



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

**DESARROLLO DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DE DOSIS DE ZINC EN  
EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.)**

**DEVELOPMENT OF A MODEL OF ZINC DOSE ESTIMATION IN CORN (*Zea  
mays* L.) CROP**

Proyecto de Actividad Formativa Equivalente a tesis para optar al Grado de Magíster en  
Manejo de Suelos y Aguas

AUGUSTO ROLANDO MANRIQUE RUIZ

**Directores de Tesis**

OSVALDO SALAZAR GUERRERO  
RICARDO CABEZA PÉREZ

**Profesores consejeros**

JOSÉ IGNACIO COVARRUBIAS  
YASNA TAPIA FERNÁNDEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2017

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

**DESARROLLO DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DE DOSIS DE ZINC EN  
EL CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.)**

**DEVELOPMENT OF A MODEL OF ZINC DOSE ESTIMATION IN CORN (*Zea  
mays* L.) CROP**

Proyecto de Actividad Formativa Equivalente a tesis presentada para optar al Grado de  
Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

AUGUSTO ROLANDO MANRIQUE RUIZ

	Calificaciones
<b>Directores de Tesis</b>	
OSVALDO SALAZAR GUERRERO Ing. Agrónomo MSc. Ph.D.	Aprobado
RICARDO CABEZA PÉREZ Ing. Agrónomo Ph.D.	Aprobado
<b>Profesores consejeros</b>	
JOSÉ IGNACIO COVARRUBIAS PEÑA Ing. Agrónomo MSc Dr.	Aprobado
YASNA TAPIA FERNÁNDEZ Ing. Alimentos MSc Dr.	Aprobado

Santiago de Chile  
2017

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
SUMARY	2
CAPÍTULO I. ZINC EN SUELOS Y PLANTAS	3
Zinc en las plantas	3
Deficiencia de zinc en las plantas	4
Dinámica del zinc en los suelos y su disponibilidad para las plantas	5
Formas de zinc en el suelo	5
Nivel crítico de zinc en el suelo	7
Fertilización con zinc	8
Capacidad tampón del suelo para zinc	9
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10
CAPÍTULO 2. CÁLCULO DE DOSIS DE ZINC PARA EL CULTIVO DE MAÍZ	14
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
MATERIALES Y MÉTODO	16
Muestras de suelo y zona de estudio	16
Modelo de cálculo de dosis de zinc para el cultivo de maíz	17
Determinación de capacidad tampón de zinc	17
Relación de la capacidad tampón de zinc con algunas propiedades de los suelos	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
Estadística descriptiva	21
Árboles de regresión y clasificación (CART)	22
Cálculo de dosis de zinc para el cultivo del maíz	25
CONCLUSIONES	28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
APÉNDICE	34
ANEXO	37

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Concentración óptima de zinc en granos de diferentes cereales	4
Cuadro 2.	Sensibilidad relativa de diferentes cultivos a la deficiencia de zinc.	5
Cuadro 3.	Especies de zinc en la solución del suelo acorde al pH asociado	6
Cuadro 4.	Nivel crítico de zinc para el cultivo de maíz	7
Cuadro 5.	Fertilizantes en base a zinc comúnmente usados	8
Cuadro 6.	Estadígrafos de dispersión de las propiedades de suelo y de la capacidad tampón de Zn	20
Cuadro 7.	Distribución de frecuencia para la reacción del suelo (pH)	21
Cuadro 8.	Distribución de frecuencia de la materia orgánica para los suelos en estudio	21
Cuadro 9.	Distribución de frecuencia para dos separados texturales del suelo	22
Cuadro 10.	Medidas de resumen del árbol de regresión y clasificación de la capacidad tampón de zinc	23
Cuadro 11.	Categorías de capacidad tampón de zinc dependiendo de la clase textural y pH del suelo	25
Cuadro 12.	Estadígrafos de la demanda y suministro de zinc de los suelos del estudio	26
Cuadro 13.	Estadígrafos de la dosis de zinc para los predios de maíz del estudio	26

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins mostrando los puntos de muestreo	16
Figura 2. Esquema para la determinación de la capacidad tampón de zinc	18
Figura 3. Árbol de regresión para la capacidad tampón de zinc.	24

## **DEDICATORIA**

A toda mi familia, en especial a mi madre María E. Ruiz Acevedo,  
hermanos y sobrinos por alentarme y apoyarme  
incondicionalmente.

A mi novia Aida Riveros Carhuapoma, por toda la comprensión,  
preocupación y apoyo moral...Te amo.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis directores Osvaldo Salazar Guerrero y Ricardo Cabeza Pérez, por guiarme y su paciencia durante toda la investigación.

A todo personal del laboratorio de Química de Suelos y Aguas, profesora Yasna Tapia, Benjamín Castillo, Edouard Acuña, Sra. Mary Sol Aravena y Sra. Consuelo por guiarme, disposición y apoyo en el presente trabajo.

Asimismo, hago mención aparte al Programa Nacional de Beca y Crédito Educativo-PRONABEC por el apoyo y financiamiento lo cual permitió realizar estos estudios de Postgrado.

Finalmente quiero expresar mis más profundos agradecimientos a todas las amistades que me acompañaron a lo largo de este tiempo en el programa de Magíster, fue una increíble experiencia.

## RESUMEN

En Chile el cultivo de maíz representa el 20% del área total de cultivos anuales y, debido a condiciones favorables de temperatura y radiación solar, se obtiene uno de los rendimientos más altos a nivel mundial ( $12 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Sin embargo, la productividad de este cultivo se ve afectada por diversos factores, en particular, la baja fertilidad de los suelos donde es cultivado. Es así que en los últimos años ha cobrado relevancia la deficiencia de zinc (Zn) en Chile, considerado en la actualidad como el micronutriente más deficiente en suelos agrícolas del mundo.

El Zn cumple funciones fisiológicas importantes en la planta y una deficiencia de este micronutriente puede comprometer seriamente el rendimiento y la calidad del grano, particularmente el maíz es altamente sensible a esta deficiencia nutricional. Consecuentemente, se han planteado recomendaciones de fertilización con Zn en ciertos suelos, generalmente basadas en la biodisponibilidad del Zn obtenida mediante la extracción con agentes quelantes, que intentan simular su absorción por las raíces de las plantas. No obstante, existe evidencia que esta única prueba química no es suficiente para realizar recomendaciones adecuadas de fertilización.

El principal objetivo del presente estudio fue adaptar el modelo de estimación de dosis racional para Zn en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), considerando la capacidad tampón del suelo para Zn ( $CT_{Zn}$ ), con el fin de mejorar la fertilidad de los suelos de la Libertador General Bernardo O'Higgins de Chile. Utilizando el método de árboles de clasificación y regresión se estableció una relación entre la  $CT_{Zn}$  y algunas propiedades del suelo, siendo el contenido de arcilla la propiedad de mayor contribución al modelo, además de la reacción del suelo (pH) y el contenido de limo. El modelo adaptado permitió explicar al menos un 58% de la variación en la  $CT_{Zn}$ , de manera que se establecieron 3 categorías para la  $CT_{Zn}$  para los suelos de esta Región. Se estima que este modelo será una herramienta útil para tomar mejores decisiones en la recomendación de fertilizante en base a Zn.



## SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) represents 20% of the total annual crop surface in the Chilean territory and, due to favorable climate conditions the highest crop yields in the world are reached (12 Mg ha<sup>-1</sup>). However, particularly low soil fertility at local level is affecting the productivity of this crop. Recently, considered the most deficient micronutrient in agricultural soils in the world, zinc (Zn) deficiency has gained relevance in Chile.

Zinc fulfills important physiological functions in the plant and their deficiency can compromise seriously yielding and grain quality, particularly of maize that is highly sensitive to this nutritional deficiency. Therefore, Zn fertilization in some soils considering Zn bioavailability have been proposed, obtained by extraction with chelating agents and trying to simulate plant root uptake. However, there is evidence that this unique chemical test is not enough to make adequate fertilizer recommendations.

The main objective of the present study was to adapt the rational dose estimation model for Zn in the maize crop, considering the Zn buffer capacity of soil ( $CT_{Zn}$ ) to improve soil fertility at the Region Libertador General Bernardo O'Higgins of Chile. Classification and regression trees methods were used and relationships between  $CT_{Zn}$  and some soil properties were established, being clay content the more relevant to the model, besides the soil reaction (pH) and the silt content. The adapted model explained at least 58% of the  $CT_{Zn}$  variation and allowed establishing three categories for the  $CT_{Zn}$  for the soils of this Region. It is estimated that this model will be a useful tool to make better decisions on fertilizer recommendation based on Zn.

## CAPÍTULO I. ZINC EN SUELOS Y PLANTAS

Los incrementos recientes de la población mundial han determinado que la demanda de alimentos se haya duplicado en los últimos 50 años, siendo cubierta principalmente por cultivos como el trigo, el arroz y el maíz (FAO, 2002; Assunção *et al.*, 2010). En Chile, ODEPA (2015) informa que, durante la temporada 2013-2014, el cultivo del maíz registró una producción de 1,5 millones de toneladas métricas, con una superficie sembrada cercana a las 125.000 ha, representando el 20% de la superficie total de los cultivos anuales del país. Además, la misma institución precisa que el rendimiento promedio de maíz fue de 12,3 Mg ha<sup>-1</sup>, uno de los rendimientos más altos en el mundo.

La productividad de muchos cultivos, entre ellos el maíz, se ve limitada por la falta de agua para el riego y por la baja fertilidad de los suelos, principalmente de nitrógeno y fósforo (Zhang *et al.*, 2016). Sin embargo, la deficiencia de micronutrientes también representa una amenaza para la producción agrícola mundial y por ende para la nutrición del hombre (Alloway 2008). El zinc (Zn) es considerado el micronutriente más limitante para la producción de cultivos y su deficiencia es la más extendida en los suelos agrícolas del mundo (Welch y Graham 2004; Cakmak, 2008; Fageria *et al.*, 2002; Assunção *et al.*, 2010; Sadeghzadeh, 2013; Sparks, 2003; Rakshit *et al.*, 2015).

Niveles deficientes de Zn en el suelo repercuten directamente en su contenido en los granos de los cultivos, disminuyendo su calidad nutricional (Welch y Graham, 2004; Rakshit *et al.*, 2015). Por otra parte, se estima que la deficiencia de Zn en la dieta humana afecta a más de un tercio de la población mundial, con tasas de prevalencia de entre 4 a 73% en varias regiones, principalmente en países en vías de desarrollo, donde la proporción de trigo, arroz y maíz en la dieta humana corresponde a aproximadamente el 90% (OMS, 2002; Nair, 2013; Manzeke *et al.*, 2014).

### Zn en plantas

El Zn es absorbido por las raíces en forma de Zn<sup>+2</sup> por medio de proteínas específicas (ZIP transporters) ubicados en la membrana plasmática de las células de las raíces (Bouain *et al.*, 2014; Alloway, 2008; Rakshit *et al.*, 2015). Estos transportadores ZIP están regulados positivamente bajo estrés por deficiencia en Zn (Rakshit *et al.*, 2015). Desde el punto de vista fisiológico, el Zn es esencial para el normal crecimiento, desarrollo y reproducción de las plantas, cumpliendo funciones importantes como regulación del crecimiento, actividad enzimática, expresión génica, actividad de fitohormonas, síntesis de proteínas, fotosíntesis y metabolismo de carbohidratos (especialmente en plantas C4) (Mousavi, 2011; Marschner, 2012; Figueiredo *et al.*, 2012; Sadeghzadeh, 2013). En el caso del maíz (C4), el Zn juega un rol fundamental en la asimilación del CO<sub>2</sub> en el proceso de fotosíntesis, ya que es constituyente de la enzima *anhidrasa carbónica*, encargada de transformar el CO<sub>2</sub> y agua en bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Este último compuesto constituye el sustrato para la enzima *fosfoenolpiruvato carboxilasa* que cataliza la formación de cuerpos carbonados con 4 átomos de C como el malato (Marschner, 2012).

El contenido óptimo de Zn en las plantas varía considerablemente, sin embargo, estas concentraciones no difieren ampliamente en cereales como el maíz, trigo, avena, entre otros (Cuadro 1) (Kabata-Pendias, 2011).

**Cuadro 1.** Concentración óptima de Zn en granos de diferentes cereales

Cultivo	Concentración de Zn
	(mg kg <sup>-1</sup> )
Trigo	23 - 37
Cebada	20 – 30
Avena	29 – 37
Centeno	29 – 31
Arroz	1 – 41
Maíz <sup>a</sup>	26

Kabata-Pendias (2011), <sup>a</sup>Cakmak (2009)

### Deficiencia de Zn en plantas

El incremento de la superficie de cultivos de alto rendimiento, asociado a sistemas intensivos y al monocultivo, ha resultado en un agotamiento de varios elementos esenciales en los suelos. Entre los micronutrientes, la deficiencia de Zn es la más extendida en varios cultivos (Sing *et al.*, 2005; Sharma *et al.*, 2013). Nair (2013) informa que en un estudio realizado por la FAO en 30 países, se encontró que alrededor del 30% de los suelos agrícolas del mundo son deficientes en Zn. Además, aproximadamente el 50% de las áreas destinadas al cultivo de cereales en el mundo muestra baja disponibilidad de este elemento (Cakmak, 2008; Manzeke *et al.*, 2014; Nikolic *et al.*, 2016).

Los micronutrientes son necesarios en pequeñas cantidades, aunque su déficit puede causar serios problemas a la producción de los cultivos (Gupta *et al.*, 2008). La deficiencia de Zn implica una restricción nutricional para la producción de todos los cultivos, especialmente en cereales (Cakmak, 2008; Drissi *et al.*, 2015). Cuando el suministro de Zn a las plantas es insuficiente, el rendimiento del cultivo disminuye y la calidad nutricional del grano se ve también comprometida (Rengel 1999; Cakmak 2000; Sadeghzadeh 2013; Mattiello *et al.*, 2015; Pascual *et al.*, 2016; Montalvo *et al.*, 2016).

Desde un punto de vista agronómico, los cultivos varían considerablemente en su respuesta a la disponibilidad de diversos micronutrientes (Gupta *et al.*, 2008). En particular, los principales cultivos que se ven afectados por la deficiencia de Zn son: arroz, sorgo y maíz (Sparks 2003; Gupta *et al.*, 2008; Sadeghzadeh, 2013; Sharma *et al.*, 2013; Drissi *et al.*, 2015). En el Cuadro 2 se presenta un listado con la sensibilidad relativa de los diferentes cultivos en relación al Zn.

Respecto al diagnóstico de deficiencias para micronutrientes, la hoja es considerada el órgano de la planta más adecuado para coleccionar muestras y determinar la concentración de estos nutrientes. Así, las concentraciones críticas de Zn en hojas son del orden de 20 mg kg<sup>-1</sup> en trigo, 15 mg kg<sup>-1</sup> en arroz y 22 mg kg<sup>-1</sup> en maíz (Sadeghzadeh, 2013).

La sintomatología visual de deficiencia de Zn se manifiesta principalmente en la disminución del tamaño de la hoja, acortamiento de los entrenudos, infertilidad de las espiguillas y en casos extremos, clorosis intervenal en hojas nuevas (Alloway, 2008; Jones, 2003; Marschner, 2012; Montalvo *et al.*, 2016). Sin embargo, los síntomas de deficiencia de Zn visibles en los cultivos generalmente ocurren solo en casos de deficiencia graves del elemento (Sadeghzadeh, 2013).

**Cuadro 2.** Sensibilidad relativa de diferentes cultivos a la deficiencia de Zn.

Sensibilidad		
Baja	Media	Alta
Alfalfa	Cebada	Maíz
Zanahoria	Papas	Arroz
Viñas	Soya	Sorgo
Avena	Remolacha azucarera	Algodón
Centeno	Espinacas	Cítricos
Trigo	Tomate	Fréjol

Recopilado por Montalvo (2016).

### **Dinámica del Zn en los suelos y su disponibilidad para las plantas**

El contenido de Zn total en el suelo varía según el material parental (10-300 mg kg<sup>-1</sup>), condiciones climáticas, contenido de materia orgánica (MO), textura y pH del suelo (Domy, 2001; Nagajyoti *et al.*, 2010; Kabata-Pendias, 2011; Montalvo *et al.*, 2016). Los suelos formados a partir de rocas básicas (basalto), presentan mayores concentraciones de Zn (48-240 mg kg<sup>-1</sup>), mientras que las rocas ígneas ricas en sílice (granito) y metamórficas (gneis) presentan concentraciones solo de 5-140 mg kg<sup>-1</sup> (Nagajyoti *et al.*, 2010; Montalvo *et al.*, 2016). A pesar que se pueda detectar un contenido relativamente alto de Zn en los suelos, este valor no es un buen indicador de su disponibilidad para las plantas, ya que sólo una pequeña cantidad de Zn está en equilibrio con la solución del suelo (White y Zasoski, 1999; Gupta *et al.*, 2008; Sadeghzadeh, 2013).

Los suelos con bajos niveles de Zn disponible para las plantas se encuentran en diversas regiones climáticas, pero son más extendidas en aquellas con clima de tipo Mediterráneo (Rengel *et al.*, 1999), especialmente en regiones semi húmedas y áridas. Los niveles de Zn disponibles para las plantas disminuyen progresivamente en suelos de pH neutro y alcalinos (principalmente calcáreos), debido a la alta concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> que disminuye la solubilidad de Zn en el suelo (Sing *et al.*, 2005; Zuo y Zhang, 2011; Sparks 2003; Ma *et al.*, 2014). Una baja disponibilidad de Zn es también común en suelos arenosos y/o altamente erosionados (Sing *et al.*, 2005; Sharma *et al.*, 2013; Sadeghzadeh, 2013; Drissi *et al.*, 2015).

Los factores como la textura del suelo, la naturaleza de las arcillas del suelo, MO, la capacidad de intercambio catiónico, la humedad, la temperatura, la compactación del suelo y la disponibilidad de otros nutrientes en el suelo influyen en la disponibilidad, de Zn para las plantas (Rashid *et al.*, 2014).

### **Formas de Zn en el suelo**

En una revisión, Swietlik (2010) señala que el Zn posee una configuración electrónica externa 3d<sup>10</sup>4s<sup>2</sup> completa y, a diferencia de los otros micronutrientes como Fe, Cu, Mn y Mo, tiene un sólo estado de oxidación, por lo tanto, una sola valencia equivalente a II. El Zn muestra cierta semejanza con el Mg y puede sustituirlo en minerales de silicato. Sin embargo el Zn es mucho más electronegativo que el Mg formando enlaces covalentes mucho más fuertes.

El Zn se encuentra presente en la solución del suelo en formas orgánicas e inorgánicas (Fageria, 2009). Así, el Zn disuelto en la solución del suelo puede ser presentado como la suma de ambas formas:

$$Zn_{soluble} = Zn_{inorgánico} + Zn_{orgánico} \quad (1)$$

El pH de la solución del suelo juega un rol determinante en la especiación química del Zn. Así, la especie predominante de Zn en la solución suelo por bajo un valor de pH 7,7 es  $Zn^{2+}$ , mientras que el  $ZnOH^+$  predomina sobre este valor de pH. El  $Zn(OH)_2^0$  es la principal especie por encima de pH 9,1, mientras que las especies de  $Zn(OH)_3$  y  $Zn(OH)_4^{2-}$  no son predominantes en el rango de pH de los suelos agrícolas (Cuadro 3). Las especies de Zn que contribuyen al contenido total de Zn en solución, son:

$$Zn_{inorgánico} = (Zn^{+2}) + (ZnSO_4^0) + (ZnOH^+) + (Zn(OH)_2^0) + (ZnHPO_4^0) \quad (2)$$

**Cuadro 3.** Especies de Zn en la solución del suelo acorde al pH asociado.

Especie en solución	Rango de pH en que predomina
$Zn^{+2}$	pH < 7,7
$ZnOH^+$	> 7,7 y 9,0
$Zn(OH)_2^0$	pH > 9,1
$Zn(OH)_3$ y $Zn(OH)_4^{2-}$	Ninguno

Adaptado de Fageria (2009) y Swietlik (2010).

También es importante mencionar que está implicado en varias interacciones con varios elementos (Kabata-Pendias, 2011; Hafeez *et al.*, 2013), entre las interacciones más importantes y complejas es con el fósforo (P) disuelto en la solución del suelo formando  $ZnHPO_4^0$ , especialmente en suelos con altos niveles de este elemento, lo cual disminuye la disponibilidad de Zn para las plantas (Mousavi, 2012; Blume *et al.*, 2016), Kabata-Pendias (2011) menciona que la relación óptima P:Zn para las plantas de maíz es de 100. Hafeez *et al.* (2013), mencionan que a concentraciones altas de cobre (Cu) en la solución del suelo en relación con Zn pueden reducir la disponibilidad de Zn para las plantas (y viceversa) debido a la competencia por los mismos sitios de absorción en la raíz de la planta. Otra interacción compleja es la de Zn y Fe existiendo un antagonismo entre estos elementos (Hafeez *et al.*, 2013), igualmente, el Zn puede disminuir su disponibilidad si interacciona con el azufre, formando sulfatos de Zn ( $ZnSO_4^0$ ) (Blume *et al.*, 2016). Fageria (2009) menciona que existiría una interacción sinérgica entre el Zn y B así como también la aplicación de fertilizante nitrogenado, como el sulfato de amonio ( $(NH_4)_2SO_4$ ), el cual puede tener un efecto acidificante importante en los suelos y conducir así a un aumento de la disponibilidad de Zn para cultivos en suelos con un estado de pH relativamente alto.

Aunque el Zn disuelto en la solución del suelo se encuentra en bajas concentraciones en relación al Zn total del suelo, éste es de gran importancia ya que las plantas absorben los elementos sólo desde la solución del suelo. Para que el Zn llegue a ser absorbido por las raíces de las plantas el elemento se debe mover hacia las raíces por difusión (Nair, 2013; Rakshit *et al.*, 2015).

Por otra parte, los exudados radiculares juegan un importante rol al quelar metales y facilitar su disponibilidad. Así por ejemplo, cuando las concentraciones de Zn disponible en el suelo son bajas, las raíces inducen cambios en el pH de la rizósfera y exudan ácidos orgánicos que solubilizan y quelan el Zn (Sharma *et al.*, 2013; Nair, 2013; Ma *et al.*, 2014; Rakshit *et al.*, 2015).

### Nivel crítico de Zn en el suelo

Para un crecimiento óptimo de las plantas, la concentración de nutrientes en la solución del suelo debe mantenerse por sobre una cierta concentración, cuyo valor se denomina nivel crítico (Mengel y Kirkby, 2001). El nivel crítico de un nutriente se define como el contenido de un nutriente en el suelo por debajo del cual el crecimiento y rendimiento del cultivo se incrementa con la adición del nutriente (Molina y Bornemisza, 2006). La determinación del nivel crítico considera estudios de correlación entre los rendimientos relativos del cultivo y la concentración del elemento en el suelo (Cabalceta y Molina, 2006).

Se han utilizado varios procedimientos analíticos y extractantes para evaluar la disponibilidad de Zn en los suelos. Entre ellos se incluyen: (i) ácidos minerales, (ii) agentes quelantes, (iii) sales tamponadas, (iv) sales neutras, y (v) otros extractantes propuestos para pruebas rutinarias de suelo (Alloway, 2008; Behera *et al.*, 2012). A escala global, el ácido dietilentriamino penta-acético (DTPA) es la solución más utilizada para la extracción de Zn disponible en diferentes tipos de suelo. Sin embargo otros extractantes como el ácido etilendiamino tetra-acético (EDTA), el ácido clorhídrico, el bicarbonato de amonio-DTPA (ABDTPA), las soluciones Mehlich 1 y Mehlich 3, son también frecuentemente empleados (Behera *et al.*, 2012; Sadeghzadeh, 2013). El Cuadro 4 incluye valores de nivel crítico de Zn para el cultivo del maíz basados principalmente en extracciones con DTPA.

**Cuadro 4.** Nivel crítico de zinc para el cultivo de Maíz

Solución extractante <sup>1</sup>	Nivel crítico	Referencia
	--mg Zn kg <sup>-1</sup> --	
Varios	0,50 a 2,00	Sing <i>et al.</i> , 2005
	0,50	Cakmak <i>et al.</i> , (1999) Ratto (2006)
DTPA	0,80	Lindsay y Norvell (1978) Alloway (2008)
	0,86	Drissi <i>et al.</i> , (2015) Fageria <i>et al.</i> , 2002

<sup>1</sup>DTPA= ácido dietilentriamino penta-acético.

Por otra parte, aunque la toxicidad del Zn en condiciones naturales es muy rara, ésta generalmente resulta en suelos contaminados por actividades mineras o por la eliminación de desechos municipales e industriales ricos en Zn .

## Fertilización con Zn

Se ha reconocido que la tolerancia de los cultivos a la deficiencia de Zn es muy variable, siendo el maíz particularmente muy sensible (Cuadro 2) (Gupta *et al.*, 2008; Sadeghzadeh, 2013; Sharma *et al.*, 2013; Drissi *et al.*, 2015). Por lo general, el rendimiento del maíz se incrementa con la fertilización de Zn (Mattiello *et al.*, 2015). Además, la nutrición adecuada con Zn contribuye también a mejorar la viabilidad de semillas, vigor de plántulas y a mejorar la tolerancia a varios factores de estrés ambiental durante la etapa de crecimiento temprano (Harris *et al.*, 2007; Cakmak, 2008). Asimismo, puede ayudar a reducir la acumulación de cadmio (Cd) en las semillas, ya que el Zn y el Cd son químicamente muy similares, este efecto inhibitorio es de gran importancia debido a que el Cd tiene un alto potencial tóxico para la salud humana y el medio ambiente (Cakmak, 2009). Por lo tanto, el uso de fertilizantes en base a Zn es la solución más eficaz y rápida para la corrección de la deficiencia de Zn (Cakmak, 2009; Wang *et al.*, 2012; Montalvo *et al.*, 2016).

Sin embargo, Rashid *et al.* (2014) menciona que en suelos dominados por óxidos de hierro y oxihidróxidos y óxidos amorfos de hierro y aluminio tales como Ultisoles y Oxisoles o en suelos calcáreos y alcalinos, el fertilizante de Zn añadido se conserva irreversiblemente y se puede hacer frente a una pobre eficiencia de uso de fertilizantes de Zn. Actualmente se utilizan varias fuentes de fertilizantes de Zn tal como se detalla en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Fertilizantes en base a Zn comúnmente usados.

Fuente de zinc <sup>a</sup>	Fórmula <sup>b</sup>	Solubilidad en agua	Contenido de Zn (%)
<b>Inorgánicas</b>			
Sulfato de zinc monohidratado	ZnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	Soluble	36
Sulfato de zinc heptahidratado	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Soluble	22
Óxido de zinc	ZnO	Insoluble	50 – 80
Carbonato de zinc	ZnCO <sub>3</sub>	Insoluble	50 – 56
Cloruro de zinc	ZnCl <sub>2</sub>	Soluble	50
Nitrato de zinc	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	Soluble	23
<b>Quelatos sintéticos</b>			
Zinc disodio EDTA	Na <sub>2</sub> ZnEDTA	Soluble	8 - 14
Zinc sodio HEDTA	NaZnHEDTA	Soluble	6 - 10
Zinc sodio NTA	NaZnNTA	Soluble	9 - 13
<b>Complejos orgánico natural</b>			
Poliflavonoide de zinc	-	Soluble	50 - 100
Lignosulfonato de zinc	-	Soluble	50 - 80
<b>Complejos inorgánicos</b>			
Solución de sulfato de zinc amoniacal	Zn(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>	Soluble	10

<sup>a</sup> Según Montalvo (2016) y Alloway (2008).

<sup>b</sup> NTA: ácido nitrilotriacético; HEDTA: ácido N-(2-hidroxi-etil) etilendinitrilotriacético; EDTA: ácido etilendiamino tetraacético.

Uno de los fertilizantes en base a Zn más utilizado es el sulfato de Zn debido a su alta solubilidad (Bouman, 2002), asimismo diversos estudios muestran que dependiendo de la tasa utilizada el sulfato de Zn aplicado puede ser eficaz en el suelo hasta 2 - 3 años en la corrección de la deficiencia de Zn (Cakmak, 2008). Sin embargo, algunas fuentes menos solubles como ZnO, ZnCO<sub>3</sub> pueden resultar mejor en suelos ácidos (Rashid *et al.*, 2014).

### **Capacidad tampón del suelo para Zn**

Nair (2013) menciona que durante mucho tiempo las recomendaciones para fertilizar con Zn se han basado en la extracción de Zn con DTPA, para luego entregar una recomendación genérica de aplicación de fertilizantes al agricultor. Sin embargo, Dang *et al.* (1994) encontraron que el Zn, medido por extracción con DTPA, no explicaba de forma satisfactoria la variación en los rendimientos de trigo observada (26%) en comparación con la capacidad tampón de Zn del suelo ( $CT_{Zn}$ ), la cual lo hacía hasta en un 62%. Por lo tanto, la  $CT_{Zn}$  es una medida que puede ayudar a elaborar una estrategia de fertilización de un cultivo.

La capacidad tampón de un nutriente en el suelo ( $CT$ ), se define como la resistencia que opone el suelo al cambio en la concentración del nutriente en la solución del suelo al ser fertilizado (Nair, 2013). Havlin (2005) la define como la habilidad de un suelo para resuministrar nutrientes a la solución suelo; por ejemplo, en la medida que la planta absorbe Zn<sup>+2</sup>, más de este catión es desorbido desde los sitios de intercambio del suelo para rellenar la solución suelo. Otra definición de capacidad tampón ampliamente aceptada es la relación entre la *cantidad e intensidad* de un nutriente en el suelo. La *intensidad (I)* representa la concentración de un nutriente en la solución del suelo, en tanto la *cantidad (Q)* corresponde a la cantidad de nutriente que está en situación de intercambio con el de la solución del suelo (Mengel y Kirkby, 2001). Por lo tanto,  $CT_{Zn}$  se entenderá como la cantidad de Zn (kg de Zn) necesaria para aumentar en 1 mg la disponibilidad de Zn extraídos con DTPA (mg Zn-DTPA kg<sup>-1</sup> de suelo). Mientras mayor sea la  $CT_{Zn}$ , mayor será la necesidad de aplicar fertilizantes que aporten el nutriente para aumentar el valor de Zn-DTPA en el suelo (Rodríguez, 1993; Nair, 2013).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alloway, B. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition (2<sup>nd</sup> ed.), International Zinc Association. Paris, France.
- Assunção, A., Schat, H. and Aarts, M. 2010. Regulation of the adaptation to zinc deficiency in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 5(12), 1553-1555.
- Behera, S. K., Shukla, A. K. and Singh, M. V. 2012. Distribution variability of total and extractable copper in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. *Agrochimica*, 56(1), 28–41.
- Blume, H. P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R. , Kandeler, E., Kögel-Knabner, I. and Wilke, B. M. 2016. Scheffer Schachtschabel- Soil Science. (Ed.) Springer. Berlin, Germany.
- Bouain, N., Shahzad, Z., Rouached, A., Khan, G. A., Berthomieu, P., Abdelly, C. and Rouached, H. 2014. Phosphate and zinc transport and signalling in plants: Toward a better understanding of their homeostasis interaction. *Journal of Experimental Botany*, 65(20), 5725–5741.
- Cabalceta, G. y Molina, E. 2006. Niveles críticos de nutrientes en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 31-44.
- Cakmak, I., Kalayci, M., Ekiz, H., Braun, H. J., Kilin, Y., and Yilmaz, A. 1999. Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-science for stability project. *Field Crops Research*, 60(1–2), 175–188.
- Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. Tansley Review No. 111. *New Phytologist*, 146, 185-205.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?. *Plant and Soil*, 302(1-2), 1-17.
- Cakmak, I. 2009. Enrichment of fertilizers with zinc: An excellent investment for humanity and crop production in India. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 23(4), 281–289.
- Dang, Y. P., Dalal, R. C., Edwards, D. G., and Tiller, K. G. 1994. Zinc buffer capacity of vertisols. *Australian Journal of Soil Research*, 32(6), 1231–1242.
- Domy, C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments (2<sup>nd</sup> Ed.). Springer. New York, USA.
- Drissi, S., Houssa A. A., Bamouh, A. y Benbella, M. 2015. Response of corn silage (*Zea mays* L.) to zinc fertilization on a sandy soil under field and outdoor container conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science*. [in press]. DOI: 10.1016/j.jssas.2015.05.002.

- Fageria, N. K. 2009. The use of nutrients in crop plants. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., and Clark, R. B. 2002. Micronutrients in Crop Production. *Advances in Agronomy*, 77, 185-268.
- FAO. 2002. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Informe resumido. Roma.
- Figueiredo, D. D., Barros, P. M., Cordeiro, A. M., Serra, T. S., Lourenço, T., Chander, S., Oliveira, M. and Saibo, N. J. 2012. Seven zinc-finger transcription factors are novel regulators of the stress responsive gene OsDREB1B. *Journal of Experimental Botany*, 63(2), 695-709.
- Graham, R. D., Ascher, J. S. and Hynes, S.C. 1992. Selecting zinc-efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. *Plant and Soil*, 146(1-2), 241-250.
- Gupta, U. C., Wu, K. and Liang, S. 2008. Micronutrients in Soils, Crops, and Livestock. *Earth Science Frontiers*, 15(5), 110-125.
- Hafeez, B., Khanif, Y. M., and Saleem, M. 2013. Role of zinc in plant nutrition - A review. *American journal of experimental Agriculture*, 3(2), 374-391.
- Harris, D., Rashid, A., Miraj, G., Arif, M., and Shah, H. 2007. "On-farm" seed priming with zinc sulphate solution - A cost-effective way to increase the maize yields of resource-poor farmers. *Field Crops Research*, 102(2), 119-127.
- Havlin, J., Beaton J., Tisdale, S., Nelson, W. 2005. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (7<sup>th</sup> Ed). Pearson Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Jones, J., 2003. Agronomic handbook: Management of crops, soils and their fertility, CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants (4<sup>th</sup> Eds.). CRC Press. Boca Raton, USA.
- Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper 1. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.
- Ma, Q., Wang, X., Li, H., Li, H., Cheng, L., Zhang, F., Rengel Z. and Shen, J. 2014. Localized application of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N plus P enhances zinc and iron accumulation in maize via modifying root traits and rhizosphere processes. *Field Crops Research*, 164(1), 107-116.
- Manzeke, G. M. Mtambanengwe, F., Nezomba, H., and Mapfumo, P. 2014. Zinc fertilization influence on maize productivity and grain nutritional quality under integrated soil fertility management in Zimbabwe. *Field Crops Research*, 166, 128-136.
- Marschner, H. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3<sup>th</sup> Ed.). Academic Press. USA.

- Mattiello, E. M. Ruiz, H. A., Neves, J. C., Ventrella, M. C., and Araújo, W. L. 2015. Zinc deficiency affects physiological and anatomical characteristics in maize leaves. *Journal of Plant Physiology*, 183, 138-43.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition (5<sup>th</sup> ed.), Springer Science and Business Media.
- Molina, E. y Bornemisza, E. 2006. Nivel crítico de Zinc en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 45-59.
- Montalvo, D. Degryse, F., Silva, R. C., Baird, R., and McLaughlin, M. J. 2016. Agronomic Effectiveness of Zinc Sources as Micronutrient Fertilizer. *Advances in Agronomy*, 139, 215 – 267.
- Mousavi, S. R. 2011. Zinc in Crop Production and Interaction with Phosphorus. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 1503–1509.
- Mousavi, S. R., Galavi, M., and Rezaei, M. 2012. The interaction of zinc with other elements in plants: A review. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(24), 1881 – 1884.
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. and Sreekanth, T. V. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(3), 199–216.
- Nair, P. 2013. The Buffer Power Concept and Its Relevance in African and Asian Soils. *Advances in Agronomy*, 121, 447–516.
- Nikolic, M., Nikolic, N., Kostic, L., Pavlovic, J., Bosnic, P., Stevic, N., Savic, J. and Hristov, N. 2016. The assessment of soil availability and wheat grain status of zinc and iron in Serbia: Implications for human nutrition. *Science of the Total Environment*, 553, 141-148.
- ODEPA, Oficina de estudios y políticas agrarias. 2013. Reglamento especial para el maíz, en el marco de la ley que regula las transacciones comerciales de productos agropecuarios. [en línea] <<http://www.odepa.gob.cl/reglamento-especial-para-el-maiz-en-el-marco-de-la-ley-que-regula-las-transacciones-comerciales-de-productos-agropecuarios/>> [consulta: 31 enero 2017].
- OMS, Organismo Mundial de la Salud. 2002. The world health report 2002-Reducing risks, promoting healthy life. Education for health (Abingdon, England).
- Pascual, M. B., Echevarria, V., Gonzalo, M. and Hernández-Apaolaza, L. 2016. Silicon addition to soybean (*Glycine max L.*) plants alleviate zinc deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108, 132-138.
- Rakshit, A., Singh, H. B., and Sen, A. 2015. Nutrient use efficiency: from basics to advances. Springer.
- Rengel, Z. 1999. Zinc deficiency in wheat genotypes grown in conventional and chelator-buffered nutrient solutions. *Plant Science*, 143(2), 221-230.

- Rengel, Z., Batten, G. D. and Crowley, D. E. 1999. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. *Field Crops Research*, 60(1-2), 27–40.
- Rodríguez, S., y Rodríguez, J. J. 1993. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile.
- Sadeghzadeh, B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 905–927.
- Sharma, A. Patni B., Shankhdhar D. and Shankhdhar S.C. 2013. Zinc - An Indispensable Micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 19(1), 11–20.
- Sing, B., Senthil Kumar, A. Natesan, B. K. Singh and K. Usha. 2005. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. *Current Science*, 88(1), 36-44.
- Sparks, D. 2003. Environmental Soil Chemistry. Second Edition. Academic Press. London.
- Sparks, D. 2013. Advances in agronomy. Vol. 122. Elsevier Academic. London.
- Wang, J. Mao, H. Zhao, H. Huang, D. and Wang, Z. 2012. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. *Field Crops Research*, 135, 89-96.
- Swietlik, D. 1999. Zinc nutrition in horticultural crops. *Horticultural reviews*, 23, 109-180.
- Welch, R. M. and Graham, R. D. 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany*, 55(396), 353-364.
- White, J. G. and Zasoski, R.J. 1999. Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research*, 60(1–2), 11–26.
- Zhang, D., Pan, G., Wu, G., Wanjiru, G., Li, L. and Zhang, X. 2016. Chemosphere Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere*, 142, 106-113.
- Zuo, Y. and Zhang, F. 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil*, 339(1), 83-95.

## CAPÍTULO 2. ESTIMACION DE DOSIS DE ZINC PARA EL CULTIVO DE MAÍZ

### INTRODUCCIÓN

La mayoría de los suelos en el mundo son deficientes en nitrógeno y fósforo, a esta problemática se suma la deficiencia de micronutrientes que representa una amenaza para la producción agrícola mundial y por ende para la nutrición del hombre (Alloway, 2008).

Dentro de los micronutrientes, el zinc (Zn) es considerado el de mayor deficiencia en los suelos del mundo, y se estima que alrededor del 50% de los suelos destinados al cultivo de cereales presenta baja disponibilidad de Zn (Cakmak, 2002; Alvarez y González, 2006; Manzeke *et al.*, 2014; Nikolic *et al.*, 2016). Las causas más frecuentes que afectan la disponibilidad de Zn en el suelo son los altos valores de pH, asociados a contenidos altos de carbonatos (Bukvić *et al.*, 2003; Marschner, 2012; Sharma *et al.*, 2013).

Por otra parte, dentro de los cereales el maíz es particularmente sensible a la deficiencia de Zn en el suelo (Sparks 2003; Gupta *et al.* 2008; Sadeghzadeh 2013; Sharma *et al.* 2013; Drissi *et al.* 2015), ya que este elemento cumple importantes funciones fisiológicas en esta especie que pueden afectar la calidad del grano, el rendimiento del cultivo y, en casos graves, producir la pérdida de la cosecha (Rengel, 1999; Cakmak, 2000; Sadeghzadeh, 2013; Mattiello *et al.*, 2015; Pascual *et al.*, 2016; Montalvo *et al.*, 2016).

Una de las estrategias que se ha utilizado con éxito para corregir la deficiencia de Zn ha sido la aplicación al suelo de fertilizantes que contienen Zn (Cakmak, 2008; Drissi *et al.*, 2015), existiendo una gran variedad de fuentes de Zn en el mercado (Montalvo *et al.*, 2016). Sin embargo, una aplicación efectiva de Zn al suelo requiere del conocimiento de la capacidad específica del suelo para reaccionar con la adicción de este elemento, pudiendo generarse en algunos casos sub o sobre fertilizaciones (Sadzawka y Campillo, 2005). Por lo tanto, una alternativa es ajustar las recomendaciones de dosis de Zn mediante el conocimiento de la capacidad tampón de Zn ( $CT_{Zn}$ ) (Nair, 2013). Esta propiedad edáfica indica la cantidad del nutriente en  $\text{kg Zn ha}^{-1}$  que debe agregarse a un suelo para incrementar en  $1 \text{ mg Zn kg}^{-1}$  del suelo a una profundidad de 20 cm, por analogía con la capacidad tampón de P en los suelos (Rodríguez, 1993).

Por consiguiente, en este estudio se plantea desarrollar un modelo de estimación de dosis de Zn basado en un balance de masas entre el suministro por parte del suelo y la demanda por el cultivo de maíz, incorporando el valor de  $CT_{Zn}$  a fin de tener un mayor control de la cantidad de Zn a agregar y así mantener un rendimiento óptimo del cultivo.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Adaptar el modelo de estimación de dosis racional para Zn en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), considerando la capacidad tampón del suelo para Zn ( $CT_{Zn}$ ).

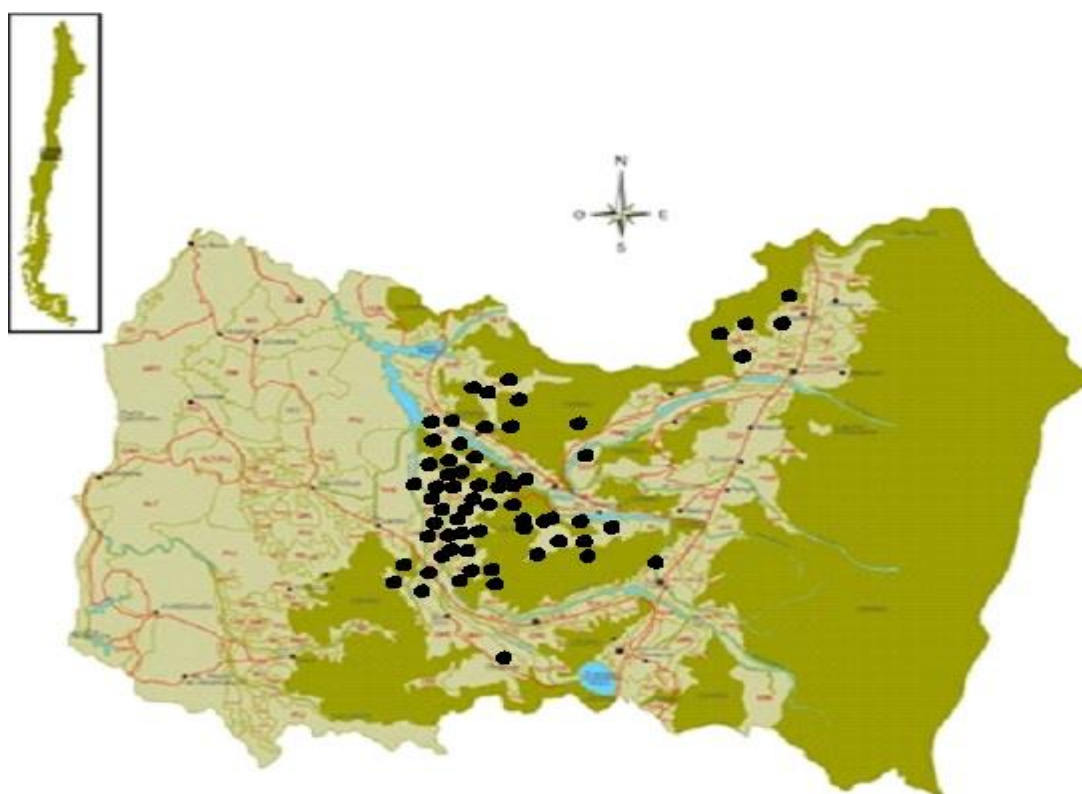
### Objetivos específicos

- Evaluar una metodología para determinar la  $CT_{Zn}$ .
- Relacionar la  $CT_{Zn}$  con algunas propiedades de los suelos.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Muestras de suelo y zona de estudio

En este estudio se utilizaron 78 muestras de suelo superficial (0-20 cm) recolectadas durante julio y septiembre de 2015, desde predios cultivados con maíz grano distribuidos en el valle central interior de la Región de O'Higgins (Figura 1). En cada uno de estos sitios se definió una unidad de muestreo (UM), desde donde fueron colectadas 15 a 20 muestras de suelo para constituir una muestra compuesta. Se verificó además que la UM cumpliera con los protocolos (Luzio y Casanova, 2006) de muestreo de suelos: i) incluir un solo tipo de suelo; ii) presentar el mismo uso y manejo; y iii) presentar < 10 ha de superficie.



**Figura 1.** Mapa de la Región O'Higgins mostrando los puntos de muestreo.

Asimismo, se utilizó información de los predios que fue previamente recolectada y organizada en una base de datos incluyendo los valores de rendimiento de grano obtenidos durante la temporada 2015-2016, variables del suelo, tanto químicas como físicas: reacción del suelo (pH), contenido de materia orgánica (MO), textura y en algunos casos densidad aparente ( $Da$ ) medida con cilindro. Todas estas variables fueron determinadas por el Laboratorio de Química de Suelo y Aguas del Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. En caso de no contar con valores de  $Da$  se utilizaron las funciones de pedotransferencia propuestas por López (2016) para su estimación. Además, se utilizó el software RETC Model para predecir el contenido de agua a capacidad de campo (33 kPa).

El clima de la zona estudiada es de tipo Mediterráneo semiárido con veranos cálidos e inviernos fríos, con una temperatura media anual del aire de 14,6°C, presenta una máxima mensual de 26,3°C (enero) y una mínima mensual de 6,1°C (agosto). Las precipitaciones se concentran en los meses de mayo a octubre y bordean una media anual de 550 mm, con una evapotranspiración potencial anual de 940 mm (Uribe *et al.*, 2012).

### Modelo de cálculo de dosis de Zn para el cultivo de maíz

El modelo se basó en un balance de masas (Rodríguez, 1993; Luzio y Casanova, 2006), que considera la demanda de Zn por parte del cultivo ( $DEM_{Zn}$ ) y el suministro de Zn por el suelo ( $SUM_{Zn}$ ). Para la corrección de la dosis de Zn, se incorporó la capacidad tampón de Zn del suelo ( $CT_{Zn}$ ) expresada como los kg de Zn  $ha^{-1}$  necesarios para elevar en 1 mg  $kg^{-1}$  el contenido de Zn-DTPA de una hectárea de suelo hasta una profundidad de 20 cm. Así la  $CT_{Zn}$  tiene las siguientes unidades:  $kg\ Zn\ ha^{-1}/mg\ Zn\ kg^{-1}$  y la dosis de Zn se calcula como:

$$Dosis\ de\ Zn\ (kg\ ha^{-1}) = (DEM_{Zn} - SUM_{Zn}) \times CT_{Zn} \quad (1)$$

La  $DEM_{Zn}$  ( $kg\ Zn\ ha^{-1}$ ) se calculó según:

$$DEM_{Zn} = \frac{RE \times (1 - HC) \times RI_{Zn}}{IC} \quad (2)$$

donde:

*RE*: rendimiento de maíz grano obtenido por los agricultores en cada predio ( $qqm\ ha^{-1}$ ).

*HC*: humedad de cosecha del maíz grano (%), se utilizó un valor de 14,5 (ODEPA, 2013; Gyori, 2017)

*IC*: Índice de cosecha del maíz grano (-), se utilizó un valor de 0,46 (Fundacion Chile, 2011).

*RI<sub>Zn</sub>*: Requerimiento interno de Zn ( $kg\ Zn/100\ kg\ de\ grano$ ), se utilizó un valor de 0,0053 (Torri *et al.*, 2005).

Como  $SUM_{Zn}$  se utilizaron los niveles de Zn disponible, los cuales fueron medidos en cada una de las muestras de suelo, para lo cual se empleó como extractante una solución de DTPA-CaCl<sub>2</sub>-TEA tamponada a pH 7,3, posteriormente se determinó la concentración Zn con un espectrómetro de emisión atómica con plasma inducido por microondas (MP-AES Agilent 4100) de acuerdo a Sadzawka (1990) y Katyal y Sharma (1991). El  $SUM_{Zn}$  medido se expresa en  $mg\ kg^{-1}$ , luego para convertirlo a  $kg\ ha^{-1}$  se consideró la densidad aparente del suelo (*Da*) y un espesor de suelo de 20 cm para el horizonte A.

### Determinación de capacidad tampón de Zn

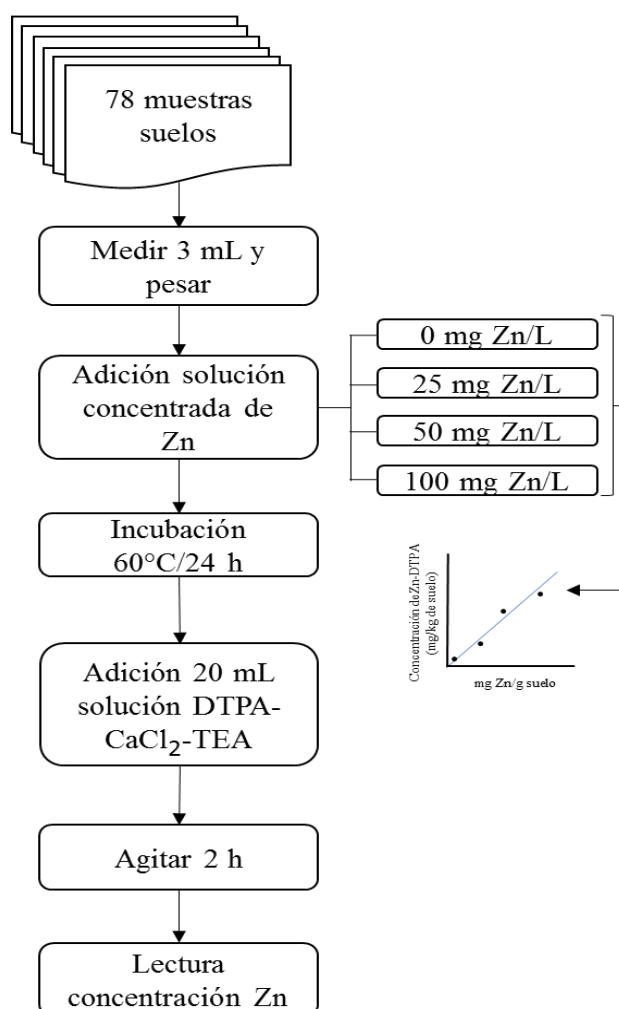
Para determinar la  $CT_{Zn}$  se adaptó el método propuesto por Sadzawka *et al.* (2006) para determinar la capacidad tampón de P a fin de definir la  $CT_{Zn}$ , para lo cual se realizaron pruebas preliminares con tres muestras de suelo que presentaban clases texturales contratantes dentro de las 78 muestras de suelo recolectadas, estas pruebas preliminares permitieron determinar el número de concentraciones de Zn usadas para la incubación de los suelos.



El procedimiento desarrollado se detalla a continuación:

- 1) Se pesó un volumen de 3 mL de suelo previamente tamizados a 2 mm en un frasco plástico. Cada suelo fue pesado con cuatro repeticiones, equivalentes a las concentraciones de Zn a ser incubadas.
- 2) A una de las réplicas se agregó 5 mL de agua destilada y al resto de ellas se les adicionó 5 mL de solución de Zn con las siguientes concentraciones: 25, 50 y 100 mg L<sup>-1</sup>. El patrón de Zn estándar que se utilizó fue Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1000 mg/L (Merck).
- 3) Los frascos se incubaron a 60°C por 24 h.
- 4) Se determinó la concentración de Zn-DTPA en las muestras utilizando el procedimiento descrito por Sadzawka (1990) y Katyal y Sharma (1991) (ver Figura 2).

Posteriormente se ajustó una función de regresión lineal considerando en el eje Y la extracción de Zn (mg Zn kg suelo<sup>-1</sup>) luego de la adición de soluciones con diferentes concentraciones de Zn (0, 25, 50 y 100 mg Zn L<sup>-1</sup>) y en el eje X las diferentes concentraciones de Zn aplicado por masa de suelo (mg Zn kg<sup>-1</sup>). Para estimar la  $CT_{Zn}$  (kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>) se calculó la recíproca de la pendiente de la regresión lineal (Sadzawka y Campillo, 2005).



**Figura 2.** Esquema para la determinación de la capacidad tampón de Zn.

## **Relación de la $CT_{Zn}$ con algunas propiedades de los suelos**

Debido principalmente a que las variables arcilla, limo y arena son de tipo composicional, poseen la restricción que la suma de ellas para cada observación es una constante; es decir cada fracción granulométrica representa una proporción del todo que determina la textura del suelo (Mateu-Figueras *et al.*, 2003; Belmonte, 2012). Ante esta limitación, se utilizó el método multivariado de clasificación no paramétrica denominada Árboles de Clasificación y Regresión (CART), que pertenece a la familia de las técnicas de árboles de decisión (Kovalevski y Macat, 2012; Breiman *et al.*, 1984).

Según Díaz (2012) dentro del método de CART, existen dos tipos de árboles:

- 1) El árbol de clasificación, que requiere que la variable respuesta sea categórica.
- 2) El árbol de regresión, requiere que la variable respuesta sea continua

Dado que la variable respuesta del presente estudio es continua se utilizó el árbol de regresión, este árbol consiste en un conjunto de reglas determinadas por un procedimiento mediante particiones binarias recursivas donde un conjunto de datos es sucesivamente particionado, esta partición binaria permite conformar dos grupos o nodos más homogéneos dentro y más heterogéneos entre ellos (Serna, 2009; Heredia *et al.*, 2010; Díaz, 2012).

Cada árbol se obtiene a partir de la clasificación de un nodo parental o raíz que contiene la totalidad de los datos, este nodo raíz se particionará si cumple una de las siguientes condiciones: si hay suficiente heterogeneidad para producir una partición de observaciones y/o el tamaño del nodo es superior al mínimo establecido para continuar con el algoritmo (Zhang y Singer, 2010; Heredia *et al.*, 2010), los nodos formados son mutuamente excluyentes, si estos nodos se ven afectados por una nueva partición se denominan nodos intermedios, si por el contrario los datos dentro del nodo tienen suficiente homogeneidad o bien el tamaño del nodo es suficiente, este nodo no volverá a particionarse y recibirá el nombre de nodo terminal (Calle y Sánchez-Espigares, 2007; Heredia *et al.*, 2010).

El CART se construyó mediante 3 pasos (Timofeev, 2004; Zhang y Singer, 2010):

- i) Construcción del árbol máximo: este árbol ajusta la información contenida en la base de datos.
- ii) Poda del árbol: que consiste en ir cortando los nodos terminales desde el último nivel hacia arriba, de esta forma se van dejando los nodos más importantes.
- iii) Elección del árbol óptimo: el objetivo es encontrar un árbol que equilibre la complejidad del árbol y que a su vez tenga una estimación de riesgo baja.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estadística descriptiva

En general, se encontró una variabilidad alta en las propiedades de los suelos utilizados en el estudio, presentando coeficiente de variación (CV) > 20%, lo que sugiere que la  $CT_{Zn}$  medida en este estudio representa a un gran combinatoria de tipos de suelo utilizados para el cultivo de maíz en la Región de O'Higgins, estos CV resultados coinciden con lo reportado por Mulla y McBratney (2002) tanto para el pH como para arcilla mientras que los CV de arena y contenido de MO son ligeramente mayores (Anexo 1). En el Cuadro 6 se muestra la estadística descriptiva de los resultados obtenidos para las propiedades de los suelos y la  $CT_{Zn}$ .

**Cuadro 6.** Estadígrafos de dispersión de las propiedades de suelo y de la capacidad tampón de Zn.

Propiedad <sup>1</sup>	Estadígrafo <sup>2</sup>						
	n	$\mu$	mín	máx	$\sigma$	$\sigma^2$	CV (%)
pH	78	7,03	6,00	7,90	0,44	0,19	6,3
MOS (%)	78	2,84	0,68	14,20	2,02	4,09	71,1
A (%)	78	36,27	14,90	69,70	13,11	171,79	36,1
L (%)	78	30,78	13,80	52,30	8,61	74,15	27,9
a (%)	78	32,95	9,20	69,50	14,56	211,97	44,2
$CT_{Zn}$	78	0,84	0,47	1,50	0,23	0,052	27,38

<sup>1</sup> MOS = materia orgánica del suelo; A = arcilla; L = limo; a = arena.

<sup>2</sup> n = cantidad de muestras;  $\mu$  = media aritmética; mín = mínimo; máx = máximo;  $\sigma$  = desviación estándar;  $\sigma^2$  = varianza; CV = coeficiente de variación.

Los resultados muestran que el pH presentó un CV bajo (< 20%), con una predominancia de suelos con pH neutro a débilmente alcalino (83%), esto concuerda con Casanova *et al.* (2013) y Nájera *et al.* (2015). Para el presente estudio se utilizaron muestras de suelo en rangos desde débilmente ácido hasta moderadamente alcalino (Cuadro 7). Todos estos valores de pH se encuentran dentro de los valores descritos por CIREN (2002) para los suelos de la Región de O'Higgins.

**Cuadro 7.** Distribución de frecuencia para la reacción del suelo (pH).

Categoría <sup>1</sup>	Rango	Frecuencia	Proporción	Proporción acumulada
	-	-	----- % -----	
Débilmente ácido	6,1 – 6,5	12	15,39	15,39
Neutro	6,6 – 7,3	45	57,69	73,08
Débilmente alcalino	7,4 – 7,8	20	25,64	98,72
Moderadamente alcalino	7,9 – 8,4	1	1,28	100,00
Total		78	100,00	

<sup>1</sup>Categorías según Schoeneberger *et al.* (2012).

Para el caso del contenido de MO del suelo, en general los suelos presentaron bajos contenidos de MO, el Cuadro 8 muestra que la mayor parte de las muestras (75% del total) se encontraba en un rango de contenido de MO de muy bajo a bajo (< 3% MO). Estos resultados coinciden con lo reportado por Nájera *et al.* (2015), aunque fue posible contar al menos con un 10% de muestras en rangos altos a muy altos (> 4,5% MO). Estos datos también coinciden con los reportados por CIREN (2002).

**Cuadro 8.** Distribución de frecuencia de la materia orgánica para los suelos en estudio.

Categoría <sup>1</sup>	Rango	Frecuencia	Proporción	Proporción acumulado
	- % -	-	----- % -----	
Muy bajo	0,1 – 1,5	4	5,1	5,1
Bajo	1,6 – 3,0	55	70,5	75,6
Medio	3,1 – 4,5	11	14,1	89,7
Alto	4,6 – 6,0	2	2,6	92,3
Muy alto	> 6,0	6	7,7	100,0
Total		78	100,0	

<sup>1</sup> Categorías según Jones (2003).

El Cuadro 9 muestra la variabilidad de textura del suelo en los suelos estudiados encontrándose un amplio rango de clases texturales que van desde arcillosa hasta franco limosa, que corresponden a un 56,7 % mollisoles, 19,4 % alfisoles, 17,9 % vertisoles y 6 % inceptisoles.

**Cuadro 9.** Distribución de frecuencia para dos separados texturales del suelo.

Categorías	Arcilla			Limo		
	Frecuencia	Proporción	Proporción acumulado	Frecuencia	Proporción	Proporción acumulado
	-	----- % -----				
<25	18	23,08	23,08	20	25,64	25,64
25 a < 50	48	61,54	84,62	57	73,08	98,72
50 a < 75	12	15,38	100,00	1	1,28	100,00
> 75	-	-	-	-	-	-
	78	100,0	100,00	78	100,00	100,00

El Zn DTPA para las muestras de suelo presentó rango de 0,12 a 8,72 mg kg<sup>-1</sup> con una concentración media de 1,26 mg kg<sup>-1</sup>, esta media es ligeramente menor (0,34 mg kg<sup>-1</sup>) a la concentración promedio reportada por Nájera *et al.* (2015) en la zona, pero ambas concentraciones se encuentran por encima del nivel crítico de Zn reportado para el cultivo de maíz (Lindsay y Norvell, 1978; Alloway, 2008; Drissi *et al.*, 2015). No obstante, Nájera *et al.* (2015) observan incrementos de rendimiento en cultivo maíz cuando la concentración de Zn disponible se encontraba por encima de 1 mg kg<sup>-1</sup>, por lo que aparentemente el nivel crítico para el cultivo de maíz en esta zona sería más elevado que el reportado en la literatura. Al respecto, Sparks (2013) menciona que, a pesar de que la mayoría de los criterios desarrollados localmente para establecer el nivel crítico del nutriente se encuentran cerca de los valores reportados en la literatura, algunos niveles críticos son considerablemente diferentes.

### Árboles de regresión y clasificación (CART)

Se utilizó el método de crecimiento CART desarrollado por Breiman (1984), considerando como variable dependiente (VD) a la  $CT_{Zn}$  y como variables independientes (VI) al pH del suelo, MOS, y los separados texturales (A, L y a). En una primera instancia se elaboró un primer árbol máximo de regresión y clasificación (Apéndice 3), a dicho árbol no se estableció criterios de crecimiento (Zhang y Singer, 2010; Díaz, 2012).

Posterior a este procedimiento se elaboró un segundo árbol de regresión y clasificación limitando los criterios de crecimiento permitiendo que el árbol de regresión y clasificación sea lo más sencillo posible. Para ello se consideró las mismas VD y VI, pero se estableció una máxima profundidad del árbol de 2 niveles de crecimiento (número de niveles por debajo del nodo raíz) debido a que a mayores niveles la interpretación de árbol de regresión se hacía más compleja y no se obtenía una mejora significativa en la predicción de la  $CT_{Zn}$  a pesar que se incluían más variables en el modelo (Zhang y Singer, 2010; Díaz, 2012; Berlanga *et al.*, 2013).

El procedimiento CART determinó que existe una  $CT_{Zn}$  distinta para los suelos (Kuo, 1990). En el Cuadro 10 se presentan las medidas de resumen del CART, pudiéndose observar en total 7 nodos, donde el nodo "0" (nodo raíz) representa el total de muestras de suelo analizadas, este nodo raíz se divide en 2 nodos intermedios (nodo 1 y nodo 2), estos nodos se vuelven a particionar en los nodos 3 y 4, 5 y 6 respectivamente siendo estos los nodos terminales.

**Cuadro 10.** Medidas de resumen del árbol de regresión de la capacidad tampón de Zn.

Nodo raíz	Nodo	n <sup>1</sup>	Media	Desviación estándar	Proporción	Media pronosticada de $CT_{Zn}$	Variable independiente primaria		
							Variable	Mejora	Valores de división
			$\mu$	$\sigma$	(%)	$\mu_p$	(%)		
	0	78	0,84	0,23	100,0	0,84	-	-	-
0	1	46	0,72	0,16	59,0	0,72	Arcilla	1,9	$\leq 37,00\%$
0	2	32	1,001	0,23	41,0	1,00	Arcilla	1,9	$> 37,00\%$
1	3	45	0,71	0,14	57,7	0,71	Limo	0,3	$\leq 51,05\%$
1	4	1	1,19	--	1,3	1,19	Limo	0,3	$> 51,05\%$
2	5	28	0,97	0,20	35,9	0,96	pH	0,5	$\leq 7,45$
2	6	4	1,29	0,10	5,1	1,29	pH	0,5	$> 7,45$

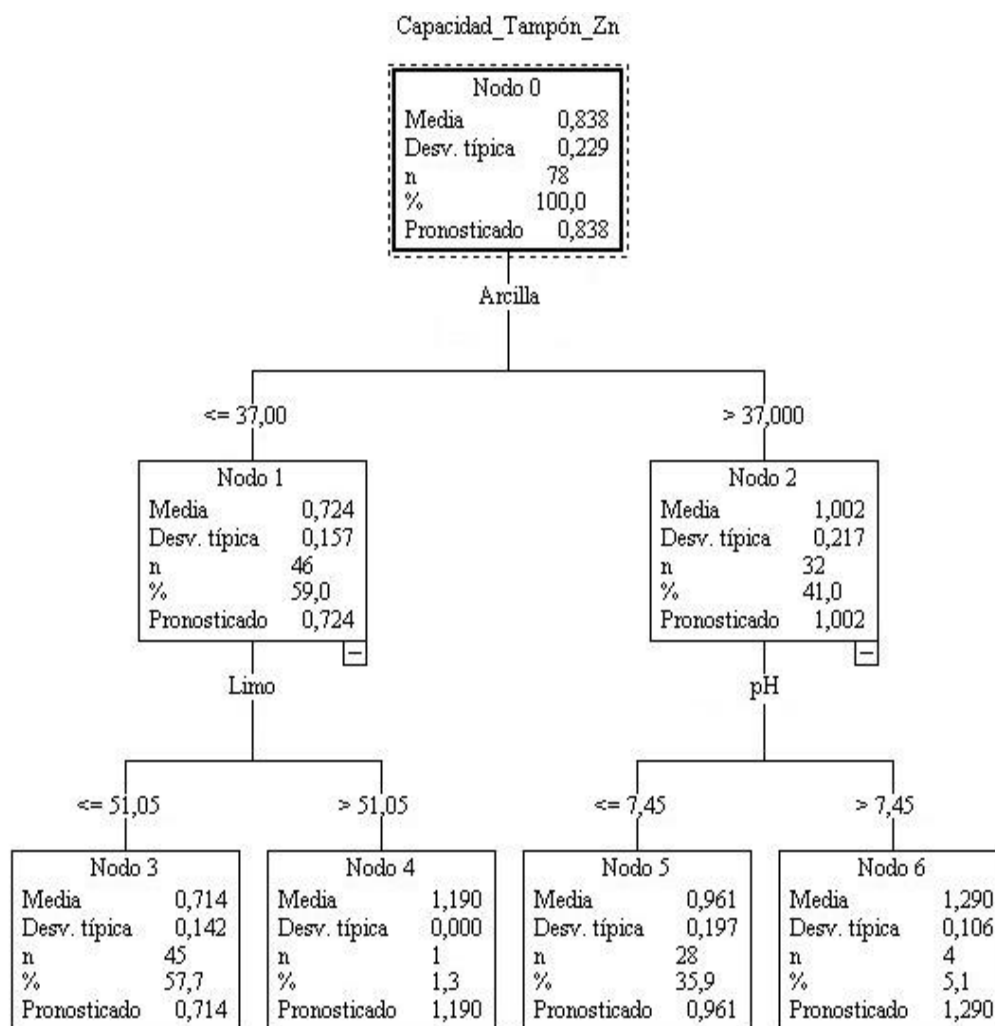
<sup>1</sup> Cantidad de muestras

En la Figura 3 se muestra el árbol de regresión, en cada nodo se muestra la media aritmética, desviación estándar, porcentaje de muestra respecto del total y el valor pronosticado de la variable dependiente. Se puede observar que el nodo raíz muestra una media global para la  $CT_{Zn}$  de 0,84 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>, el árbol de regresión detecta como primer criterio de partición a la variable contenido de arcilla, de esta forma el nodo raíz experimenta una división binaria gracias a la variable contenido de arcilla, el nivel 1 está formado por el nodo 1 en la cual se encuentran aquellas muestras que presenten un contenido de arcilla  $\leq 37\%$ , estas  $\{\{\{\}$  muestras tendrían una  $CT_{Zn}$  de 0,72 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>, representando al 59% del total de muestras de suelo del estudio. En el nodo 2 se encuentran aquellos suelos que tienen un contenido de arcilla  $> 37\%$ , presentando una  $CT_{Zn}$  de 1.0 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup> lo cual representa un 41% del total de muestras de suelo del estudio. Por lo tanto, la variable contenido de arcilla es considerada la variable predictora de mayor importancia en el modelo esto concuerda con la literatura que menciona que la arcilla controla predominantemente la retención y disponibilidad de micronutrientes (Katyal y Sharma, 1991; Mengel y Kirkby, 1987).

En el segundo nivel, se observa que tanto el nodo 1 y nodo 2 sufren una división binaria, en el caso del nodo 1 se divide en el nodo 3 y 4, esta división se da en función del contenido de limo; en el nodo 3 se encuentran aquellas muestras que tienen un contenido  $\leq 51\%$  de limo, obteniendo un valor pronosticado para la  $CT_{Zn}$  de 0,71 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>. Las muestras presentes en este nodo terminal corresponden a suelos de texturas gruesas y medias; mientras que los suelos que tienen  $> 51\%$  limo presentan un valor de la  $CT_{Zn}$  de 1,19 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>, las muestras que se ubican en este nodo terminal corresponden a suelos de clase textural franco arcillo limosa, franco limosa y limosa.

Por otra parte, el nodo 2 se divide en el nodo 5 y 6 en función de la variable pH, donde los suelos que tengan un pH  $\leq 7,5$  tienen una  $CT_{Zn}$  de 0,96 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>; mientras que aquellos suelos que presentan un pH  $> 7,5$  presentarán una  $CT_{Zn}$  1,29 kg Zn ha<sup>-1</sup>/mg Zn kg<sup>-1</sup>. Por lo tanto, los suelos que se encuentran dentro de los nodos 5 y 6 se ubican

dentro de las siguientes clases texturales: arcillosa, arcillo limosa y arcillo arenosa, que dependiendo del pH del suelo se dividirán en dos subcategorías. En el Cuadro 11 se muestran las categorías propuestas con mayor detalle.



**Figura 3.** Árbol de regresión y clasificación para la capacidad tampón de Zn en suelos de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

El procedimiento CART está asociado a una estimación de riesgo o probabilidad de error del modelo (IBM SPSS, 2012; Díaz, 2012). En este caso se determinó una estimación de riesgo de 2,2 % con un error estándar del 0,5%, una interpretación de la estimación del riesgo con una variable dependiente continua se obtiene mediante el cociente entre la varianza dentro del nodo raíz (estimación del riesgo) y la varianza total (varianza del nodo raíz) (Kovalevski y Macat, 2012; Roche, 2009), obteniendo que el árbol de regresión explica por lo menos el 58% de la variación de la  $CT_{Zn}$ .

Por lo tanto, aquellos suelos que tengan un mayor contenido de arcilla se requiere aplicar una mayor cantidad de Zn debido a que presentan una mayor  $CT_{Zn}$ , en comparación con los suelos arenosos que poseen una baja  $CT_{Zn}$  en la cual la adsorción del nutriente cerca de la raíz de la planta se reduce rápidamente debido a un transporte difusivo más lento traduciéndose en una absorción de nutrientes limitado estos resultados coinciden con lo reportado por la literatura (Barrow, 1966; Rodríguez, 1993).

Existe una escasez de material publicado sobre el efecto del poder tampón y la disponibilidad de los micronutrientes, por lo tanto, el presente trabajo se remite a algunos autores (Kuo, 1990; Dang *et al.*, 1994; Girija Veni *et al.*, 2013), que mencionan al pH como la variable de mayor influencia en la  $CT_{Zn}$ . Asimismo, Sparks (2003) menciona al pH,  $CaCO_3$  y MOS como las principales variables que la afectan. Por su parte, Brennan (1992) menciona que la variable más importante es el pH, seguido por la arcilla y la MOS, mientras que Maskina *et al.* (1980) mencionan a la textura del suelo y el pH como los principales factores que influyen en la  $CT_{Zn}$ . Por su parte Mahata *et al.* (2012) reporta a la materia orgánica, la arcilla y la CIC como los principales factores para determinar la disponibilidad de Zn en los suelos.

Si bien es cierto que en el presente estudio encontramos la variable contenido de arcilla como el mejor predictor de la  $CT_{Zn}$ , diversos estudios señalan que es el pH la principal variable de importancia que influye en la  $CT_{Zn}$ . Al respecto Roca *et al.* (2007) mencionan que el escaso rango de variación de las variables en estudio (MOS y pH) puede ser uno de los motivos por el cual las asociaciones entre dichas variables y la  $CT_{Zn}$  no sean significativas.

Para facilitar la interpretación de los resultados se proponen tres categorías (ver Cuadro 11), las cuales se ajustaron al triangulo textural USDA, donde una determinada clase textural éste presente en 1 sola categoría. Así, para la primera categoría se consideró a las clases texturales que presentan un contenido de Arcilla mayor a 40%. Esta primera categoría se divide en función del pH en dos subcategorías. En la segunda categoría se encuentran las clases texturales que presentan un contenido de arcilla menor al 40% y un contenido de limo mayor al 50%. Finalmente, la categoría 3 consideró a las clases texturales que presentan un contenido de arcilla y limo menor a 40% y 50% respectivamente.

**Cuadro 11.** Categorías propuestas para capacidad tampón para zinc dependiendo de la clase textural y pH del suelo.

Clase textural	pH	Limo	Valor de $CT_{Zn}$
	-	%	- kg Zn ha <sup>-1</sup> /mg Zn kg <sup>-1</sup> -
Arcillosa, arcillo limosa y arcillo arenosa (si a = 45-60 % y L<20%)	≥ 7,5	-	1,3
	< 7,5	-	1,0
Franco limosa, limosa y franco arcillo limosa (si a<20% y A<40%)	-	>50%	1,2
Franco arcillo arenosa, franco arcillosa, franca, franco arenosa, areno francosa y arenosa	-	≤50	0,7



## Cálculo de dosis de Zn para maíz

Cuando la demanda es mayor que el suministro, se producirá un déficit de Zn que es necesario suplir con fertilización (Rodríguez, 1993; Rojas, 2009). En el presente estudio se encontró que en todos los predios la demanda de Zn fue mayor que el suministro desde el suelo como se muestra en el Cuadro 12.

**Cuadro 12.** Estadígrafos de la demanda y suministro de zinc de los suelos del estudio

Balance	Estadígrafo <sup>1</sup>					
	n	$\mu$	min	máx	$\sigma$	$\sigma^2$
<i>DEM</i> <sub>Zn</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	78	1,50	1,0800	1,90	0,170	0,028
<i>SUM</i> <sub>Zn</sub>	78	0,03	0,0003	0,20	0,029	0,001

<sup>1</sup> n = cantidad de muestras;  $\mu$  = media aritmética; mín = mínimo; máx = máximo;  $\sigma$  = desviación estándar;  $\sigma^2$  = varianza.

Acerca de la recomendación de la dosis de fertilización con Zn para el cultivo del maíz existe una diversidad de recomendaciones, muchas de ellas basados en la extracción de Zn-DTPA. Sin embargo, queda claro que esta metodología no explica adecuadamente la disponibilidad del Zn para las plantas (Nair, 2013). Por lo mismo, Nair (2013) sugiere investigar la capacidad tampón del suelo y luego calibrar las recomendaciones de fertilizantes de Zn. Esto es apoyado por los resultados de Dang (1994) quien menciona que la  $CT_{zn}$  por si sola representa hasta el 62% de la variación en el rendimiento de trigo respecto a la extracción de Zn con DTPA, la cual aporta sólo un 26% de explicación a la variación del rendimiento de trigo observado.

Dicho esto, la  $CT_{zn}$  se muestra como el criterio más importante que afecta el procesos de absorción por las raíces de la planta, ya que las velocidades de flujo dependen del gradiente de concentración de Zn entre la superficie radicular y la solución del suelo, por lo tanto cuantificar la  $CT_{zn}$  con precisión haría que el análisis de suelo y posterior recomendación de fertilización fuera confiable y reproducible (Nair, 2013).

Es por ello que empleando la ecuación 1 se estimó la dosis de Zn para los 78 predios, en el Cuadro 13 se muestra el promedio de la dosis de fertilización.

**Cuadro 13.** Estadígrafos de la dosis de zinc para los predios de maíz del estudio.

Dosis de Zn (kg ha <sup>-1</sup> )	Estadígrafo <sup>1</sup>					
	n	$\mu$	mín	máx	$\sigma$	$\sigma^2$
	78	1,26	0,69	2,55	0,38	0,145

<sup>1</sup> n = cantidad de muestras;  $\mu$  = media aritmética; mín = mínimo; máx = máximo;  $\sigma$  = desviación estándar;  $\sigma^2$  = varianza.

Las dosis de fertilización con Zn para los suelos en estudio se encuentran en un rango de 0,69 kg Zn ha<sup>-1</sup> hasta 2,55 kg Zn ha<sup>-1</sup>, estas dosis son inferiores a las dosis recomendadas

por diversos autores, tal es el caso de Nair (2013) quien menciona que en los estados de la India se recomienda de manera general la aplicación de fertilizante en base a Zn a razón de 25 kg ha<sup>-1</sup> basado en una extracción DTPA, por su parte Bouman (2002) menciona que en América del Sur se fertiliza con Zn a una tasa de 30 a 50 kg ha<sup>-1</sup>, Alloway (2008) menciona que en Virginia EE.UU. la dosis de fertilización con Zn es de 6,7 kg ha<sup>-1</sup> para una corrección efectiva de las deficiencias de Zn en maíz. Asimismo, Esposito *et al.*, (2010) cuantifico el rendimiento de maíz encontrando que las mejores dosis fueron 1,5 – 2 y 3 kg Zn ha<sup>-1</sup>. Estas dosis recomendadas en este presente trabajo podrían atribuirse a la incorporación de la  $CT_{Zn}$  al modelo de estimación, lo que las hace más confiable en la medida que se compruebe el modelo con estudios adicionales de validación.

## CONCLUSIONES

Mediante el método de árboles de regresión y clasificación se logró adaptar un modelo de estimación de dosis racional para Zn en el cultivo de maíz considerando la  $CT_{Zn}$ . Este modelo permitirá predecir la cantidad de Zn a agregar al suelo de modo que asegure una concentración adecuada de Zn disponible para la planta que permita un rendimiento óptimo de los cultivos de maíz de la Región O'Higgins-Chile.

Se propone una metodología de laboratorio para determinar la  $CT_{Zn}$  consistente en la incubación de un volumen de suelo a concentraciones crecientes de Zn a 60°C durante 24 horas, de esta manera superar las limitaciones que presentan las diferencias individuales de la capacidad del suelo para reaccionar ante la adición de Zn.

En términos generales se observó una mayor  $CT_{Zn}$  en suelos de textura fina en comparación a suelos de textura gruesa, observándose la existencia de una relación entre la  $CT_{Zn}$  y las propiedades de los suelos, identificando al contenido de arcilla como principal variable que influye en la  $CT_{Zn}$ , seguido por el pH del suelo y el contenido de limo, en función de estas variables se proponen 3 categorías para la  $CT_{Zn}$  de los suelos de la Región O'Higgins-Chile.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alloway, B. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition (2<sup>nd</sup> ed.), International Zinc Association. Paris, France.
- Alvarez, J. M., and González, D. 2006. Zinc transformations in neutral soil and zinc efficiency in maize fertilization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(25), 9488–9495.
- Barrow, N. J. 1966. Nutrient potential and capacity. II. Relationship between potassium potential and buffering capacity and the supply of potassium to plants. *Australian Journal of Agricultural Research* 17, 849-861.
- Belmonte, V. 2012. Alternativas para el Análisis de Datos Composicionales con estructura de tratamiento. Una aplicación en el estudio del efecto de temperaturas de quema sobre las propiedades físicas de suelos en la región semiárida pampeana central. Tesis en Magíster en Estadística Aplicada. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Berlanga, V., Rubio, M., y Baños, R. 2013. Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 6(1), 65-79.
- Bouman, B., Hengsdijk, H., Hardy, B., Bindraban, P., Tuong, T. and Ladha J. 2002. Water-wise rice production. Proceedings of the International Workshop on Water-wise Rice Production, International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., and Stone, C. G. 1984. Classification and Regression Trees. Wadsworth International Group, Belmont, California, USA.
- Brennan, R. 1992. The relationship between critical concentration of DTPA - extractable zinc from the soil for wheat production and properties of Southwestern Australian Soils response to applied zinc. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(7-8), 747–759.
- Bukvić, G., Antunović, M., Popović, S., and Rastija, M. 2003. Effect of P and Zn fertilisation on biomass yield and its uptake by maize lines (*Zea mays* L.). *Plant, Soil and Environment*, 49(11), 505–510.
- Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(111), 185–205.
- Cakmak, I. 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food. *Plant and Soil*, 247, 3–24.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302(1-2), 1-17.
- Calle, M. L., y Sánchez-Espigares, J. A. 2007. Árboles de clasificación y regresión en la investigación biomédica. *Medicina clínica*, 129(18), 702-706.

Casanova, M., Salazar, O., Seguel, O., Luzio, W. 2013. The Soils of Chile, World Soils Book Series. Springer Science Business Media, Dordrecht.

CIREN. 1996. Estudio agrológico, Región VI de Chile. Centro de Información de Recursos Naturales, Publicación, N° 114. Santiago, Chile.

Dang, Y. P., Dalal, R. C., Edwards, D. G., and Tiller, K. G. 1994. Zinc buffer capacity of vertisols. *Australian Journal of Soil Research*, 32(6), 1231–1242.

Díaz, J. 2012. Comparación entre Árboles de Regresión CART y Regresión Lineal. Tesis en Ciencias - Estadísticas. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

Drissi, S., Houssa A. A., Bamouh, A. y Benbella. M. 2015. Response of corn silage (*Zea mays L.*) to zinc fertilization on a sandy soil under field and outdoor container conditions. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Science*. [in press].

Espósito G., Balboa G., Castillo C. y Balboa R. 2010. Disponibilidad de zinc y respuesta a la fertilización del maíz en el sur de Córdoba. In: *XXII Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo, Rosario*. pp. 1–4.

Fundación Chile. 2011. Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano. Unidad Cropcheck Chile® - Alimentos y Biotecnología. Santiago-Chile.

Girija Veni, V., Rattan, R.K. and Datta, S.P. 2013. Adsorption study : A systematic approach to determine zinc availability in soils of divergent characteristics. *International Journal of Agricultural Sciences*, 4(2), 102–105.

Gupta, U.C., Wu, K. and Liang, S. 2008. Micronutrients in Soils, Crops, and Livestock. *Earth Science Frontiers*, 15(5), 110–125.

Gyori, Z., 2017. Corn: Grain-Quality characteristics and management of quality requirements. In: C. Wrigley (ed.) *Cereal Grains Assessing and Managing Quality*. pp. 235–256.

Heredia, S.R., Bruno, C., Balzarini, M., 2010. Identificación de relaciones entre rendimientos y variables ambientales vía árboles de clasificación y regresión (CART). *Interciencia* 35 (12), 876–882.

Jones, J. 2003. Agronomic handbook: Management of crops, soils and their fertility, CRC Press.

Katyal, J. C., and Sharma, B. D. 1991. DTPA-extractable and total Zn, Cu, Mn, and Fe in Indian soils and their association with some soil properties. *Geoderma*, 49(1-2), 165-179.

Kovalevski, L. y Macat, P. 2012. Alternativas no paramétricas de clasificación multivariada. Decimoséptimas Jornadas “Investigaciones en la Facultad” de Ciencias Económicas y Estadística Universidad Nacional de Rosario. Rosario Argentina.

- Kuo, S. 1990. Zn buffering capacity and Zn accumulation in Swiss chard for some sludge-amended soils. *Plant and Soil*, 126(2), 177–186.
- Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper 1. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.
- López, J. 2016. Funciones de pedotransferencia para estimar la densidad aparente de suelos en Chile. Tesis de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.
- Luzio, W. y Casanova, M. 2006. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Servicio Agrícola Ganadero (SAG) y Universidad de Chile, 2006
- Mahata, M. K., Debnath, P., and Ghosh, S. K. 2014. Critical limits of zinc in soil and rice plant grown in alluvial soils of West Bengal, India. *SAARC Journal of Agriculture*, 10(2), 137-146.
- Manzeke, G. M., Mtambanengwe, F., Nezomba, H., and Mapfumo, P. 2014. Zinc fertilization influence on maize productivity and grain nutritional quality under integrated soil fertility management in Zimbabwe. *Field Crops Research*, 166, 128–136.
- Marschner, H. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3<sup>ra</sup> ed.). Academic press. USA.
- Maskina, M.S., Randhawa, N.S. and Sinha, M.K. 1980. Relation of growth and zinc uptake of rice to quantity, intensity and buffering capacity factors of zinc in soils. *Plant and Soil*, 54(2), 195–205.
- Mateu-Figueras, G., Martín-Fernández, J. A., Pawlowsky-Glahn, V., and Barceló-Vidal, C. 2003. El problema del análisis estadístico de datos composicionales. 27 Congreso Nacional de estadística e investigación operativa. Universitat de Lleida, Lleida, España.
- Mattiello, E.M. Ruiz, H. A., Neves, J. C., Ventrella, M. C., and Araújo, W. L. 2015. Zinc deficiency affects physiological and anatomical characteristics in maize leaves. *Journal of Plant Physiology*, 183, 138-43.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition (5<sup>th</sup> ed.), Springer Science and Business Media.
- Montalvo, D. Degryse, F., Silva, R. C., Baird, R., and McLaughlin, M. J. 2016. Agronomic Effectiveness of Zinc Sources as Micronutrient Fertilizer. *Advances in Agronomy*, 139, 215 – 267.
- Mulla, D.J. and McBratney, A.B. 2002. Soil Spatial Variability. pp: 434-371. In: Soil Physics Companion. Warrick, A.W. (Ed.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA.
- Nair, P. 2013. The buffer power concept and its relevance in african and asian soils. In *Advances in Agronomy*. 2013 Elsevier Inc., 447–516.

Nikolic, M., Nikolic, N., Kostic, L., Pavlovic, J., Bosnic, P., Stevic, N., Savic, J. and Hristov, N. 2016. The assessment of soil availability and wheat grain status of zinc and iron in Serbia: Implications for human nutrition. *Science of the Total Environment*, 553, 141-148.

ODEPA, Oficina de estudios y políticas. Agrarias. 2013. Reglamento especial para el maíz, en el marco de la ley que regula las transacciones comerciales de productos agropecuarios. [en línea] <<http://www.odepa.gob.cl/reglamento-especial-para-el-maiz-en-el-marco-de-la-ley-que-regula-las-transacciones-comerciales-de-productos-agropecuarios/>> [consulta: 31 enero 2017].

Pascual, M. B., Echevarria, V., Gonzalo, M. J., and Hernández-Apaolaza, L. 2016. Silicon addition to soybean (*Glycine max* L.) plants alleviate zinc deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108, 132–138.

Rengel, Z. 1999. Zinc deficiency in wheat genotypes grown in conventional and chelator-buffered nutrient solutions. *Plant and Soil*, 215(2), 193–202.

Roca, N., Pazos, M. S., y Bech, J. 2007. Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del NO Argentino. *Ciencia Del Suelo*, 25(1), 31–42.

Roche, A. 2009. Árboles de decisión y series de tiempo. Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Matemática. Facultad de ingeniería. Universidad de la República. Uruguay.

Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile.

Rojas, C. 2009. Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. Centro Regional de Investigación INIA La Platina, pp.24–43.

Sadeghzadeh, B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 905–927.

Sadzawka, A. 1990. Métodos de análisis de suelos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (Serie La Platina N° 16).

Sadzawka, A. y Campillo, R. 2005. Capacidad tampón de fósforo. Validación en terreno de la determinación de laboratorio. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur.*, (25), 14-15.

Sadzawka, A. Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., y Neaman, A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Serie La Platina N° 16).

Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A. and Benham, E.C. 2012. *Field book for describing and sampling soils*, Version 3.0. *Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE*, 36.

Serna, S. 2009. Comparación de árboles de regresión y clasificación y regresión logística. Tesis para optar el grado de Magíster. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Colombia.

Sharma, A. Patni B., Shankhdhar D. and Shankhdhar S.C. 2013. Zinc - An Indispensable Micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 19(1), 11–20.

Sparks, D. 2003. Environmental Soil Chemistry. Second Edition. Academic Press. London.

Sparks, D. 2013. Advances in agronomy. Vol. 122. Elsevier Academic. London.

IBM SPSS. 2011. Decision Trees 20. Copyright SPSS Inc. 1989, 2011, [en línea] <[ftp://public.dhe.ibm.com/software/analytics/spss/documentation/statistics/20.0/es/client/Manuals/IBM\_SPSS\_Decision\_Trees.pdf] > [consulta: 10 marzo 2017].

Timofeev, R., 2004. Classification and regression trees (CART) Theory and Applications. PhD thesis. Humboldt University, Berlin.

Torri, S; Urricariet, S. y Lavado R. 2005. Micronutrientes y elementos traza. pp. 189-205. En: Echeverría, H. y García, F. (eds.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. INPOFOS-INTA, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Uribe, J. Cabrera, R. De la Fuente, A. y Paneque, M., 2012. Atlas Bioclimático de Chile, Santiago Chile: Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental. Universidad de Chile.

Zhang, H. and Singer, B. 2010. Recursive Partitioning and Applications. Springer. New York.



## APÉNDICE

**Apéndice 1.** Resumen del modelo del árbol máximo de regresión y clasificación

Especificaciones	Método de crecimiento	CART
	Variable dependiente	Capacidad Tampón Zn
	Variables independientes	pH, MOS, Arcilla, Limo, Arena
	Máxima profundidad del árbol	5
	Número de nodos	29
	Número de nodos terminales	15

**Apéndice 2.** Tabla de árbol máximo de regresión y clasificación

Nodo raíz	Nodo	n <sup>1</sup>	$\mu$ <sup>2</sup>	$\sigma$ <sup>3</sup>	Proporción (%)	$\mu_p$ <sup>4</sup>	Variable independiente primaria	
							Variable	Valores de división
	0	78,00	0,84	0,23	1,00	0,84		
	0	1	46,00	0,72	0,16	0,59	0,72	Arcilla ≤ 37,00
	0	2	32,00	1,00	0,22	0,41	1,00	Arcilla > 37,00
	1	3	45,00	0,71	0,14	0,58	0,71	Limo ≤ 51,05
	1	4	1,00	1,19	-	0,01	1,19	Limo > 51,00
	2	5	28,00	0,96	0,20	0,36	0,96	pH ≤ 7,45
	2	6	4,00	1,29	0,10	0,05	1,29	pH > 7,45
	3	7	29,00	0,67	0,13	0,37	0,67	Arcilla ≤ 32,15
	3	8	16,00	0,79	0,13	0,21	0,79	Arcilla > 32,15
	5	9	1,00	1,50	-	0,01	1,50	Limo ≤ 20,40
	5	10	27,00	0,94	0,17	0,35	0,94	Limo > 20,40
	6	11	1,00	1,44	-	0,01	1,44	MOS ≤ 2,73
	6	12	3,00	1,24	0,04	0,04	1,24	MOS > 2,73
	7	13	28,00	0,68	0,13	0,36	0,68	MOS ≤ 8,77
	7	14	1,00	0,47	-	0,01	0,47	MOS > 8,77
	8	15	3,00	0,93	0,15	0,04	0,93	Arcilla ≤ 32,85
	8	16	13,00	0,76	0,10	0,17	0,76	Arcilla > 32,85
	10	17	4,00	1,17	0,22	0,05	1,17	pH ≤ 6,35
	10	18	23,00	0,90	0,13	0,29	0,90	pH > 6,35
	13	19	15,00	0,71	0,14	0,19	0,71	Arena ≤ 45,80
	13	20	13,00	0,64	0,11	0,17	0,64	Arena > 45,80
	15	21	2,00	0,85	0,01	0,03	0,85	pH ≤ 7,30
	15	22	1,00	1,11	-	0,01	1,11	pH > 7,30
	16	23	7,00	0,71	0,09	0,09	0,71	pH ≤ 7,10
	16	24	6,00	0,82	0,08	0,08	0,82	pH > 7,10
	17	25	2,00	1,34	0,14	0,03	1,34	Arena ≤ 27,45
	17	26	2,00	1,00	0,09	0,03	1,00	Arena > 27,45
	18	27	5,00	1,04	0,05	0,06	1,04	Limo ≤ 23,10
	18	28	18,00	0,86	0,12	0,23	0,86	Limo > 23,10

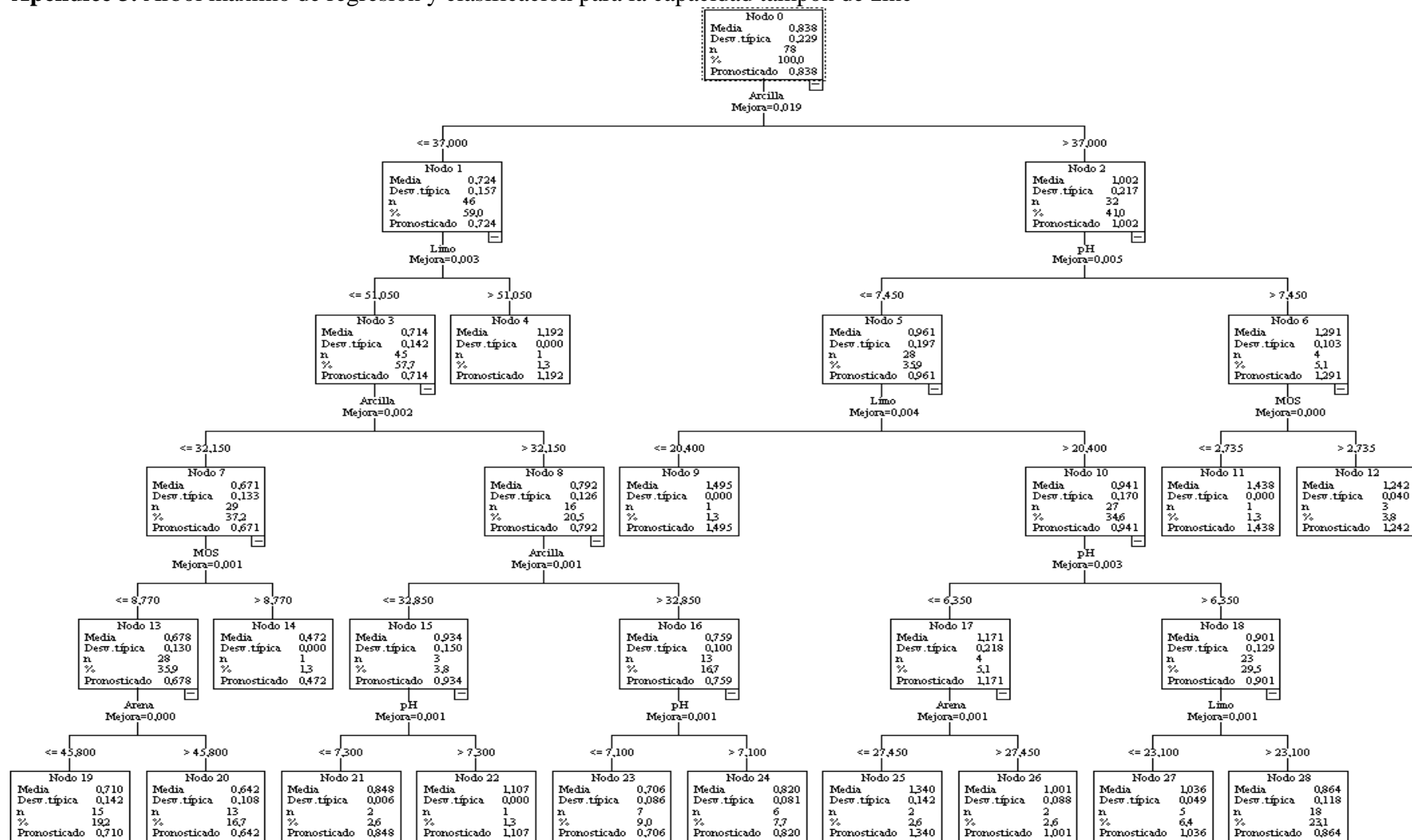
<sup>1</sup> Cantidad de muestras

<sup>2</sup> Media aritmética de la capacidad tampón de Zn

<sup>3</sup> Desviación estándar

<sup>4</sup> Media aritmética pronosticada de la capacidad tampón de Zn

### Apéndice 3. Árbol máximo de regresión y clasificación para la capacidad tampón de zinc



**Apéndice 4:** Contenido de Zn extraído de los suelos de la Región O'Higgins.

N°	Extracción de Zn	N°	Extracción de Zn
	---mg Zn kg <sup>-1</sup> ---		---mg Zn kg <sup>-1</sup> ---
1	1,26	41	1,26
2	1,9	42	1,1
3	1,46	43	0,28
4	0,12	44	0,4
5	1,02	45	0,36
6	1,4	46	0,8
7	1,24	47	2,88
8	2,62	48	1,1
9	1,38	49	0,48
10	1,06	50	0,68
11	1,36	51	0,72
12	1,6	52	1,2
13	0,7	53	1,14
14	1,08	54	0,4
15	0,7	55	1,32
16	0,92	56	0,58
17	1,02	57	1,18
18	0,36	58	0,54
19	0,6	59	0,84
20	3,06	60	0,74
21	0,68	61	5,36
22	0,78	62	1,12
23	1,96	63	0,44
24	0,68	64	1,18
25	0,56	65	2,1
26	1,1	66	1,54
27	0,78	67	0,5
28	0,62	68	0,88
29	8,72	69	1,98
30	0,72	70	1,7
31	0,98	71	0,44
32	0,84	72	0,88
33	2,14	73	0,94
34	2,6	74	0,76
35	2,06	75	0,62
36	0,42	76	0,32
37	0,86	77	2,84
38	0,94	78	2,88
39	0,94		
40	1,12		

## ANEXOS

### Anexo 1. Variabilidad de algunas propiedades del suelo

Propiedad del suelo <sup>1</sup>	CV (%) <sup>2</sup>	Magnitud de la variabilidad
pH	2 - 15	Baja
a (%)	3 - 37	Baja a moderada
A (%)	16 - 53	Moderada a alta
MOS (%)	21 - 41	Moderada a alta

<sup>1</sup> a = arena; A = arcilla; MOS = materia orgánica del suelo

<sup>2</sup> CV= coeficiente de variación

Fuente: Adaptado de Mulla y McBratney (2002).

### Anexo 2. Valores interpretativos para el contenido de materia orgánica del suelo

Categoría <sup>1</sup>	Rango de contenido de materia orgánica
	----%----
Muy bajo	0,1 - 1,5
Bajo	1,6 - 3,0
Medio	3,1 - 4,5
Alto	4,6 - 6,0
Muy alto	> 6,0

Fuente: Jones (2003).

### Anexo 3: Términos descriptivos y rango de pH del suelo

Término descriptivo	Rango pH
Ultra ácido	< 3,5
Extremadamente ácido	3,6 - 4,4
Muy fuertemente ácido	4,5 - 5,0
Fuertemente ácido	5,1 - 5,5
Moderadamente ácido	5,6 - 6,0
Débilmente ácido	6,1 - 6,5
Neutro	6,6 - 7,3
Débilmente alcalino	7,4 - 7,8
Moderadamente alcalino	7,9 - 8,4
Fuertemente alcalino	8,5 - 9,0
Muy fuertemente alcalino	> 9,0

Fuente: Schoeneberger *et al.* (2012).