub>	<b>-0,35</b>	<b>-0,84</b>	<b>0,63</b>	<b>0,92</b>	<b>0,86</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	1															
CE <sub>1:5v/v</sub>	<b>-0,42</b>	<b>-0,87</b>	<b>0,69</b>	<b>0,89</b>	<b>0,83</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>	1														
CE <sub>1:1v/v is</sub>	-0,15	<b>-0,84</b>	<b>0,47</b>	<b>0,84</b>	<b>0,85</b>	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	1													
CE <sub>1:2,5v/v is</sub>	<b>-0,35</b>	<b>-0,84</b>	<b>0,62</b>	<b>0,92</b>	<b>0,87</b>	<b>0,94</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	<b>0,97</b>	<b>0,96</b>	1												
CE <sub>1:5v/v is</sub>	<b>-0,36</b>	<b>-0,86</b>	<b>0,65</b>	<b>0,91</b>	<b>0,84</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>	1											
θ <sub>sat</sub>	<b>0,44</b>	-0,23	-0,23	-0,11	-0,02	0,08	0,13	0,14	0,07	0,11	0,22	0,04	0,08	1										
θ <sub>33</sub>	<b>0,47</b>	-0,31	-0,23	-0,02	0,12	0,31	0,33	0,32	0,23	0,23	<b>0,41</b>	0,22	0,22	<b>0,66</b>	1									
θ <sub>1500</sub>	<b>0,68</b>	-0,18	<b>-0,44</b>	-0,08	0,11	0,20	0,24	0,25	0,13	0,13	<b>0,36</b>	0,12	0,14	<b>0,79</b>	<b>0,76</b>	1								
pHe	<b>0,51</b>	0,04	<b>-0,40</b>	-0,22	-0,21	-0,13	-0,13	-0,01	-0,08	-0,14	0,04	-0,04	-0,05	0,20	<b>0,45</b>	<b>0,44</b>	1							
pH <sub>1:1m/v</sub>	0,32	-0,20	-0,16	-0,26	-0,33	-0,05	-0,02	0,02	-0,02	-0,01	0,09	-0,03	0	<b>0,61</b>	<b>0,64</b>	<b>0,53</b>	<b>0,69</b>	1						
pH <sub>1:2,5m/v</sub>	0,28	-0,22	-0,12	-0,24	-0,32	-0,05	-0,02	0,02	-0,01	0,01	0,09	-0,02	0,01	<b>0,65</b>	<b>0,60</b>	<b>0,50</b>	<b>0,61</b>	<b>0,98</b>	1					
pH <sub>1:5m/v</sub>	0,31	-0,23	-0,14	-0,23	-0,29	-0,01	0,02	0,06	0,02	0,03	0,13	0	0,03	<b>0,61</b>	<b>0,62</b>	<b>0,52</b>	<b>0,58</b>	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	1				
pH <sub>1:1v/v</sub>	0,23	0,02	-0,19	<b>-0,34</b>	<b>-0,49</b>	-0,29	-0,28	-0,20	-0,20	-0,22	-0,17	-0,18	-0,16	0,20	0,29	0,2	<b>0,82</b>	<b>0,79</b>	<b>0,74</b>	<b>0,69</b>	1			
pH <sub>1:2,5v/v</sub>	0,23	0	-0,18	<b>-0,34</b>	<b>-0,50</b>	-0,29	-0,27	-0,19	-0,19	-0,21	-0,15	-0,18	-0,15	0,24	0,33	0,24	<b>0,82</b>	<b>0,83</b>	<b>0,79</b>	<b>0,74</b>	<b>0,98</b>	1		
pH <sub>1:5v/v</sub>	0,28	-0,01	-0,21	<b>-0,36</b>	<b>-0,49</b>	-0,26	-0,24	-0,17	-0,18	-0,20	-0,12	-0,17	-0,15	0,28	<b>0,40</b>	0,30	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>	<b>0,81</b>	<b>0,77</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>	1	

En negritas,  $p < 0,01$ ; en negritas y cursiva,  $p < 0,05$ . A, arcilla; L, limo; a, arena; θ<sub>sat</sub>, θ<sub>33</sub> y θ<sub>1500</sub>, contenido volumétrico de agua a 33, 1500 kPa y a saturación; pHe, pH en el extracto de la pasta saturada; m, masa; v, volumen; is, *in situ*.

## APÉNDICE II

### Selección stepwise, todos los suelos.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CEe</b>	35	0.68	0.66	0.49	71.72	77.94

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	8.04	1.02	5.96	10.13	7.85	<0.0001		
Limo	-0.14	0.02	-0.18	-0.11	-8.16	<0.0001	66.57	1.06
psat	-3.16	1.06	-5.32	-0.99	-2.96	0.0057	10.55	1.06

Error cuadrático medio: 0.395414

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE1:1 m/v</b>	35	0.69	0.66	0.18	34.64	42.42

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 3

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	7.66	0.99	5.65	9.68	7.77	<0.0001		
Limo	-0.08	0.01	-0.11	-0.06	-7.49	<0.0001	57.42	1.30
pH <sub>1:1 m/v</sub>	-0.65	0.12	-0.90	-0.40	-5.26	<0.0001	29.79	1.27
Arcilla	0.02	0.01	2.5E-03	0.03	2.42	0.0214	8.72	1.39

Error cuadrático medio: 0.133646

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE1:2.5 m/v</b>	35	0.68	0.66	0.03	-19.75	-13.53

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	2.49	0.44	1.59	3.39	5.62	<0.0001		
Limo	-0.04	4.7E-03	-0.05	-0.03	-8.20	<0.0001	67.27	1.05
pH <sub>1:2.5 m/v</sub>	-0.12	0.05	-0.23	-0.01	-2.30	0.0283	7.15	1.05

Error cuadrático medio: 0.028982

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE1:5 m/v</b>	35	0.66	0.65	0.01	-64.02	-59.35

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.87	0.07	0.73	1.01	12.32	<0.0001		
Limo	-0.02	2.5E-03	-0.02	-0.01	-8.04	<0.0001	63.72	1.00

Error cuadrático medio: 0.008399

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE1:1 v/v</b>	35	0.68	0.67	0.13	26.59	31.25

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	3.06	0.26	2.53	3.58	11.88	<0.0001		
Limo	-0.07	0.01	-0.09	-0.06	-8.32	<0.0001	68.30	1.00

Error cuadrático medio: 0.111828

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE1:2.5 v/v</b>	35	0.75	0.73	0.04	-16.68	-10.45

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	2.42	0.31	1.78	3.05	7.78	<0.0001		
Limo	-0.05	4.8E-03	-0.06	-0.04	-9.54	<0.0001	90.21	1.00
pH <sub>1:2.5 v/v</sub>	-0.08	0.04	-0.16	-4.9E-03	-2.17	0.0378	6.58	1.00

Error cuadrático medio: 0.031641

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE1:5 v/v</b>	35	0.79	0.78	0.01	-67.51	-61.29

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	1.35	0.15	1.04	1.65	9.09	<0.0001		
Limo	-0.02	2.3E-03	-0.03	-0.02	-10.78	<0.0001	114.70	1.00
pH <sub>1:5 v/v</sub>	-0.04	0.02	-0.08	-0.01	-2.55	0.0159	8.31	1.00

Error cuadrático medio: 0.007403

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:1</sub>v<sub>v</sub>g</b>	35	0.80	0.78	0.11	16.18	23.96

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 3

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	3.83	0.49	2.83	4.83	7.79	<0.0001			
Limo	-0.08	0.01	-0.09	-0.06	-10.16	<0.0001	102.97	1.06	
$\theta_{1500}$	4.24	1.12	1.95	6.53	3.78	0.0007	16.86	2.69	
$\theta_{set}$	-2.14	0.77	-3.70	-0.57	-2.78	0.0091	10.53	2.75	

Error cuadrático medio: 0.078879

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:2,5</sub>v<sub>v</sub>g</b>	35	0.71	0.70	0.05	-8.46	-3.80

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	1.91	0.16	1.59	2.23	12.24	<0.0001			
Limo	-0.05	0.01	-0.06	-0.04	-8.89	<0.0001	77.74	1.00	

Error cuadrático medio: 0.041080

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:5</sub>v<sub>v</sub>g</b>	35	0.75	0.74	0.01	-58.29	-53.62

Máximo p-valor para retener y entrar: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	1.05	0.08	0.90	1.21	13.74	<0.0001			
Limo	-0.03	2.7E-03	-0.03	-0.02	-9.89	<0.0001	95.97	1.00	

Error cuadrático medio: 0.009895

## APÉNDICE III

### Selección stepwise, suelos diferenciados por textura.

#### *Suelos arcillosos*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>e</sub></b>	10	0.78	0.75	0.32	15.46	16.37			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	7.22	1.09	4.70	9.75	6.60	0.0002			
$\theta_{sat}$	-7.25	1.37	-10.40	-4.10	-5.31	0.0007	26.15	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.188544</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>1:1m/v</sub></b>	10	0.80	0.78	0.17	9.52	10.43			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	7.84	1.20	5.08	10.59	6.55	0.0002			
pH <sub>1:1m/v</sub>	-0.94	0.17	-1.32	-0.56	-5.69	0.0005	29.84	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.104105</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>1:2.5m/v</sub></b>	10	0.71	0.68	0.01	-20.55	-19.65			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	-0.12	0.13	-0.41	0.17	-0.97	0.3615			
arena	0.02	0.01	0.01	0.04	4.46	0.0021	18.77	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.005143</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>1:5m/v</sub></b>	10	0.53	0.47	3.9E-03	-27.85	-26.94			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	0.83	0.18	0.40	1.25	4.50	0.0020			
pH <sub>1:5m/v</sub>	-0.08	0.03	-0.13	-0.02	-2.98	0.0175	9.02	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.002479</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>1:1v/v</sub></b>	10	0.82	0.80	0.01	-15.18	-14.27			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	2.44	0.25	1.86	3.01	9.75	<0.0001			
pH <sub>1:1v/v</sub>	-0.21	0.04	-0.30	-0.13	-6.01	0.0003	33.18	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.008804</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>1:2.5v/v</sub></b>	10	0.62	0.57	0.01	-14.53	-13.62			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	1.26	0.23	0.73	1.79	5.45	0.0006			
pH <sub>1:2.5v/v</sub>	-0.12	0.03	-0.19	-0.04	-3.58	0.0072	12.48	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.009392</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE<sub>1:5v/v</sub></b>	10	0.76	0.69	2.9E-03	-32.25	-31.04			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	0.81	0.12	0.52	1.10	6.62	0.0003			
$\theta_{sat}$	-1.46	0.42	-2.45	-0.47	-3.48	0.0102	12.75	11.84	
$\theta_{1800}$	1.96	0.81	0.06	3.87	2.44	0.0450	7.32	11.84	
<i>Error cuadrático medio: 0.001494</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:1v/v<sub>ig</sub></b>	10	0.51	0.45	0.03	-8.88	-7.98			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	1.98	0.32	1.24	2.73	6.12	0.0003			
$\theta_{sat}$	-1.17	0.40	-2.11	-0.24	-2.90	0.0198	8.61	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.016522</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:2Sv/v<sub>is</sub></b>	10	0.65	0.61	0.02	-11.37	-10.47			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	1.55	0.29	0.89	2.21	5.41	0.0006			
$\theta_{sat}$	-1.38	0.36	-2.21	-0.56	-3.87	0.0047	14.44	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.012878</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:5v/vis</b>	10	0.58	0.53	0.01	-25.14	-24.23			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	0.73	0.14	0.40	1.07	5.10	0.0009			
$\theta_{sat}$	-0.60	0.18	-1.02	-0.19	-3.36	0.0100	11.13	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.003251</i>									

### Suelos francos a franco arcillosos

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CEe</b>	12	0.66	0.62	0.11	-0.84	0.62			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	5.64	1.08	3.23	8.04	5.21	0.0004			
pHe	-0.58	0.13	-0.87	-0.28	-4.38	0.0014	18.50	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.039740</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:1m/v</b>	12	0.39	0.32	0.03	-8.45	-7.00			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	1.36	0.38	0.52	2.20	3.62	0.0047			
limo	-0.03	0.01	-0.05	-3.1E-03	-2.50	0.0312	6.79	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.021074</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:2Smv</b>	12	0.00	0.00	0.01	-23.46	-22.49			
<i>Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 0</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	0.25	0.02	0.20	0.31	10.94	<0.0001			
<i>Error cuadrático medio: 0.006481</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:5m/v</b>	12	0.35	0.29	2.7E-03	-38.41	-36.96			
<i>Selección Stepwise.</i>									
<i>Máximo p-valor para entrar: 0.05</i>									
<i>Máximo p-valor para retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	0.43	0.11	0.19	0.67	3.95	0.0027			
limo	-0.01	3.2E-03	-0.01	-3.7E-04	-2.34	0.0411	6.09	1.00	
<i>Error cuadrático medio: 0.001736</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC			
<b>CE1:1v/v</b>	12	0.73	0.67	0.01	-21.46	-19.52			
<i>Selección Stepwise.</i>									
<i>Máximo p-valor para entrar: 0.05</i>									
<i>Máximo p-valor para retener: 0.05</i>									
<i>Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2</i>									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	0.86	0.29	0.20	1.52	2.93	0.0168			
limo	-0.02	0.01	-0.04	-0.01	-3.35	0.0086	12.17	1.12	
$\theta_{33}$	1.01	0.43	0.03	1.99	2.34	0.0444	7.01	1.12	
<i>Error cuadrático medio: 0.006704</i>									

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:2.5v/v</sub>	12	0.86	0.83	3.4E-03	-41.79	-39.85

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	1.17	0.13	0.88	1.47	8.98	<0.0001		
pH <sub>1:2.5v/v</sub>	-0.16	0.02	-0.20	-0.11	-7.47	<0.0001	52.31	1.88
arcilla	0.01	1.8E-03	0.01	0.01	5.07	0.0007	25.25	1.77

Error cuadrático medio: 0.001231

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:5v/v</sub>	12	0.76	0.71	2.3E-03	-44.26	-42.32

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.57	0.11	0.32	0.83	5.06	0.0007		
pH <sub>1:5v/v</sub>	-0.07	0.01	-0.10	-0.04	-4.96	0.0008	24.20	1.02
θ <sub>33</sub>	0.45	0.16	0.09	0.81	2.82	0.0201	9.25	1.02

Error cuadrático medio: 0.001003

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:1v/v is</sub>	12	0.81	0.76	0.02	-17.56	-15.62

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	1.20	0.34	0.42	1.98	3.47	0.0070		
limo	-0.03	0.01	-0.05	-0.02	-4.29	0.0020	18.63	1.12
θ <sub>33</sub>	1.37	0.51	0.21	2.52	2.68	0.0251	8.58	1.12

Error cuadrático medio: 0.009278

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:2.5v/v is</sub>	12	0.34	0.28	0.01	-27.76	-26.31

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.64	0.17	0.26	1.01	3.80	0.0035		
limo	-0.01	0.01	-0.02	-3.3E-04	-2.29	0.0448	5.87	1.00

Error cuadrático medio: 0.004214

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:5v/v is</sub>	12	0.46	0.41	1.6E-03	-44.95	-43.50

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.39	0.08	0.21	0.57	4.75	0.0008		
limo	-0.01	2.5E-03	-0.01	-1.7E-03	-2.93	0.0151	8.89	1.00

Error cuadrático medio: 0.001006

## Suelos franco arenosos a franco arcillo arenosos

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>e</sub>	13	0.56	0.52	0.52	28.03	29.72

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	5.99	0.90	4.02	7.96	6.69	<0.0001		
limo	-0.16	0.04	-0.25	-0.06	-3.77	0.0031	14.09	1.00

Error cuadrático medio: 0.376712

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:1m/v</sub>	13	0.35	0.29	0.16	13.68	15.38

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	0.14	0.55	-1.08	1.35	0.25	0.8096		
arcilla	0.06	0.02	0.01	0.11	2.41	0.0345	6.42	1.00

Error cuadrático medio: 0.124930

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
CE <sub>1:2.5m/v</sub>	13	0.68	0.65	0.03	-9.77	-8.08

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-0.24	0.22	-0.74	0.25	-1.08	0.3023		
arcilla	0.05	0.01	0.03	0.07	4.80	0.0006	22.21	1.00

Error cuadrático medio: 0.020563

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:5m/v</sub></b>	13	0.64	0.61	0.01	-26.48	-24.79

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Máximo p-valor para: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	-0.04	0.12	-0.29	0.22	-0.30	0.7705			
arcilla	0.02	0.01	0.01	0.03	4.44	0.0010	19.12	1.00	

Error cuadrático medio: 0.005688

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:1v/v</sub></b>	13	0.47	0.42	0.22	17.91	19.60

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	3.34	0.61	2.01	4.68	5.51	0.0002			
limo	-0.09	0.03	-0.15	-0.03	-3.12	0.0098	9.99	1.00	

Error cuadrático medio: 0.172935

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:2.5v/v</sub></b>	13	0.54	0.50	0.07	2.26	3.95

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	2.04	0.33	1.31	2.77	6.14	0.0001			
limo	-0.05	0.02	-0.09	-0.02	-3.58	0.0044	12.80	1.00	

Error cuadrático medio: 0.051894

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:5v/v</sub></b>	13	0.50	0.45	0.02	-17.04	-15.35

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 7, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	1.02	0.16	0.67	1.37	6.46	<0.0001			
limo	-0.02	0.01	-0.04	-0.01	-3.31	0.0070	11.10	1.00	

Error cuadrático medio: 0.011758

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:1v/vs</sub></b>	13	0.74	0.68	0.15	11.66	13.92

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 2

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	1.45	0.82	-0.38	3.28	1.76	0.1082			
arcilla	0.07	0.02	0.02	0.12	3.09	0.0115	10.75	1.12	
limo	-0.07	0.02	-0.12	-0.02	-3.00	0.0133	10.27	1.12	

Error cuadrático medio: 0.100876

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:2.5v/vs</sub></b>	13	0.58	0.54	0.07	2.26	3.96

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	2.18	0.33	1.44	2.91	6.55	<0.0001			
limo	-0.06	0.02	-0.09	-0.03	-3.87	0.0026	14.79	1.00	

Error cuadrático medio: 0.051912

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
<b>CE<sub>1:5v/vs</sub></b>	13	0.63	0.60	0.02	-16.56	-14.87

Máximo p-valor para entrar y retener: 0.05

Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 1

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	Cp	Mallows	VIF
const	1.19	0.16	0.83	1.54	7.38	<0.0001			
limo	-0.03	0.01	-0.05	-0.02	-4.32	0.0012	18.22	1.00	

Error cuadrático medio: 0.012197

## ANEXO I

**Características generales de los suelos en estudio (CIREN, 1996).**

Serie	Descripción
Batuco (BTC)	Suelos de origen lacustrino, estratificado, profundo, de características vérticas en sus primeros horizontes; clase textural superficial arcillo limosa y de color pardo; en profundidad es franco arcillo arenosa, de color pardo amarillento oscuro; se presenta cementado por carbonato de calcio en profundidad. Pertenecen a la Familia arcillosa sobre franca gruesa, calcárea, térmica de los Sodic Haploxererts.
Cotuba (COU)	Suelos de origen lacustrino, clase textural franca y color pardo grisáceo muy oscuro en superficie; de clase textural franco arcillosa a arcillosa y color vario en profundidad. El sustrato está dominado por matices grises, mostrando una fuerte gleyzación. Se clasifican como miembro de la Familia arcillosa, calcárea, mixta, térmica de los Aeric Fluvaquent.
Peralillo (PRE)	Suelos de origen depositacional lacustrino, limitante con las áreas pantanosas, presenta características vérticas, presenta problemas de saturación y acumulación de sales, cloruros y sulfatos de sodio. Clase textural arcillosa y de color pardo muy oscuro. De permeabilidad muy lenta y drenaje pobre, el nivel freático varía entre 30 y 100 cm. Se clasifica como miembro de la Familia muy fina, montmorillonítica, térmica de los Halic Epiaquerts.
Maipo (MAO)	Suelos de origen aluvial, profundos. La clase textural en superficie es franca y de color pardo muy oscuro, presenta un horizonte cámbico de textura franca y color pardo oscuro, a profundidad intermedia la clase textural es franco arcillosa y color pardo oscuro. Así mismo en profundidad, el sustrato se encuentra constituido por gravas y piedras con matriz franco arenosa que representa entre el 40 y 60% en volumen. Se clasifican como miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls.
Mapocho (MPC)	Suelos de origen aluvial, profundos, que ocupan la posición de terrazas antiguas. La clase textural en superficie es franco arcillo limosa o arcillo limosa y de color pardo oscura y pardo grisáceo oscuro, los horizontes intermedios son de clase textural arcillo limosa y de color pardo rojizo oscuro, y en profundidad la clase textural franco arcillo limosa o arcillo limosa y de color pardo oscuro. Se clasifican como miembro de la Familia limosa fina, mixta, térmica de los Fluventic Haploxerolls.
Cuesta Barriga (PTB)	Suelos de origen aluvio coluvial, moderadamente profundos, Clase textural en superficial franco limosa y color pardo oscuro, con un contenido de gravilla escaso; y en profundidad la clase texturales franco arcillo arenosa, con abundantes gravas y de color pardo oscuro. El sustrato está constituido por gravas y piedras en matriz franco arcillo arenosa con abundante gravilla, sin raíces. Se clasifican como miembro de la Familia franca gruesa, mixta, térmica de los Typic Haploxerolls.
Huechún (HCN)	Suelos de origen aluvio coluvial, profundos. La clase textural en el horizonte superior es arcillosa a arcillo limosa y de color pardo muy oscuro a pardo rojizo oscuro, en el horizonte inferior la clase textural es arcillo limosa y a profundidad cambia a y franco arcillosa de color gris muy oscuro a gris rojizo, muestra filamentos de CaCO <sub>3</sub> que se acumulan en los canalículos de antiguas raíces. Se clasifican como miembro de la Familia arcillosa, mixta, térmica de los Vertic Calcixerolls.