



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Agronomía - Programa de Magíster en Ciencias Agronómicas

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL Y REDES
NEURONALES (RNA) PARA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA
UTILIZANDO CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE (CE_a) EN SUELOS
ANDISOLES Y UN VERTISOL EN CHILE.**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agronómicas con
mención en Suelos

SERGIO FABIÁN CABELLO LEIVA
CHILLÁN-CHILE
2014

Profesor Guía: Juan Alberto Barrera Berrocal
Dpto. de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía
Universidad de Concepción

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL Y REDES NEURONALES (RNA) PARA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA UTILIZANDO CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE (CE_a) EN SUELOS ANDISOOLES Y UN VERTISOL EN CHILE

Aprobada por:

Juan Alberto Barrera Berrocal
Ing. Agrónomo, Dr.

Profesor Guía

Marco Sandoval Estrada
Ing. Agrónomo, Dr.

Evaluador Interno

Leandro Paulino
Ing. Forestal, Dr.

Evaluador Interno

Inés Figueroa Cares
Ing. Agrónomo, Dr.

Directora de Programa



RECONOCIMIENTOS

Al Profesor guía Dr. Juan Alberto Barrera por su apoyo y ayuda incondicional en el ámbito académico y personal.

Quiero dar mis profundos agradecimientos a CONICYT por el financiamiento aportado para la realización de mi Magíster, le doy gracias a la institución por el apoyo brindado y por darme la oportunidad de contribuir a la agricultura de mi país con una investigación muy aplicable y amigable a nuestra realidad.

Al profesor laborista Manuel Zapata por todas sus enseñanzas y colaboración

A mis amigos tesisistas Marcelo de la Fuente y Franco Weisser por el compañerismo y apoyo en todo momento.

A Clarita Castro por todo el apoyo y el cariño brindado.

A mi madre Rosa Leiva Pérez y a mi padre Sergio Cabello Durante a quienes les debo todo en la vida, gracias por quererme y cuidarme.

A mi familia y amigos y seres queridos que siempre estuvieron brindando apoyo e incentivando en el proceso.

Y a todos lo que de alguna forma colaboraron en este trabajo.

*Dedicada a mi sobrina Antonia Cabello
Que con su cariño y alegría me motiva
A seguir adelante, sé que tú Antonia llegarás
Muy lejos, te quiero mucho.*

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	2
Introducción.....	2
Materiales y Métodos.....	4
Resultados y Discusión.....	10
Conclusiones.....	19
Referencias.....	20
Anexos.....	25



INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Gráficos Comparativos entre los modelos de Regresión Lineal Múltiple y la Redes Neuronales (RNA) de estimación de humedad volumétrica estimada v/s medida en laboratorio.....	18
Tabla 1 Parámetros estadísticos de resumen de todas las Etapas en investigación.....	11
Tabla 2 Resumen de correlaciones de Pearson para las mediciones de Conductividad Eléctrica Aparente de suelos (CE_a) de las tres etapas de investigación, correlacionándolas con las propiedades físicas de suelo, temperaturas ambiente y de suelo a diferentes profundidades según la metodología desarrollada por etapa.....	14
Tabla 3 Regresiones lineales simples y múltiples en las diferentes etapas de la investigación asociado a estadísticos de cada modelo.....	15
Tabla 4 Redes Neuronales que estiman Humedad volumétrica de suelo en cada etapa del estudio y resumen de variables empleadas para el entrenamiento previo.....	17

ÍNDICE DE ANEXOS

	Páginas
Anexo 1 Mapa con demarcación de los sitios de Estudio. Sitio 1 y 2 Campus Chillan de la Universidad de Concepción, y sitio 3 Chillán Norte.....	25
Anexo 2 Características descriptivas del equipo de inducción electromagnética CMD-1. Fuente GF Instruments.....	25
Anexo 3 Tablas de parámetros estadísticos de resumen por Etapa.....	26
Anexo 4 Tablas de correlación de Pearson para todas las variables de las etapas del Ensayo.....	28
Anexo 5 Tablas de análisis estadísticos de regresiones lineales simples y múltiples.....	30



ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL Y REDES NEURONALES (RNA) PARA ESTIMACIÓN DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA UTILIZANDO CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE (CE_a) EN SUELOS ANDISOLES Y UN VERTISOL EN CHILE

COMPARATIVE ANALYSIS OF LINEAR REGRESSION MODELS AND NEURAL NETWORKS FOR WATER CONTENT ESTIMATION USING ELECTRICAL CONDUCTIVITY (EC_a) IN ANDOSOLS AND A VERTOSOL IN CHILE

Palabras índice adicionales: Inducción electromagnética, CMD-1, programación, Redes Neuronales (RNA), Andisol.

RESUMEN

El contenido de agua en el suelo (Humedad volumétrica, Θ) es un factor de gran importancia en la agricultura mundial, ya que se busca la eficiencia en el uso del recurso debido a su disponibilidad limitada. Se obtuvieron datos de CE_a , a través de EMI (CMD-1) en suelos Andisoles y un Vertisol para para estimar Θ . En una primera etapa la estimación de Θ se complementó con temperatura de suelo inferida a través de datos de estación meteorológica, una segunda etapa con datos de termómetro en terreno y una tercera etapa con datos de temperatura de suelos con dataloggers. Al correlacionar la CE_a con la Humedad volumétrica se obtuvieron coeficientes de correlación de 0,59, 0,6, 0,68 y 0,98 respectivamente por etapa, denotando una clara relación lineal positiva y una buen capacidad predictiva de la CE_a sobre la Θ , además de una correlación lineal positiva para las temperaturas de suelo y CE_a , en todas las profundidades. Los modelos de regresión lineal múltiple para estimación de Θ en base a CE_a y o variables físicas de suelo presentan un R^2 de 0,8, 0,54, 0,8, 0,99 respectivamente por etapa y las estimaciones a través de RNA con R^2 de 0,82, 0,86, 0,97, 0,99 para cada etapa. De tal forma queda de manifiesto la gran capacidad predictiva de humedad volumétrica de suelos a través de RNA en relación a modelos de regresión lineal tradicionales, pudiendo ser una herramienta poderosa, simple y mejorada.

SUMMARY

The soil water content (θ) is a factor of great importance in world agriculture, the agriculture find the efficiency in the use of this resource because has a limited availability. EC_a data were obtained through EMI (CMD-1) in Andosols and Vertosol soils for water content estimation. In the first stage, the estimation was supplemented with soil temperature from weather station data, in the second stage was collected with soil thermometer and in the third stage the soil temperature was obtained with soil dataloggers in different deeps. By correlation between soil water content and EC_a its posible to see correlation coefficients of 0.59, 0.6, 0.68 and 0.98 were obtained respectively by stage, denoting a clear positive linear relationship and a good predictive ability of EC_a over soil water content, and a positive linear correlation for soil temperatures and EC_a , at all depths. The multiple linear regression models to estimate soil wáter content through CE_a and soil physical variables have an R^2 of 0.8, 0.54, 0.8, 0.99 respectively. Estimation by stage through RNA with R^2 0.82, 0.86, 0.97, 0.99 for each stage. RNA shows a great prediction capacity in water contet estimation in compartion with traditional linear regression models, RNA is simple and improved tool.

INTRODUCCIÓN

El gran desafío de la agricultura contemporánea es responder de forma satisfactoria a una creciente demanda por alimentos de una población en pleno crecimiento, enmarcándose en el contexto de la maximización de rendimientos, calidad y uso eficiente de recursos en general. Debido a lo anterior es de vital importancia el uso del agua, mejorando eficiencia de uso (Evelt et al., 2007) optimizando programación del riego (Mwale et al., 2005) y balance de agua en el suelo (Tolk y Evelt, 2009).

Actualmente se usan técnicas comunes de laboratorio para conocer el contenido de agua en el suelo, distinguiéndose grillas de trabajo y una gran cantidad de toma de muestras y algunas técnicas con sensores de neutrones y sensores dieléctricos (FDR y TDR) (Dalton, 1992). Pero todas éstas mantienen su carácter estático en la medición, perdiendo su atributo espacial, lo que dificulta su uso en grandes áreas por el gran consumo de recursos y tiempo, al ser invasiva y

lenta. (Robinson et al., 2010; Triantafilis y Lesch, 2005; Wijewardana and Galagedara, 2010).

En la actualidad se han incorporado una gran cantidad de herramientas que permiten diferenciar la variabilidad del contenido de humedad de un suelo en el concepto de Agricultura de precisión permitiendo una eficiente delimitación y distribución de recursos (Amin et al., 2004; Deorge, 1999; Johnson et al., 2003; Pautasso et al., 2010; Serrano et al., 2010), con este propósito, es posible correlacionar el contenido del agua en el suelo a través del uso de sensores remotos en plataformas satélites (imágenes satelitales de radar) (Bannari et al., 2008; Clevers et al., 2007), cámaras infrarrojas (NIR) (Fekadu et al., 2010; Hunt et al., 2010), así como el uso de sensores ópticos radiométricos en terreno. El desarrollo de sensoramiento *in situ* ha incrementado la efectividad y confiabilidad de la agricultura de precisión (Pierce y Nowak, 1999).

La Inducción Electromagnética (EMI, *Electromagnetic Induction*) es un sensor que permite inspeccionar de forma no invasiva el suelo a través de la medición de la conductividad eléctrica aparente (CE_a) (Corwin y Lesch, 2005; Corwin et al., 2006).

La CE_a medida por EMI determinada principalmente por el contenido de sales, mineralogía de arcillas, contenido de humedad y temperatura del suelo (Brevik et al., 2006; Corwin y Lesch, 2005; Corwin et al., 2006; Triantafilis y Lesch, 2005). Actualmente se sabe que la CE_a es también influenciada por factores edáficos de forma conjunta como la porosidad, concentración de electrólitos disueltos, cantidad y composición de los coloides (arcilla y materia orgánica), Ca y Mg intercambiable (Sudduth et al., 2005), contenido de materia orgánica, además de factores biológicos del suelo (Corwin y Lesch, 2005; Corwin et al., 2006; Johnson et al., 2003; Sudduth et al., 2005) siendo demostrados en diversos estudios.

Estudios científicos correlacionan la CE_a con el contenido de agua en el suelo (Hossain et al., 2010; Corwin y Lesch, 2005; Corwin et al., 2006; Johnson et al., 2003; Sudduth et al., 2005) De tal forma Brevick y Fenton (2006) concluyen que la humedad de suelo es el factor más influyente en la CE_a en suelos no salinos, siendo incluso más importante que el contenido de sales, contenido de

arcillas y temperatura de suelo. En ésta línea, el factor temperatura del suelo es determinante al estimar la CE_a (Padhi y Misra, 2011), ya que en consecuencia las diferentes temperaturas varían la viscosidad del agua y por ende la capacidad de movilidad de electrolitos disueltos, las cuales pueden variar estacionalmente (Siri-Prieto et al., 2006).

Investigaciones anteriores correlacionan el contenido de Humedad del Suelo con CE_a a través de herramientas estadísticas como la regresión lineal simple, regresión lineal múltiple, entre otras (Hossain et al., 2010; Padhi y Misra, 2011). Zou (2010) usa el método de Redes Neuronales (RNA) para realizar estimaciones de contenido de humedad, dichos modelos consisten en un gran número de procesos elementales interconectados (nodos o unidades), simulando de forma básica una neurona biológica (Farifteh et al., 2007), analizando datos de entradas y generando datos respuesta a través de una función de transferencia (no lineal), arquitectura de la red y ley de aprendizaje (Yilmaz y Kaynar, 2011). De tal forma es posible postular que las RNA pueden ser usadas como un sustituto a modelos de regresión (Singh et al., 2003) al entregar resultados de variables complejas para extraer patrones y detectar tendencias en procesos estadísticos (Yilmaz y Kaynar, 2011).

En vista de los antecedentes recopilados se plantea que a través Redes Neuronales es posible estimar el contenido de humedad volumétrica del suelo (θ), inferido a través de mediciones de Conductividad Eléctrica Aparente (CE_a) en un suelo Andisol y Vertisol de la Región del Bio-Bio, Chile, y con especial énfasis en suelos Andisoles debido a la escasa o nula investigación actual en este tipo de suelo. El objetivo fue generar modelos de regresión lineal simple, múltiple y redes neuronales (RNA) para determinar contenido de humedad volumétrica de suelo (θ) a partir de mediciones de CE_a sensadas con Inducción Electromagnética (EMI) y a su vez evaluar el mejor modelo de estimación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la Estación Experimental El Nogal de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, Campus Chillan y en un

campo vecino a la estación en la Región del Bío-Bío, Chile. En el Anexo 1 es posible observar el mapa de distribución de la investigación en terreno.

Se realizaron tres etapas de investigación, en respuesta a metodologías usadas en la actualidad para estimaciones de Θ en base a mediciones de CE_a , en suelos Andisoles y un Vertisol, encontrándose todos los sitios con pradera natural. Los órdenes de suelo estudiados son representativos de la realidad agrícola local.

La Etapa I se realizó en los meses de octubre del 2011 hasta octubre del 2012 en el Sitio 1 con coordenadas lat $-36,595133^\circ$ long $-72,080954^\circ$, el sitio se encuentra inmerso en la Serie de Suelo Tres Hijuelas (Andisol, Haploxerands) presentando relieve plano y drenaje moderado así como presencia de moteados en el Perfil (Cruzat, 1978)

La Etapa II se llevó a cabo en los meses de Noviembre, Diciembre del 2012 y Enero del 2013, contemplando el Sitio 1 y el Sitio 2 (lat -36.59905° long $-72,082295^\circ$), perteneciendo éste último a la serie Arrayan (Andisol, Haploxerands), con relieve plano y algunas ondulaciones, con un material generador de cenizas volcánicas modernas con un perfil profundo y muy bien estructurado (CIREN, 1999).

La Etapa III se concretó en los meses Noviembre, Diciembre del 2012 y Enero del 2013, enmarcando en el estudio los Sitios 1, 2 y 3 (lat $-36,584684^\circ$ long $-72,084827^\circ$), perteneciendo este último a la serie Quella (Vertisol, Durixererts) siendo suelos en posición baja, de plano depositacional y origen lacustrino (CIREN, 1999).

Los sitios estudiados se encuentran ubicados en la depresión central de Chile continental, bajo un régimen de clima mediterráneo con una precipitación anual de 1000 a 1500 mm anuales, distribuidas de forma principal en los meses de invierno (CIREN, 1992).

Mediciones de CE_a a través de EMI

Las lecturas en terreno fueron realizadas con el equipo de inducción electromagnética CMD-1 (detalles del instrumento en Anexo 1), el cual midió la conductividad eléctrica aparente (CE_a) en milisiemens por metro ($mS \cdot m^{-1}$) siguiendo el principio de emisión de una onda electromagnética a través de una

bobina emisora para luego propagarse a través del medio conductor, en este caso el suelo, produciendo cambios en el voltaje inicial de la onda según las propiedades del medio, las cuales se recibieron en una segunda bobina receptora (Inman et al., 2001). El equipo se dispuso a 15 cm sobre la superficie del suelo, usando la configuración de dipolo horizontal que tiene una profundidad de lectura de 0,75 m. según catálogo, al considerar los 15 cm sobre la superficie es posible estimar una profundidad efectiva de lectura de 0,6 m. al interior del perfil estudiado (Padhi y Misra, 2011). Se usó esta metodología ya que la elevación del instrumento debe ser contante, de lo contrario se presentarían alteraciones en las mediciones obtenidas, bajo un concepto de profundidad efectiva de medición y propagación en el medio conductor (Hossain et al., 2010; Padhi y Misra, 2011). Pevio a cada instancia de medición, se realizó la calibración automática de fábrica para CMD-1 recomendada según manual de usuario.

En la Etapa I, se realizaron mediciones de CE_a en los meses de Octubre 2011, Marzo, Abril, Mayo, Junio y Octubre del 2012, realizando un seguimiento temporal de los cambios de CE_a (Padhi y Misra, 2011). Cada campaña de medición constó en la lectura de 6 puntos de muestreo con cuatro repeticiones cada uno en un área de 200 m². Dichas lecturas se estandarizaron a 25 °C a través de la ecuación (1) de Richards (1954), sugerida en el estudio realizado por Sudduth *et al.* (2001) para poder corregir la respuesta de CE_a frente a diferencias térmicas en la medición.

$$CE_{a25} = CE_a(0,4779+1,3801e^{(-T / 25,654)}) \quad (1)$$

Donde T= temperatura de suelo en Celsius.

La Etapa II, se llevó a cabo en los sitios 1 y 2 entre los meses Noviembre y Diciembre 2012, donde se establecieron cuatro tratamientos de humedad de suelo siendo T1 tratamiento control sin riego, T2: 100 mm de agua; T3: 200 mm de agua y T4: 400 mm de agua, siendo similar a lo observado en el estudio de Hossain et al. (2010). Se monitoreó la CE_a 6 veces al día, entre 8:00 y 20:00 horas en cada

tratamiento con cuatro repeticiones por punto en el modo manual de EMI, con su dipolo horizontal a una profundidad efectiva de trabajo de 0,6 m.

La Etapa III fue realizada en los sitios 1, 2 y 3 entre los meses de Noviembre y Diciembre 2012 y además Enero 2013, donde se midió la CE_a con CMD-1 en el modo dipolo horizontal a una profundidad efectiva de trabajo de 0,6 m., midiendo automáticamente en intervalos de 15 segundos desde las 8:00 a las 20:00 Horas. Se midió CE_a en el suelo sin riego y luego se aplicó un riego de 250 mm* m² . Después de 24 y 96 horas se realizó una segunda y tercera medición con EMI en cada sitio, con la obtención de diferenciales de humedad por evapotranspiración y drenaje (Hossain et al., 2010).

Muestreo tradicional de Propiedades físicas de suelo

Se realizaron calicatas en cada uno de los tres sectores de estudio. En la Etapa 1 se caracterizó el perfil y se tomaron muestras entre los 0-30 cm y entre 30-60 cm. En las Etapas II y III se procedió a caracterizar los perfiles además de tomar muestras en los rangos de 0-15, 15-30, 30-45, 45-60 cm respectivamente. Cada una de las muestras fue llevada en contenedores térmicos para su evaluación en el Laboratorio de Física de Suelos de la Universidad de Concepción.

La textura del suelo se determinó por medio del método del hidrómetro de Bouyoucos de acuerdo a lo establecido por Sandoval *et al.* (2012). Este análisis se realizó una vez en el periodo de muestreo para cada punto.

Densidad aparente (Da) de los suelos fue determinada a través del método del terrón explicado por Sandoval *et al.* (2012). Se realizó una vez en la temporada de medición para cada punto de muestreo en cada una de sus profundidades.

Contenido de humedad gravimétrico del Suelo (W) fue realizado a través de análisis gravimétrico donde cada muestra es secada a una temperatura de 105 ± 5 °C hasta alcanzar peso constante, realizando el posterior cálculo según ecuación 2 (Sandoval et al., 2012).

$$W = ((PH - PS) / PS) * 100 \quad (2)$$

Donde, PH = peso húmedo; PS = peso seco.

El contenido de agua volumétrico (θ) fue estimado según la ecuación 3 para cada etapa, y es usado en diversos estudios para establecer correlaciones con CE_a (Amin et al., 2004; Andre et al., 2010; Corwin y Lesch, 2005; Corwin et al., 2006; Hossain et al., 2010; Padhi y Misra, 2011; Robinson et al., 2010; Wijewardana y Galagedara, 2010).

$$\theta = W * (D_{ap} / \rho) \quad (3)$$

Donde W = contenido de agua gravimétrico (%HBSS), D_a = densidad aparente ($g\ cm^{-3}$), ρ = densidad del agua ($1\ g\ cm^{-3}$)

En la Etapa I se muestreó el suelo en cada una de las campañas, en las mismas profundidades de las muestras de texturales, a las 9:00 horas, luego las muestras se transportaron en contenedores térmicas hasta el Laboratorio de Física de Suelos

En Las Etapas II y III se tomaron muestras a las mismas profundidades de las muestras de texturales para estimar el contenido de humedad de suelos a las 8:00, 14:00 y 20:00 horas de cada día de medición, para luego ser llevadas en contenedores térmicos al laboratorio de Física de Suelos para su análisis inmediato según los métodos detallados con anterioridad.

Temperatura del suelo

En la actualidad es reconocido que la CE_a es influenciada por la temperatura, (Padhi and Misra, 2011; Sudduth et al., 2001) de tal forma en la Etapa I se estimó la temperatura del suelo basados en el modelo propuesto por Campbell, el cual se detalla en la ecuación 4. (Campbell, 1995)

$$T(z, t) = t_{prom} + A * EXP^{-Z/D} * \text{seno}(Wt - Z/D) \quad (4)$$

Donde; $T(z,t)$ = temperatura de suelo en Celsius; $t_{prom} = (t_{m\acute{a}xima} - t_{m\acute{i}nima})^{-2}$ ($^{\circ}C$); A ($_{\theta}$) = amplitud termal; Z = profundidad de suelo (m); D = profundidad de alternancia; Wt = frecuencia angular (s).

Los datos de temperatura de suelo se obtuvieron de la Estación Meteorológica Automática (EMA) de la Universidad de Concepción, Campus Chillán de octubre 2011 a octubre 2012. La temperatura se midió hasta los 75 cm de profundidad, a intervalos de 5 cm, valores que fueron promediados en un solo intervalo.

En la Etapa II se registró la temperatura en cada día de medición de CE_a a las 8:00, 14:00 y 20:00 horas, monitoreando temperatura ambiente y temperatura de suelos a los 5, 10 y 15 cm, para ello se usó un termómetro digital de penetración Multi-Thermometer con precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$, el cual necesitaba 5 minutos para estabilizar la medición, según catálogo. Bajo los 30 cm de profundidad en el suelo la temperatura sufre variaciones poco significativas, por lo cual no se midió bajo estas profundidades (Padhi and Misra, 2011).

La temperatura del Suelo en la Etapa III se midió con datalogger watchdog modelo 100 2K – 3619WD con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ (detalles en Anexo 4), los cuales fueron ubicados a temperatura ambiente y a 7,5, 15, 30 y 45 cm enterrados en el suelo al interior de una bolsa hermética. Los dataloggers se programaron para que registraran la temperatura en intervalos de 5 minutos y siendo precalibrados en igualdad de condiciones.

Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado usando el software Infostat, versión 2012, el cual pertenece al Grupo Infostat FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (Di Rienzo et al., 2011). Se realizaron análisis de correlación de Pearson, regresiones lineales y múltiples para explicar las variaciones en CE_a , a partir de variables independientes del suelo en estudio como contenido de arcillas, temperatura ambiental y de suelo (en $^\circ\text{C}$) a diferentes profundidades, densidad aparente (D_a) con el objetivo de estimar la Humedad volumétrica del suelos. Para ello se evaluó la significancia de la variable en los modelos planteados y la bondad de ajuste a través del coeficiente de determinación (R^2).

Redes Neuronales (RNA)

En la actualidad las RNA son usadas como un sustituto para autocorrelaciones, regresiones lineales, múltiples, trigonométricas, entre otras (Singh et al., 2003; Yilmaz and Kaynar, 2011). Se utilizó la RNA Multilayer Perceptron (MLP), siendo ésta la más usada en la literatura para estimaciones (Yilmaz y Kaynar, 2011), la cual consiste en un gran número de procesos y elementos interconectados (nodos o unidades) simulando una neurona biológica (Farifteh et al., 2007). Se evaluaron las variables que resultaron con significancia estadística, con el fin de obtener un análisis comparativo con técnicas de regresión común para determinar contenido de humedad volumétrica en el suelo. Para ello se usó el software Matlab 7.1 ingresando los datos de forma matricial para su posterior procesamiento en software con la herramienta de RNA predeterminada (Farifteh et al., 2007; Demuth y Beale, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad del contenido de humedad volumétrica del suelo

Los contenidos de humedad en el suelo fueron muy variados y con alta dispersión entre y cada etapa. La Etapa I se caracteriza por un contenido de humedad volumétrica de suelo muy variado durante el año de mediciones en las nueve campañas realizadas. En la Tabla 1 se puede observar medias, desviación estándar (D.E) y el coeficiente de variación (CV), estos parámetros muestran valores elevados, lo cual demuestra una alta dispersión, heterogeneidad y variación en el grupo de datos (Di Rienzo et al., 2012), siendo similar al estudio de Reedy and Scanlon, (2003), en la Etapa II, IIIa y IIIb se observa una tendencia similar. Dejando de manifiesto la alta variabilidad del contenido de humedad en el suelo, desde un punto de vista estacional y en las etapas de tratamientos de riego. El Anexo 3 en las tablas 1, 2, 3 y 4 se muestran todos los estadísticos de resumen por etapa.

Tabla 1. Parámetros estadísticos de resumen de todas las Etapas en investigación

Etapa	Variable	N	Media	D.E	CV
E. I	Da.	35	1,08	0,19	17,77
	H. Vol.	35	36,68	8,64	23,55
	CE _a	35	8,12	0,6	7,37
	arcilla (%)	35	27,09	2,27	8,39
	T ° suelo	35	10,73	4,54	42,34
	CE _a 25°C	35	11,34	1,33	11,7
E. II	CE _a	43	9,15	1,66	18,15
	T° am.	43	20,16	6,71	33,27
	T° s5	43	20,22	2,6	12,85
	T° s10	43	19,65	1,58	8,05
	T° s15	43	19,28	0,98	5,09
	Media T° s	43	19,72	1,63	8,25
	Da.	43	1,1	0,07	6
	H. Vol.	43	37,45	8,17	21,8
E. IIIa	arcilla (%)	43	26,79	3,16	11,79
	CE _a	106	9,05	1,62	17,94
	T° am	106	25,22	5,25	20,83
	T° s30	106	18,84	1,64	8,72
	T° s45	106	18,58	1,2	6,46
	T° s30-45	106	18,71	1,36	7,29
	T° s7,5	106	20,7	4,56	22,01
	T° s15	106	19,09	2,34	12,24
	T° s0-30	106	19,54	2,66	13,62
	H. Vol.	106	36,52	8,06	22,06
	arcilla (%)	106	25,02	4,94	19,75
E. IIIb	Da.	106	1,16	0,06	5,38
	CE _a	28	25,48	6,32	24,82
	T° am.	28	27,76	5,05	18,2
	T° s7,5	28	25,45	3,22	12,65
	T° s15	28	24,48	2,73	11,14
	T° s30	28	23,82	2,99	12,56
	T° s0-30	28	24,58	2,75	11,18
	T° s45	28	23,46	2,45	10,45
	T° s30-45	28	23,64	2,71	11,46
	Da.	28	1,58	0,04	2,79
	H. Vol.	28	35,21	10,5	29,82
	arcilla (%)	28	24,07	7,18	29,85

E. I: Etapa I; E. II: Etapa II; E.IIIa: Etapa III Campus El Nogal; E.IIIb: Etapa III Chillán Norte N: número de muestras analizadas; Media: media muestral; D.E; Desviación Estándar; CV: Coeficiente de Variación; Da: Densidad Aparente del suelo; CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; arcilla (%): contenido de arcilla del suelo; T° suelo: Temperatura media del suelo en los primeros 60 centímetros; T° s5: temperatura a 5 cm. de profundidad; T° s10: temperatura a 10 cm. de profundidad; media T° s: temperatura media entre hasta los 15 cm de profundidad; CE_a 25°C: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m, estandarizada a 25°C; T° s7,5: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; T° s15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s30: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; T° s45: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; T° s0-30: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; T° s30-45: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos.

Efecto de la Temperatura

La temperatura ambiente y del suelo en el periodo de mediciones de todas las etapas presenta una alta variabilidad, dispersión y heterogeneidad luego de observar las media, D.E y CV en la tabla 1.

Cómo era de esperarse las temperaturas más superficiales de suelo presentan la mayor variabilidad y dispersión, en comparación con profundidades mayores a 30 cm, dejando de manifiesto la mayor estabilidad térmica bajo esa profundidad (Padhi and Misra, 2011), este patrón es detectable en los postulados de Campbell (1995).

Conductividad Eléctrica aparente.

La Etapa I se desarrolló en un suelo andisol, de tal forma los valores de (CE_a) que se registraron durante 12 meses de medición. En la Tabla 1 los estadísticos de resumen (D.E, CV) no demuestran una dispersión y heterogeneidad alta respecto a un análisis comparativo con otras variables presentes en la misma tabla de resumen.

En la Etapa II la tendencia es diferente (mayor dispersión en los datos), pudiendo ser explicado por los contenidos de humedad diferenciados por riego, así como también la alta variabilidad de temperaturas ambiente y de suelo, considerando que estos factores influyen de manera directa en el comportamiento de la CE_a en el medio conductor (Amin et al., 2004; Brevik et al., 2006; Corwin y Lesch, 2005; Corwin et al., 2006; Hossain et al., 2010 ; Padhi and Misra, 2011; Reedy y Scanlon, 2003).

En la Etapa III (en sus tres sectores) la dispersión y heterogeneidad de los datos sigue un patrón similar a lo observado en la Etapa II, según estadísticos de resumen (D.E, CV) presentados en la Tabla 1.

Se presentan valores muy diferentes entre los sectores, ya que en el caso del Campus de Chillan los valores de CE_a son similares a los obtenidos en la Etapa I y II al tratarse de suelos Andisoles, en el caso del sector de Chillan Norte se trata de un Vertisol , validando estudios propuestos en estos suelos al monitorear la CE_a (Hossain et al., 2010; Reedy and Scanlon, 2003).

Correlación de Pearson

La correlación de Pearson se usó para conocer y establecer la relación entre variables. La correlación entre la CE_a , propiedades físicas y temperatura de suelo medida en cada una de las etapas del estudio.

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación para cada variable por etapa, en donde es posible ver la fuerte relación lineal positiva al correlacionar la CE_a con las variables Humedad volumétrica, contenido de arcillas y temperaturas en todas las profundidades, pudiendo ser empleado como un buen indicador para determinar la relación predictiva de las variables (Yilmaz and Kaynar, 2011). El Anexo 4 presenta en las tablas 5, 6, 7 y 8 las correlaciones de Pearson por cada etapa, en donde se pueden ver otras relaciones generadas entre variables.

Análisis de Regresión

Los modelos generados en base a regresiones lineales son ampliamente usados en estudios de estimación de humedad volumétrica de suelo en base a CE_a obteniendo buenos resultados (Hossain et al., 2010; Sudduth et al., 2005; Yilmaz y Kaynar, 2011).

Las ecuaciones de regresión, sus coeficientes de determinación (R^2) y el coeficiente de determinación ajustado al modelo (R^2 Ajustado) se muestran en la Tabla 3 y en el Anexo 5 se encuentran todos los estadísticos empleados en las regresiones por etapa. Al analizar las regresiones lineales simples entre Humedad volumétrica y CE_a como variable regresora, se obtuvieron R^2 bajos para todas las etapas, siendo coincidente con estudios de Hossain *et al.* (2010) y Sudduth *et al.* (2005), a excepción de la Etapa 1 con CE_a estandarizada a 25°C con un R^2 y la Etapa III (sector 3) que presenta un R^2 de 0,98, ratificando las tendencias observadas en otros estudios de suelos vertisoles (Hossain et al., 2010)

Tabla 2. Resumen de correlaciones de Pearson para las mediciones de Conductividad Eléctrica Aparente de suelos (CE_a) de las tres etapas de investigación, correlacionándolas con las propiedades físicas de suelo, temperaturas ambiente y de suelo a diferentes profundidades según la metodología desarrollada por etapa.

Variables Regresoras	CEa por Etapas del Ensayo			
	Etapa I	Etapa II	Etapa IIIa	Etapa IIIb
H. Vol.	0,59	0,6	0,68	0,98
%arcilla	0,21	0,44	0,63	-0,94
Da.	0,55	-0,09	-0,63	-0,94
T ° suelo	0,26	-	-	-
CEa. 25°C	0,37	-	-	-
T° am a	-	0,4	-	-
T° s5	-	0,38	-	-
T° s10a	-	0,28	-	-
T° s15a	-	0,14	-	-
mediaT° s	-	0,32	-	-
T° am.	-	-	0,02	-0,3
T° s7,5	-	-	0,2	0,25
T° s15	-	-	0,2	0,35
T° s30	-	-	0,11	0,36
T° s0-30	-	-	0,2	0,34
T° s45	-	-	0,22	0,27
T° s30-45	-	-	0,16	0,32

CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; Da: Densidad Aparente del suelo; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; T° suelo: Temperatura media del suelo en los primeros 60 centímetros; CE_a 25°C: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m, estandarizada a 25°C; T° am a: Temperatura ambiente en Celsius; T° s5: Temperatura de suelos a los 5 cm de profundidad; T° s10a: Temperatura de suelos a los 10 cm de profundidad; T° s15a: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s0-15: Temperatura media de suelos entre los 0 y 15 cm de profundidad; T° am: Temperatura ambiente en Celsius; T° s7,5: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; T° s15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s30: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; T° s45: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; T° s0-30: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; T° s30-45: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; Etapa IIIa: Etapa II Campus el Nogal; Etapa IIIb: Etapa III Chillán norte.

Reddy *et al.*, (2003) obtuvo un R^2 de 0,8 al estandarizar la CE_a , similar resultado se presentó en la Etapa I con CE_a estandarizada con la misma ecuación y a la vez se observa una tendencia similar a la presente en la Etapa III Chillán Norte, ya que dicho estudio se realiza de forma coincidente en un suelo Vertisol al igual con un R^2 de 0,9.

Analizando las regresiones lineales múltiples en la Tabla 3, es posible ver que al incorporar variables como el contenido de arcillas y temperaturas de

Tabla 3. Regresiones lineales simples y múltiples en las diferentes etapas de la investigación asociado a estadísticos de cada modelo.

Regresión	Etapas	N	R2	R2 Aj	ECMP
$y=8,56(CE_a)-32,83$	I	35	0,35	0,33	57,24
$y=4,98(CE_a+25^{\circ}C)-19,84$	I	35	0,59	0,57	35,75
$y=9,71(CE_a)+1,33(\%A)-1,1(T_s)-66,38$	I	35	0,8	0,79	20,68
$y=4,64(CE_a)+1,51(\%A)-56,82$	I	35	0,74	0,73	24,11
$y=2,93(CE_a)+10,66$	II	43	0,35	0,34	48,07
$y=2,74(CE_a)+0,82(\%A)-0,81(T_5)+6,81$	II	43	0,54	0,51	37,81
$y=3,39(CE_a)+5,85$	IIIa	106	0,47	0,46	36,15
$y=3,65(CE_a)-0,43(T_{am})-0,85(T_{7,5})+1,89(T_{30-45})-3,4$	IIIa	106	0,8	0,79	14,8
$y=1,63(CE_a)-6,36$	IIIb	28	0,97	0,96	4,63
$y=1,48(CE_a)-0,86(T_{15})+3,6(T_{30})-3,19(T_{45})+7,48$	IIIb	28	0,99	0,99	2,4

CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; Tam: Temperatura ambiente en Celsius; Ts: Temperatura media de suelos entre 0 y 60 cm de profundidad; T5: Temperatura de suelos a 5 cm de profundidad; T7,5: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; T15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T30: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; T45: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; T° s0-30: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; T30-45: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; y: Humedad Volumétrica de Suelos; ; %A: contenido de arcilla del suelo.

ambiente y suelo, según corresponda a etapas, se obtienen R² considerablemente más robustos en comparación con regresiones lineales simples. Sudduth et al., (2005) en su estudio incorpora el contenido de arcilla, arena y la capacidad de intercambio catiónico del suelo y obtiene R² de 0,3 a 0,79 según sector y Padhi y Misra., (2011) integra en sus modelos las temperaturas superficiales de suelo llegando a obtener un R² de 0,98 en un suelo arcillo-arenoso, lo que deja de manifiesto la relación entre la CE y las propiedades físicas, químicas y de temperatura del suelo, validando la interacción de éstas variables de suelo con la CE_a.

Redes Neuronales (RNA) mediante Matlab

Las Redes neuronales desde siempre se usan para predecir (Zou et al., 2010). Se obtuvo una serie de RNA a través del software Matlab (Farifteh et al., 2007), de las cuales se utilizó la variable CE_a por sí sola para entrenar las RNA y también a las mismas variables regresoras con significancia estadística usadas en las regresiones lineales múltiples.

En la Tabla 4 se muestran las RNA entrenadas en el toolbox de Matlab con las variables por etapa, donde destacan en la Etapa I la N°2 y 11 con R² de 0,67 y

0,91 respectivamente, del mismo modo en la Etapa II se identifica las RNA N°13 y 18 con R^2 de 0,8 y 0,93. La Etapa III Campus el Nogal se diferencia con un R^2 de 0,81 y 0,98 en las RNA N°20 y 24. La Etapa III Chillán Norte muestra como las mejores RNA predictivas a las N° 25 y 28 con un R^2 de 0,99 de forma respectiva. Todas las RNA presentan R^2 elevado al predecir la humedad volumétrica en los suelos estudiados, por lo cual se posiciona como una poderosa herramienta ya que incluso pueden ser usadas como un directo sustituto de modelos de regresión convencional, es de considerar que no necesariamente al poseer un mayor número de neuronas se obtiene mejores resultados (Yilmaz and Kaynar, 2011), pudiendo llevar incluso a malas estimaciones, tendencia que observa en la tabla 4, ya que en los casos de las RNA con mayor número de neuronas no necesariamente presentan mejor bondad de ajuste.

Comparativa Gráfica entre Regresiones y RNA

Con el objetivo de comprender las estimaciones de Humedad volumétrica de suelos se presentan en la Figura 1 una comparativa de resumen entre las Regresiones Lineales múltiples y las RNA.

Al analizar en detalle la comparación es posible apreciar que todos los modelos presentan una buena estimación de humedad, pero de forma clara las RNA presentan estimaciones que se acercan más al control de humedad.

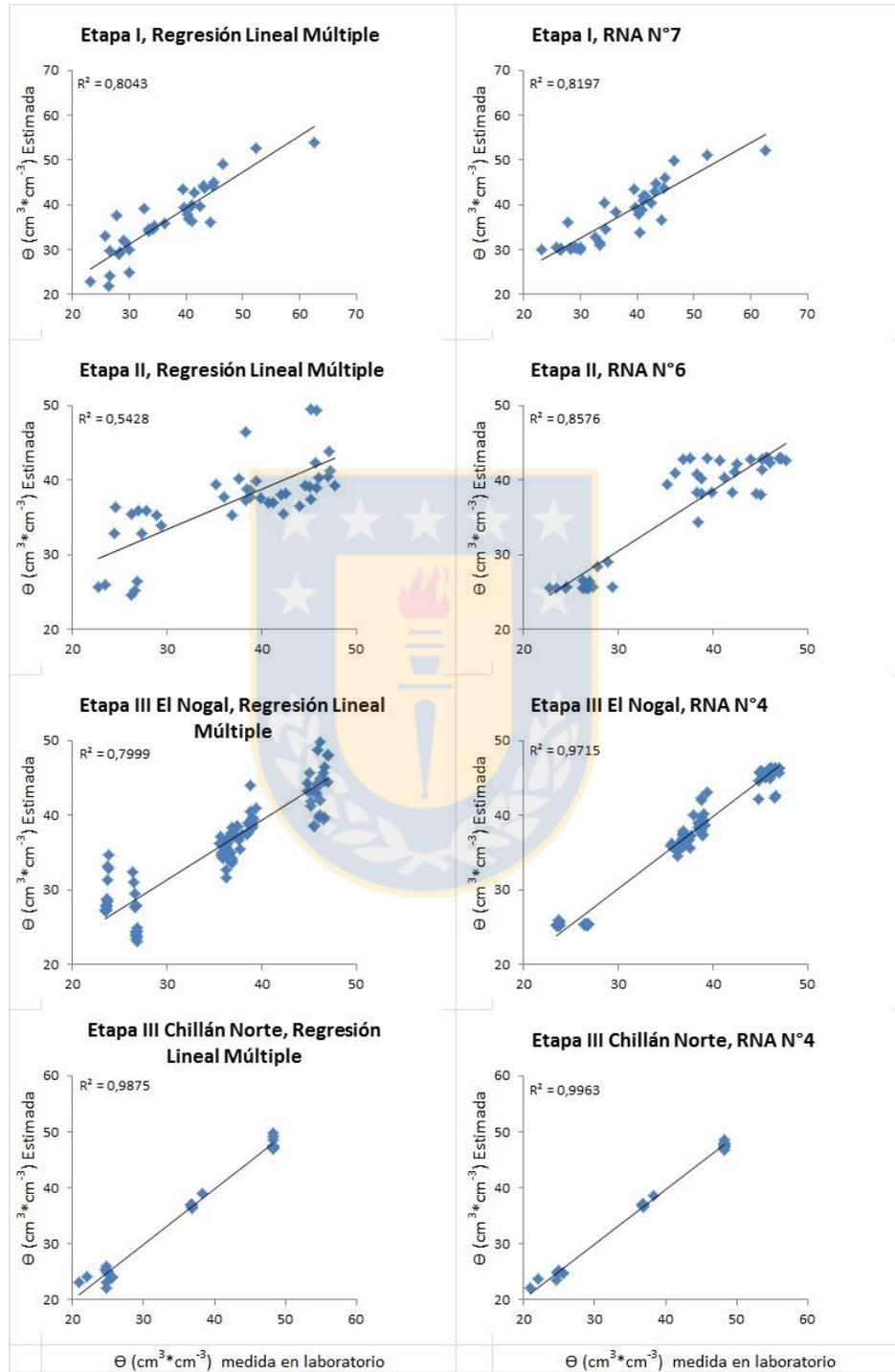
Los modelos de regresión lineal múltiple, si bien son una buena alternativa, sus capacidades predictivas son sesgadas a los límites donde es generado el modelo. Por otro lado las RNA pueden considerarse, al ser entrenadas de forma correcta, como un “experto” que es capaz de detectar y proyectar situaciones (Yilmaz and Kaynar, 2011), siendo una ventaja comparativa respecto a otros modelos.

Tabla 7. Redes Neuronales que estiman Humedad volumétrica de suelo en cada etapa del estudio y resumen de variables empleadas para el entrenamiento previo.

Eta	N°	N	CE _a	CE _a 25°C	T° Suelo	% Arcilla	T° 5 cm.	T° am.	T° s7,5	T° s30- 45	T° s15	T° s30	T° s45	R ²
EI	1	5	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,56
	2	10	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,67
	3	20	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,63
EI	4	5	Si	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	0,89
	5	10	Si	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	0,94
	6	20	Si	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	0,92
EI	7	5	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,88
	8	10	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,73
	9	20	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,85
EI	10	5	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	0,87
	11	10	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	0,91
	12	20	No	Si	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	0,85
EII	13	5	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,805
	14	10	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,762
	15	20	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,743
EII	16	5	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	0,899
	17	10	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	0,867
	18	20	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	0,900
EIII Nogal	19	5	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,786
	20	10	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,811
	21	20	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,809
EIII Nogal	22	5	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	0,989
	23	10	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	0,957
	24	20	Si	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	0,974
EIII C. Norte	25	5	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,99
	26	10	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,96
	27	20	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	0,97
EIII C. Norte	28	5	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	0,99
	29	10	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	0,99
	30	20	Si	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	0,99

Eta: Etapas del Ensayo; EI: Etapa I; EII: Etapa II; EIII Nogal: Etapa III Campus El Nogal; EIII C. Norte: Etapa III Chillán Norte; N°: Número de RNA; N: número de neuronas en la red; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹); CE_a 25°C: Conductividad Eléctrica Aparente estandarizada a 25°C.; T° 5 cm: temperatura de suelo en Celsius a 5 cm. de profundidad); T° am: temperatura ambiente en Celsius; T° s7,5: temperaturas en Celsius a 7,5 cm de profundidad en suelo; T° s30-45: Temperatura en Celsius entre 30 y 45 cm. de profundidad en suelo); T° s15: temperatura en Celsius a 15 cm. de profundidad en suelo; T° s30: temperaturas en Celsius a 30 cm de profundidad en suelo; T° s45: Temperatura en Celsius a 45 cm. de profundidad en suelo; %Arcilla: porcentaje de arcilla del suelo; R²: coeficiente de determinación de la RNA.

Figura 1. Gráficos Comparativos entre los modelos de Regresión Lineal Múltiple y la Redes Neuronales (RNA) de estimación de humedad volumétrica estimada v/s medida en laboratorio.



CONCLUSIÓN

Basándose en los resultados obtenidos en la investigación, es posible concluir y proyectar lo siguiente:

1. Las Redes Neuronales presentan una mejor capacidad de estimación de humedad volumétrica en base a mediciones de conductividad eléctrica aparente, en comparación con regresiones
2. Inducción Electromagnética se posiciona como una poderosa herramienta, no invasiva de medición de Humedad volumétrica en suelos Andisoles y Vertisoles en Chile y el Mundo.
3. La temperatura del suelo es una variable que aporta mayor capacidad predictiva a los modelos generados con redes neuronales y regresiones lineales, siendo las temperaturas superficiales del suelo las que aportan una mejora significativa, debido a que son éstas las que poseen una mayor variación dentro de la temporada e incluso durante el día, influyendo de forma directa en las mediciones de conductividad eléctrica aparente.
4. El comportamiento de la CE_a resultó diferente entre un suelos Andisoles y un Vertisol, siendo el primero más influenciado por los contenidos de humedad y temperaturas de suelo.
5. Los Resultados de la Investigación son punto de partida para la generación de modelado espacial de contenido de agua volumétrico en suelos Andisoles y Vertisoles en Chile, así como otros suelos, a través de monitoreo de CE_a .

REFERENCIAS

1. Amin, M. S. M., Aimrun, W., Eltaib, S. M., and Chan, C. S. (2004). Spatial soil variability mapping using electrical conductivity sensor for precision farming of rice. *International Journal of Engineering and Technology* **1**, 47-57.
2. Andre, F., van Leeuwen, C., Saussez, S., Van Durmen, R., Bogaert, P., Moghadas, D., de Ressaquier, L., Delvaux, B., Vereecken, H., and Lambot, S. (2010). High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics*.
3. Bannari, A., Guedon, A. M., El-Harti, A., Cherkaoui, F. Z., and El-Ghmari, A. (2008). Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land (EO-1) Imaging Sensor. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **39**, 2795-2811.
4. Brevik, E. C., Fenton, T. E., and Lazari, A. (2006). Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture* **7**, 393-404.
5. Campbell, G. S. (1995). Introducción a la Biofísica Ambiental. *EUB. Barcelona, España*.
6. CIREN (1992). Distritos Agroclimáticos Regiones VI, VIII y Metropolitana.
7. CIREN (1999). Estudio Agrológico VIII Región N°121.
8. Clevers, J., Kooistra, L., and Schaepman, M. E. (2007). Canopy water content retrieval from hyperspectral remote sensing. pp. 12-14.
9. Corwin, D. L., and Lesch, S. M. (2005). Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture* **46**, 103-133.

10. Corwin, D. L., Lesch, S. M., Oster, J. D., and Kaffka, S. R. (2006). Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma* **131**, 369-387.
11. Cruzat (1978). Reconocimiento y caracterización física y química de los suelos de la Estación Experimental de la Escuela de Agronomía, de la Universidad de Concepción Chillan. *Tesis, Ing. Agrónomo. Universidad de Concepción, Esc. Agron. Chillán, Chile.*
12. Dalton, F. N. (1992). Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*, 143-167.
13. Deorge (1999). Management zone concepts. *Information Agriculture Conference SSMG-2, Perdue.*
14. Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., and Robledo, C. W. (2012). InfoStat.
15. Evett, S., Ibragimov, N., Kamilov, B., Esanbekov, Y., Sarimsakov, M., Shadmanov, J., Mirhashimov, R., Musaev, R., Radjabov, T., and Muhammadiev, B. (2007). Neutron moisture meter calibration in six soils of Uzbekistan affected by carbonate accumulation. *Vadose Zone Journal* **6**, 406-412.
16. Farifteh, J., Van der Meer, F., Atzberger, C., and Carranza, E. J. M. (2007). Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). *Remote Sensing of Environment* **110**, 59-78.
17. Fekadu, D., Bediye, S., Kehaliw, A., Daba, T., Kitaw, G., and Assefa, G. (2010). Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) for determination of chemical entities of natural pasture from Ethiopia. *Agriculture & Biology Journal Of North America* **1(5)**, 919-922.

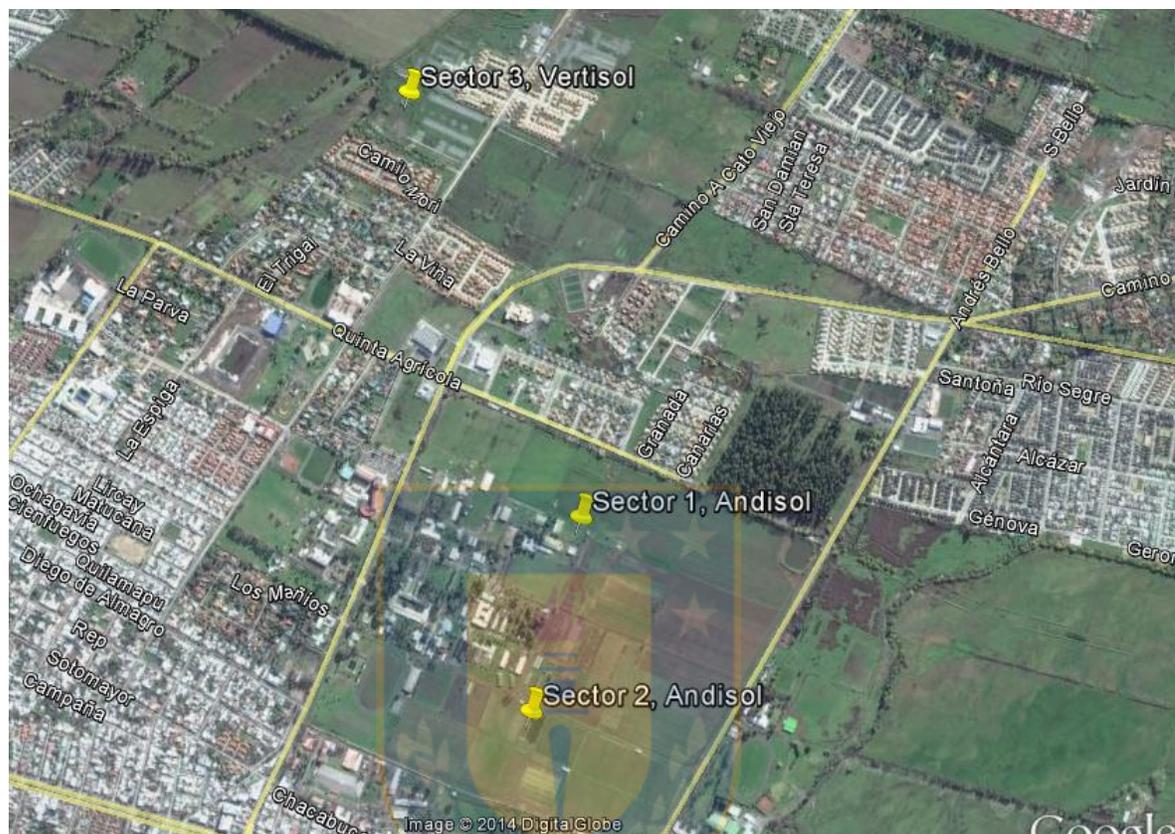
18. Hossain, M. B., Lamb, D. W., Lockwood, P. V., and Frazier, P. (2010). EM38 for volumetric soil water content estimation in the root-zone of deep vertosol soils. *Computers and Electronics in Agriculture* **74**, 100-109.
19. Hunt, E. R., Hively, W. D., Fujikawa, S. J., Linden, D. S., Daughtry, C. S. T., and McCarty, G. W. (2010). Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing* **2**, 290-305.
20. Inman, D. J., Freeland, R. S., Yoder, R. E., Ammons, J. T., and Leonard, L. L. (2001). Evaluating GPR and EMI for morphological studies of loessial soils. *Soil science* **166**, 622.
21. Johnson, C. K., Mortensen, D. A., Wienhold, B. J., Shanahan, J. F., and Doran, J. W. (2003). Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system.
22. Mwale, S. S., Azam-Ali, S. N., and Sparkes, D. L. (2005). Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil water measurement? *Soil use and management* **21**, 340-347.
23. Padhi, J., and Misra, R. K. (2011). Sensitivity of EM38 in determining soil water distribution in an irrigated wheat field. *Soil and Tillage Research* **117**, 93-102.
24. Pautasso, J. M., Albarenque, S., Schulz, G., Kemmerer, A. C., Bedendo, D. J., and Melchiori, R. J. M. (2010). Delimitación de zonas de manejo mediante variable de suelo y validación para maíz. *Curso Internacional de Agricultura de Precisión. 9. Expo de Máquinas Precisas. 4. 2010 07 14-16, 14, 15 y 16 de julio de 2010. Manfredi, Córdoba. AR.*
25. Pierce, F. J., and Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy* **67**, 1-85.
26. Reedy, R. C., y Scanlon, B. R. (2003). Soil water content monitoring using electromagnetic induction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **129**, 1028-1039.

27. Robinson, J. B., Silburn, D. M., Foley, J. J., and Orange, D. D. (2010). Root zone soil moisture content in a Vertosol is accurately and conveniently measured by electromagnetic induction measurements with an EM38. *Proceedings of the 19th World Congress Of Soil Science Symposium 1.5.1*, 78-81.
28. Rodriguez-Abad, I., Martinez-Sala, R., Capuz Lladri³, R., D  ez Barra, R., and Garcia-Garcia, F. (2010). Estudio de la variación del contenido de humedad en el Pinus pinaster Ait. por medio de la técnica no destructiva del georradar. *Materiales de construcción* **61**, 143-156.
29. Sandoval, M., Dorner, O., Seguel, J., Cuevas, J., and Rivera, D. (2012). Métodos de Análisis Físicos de Suelo. *Publicaciones Departamento de Suelos N 5. Universidad de Concepción. Chillán, Chile.*
30. Serrano, J. M., Peña, J. O., Marques da Silva, J. R., and Shaidian, S. (2010). Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* **73**, 7-16.
31. Singh, T. N., Kanchan, R., Verma, A. K., and Singh, S. (2003). An intelligent approach for prediction of triaxial properties using unconfined uniaxial strength. *Min Eng J* **5**, 12-16.
32. Siri-Prieto, G., Reeves, D. W., Shaw, J. N., and Mitchell, C. C. (2006). World's oldest cotton experiment: relationships between soil chemical and physical properties and apparent electrical conductivity. *Communications in soil science and plant analysis* **37**, 767-786.
33. Sudduth, K. A., Drummond, S. T., and Kitchen, N. R. (2001). Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* **31**, 239-264.
34. Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D. E., Palm, H. L., Pierce, F. J., and Schuler, R. T. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* **46**, 263-283.

35. Tolk, J. A., and Evett, S. R. (2009). Lysimetry versus neutron moisture meter for evapotranspiration determination in four soils. *Soil Science Society of America Journal* **73**, 1693-1698.
36. Triantafyllis, J., and Lesch, S. M. (2005). Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. *Computers and Electronics in Agriculture* **46**, 203-237.
37. Wijewardana, Y., and Galagedara, L. W. (2010). Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology* **391**, 24-33.
38. Yilmaz, I. k., and Kaynar, O. (2011). Multiple regression, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potential of clayey soils. *Expert Systems with Applications* **38**, 5958-5966.
39. Zou, P., Yang, J., Fu, J., Liu, G., and Li, D. (2010). Artificial neural network and time series models for predicting soil salt and water content. *Agricultural Water Management* **97**, 2009-2019.

ANEXOS

Anexo 1. Mapa con demarcación de los sitios de Estudio. Sitio 1 y 2 Campus Chillan de la Universidad de Concepción, y sitio 3 Chillán Norte.



Anexo 2. Características descriptivas del equipo de inducción electromagnética CMD-1. Fuente GF Instruments.

Características	Especificaciones
Rangos de medida	1000 mS/m
Exactitud de la medición	± 4% en 50 mS/m
Frecuencia de operación	30 kHz
Profundidades efectivas	1,5 m / 0,75 m
Espaciamiento entre bobinas	0,98 m
Longitud y peso de la sonda	1,065 m, 2,5 kg
Temperatura de trabajo	-10 °C hasta +50 °C

Anexo 3. Tablas de parámetros estadísticos de resumen por Etapa.

Tabla 1. Parámetros estadísticos de resumen de la Etapa I, sector 1.

Var. E. I	N	Media	D.E	E.E	CV	Min	Max	SC
Da.	35	1,08	0,19	0,03	17,77	0,93	1,48	42,02
H. Vol.	35	36,68	8,64	1,46	23,55	23,07	62,63	49623,04
CE _a	35	8,12	0,6	0,1	7,37	7,01	9,05	2319,12
%arcilla	35	27,09	2,27	0,38	8,39	25	31,7	25869,31
T ° suelo	35	10,73	4,54	0,77	42,34	6,16	17,01	4733,46
CE _a 25°C	35	11,34	1,33	0,22	11,7	9,05	13,53	4560,6

Var. E. I: Variables estudiadas en la Etapa II; N: número de muestras analizadas; Media: media muestral; D.E; Desviación Estándar; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación; Min: valor mínimo de las muestras; Max: valor máximo de las muestras; SC: Suma de Cuadrados; Da: Densidad Aparente del suelo; CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; T ° suelo: Temperatura media del suelo en los primeros 60 centímetros; CE_a 25°C: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m, estandarizada a 25°C; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de resumen de la Etapa II, sector 1 y 2.

Var. E. II	N	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx	SC
CE _a	43	9,15	1,66	0,25	18,15	5,72	13,76	3711,9
T° am.	43	20,16	6,71	1,02	33,27	11	30,6	19371,4
T° s5	43	20,22	2,6	0,4	12,85	15,2	25,2	17870,0
T° s10	43	19,65	1,58	0,24	8,05	15,3	22,5	16706,5
T° s15	43	19,28	0,98	0,15	5,09	15,7	21,5	16030,5
mediaT° s	43	19,72	1,63	0,25	8,25	15,87	22,9	16830,5
Da.	43	1,1	0,07	0,01	6	0,99	1,24	52,1
H. Vol.	43	37,45	8,17	1,25	21,8	22,75	47,77	63114,3
%arcilla	43	26,79	3,16	0,48	11,79	19,07	29,08	31286,0

Var. E. II: Variables estudiadas en la Etapa II; N: número de muestras analizadas; Media: media muestral; D.E.; Desviación Estándar; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación; Min: valor mínimo de las muestras; Max: valor máximo de las muestras; SC: Suma de Cuadrados; CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; T° am: Temperatura ambiente en Celsius; T° s5: Temperatura de suelos a los 5 cm de profundidad; T° s10: Temperatura de suelos a los 10 cm de profundidad; T° s15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s0-15: Temperatura media de suelos entre los 0 y 15 cm de profundidad;; Da: Densidad Aparente del suelo; T° suelo: Temperatura media del suelo en los primeros 60 centímetros; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo.

Tabla 3. Parámetros estadísticos de resumen de la Etapa III Campus el Nogal, sector 1 y 2.

Var. E.IIIa	n	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx	SC
CE _a	106	9,05	1,62	0,16	17,94	5,58	13,87	8955,05
T° am	106	25,22	5,25	0,51	20,83	13,68	33,61	70303,91
T° s30	106	18,84	1,64	0,16	8,72	16,5	21,98	37914,28
T° s45	106	18,58	1,2	0,12	6,46	16,67	21,61	36738,32
T° s30-45	106	18,71	1,36	0,13	7,29	16,58	21,79	37302,23
T° s7,5	106	20,7	4,56	0,44	22,01	12,1	28,3	47611,96
T° s15	106	19,09	2,34	0,23	12,24	15,47	24,07	39197,9
T° s0-30	106	19,54	2,66	0,26	13,62	14,82	24,44	41233,67
H. Vol.	106	36,52	8,06	0,78	22,06	23,46	47,03	148201,4
%arcilla	106	25,02	4,94	0,48	19,75	19,07	29,08	68897,79
Da.	106	1,16	0,06	0,01	5,38	1,11	1,24	144,16

Var. E. IIIa: Variables estudiadas en la Etapa III Campus El Nogal; N: número de muestras analizadas; Media: media muestral; D.E.; Desviación Estándar; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación; Min: valor mínimo de las muestras; Max: valor máximo de las muestras; S.C.: Suma de Cuadrados, CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; T° am: Temperatura ambiente en Celsius; T° s7,5: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; T° s15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s30: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; T° s45: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; T° s0-30: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; T° s30-45: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; ; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; Da: Densidad Aparente del suelo.

Tabla 4. Parámetros estadísticos de resumen de la Etapa III Chillán Norte, sector 3

Var. E. IIIb	n	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx	SC
CE _a	28	25,48	6,32	1,19	24,82	16,43	33,93	19250,8
T° am.	28	27,76	5,05	0,95	18,2	22,39	38,3	22266,33
T° s7,5	28	25,45	3,22	0,61	12,65	19,36	31,6	18415,8
T° s15	28	24,48	2,73	0,52	11,14	20,03	31,49	16986,83
T° s30	28	23,82	2,99	0,57	12,56	20,36	31,49	16128,79
T° s0-30	28	24,58	2,75	0,52	11,18	19,91	31,52	17127,66
T° s45	28	23,46	2,45	0,46	10,45	20,75	30,31	15568,73
T° s30-45	28	23,64	2,71	0,51	11,46	20,55	30,9	15844,05
Da.	28	1,58	0,04	0,01	2,79	1,54	1,63	69,95
H. Vol.	28	35,21	10,5	1,98	29,82	20,87	48,22	37683,46
%arcilla	28	24,07	7,18	1,36	29,85	17,96	32,22	17616,36

Var. E. IIIb: Variables estudiadas en la Etapa III Chillán Norte; N: número de muestras analizadas; Media: media muestral; D.E.; Desviación Estándar; E.E: Error Estándar; CV: Coeficiente de Variación; Min: valor mínimo de las muestras; Max: valor máximo de las muestras; SC: Suma de Cuadrados; CE_a: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; T° am: Temperatura ambiente en Celsius; T° s7,5: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; T° s15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s30: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; T° s45: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; T° s0-30: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; T° s30-45: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; ; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; Da: Densidad Aparente del suelo.

Anexo 4. Tablas de correlación de Pearson para todas las variables de las etaoas del Ensayo.

Tabla 5. Matriz de correlación de Pearson entre Conductividad Eléctrica aparente (CE_a), Conductividad Eléctrica Aparente estandarizada a 25°C ($CE_a 25^\circ C$) y propiedades físicas del suelo (%Arcilla, Densidad Aparente y Humedad volumétrica de suelo), además de la temperatura promedio de suelo en 60 cm de profundidad, en la Etapa I, sector 1.

Etapa I	Da	CE_a	%Arcilla	T ° suelo	$CE_a 25^\circ C$	H. Vol.
Da	1	0,55	0	1	0,7	0
CE_a	0,1	1	0,23	0,13	0,03	0
%Arcilla	0,9	0,21	1	0,99	0,45	0
T ° suelo	0	0,26	0	1	0	0,02
$CE_a 25^\circ C$	0,07	0,37	0,13	-0,8	1	0
H. Vol	0,47	0,59	0,49	-0,4	0,77	1

Da: Densidad Aparente del suelo; CE_a : Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; T ° suelo: Temperatura media del suelo en los primeros 60 centímetros; $CE_a 25^\circ C$: Conductividad Eléctrica aparente en ms/m, estandarizada a 25°C; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos.

Tabla 6. Matriz de correlación de Pearson entre Conductividad Eléctrica aparente (CE_a) y propiedades físicas del suelo (%Arcilla, Densidad Aparente y Humedad volumétrica de suelo), además de la temperatura en tres profundidades con termómetro digital. Etapa II, sector 1 y 2.

Etapa II	CE_a	T°am.	T° s5	T° s10	T° s15	T° s0-15	Da.	H. vol	%Arcilla
CE_a	1	0,01	0,01	0,07	0,37	0,04	0,57	2,60E-05	3,10E-03
T° am.	0,4	1	1,00E-09	5,80E-04	0,18	1,00E-05	0,11	0,64	0,29
T° s5	0,38	0,78	1	0	1,60E-06	0	0,64	0,64	0,76
T° s10	0,28	0,5	0,91	1	0	0	0,92	0,68	0,7
T° s15	0,14	0,21	0,66	0,88	1	2,60E-12	0,49	0,95	0,21
T° s0-15	0,32	0,62	0,96	0,99	0,84	1	0,94	0,69	0,84
Da.	-0,09	0,25	0,07	-0,02	-0,11	0,01	1	0,43	4,50E-06
H. vol	0,6	-0,07	-0,07	-0,07	-0,01	-0,06	-0,12	1	3,10E-05
%Arcilla	0,44	-0,16	-0,05	0,06	0,19	0,03	-0,64	0,59	1

CE_a : Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; T° am: Temperatura ambiente en Celsius; T° s5: Temperatura de suelos a los 5 cm de profundidad; T° s10: Temperatura de suelos a los 10 cm de profundidad; T° s15: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; T° s0-15: Temperatura media de suelos entre los 0 y 15 cm de profundidad;; Da: Densidad Aparente del suelo; T° suelo: Temperatura media del suelo en los primeros 60 centímetros; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo.

Tabla 7. Matriz de correlación de Pearson entre Conductividad Eléctrica aparente (CE_a) y propiedades físicas del suelo (%Arcilla, Densidad Aparente y Humedad volumétrica de suelo), además de la temperatura en cuatro profundidades con mini estaciones WatchDog. Etapa III Campus El Nogal, sector 1 y 2.

Etapa IIIa	CE_a	$T^\circ am$	$T^\circ s30$	$T^\circ s45$	$T^\circ s30-45$	$T^\circ s7,5$	$T^\circ s15$	$T^\circ s0-30$	H. vol	%Arcilla	Da
CE_a	1	0,83	0,26	0,03	0,1	0,04	0,04	0,04	0	0	0
$T^\circ am$	0,02	1	4,00E-03	2,30E-03	2,10E-03	6,90E-11	3,90E-04	1,20E-07	1,30E-06	3,70E-07	3,70E-07
$T^\circ s30$	0,11	0,28	1	0	0	0	0	0	0,97	0,51	0,51
$T^\circ s45$	0,22	0,29	0,84	1	0	5,20E-07	0	0	0,09	0,11	0,11
$T^\circ s30-45$	0,16	0,3	0,97	0,94	1	5,20E-11	0	0	0,45	0,27	0,27
$T^\circ s7,5$	0,2	0,58	0,63	0,46	0,58	1	0	0	1,30E-03	0,03	0,03
$T^\circ s15$	0,2	0,34	0,88	0,66	0,82	0,88	1	0	0,24	0,39	0,39
$T^\circ s0-30$	0,2	0,49	0,82	0,63	0,77	0,96	0,97	1	0,03	0,11	0,11
H. vol	0,68	-0,45	3,90E-03	0,16	0,07	-0,31	-0,12	-0,21	1	0	0
%Arcilla	0,63	-0,47	-0,06	-0,15	-0,11	-0,21	-0,09	-0,16	0,81	1	0
Da	-0,63	0,47	0,06	0,15	0,11	0,21	0,09	0,16	-0,81	-1	1

CE_a : Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; $T^\circ am$: Temperatura ambiente en Celsius; $T^\circ s7,5$: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; $T^\circ s15$: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; $T^\circ s30$: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; $T^\circ s45$: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; $T^\circ s0-30$: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; $T^\circ s30-45$: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; ; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; Da: Densidad Aparente del suelo

Tabla 8. Matriz de correlación de Pearson entre Conductividad Eléctrica aparente (CE_a) y propiedades físicas del suelo (%Arcilla, Densidad Aparente y Humedad volumétrica de suelo), además de la temperatura en cuatro profundidades con mini estaciones WatchDog. Etapa III Chillán Norte, sector 3.

E. IIIb	CE_a	$T^{\circ}am$	$T^{\circ}s7,5$	$T^{\circ}s15$	$T^{\circ}s30$	$T^{\circ}s0-30$	$T^{\circ}s45$	$T^{\circ}s30-45$	Da.	H. vol.	%arcilla
CE_a	1	0,12	0,2	0,07	0,06	0,07	0,17	0,1	0	0	0
$T^{\circ}am$	-0,3	1	7,40E-05	5,00E-02	6,00E-01	2,00E-02	6,70E-01	6,30E-01	1,50E-01	1,20E-01	1,50E-01
$T^{\circ}s7,5$	0,25	0,68	1	1,60E-08	1,10E-03	5,80E-10	3,10E-03	1,70E-03	0,48	0,24	0,48
$T^{\circ}s15$	0,35	0,38	0,84	1	1,40E-12	0,00E+00	1,30E-10	7,20E-12	0,52	0,05	0,52
$T^{\circ}s30$	0,36	0,1	0,58	0,93	1	9,90E-11	0	0	0,63	0,03	0,63
$T^{\circ}s0-30$	0,34	0,43	0,88	1	0,9	1	3,40E-09	3,60E-10	5,00E-01	0,06	0,5
$T^{\circ}s45$	0,27	0,08	0,54	0,9	0,98	0,86	1	0	0,99	0,12	0,99
$T^{\circ}s30-45$	0,32	0,09	0,57	0,92	1	0,89	0,99	1	0,78	0,06	0,78
Da.	-0,94	0,28	1,40E-01	-0,13	-0,1	-0,13	3,50E-03	-0,05	1	2,20E-11	0
H. vol.	0,98	-0,3	0,23	0,37	0,41	0,36	0,3	0,36	-0,91	1	2,20E-11
%arcilla	-0,94	0,28	-0,14	-0,13	-0,1	-0,13	3,50E-03	-0,05	1	-0,91	1

CE_a : Conductividad Eléctrica aparente en ms/m; $T^{\circ}am$: Temperatura ambiente en Celsius; $T^{\circ}s7,5$: Temperatura de suelos a los 7,5 cm de profundidad; $T^{\circ}s15$: Temperatura de suelos a los 15 cm de profundidad; $T^{\circ}s30$: Temperatura de suelos a los 30 cm de profundidad; $T^{\circ}s45$: Temperatura de suelos a los 45 cm de profundidad; $T^{\circ}s0-30$: Temperatura media de suelos entre los 0 y 30 cm de profundidad; $T^{\circ}s30-45$: Temperatura media de suelos entre los 30 y 45 cm de profundidad; H.Vol: Humedad Volumétrica de Suelos; ; %Arcilla: contenido de arcilla del suelo; Da: Densidad Aparente del suelo.

Anexo 5. Tablas de análisis estadísticos de regresiones lineales simples y múltiples.

Tabla 9. Análisis de regresión lineal simple entre Conductividad Eléctrica Aparente y humedad volumétrica de suelos y estadísticos asociados. Etapa I, sector 1.

Var. E. I	N	R2	R2 Aj.	ECMP
H. Vol.	35	0,35	0,33	57,24

N: número de muestras; R^2 : coeficiente de determinación; R^2 Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-Valor	CM	VIF
Const	-32,83	16,46	-66,31	0,66	-1,99	0,05		
CE_a	8,56	2,02	4,45	12,68	4,23	0	18,427	1

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a : Conductividad Eléctrica Aparente ($ms \cdot m^{-1}$).

Tabla 10. Análisis de regresión lineal simple entre Conductividad Eléctrica Aparente estandarizada a 25°C y humedad volumétrica de suelos, además de estadísticos asociados. Etapa I, sector 1

Var. E. I	N	R ²	R ² Aj.	ECMP
H. Vol.	35	0,59	0,57	35,75

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-Valor	CM	VIF
const	-19,84	8,32	-36,76	-2,91	-2,38	0,02		
CE _a 25°	4,98	0,73	3,5	6,47	6,84	0	46,426	1

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a 25°: Conductividad Eléctrica Aparente estandarizada (ms*m⁻¹).

Tabla 11. Análisis de regresión lineal simple entre Conductividad Eléctrica Aparente y humedad volumétrica de suelos, además de estadísticos asociados. Etapa II, sector 1 y 2.

Var. E.II.	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. Vol.	43	0,35	0,34	48,07

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p	CM	VIF
Const	10,66	5,74	-0,92	22,25	1,86	0,0703		
CE _a	2,93	0,62	1,68	4,18	4,74	<0,0001	22,98	1

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹).

Tabla 12. Análisis de regresión lineal simple entre Conductividad Eléctrica Aparente y humedad volumétrica de suelos, además de estadísticos asociados. Etapa III Campus El Nogal, sector 1 y 2.

Var. E.IIIa	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. Vol.	106	0,47	0,46	36,15

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	5,85	3,27	-0,63	12,34	1,79	0,0762		
CE _a	3,39	0,36	2,68	4,09	9,53	<0,0001	90,98	1

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹).

Tabla 13. Análisis de regresión lineal simple entre Conductividad Eléctrica Aparente y humedad volumétrica de suelos, además de estadísticos asociados. Etapa III Chillán Norte, sector 3.

Var. E. IIIb	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. Vol.	28	0,97	0,96	4,63

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	-6,36	1,58	-9,61	-3,1	-4,01	0,0005		
CE _a	1,63	0,06	1,51	1,76	27,01	<0,0001	703,5	1

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹).

Tabla 14. Análisis de regresión lineal múltiple para estimar humedad volumétrica de suelos con conductividad eléctrica aparente, porcentaje de arcilla y temperatura del suelo como variables regresoras, además de estadísticos asociados. Etapa I, sector 1.

Var. E. I	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. Vol.	35	0,8	0,79	20,68

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	-66,38	11,31	-89,44	-43,31	-5,87	<0,0001		
CE _a	9,71	1,22	7,23	12,19	7,97	<0,0001	64,62	1,13
%arcilla	1,33	0,31	0,7	1,96	4,3	0,0002	20,96	1,05
T° s	-1,1	0,16	-1,42	-0,78	-7,02	<0,0001	50,77	1,08

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹); %Arcilla: porcentaje de arcilla del suelo; T° s: media de temperatura en Celsius en una profundidad de 0-60 cm.

Tabla 15. Análisis de regresión lineal múltiple para estimar humedad volumétrica de suelos con conductividad eléctrica aparente estandarizada a 25°C y porcentaje de arcilla del suelo como variables regresoras, además de estadísticos asociados. Etapa I, sector 1.

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. Vol.	35	0,74	0,73	24,11

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	-56,82	10,77	-78,75	-34,88	-5,28	<0,0001		
%arcilla	1,51	0,34	0,81	2,21	4,38	0,0001	20,61	1,02
CE _a 25°C	4,64	0,59	3,44	5,84	7,86	<0,0001	61,91	1,02

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹); %Arcilla: porcentaje de arcilla del suelo.

Tabla 16. Análisis de regresión lineal múltiple con Stepwise para estimar humedad volumétrica de suelos con conductividad eléctrica aparente, porcentaje de arcilla y temperatura superficial de suelo como variables regresoras, además de estadísticos asociados. Etapa II, sector 1 y 2.

Var. E.II	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. Vol.	43	0,54	0,51	37,81

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	6,81	10,48	-14,39	28,02	0,65	0,5196		
CE _a	2,74	0,66	1,41	4,06	4,17	0,0002	19,97	1,55
%arcilla	0,82	0,32	0,17	1,47	2,57	0,0141	9,46	1,33
T° s5	-0,81	0,38	-1,57	-0,05	-2,15	0,0375	7,55	1,25

Error cuadrático medio: 32,119683

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹); %Arcilla: porcentaje de arcilla del suelo; T° s5: temperatura en Celsius a 5 cm. de profundidad en el suelo.

Tabla 17. Análisis de regresión lineal múltiple con Stepwise para estimar humedad volumétrica de suelos a través de conductividad eléctrica aparente, temperatura ambiente y diferentes temperaturas de suelo como variables regresoras, además de estadísticos asociados. Etapa III Campus El Nogal, sector 1 y 2.

Var. E. IIIa	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
H. Vol.	106	0,8	0,79	14,8	583,64	599,62

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	-3,4	5,56	-14,43	7,63	-0,61	0,5426		
CE _a	3,65	0,23	3,2	4,1	16,03	<0,0001	258,37	1,06
T° am	-0,43	0,08	-0,6	-0,26	-5,08	<0,0001	29,6	1,54
T° s7,5	-0,85	0,12	-1,08	-0,62	-7,35	<0,0001	57,44	2,16
T° s30-45	1,89	0,33	1,25	2,54	5,82	<0,0001	37,51	1,53

Error cuadrático medio: 13,507496

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹); T° am: temperatura ambiente en Celsius; T° s7,5: temperaturas en Celsius a 7,5 cm de profundidad en suelo; T° s30-45: Temperatura en Celsius entre 30 y 45 cm. de profundidad en suelo.

Tabla 18. Análisis de regresión lineal múltiple con Stepwise para estimar humedad volumétrica de suelos a través de conductividad eléctrica aparente y diferentes temperaturas de suelo como variables regresoras, además de estadísticos asociados. Etapa III Chillán Norte, sector 3.

Var. E. IIIb	N	R ²	R ² Aj	ECMP
H. vol.	28	0,99	0,99	2,4

N: número de muestras; R²: coeficiente de determinación; R² Aj: coeficiente de determinación ajustado al modelo; ECMP: Error cuadrático medio de predicción; H. Vol: Humedad volumétrica del suelo.

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CM	VIF
const	7,48	3,75	-0,27	15,22	2	0,058		
CE _a	1,48	0,05	1,39	1,58	31,64	<0,0001	963,57	1,47
T° s30	3,6	0,59	2,38	4,83	6,09	<0,0001	39,6	52,29
T° s45	-3,19	0,61	-4,44	-1,93	-5,25	<0,0001	30,42	37
T° s15	-0,86	0,25	-1,37	-0,36	-3,51	0,0019	15,88	7,49

Error cuadrático medio: 1,617786

E.E: Error Estándar; p-Valor: valor p de significancia estadística; CM: CpMallows; CE_a: Conductividad Eléctrica Aparente (ms*m⁻¹); T° s15: temperatura en Celsius a 15 cm. de profundidad en suelo; T° s30: temperaturas en Celsius a 30 cm de profundidad en suelo; T° s45: Temperatura en Celsius a 45 cm. de profundidad en suelo.