



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA**

## **DISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN SUELOS ÁCIDOS DE LA FRAILESCA, CHIAPAS Y SU ACUMULACIÓN EN MAÍZ**

**KARLA VIANEY NARVÁEZ GALLEGOS**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2019**

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

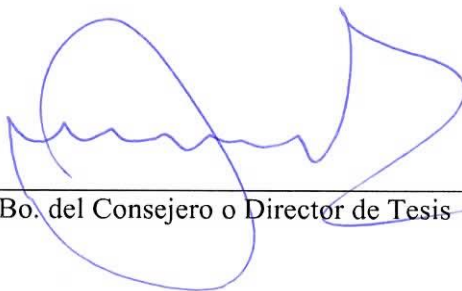
En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Karla Vianey Narváez Gallegos, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Jorge D. Etchevers Barrra, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Disponibilidad de metales pesado en suelos ácidos de la Frailesca, Chiapas y su acumulación en maíz

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 29 de julio de 2019



Firma del  
Alumno (a)



Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **DISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN SUELOS ÁCIDOS DE LA FRAILESCA, CHIAPAS Y SU ACUMULACIÓN EN MAÍZ** realizada por la alumna: **KARLA VIANEY NARVÁEZ GALLEGOS** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

DR. JORGE D. ETCHEVERS BARRA

ASESORA



---

DRA. CLAUDIA M. I. HIDALGO MORENO

ASESOR



---

DR. VÍCTOR A. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

ASESOR



---

DR. ROBERTONY CAMAS GÓMEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2019.

# DISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN SUELOS ÁCIDOS DE LA FRAILESCA, CHIAPAS Y SU ACUMULACIÓN EN MAÍZ

Karla Vianey Narvárez Gallegos, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

## RESUMEN

Los suelos agrícolas de La Frailesca, Chiapas, exhiben un elevado grado de acidez. Bajo esta condición se presentan deficiencias de ciertos nutrimentos esenciales para las plantas y la disponibilidad de la mayoría de los metales pesados aumenta. Por lo anterior, suponemos que la concentración de metales pesados extraíbles en suelo pudiese resultar en un incremento en la absorción de los mismos en la planta, esto no ha sido estudiado en profundidad. El objetivo de este trabajo fue comparar la concentración de los metales pesados Fe, Cu, Zn, Mn y Cd disponibles en los suelos agrícolas ácidos, suelos encalados y suelos con vegetación nativa (VN) sin cultivar, así como su acumulación en hojas y granos de maíz en la región La Frailesca, en el estado de Chiapas. Se colectaron muestras de suelo, hojas y granos en 15 parcelas agrícolas de los municipios de Villa Flores y Villa Corzo, que habían recibido tratamientos con cal dolomítica y en sus respectivos testigos sin cal, así como muestras de suelo de zonas con vegetación nativa (VN) sin aplicación de cal. En muestras de suelo se extrajo Fe, Cu, Zn, Mn y Cd con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M que corresponde a la fracción soluble; Fe, Cu, Zn y Mn con solución DTPA 0.005 M que además de la fracción soluble incorpora la fácilmente quelada por este compuesto; se les determinó acidez y Al intercambiables con una solución KCl 1 M. Hojas y granos se digirieron con una mezcla de  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HClO}_4$ . La cuantificación se realizó por espectrometría de absorción atómica. El encalado incrementó el pH del suelo en 1.54 unidades con la aplicación de 10 t/ha. La solución DTPA 0.005 M extrajo mayor cantidad de metales en comparación con la solución  $\text{CaCl}_2$ . Los suelos presentaron concentraciones altas de Fe ( $> 26\text{-}49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y Mn ( $> 25\text{-}50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); para Cu el rango fue de alto a medio (entre 0.9 a  $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y para Zn de medio a bajo (entre 0.3 a  $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Se encontró relación entre Fe y Mn extraídos (con  $\text{CaCl}_2$  y DTPA) en parcelas recientemente encaladas con la concentración de los mismos en granos y hojas de maíz. Ni la solución  $\text{CaCl}_2$  0.01 M ni DTPA son adecuadas para medir la disponibilidad de Cu, Zn y Cd en estos suelos. Las prácticas agrícolas acidifican el suelo y un sobrencalado, puede conducir a la deficiencia de micronutrientes.

**Palabras clave:** metales pesados extraíbles, suelos ácidos, concentración en maíz.

# AVAILABILITY OF HEAVY METALS IN ACID SOILS OF THE FRAILESCA, CHIAPAS, AND ITS ACUMULATION IN MAIZE

Karla Vianey Narváez Gallegos, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

## ABSTRACT

The agricultural soils of La Frailesca, Chiapas, exhibit a high degree of soil acidity. Under this condition, there are deficiencies of certain essential nutrients for the plants and the availability of most of the heavy metals increases, leading us to suppose that the concentration of extractable heavy metals in soil could result in an increase in the absorption of them in the plant. This phenomenon has not been studied in depth. La Frailesca is the main agricultural area of the state of Chiapas. The objective of this work was to compare the concentration of availability heavy metals Fe, Cu, Zn, Mn and Cd in acids soils, liming soils and soils with native vegetation (VN), as well as its accumulation in leaves and corn grain in La Frialesca, Chiapas. Soil samples, leaves and grains of corn were collected in 15 agricultural plots in the municipalities of Villa Flores and Villa Corzo, which had received treatments with dolomitic lime and their respective checks without liming, as well as soil samples in areas with native vegetation (VN) without lime. Fe, Cu, Zn, Mn and Cd in the soil samples were extracted with  $\text{CaCl}_2$  0.01 M which corresponds to the soluble fraction; Fe, Cu, Zn and Mn with a solution of DTPA 0.005 M that in addition to the soluble fraction incorporates the easily chelated by this compound; soil acidity and exchangeable Al were determined with 1M KCl solution. Leaves and grains were digested with a mixture of  $\text{HNO}_3$  and  $\text{HClO}_4$ . Quantification was carried out by atomic absorption spectrometry. Liming increased the soil reaction pH in 1.54 units with the application of  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . The DTPA solution extracted a greater amount of metals, compared to the  $\text{CaCl}_2$  solution. The soils showed high concentrations of Fe ( $> 26\text{-}49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and Mn ( $> 25\text{-}50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); for Cu the range was high and medium (between  $0.9\text{-}2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and for Zn from medium to low (between  $0.3\text{-}2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). A relationship was found between Fe and Mn extracted (with  $\text{CaCl}_2$  and DTPA) in recently liming plots and the concentration of them in grains and leaves. Neither the  $\text{CaCl}_2$  nor DTPA solution are adequate to test the availability of Cu, Zn and Cd in these soils. Agricultural practices acidify the soil and excess of lime can lead to micronutrient deficiency.

**Key words:** extractable heavy metals, acid soils, corn concentration.

## **DEDICATORIAS**

### **A Regina**

Por compartir esta etapa conmigo, por tu espíritu de aventura que todos los días me alienta a aprender cosas nuevas.

### **A Adrián**

Por tu apoyo incondicional y por compartir esta experiencia.

**A mis padres Griselda y Juan José**

**A mis hermanos María José y Fredy**

Por su apoyo aún en la distancia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A las siguientes instituciones: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Centro de Chiapas; International Plant Nutrition Institute (IPNI) y al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); por su aprobación para tomar muestras en sus parcelas experimentales y demostrativas.

Al Dr. Jorge D. Etchevers Barra, por compartir su conocimiento y experiencia, así como guiarme para la ejecución de éste trabajo.

A la Dra. Claudia Hidalgo Moreno, por sus acertadas observaciones y recomendaciones durante la fase de laboratorio y sobre todo por alentarme a seguir con mi proceso de aprendizaje.

Al Dr. Robertony Camas Gómez, por las facilidades otorgadas para realizar el trabajo de campo y proporcionar la información necesaria para el análisis de datos.

Al Dr. Víctor A. González Hernández por compartir conmigo su experiencia de vida y conocimientos.

Al Dr. Gustavo Ramírez Valverde, por apoyarme con el manejo de mis datos y en el uso de programas para análisis estadístico.

Al Dr. Javier Suárez Espinosa, por su apoyo para realizar el análisis estadístico.

A la Maestra Juliana Padilla Cuevas, por asesorarme en las buenas prácticas de laboratorio.

Al Ing. Rausel Camas, por apoyarme durante la etapa de trabajo de campo.

A Diana, Karen, Francisco y Efraín por su apoyo, conocimiento y tiempo dedicado durante la realización de los análisis químicos de suelo y planta.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
CAPÍTULO 3. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	4
3.1 Reacción del suelo .....	4
3.2 Origen de la acidez del suelo .....	6
3.3 Fuentes de metales pesados en el suelo .....	9
3.4 Factores del suelo que controlan la disponibilidad de metales .....	10
3.5 Relación entre pH y disponibilidad de elementos en el suelo .....	10
3.6 Efectos de los suelos ácidos en el cultivo de maíz.....	12
3.7 Elementos pesados en las plantas y su paso a la cadena trófica .....	13
3.8 Estrategias para contrarrestar la acidez del suelo .....	13
3.9 Rangos de concentración en suelo, hojas y granos .....	15
CAPÍTULO 4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....	17
4.1 Objetivo general.....	17
4.2 Objetivos específicos .....	17
4.3 Hipótesis.....	18
CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
5.1 Zona de estudio .....	19
5.1.1 Clima.....	19
5.1.2 Geología.....	20
5.1.3 Tipo de suelo.....	20
5.1.4 Actividades agrícolas .....	21
5.2 Muestreos .....	21
5.2.1 Muestreo de suelo .....	26
5.2.2 Muestreo de hojas .....	27
5.2.3 Muestreo de granos .....	29



5.3 Tratamiento de las muestras.....	29
5.3.1 Secado .....	29
5.3.2 Molienda y tamizado .....	30
5.4 Análisis químico de suelo y muestras vegetales .....	30
5.4.1 Acidez: Hidrógeno y Aluminio intercambiables .....	30
5.4.2 Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extractables con CaCl <sub>2</sub> 0.01 M .....	31
5.4.3 Fe, Cu, Zn y Mn extractables con DTPA pH 7.3.....	32
5.4.4 Análisis en tejido vegetal .....	32
5.4.5 Cuantificación de elementos .....	32
5.5 Análisis de datos .....	33
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
6.1 pH del suelo .....	34
6.2 Acidez total intercambiable (Acidez <sub>int</sub> ) y aluminio intercambiable (Al <sub>int</sub> ) .....	37
6.3 Metales en el suelo y métodos de extracción.....	39
6.3.1 Fe .....	39
6.3.2 Cu.....	41
6.3.3. Zn .....	42
6.3.4. Mn.....	44
6.3.5 Cd.....	45
6.4 Concentraciones de metales pesados en hojas y granos de maíz.....	46
6.4.1 Fe .....	47
6.4.2 Cu.....	48
6.4.3 Zn.....	49
6.4.4 Mn.....	51
6.4.5 Al .....	52
6.4.6 Cd.....	54
6.5 Relación de la concentración de metales extraíbles en el suelo con los metales en la planta.....	56
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....	63
CAPÍTULO 7. LITERATURA CITADA.....	64
ANEXOS .....	75

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Rangos de pH en suelo y sus principales características.....	5
Cuadro 2. Interpretación de pH del suelo de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	6
Cuadro 3. Principales fertilizantes con efecto ácido. ....	8
Cuadro 4. Fertilidad del suelo en función de la cantidad de metales extraídos con DTPA.....	15
Cuadro 5. Concentraciones medias de micronutrientes en grano de maíz. ....	15
Cuadro 6. Rangos de concentración para distintos elementos en maíz. ....	16
Cuadro 7. Conjunto de parcelas muestreadas y características del encalado. ....	23
Cuadro 8. Clasificación de los tratamientos de acuerdo a la dosis de encalado .....	33
Cuadro 9. Concentraciones medias de Cd en suelo, extracción con $\text{CaCl}_2$ .....	46
Cuadro 10. Concentraciones medias de Al en hojas y granos de maíz de La Frailesca. ....	54
Cuadro 11. Concentraciones medias de Cd en hojas y granos de maíz de La Frailesca. ....	55
Cuadro 12. Agrupación de parcelas muestreadas con base a las características de encalado. ....	56
Cuadro 13. Regresiones múltiples para la relación entre Fe en suelo extraído con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA y Fe total en hojas y granos de maíz.....	58
Cuadro 14. Regresiones múltiples para la relación entre Mn en suelo extraído con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA y Mn total en hojas y granos de maíz. ....	59
Cuadro 15. Regresiones múltiples para la relación entre Cu en suelo extraído con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA y Cu total en hojas y granos de maíz. ....	60
Cuadro 16. Regresiones múltiples para la relación entre Zn en suelo extraído con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA y Zn total en hojas y granos de maíz. ....	61
Cuadro 17. Regresiones múltiples para la relación entre Al intercambiable en suelo extraído con KCl 1 N y Al total en hojas y granos de maíz. ....	62
Cuadro 18. Regresiones múltiples para la relación entre Cd en suelo extraído con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y Cd total en hojas y granos de maíz.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre disponibilidad de elementos y pH del suelo.....	11
Figura 2. Temperatura, precipitación y evaporación. ....	19
Figura 3. Tipos de rocas, Región Frailesca. ....	20
Figura 4. Tipos de suelo en La Frailesca, Chiapas. ....	21
Figura 5. Detalles del muestreo de suelos. (a) geoposicionamiento de los sitios de muestreo; (b) y (c) toma de muestras individuales de suelo.....	26
Figura 6. Macro y microlocalización de los puntos de muestreo en La Frailesca, Chiapas. ....	28
Figura 7. Muestreo de hojas de maíz en etapa reproductiva R1 de la escala de Ritchie y Hanway (1986).....	29
Figura 8. Variación del pH del suelo en función a la dosis de encalado .....	35
Figura 9. Relación entre pH del suelo y dosis de encalado. ....	36
Figura 10. Relación entre pH-acidez y aluminio intercambiables en suelo.....	37
Figura 11. Efecto del encalado sobre la concentración de aluminio intercambiable.....	38
Figura 12. Efecto del encalado sobre la concentración de Fe, mediante extracción con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA.....	40
Figura 13. Efecto del encalado sobre la concentración de Cu, extracción con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA. ....	42
Figura 14. Efecto del encalado sobre la concentración de Zn, extracción con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA. ....	43
Figura 15. Efecto del encalado sobre la concentración de Mn, extracción con $\text{CaCl}_2$ 0.01 M y DTPA .....	44
Figura 16. Relación entra la concentración de Cd en suelo extraído con $\text{CaCl}_2$ y la dosis de cal aplicada.....	46
Figura 17. Relación entre concentración de Fe en hojas y granos y dosis de cal aplicada.....	47
Figura 18. Relación entre concentración de Cu en hojas y granos y dosis de cal aplicada. ....	48
Figura 19. Relación entre concentración de Zn en hojas y granos y dosis de cal aplicada. ....	50
Figura 20. Relación entre concentración de Mn en hojas y granos y dosis de cal aplicada. ....	52
Figura 21. Relación entre concentración de Al en hojas y granos y dosis de cal aplicada.....	53
Figura 22. Relación entre concentración de Cd en hojas y granos y dosis de cal aplicada. ....	55

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La acidificación del suelo constituye una limitante para la producción agrícola y es fuente de contaminación por su efecto en la liberación de ciertos elementos que pudiesen resultar perjudiciales para la salud de los cultivos y los seres vivos. La condición de acidez se presenta en muchos suelos del mundo, particularmente en climas húmedos sujetos a procesos de intensa lixiviación (Aguirre, 2001; FAO, 2016), pudiendo ser inducida por actividades antropogénicas. En este trabajo entenderemos por suelo ácido aquel cuyas concentraciones de iones hidrógeno en la solución de suelo en equilibrio con la fase sólida resulten en pH menor a 6.0.

Las principales causas naturales y antropogénicas de la acidificación del suelo son: naturaleza del material parental, largos eventos de precipitación, deposición ácida, excesiva aplicación de fertilizantes amoniacales, drenaje de suelos potencialmente ácidos, deforestación y prácticas de remoción de restos de cosechas (FAO, 2016).

Alrededor del 30% de las tierras de cultivo del mundo tienen pH ácido y se presentan en algunas de las regiones productoras de alimentos más importantes (Prochnow, 2014), representando un obstáculo para la producción de alimentos en todo el mundo (FAO, 2016). Las capas arables más ácidas en el mundo se encuentran en zonas de América del Sur que han sufrido deforestación y agricultura intensiva (FAO, 2016). En México, los suelos ácidos se encuentran distribuidos en las regiones tropicales y bosques templados con una superficie cercana a 14 millones de hectáreas, concentradas principalmente en los estados de Chiapas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Jalisco, Nayarit y Colima (Tasistro, 2013).

La acidez o reacción ácida del suelo en sistemas agrícolas ocasiona una importante pérdida de la fertilidad del suelo que impacta directa y negativamente a los rendimientos de los cultivos. La conservación de la calidad y fertilidad de los suelos de las zonas agrícolas de México es un tema de importancia para garantizar la productividad y sostenibilidad de los agrosistemas. Ya que la acidez del suelo es un fenómeno reversible, se han propuesto algunas acciones para contrarrestar sus efectos, de las cuales la principal es la adición de materiales encalantes al suelo.

Pagani y Mallarino (2012) indicaron que la aplicación de estos materiales a suelos con pH entre 5.4 y 5.7, incrementaron el valor del pH hasta 7.3, lo que resultó en aumento en el rendimiento de maíz de aproximadamente  $2.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , posteriormente los mismos autores señalaron que el

aumento del pH del suelo no siempre tienen efectos positivos en el rendimiento, lo que atribuyeron al efecto combinado de otros factores ambientales (Pagani y Mallarino, 2015). Es preciso dejar constancia que los incrementos del pH del suelo después del encalado son mediados por diferentes factores, de los cuales, los de mayor importancia son: el poder amortiguador del suelo, es decir su resistencia a modificar su pH original (Espinosa y Molina, 1999), y la cantidad de aluminio fácilmente extraíble del suelo.

La reacción del suelo no solo tiene influencia directa en los rendimientos alcanzados, sino también en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, incluyendo los metales pesados presentes en el suelo que pudieran liberarse en un medio ácido y resultar potencialmente tóxicos para la planta si son absorbidos y traslocados a sus diferentes órganos, con los subsecuentes daños a la salud al ser consumidos por humanos o animales.

En México, una de las zonas más afectadas por la acidez del suelo es la Región Frailesca, en el Estado de Chiapas, cuya condición ácida de los suelos causa pérdidas en el rendimiento de maíz de hasta  $1.4 \text{ t ha}^{-1}$  (Nieuwkoop *et al.*, 1994). Los suelos agrícolas de esta región están expuestos a la entrada de metales pesados debido a: intemperismo de los minerales primarios del material parental y uso intensivo de fertilizantes y otros agroquímicos. Sin embargo, no hay trabajos publicados que describan o cuantifiquen estas fuentes y sus efectos en la cadena trófica.

Este estudio se realizó en la región La Frailesca del Estado de Chiapas, específicamente en los límites de los municipios de Villaflores y Villa Corzo, en parcelas agrícolas en las que se ha reportado presencia de suelos ácidos que han sido tratados con cal dolomítica y yeso agrícola. El objetivo fue comparar la concentración de los metales pesados Fe, Cu, Zn, Mn y Cd disponibles en los suelos agrícolas ácidos, suelos encalados y suelos con vegetación nativa (VN) sin cultivar, así como su acumulación en hojas y granos de maíz en la región La Frailesca, en el estado de Chiapas.

## CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado de Chiapas ocupa el sexto lugar en producción de maíz a nivel nacional con 1, 068, 000 toneladas y 702,800 hectáreas, principalmente de temporal, con rendimiento promedio de 1.6 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2017). Sin embargo, en la Región La Frailesca el cultivo de maíz de grano alcanza rendimientos medios por municipio de hasta 4.2 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2017) y produce el 17% del total de maíz de grano del estado, y por su alta productividad se le conoce como “El granero de Chiapas”.

Uno de los aspectos que preocupa a los productores y técnicos, es la degradación química del suelo de La Frailesca, que se manifiesta en: pérdida de nutrientes, acidificación provocada principalmente por el uso de fuentes de fertilización nitrogenadas amoniacales, salinización y aumento de la toxicidad por liberación o concentración de algunos elementos químicos (Mendoza *et al.*, 2008). Sin duda, el más grave es el problema de la acidez, con aproximadamente 33,500 hectáreas de los suelos agrícolas de esa región que ya se reportaba desde hace 25 años; Nieuwkoop *et al.* (1994) reportaron un pH promedio de 4.7 en esos años, y es razonable suponer que este problema se haya incrementado desde entonces. No se conocen nuevos estudios publicados al respecto.

En medios ácidos, los metales pesados presentes en las partículas del suelo pueden ser disueltos, de manera que aumenta su toxicidad y biodisponibilidad (Jia *et al.*, 2017). Estos metales pasan a formar parte de la solución del suelo en formas que pueden ser asimilables por las plantas. De esta manera ocurre el primer paso de la ruta de un metal desde el suelo hacia organismos heterótrofos, como los animales y los seres humanos, por lo que el contenido de micronutrientes en sus partes comestibles constituye una contribución importante a la ingesta humana (Teklić *et al.*, 2013).

Se desconoce la cantidad disponible de estos elementos pesados en los suelos agrícolas de La Frailesca, y si éstos permanecen en el suelo o son absorbidos por las plantas y así pasan a formar parte de la cadena trófica. Esto representa un riesgo para la salud de la población consumidora del maíz que se produce en la zona.

## CAPÍTULO 3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 3.1 Reacción del suelo

Es la proporción de iones  $H^+$  y  $OH^-$  (expresada en moles por litro), existentes en la solución de suelo en equilibrio con la fase sólida, la cual se mide en unidades de pH. Cuando la concentración de iones  $H^+$  es mayor que la de  $OH^-$  se dice que el suelo tiene carácter ácido. Como la concentración de iones hidrógeno en la solución es muy pequeña (en términos de moles por litro), se acostumbra a expresarla como pH. El pH es el logaritmo del inverso de la concentración de iones  $H^+$  o  $1/H^+$  moles por litro ( $pH = \log 1/H^+$ ) o lo que es lo mismo  $pH = -\log [H^+]$ . La escala de pH se extiende de 0 a 14, como una derivación de la constante de disociación del agua ( $K_w = [H^+][OH^-] = 10^{-14}$ ).

El pH del suelo es una medida de la intensidad de la acidez en el mismo, es medido con electrodos ion-específicos de vidrio, generalmente después de alcanzado el equilibrio de la fase sólida con agua destilada, desionizada o con una solución salina (Bloom *et al.*, 2005). Puede variar ligeramente en función de la relación suelo/solución, y de la naturaleza de la solución acuosa que se emplee para hacer la medición (agua, HCl 1 N, KCl 1 N o CaCl<sub>2</sub> 0.01 M).

La condición de acidez se presenta en muchos suelos del mundo, particularmente en climas húmedos sujetos a procesos de intensa lixiviación, los trópicos húmedos y las áreas forestales de las zonas templadas son ejemplos de suelos ácidos (Aguirre, 2001). Los suelos tropicales viejos (Oxisoles y Ultisoles) son naturalmente ácidos, suelos derivados de otros materiales parentales pueden volverse ácidos después de periodos largos de uso intenso (Espinosa y Molina, 1999).

El rango de valores común de pH de los suelos agrícolas va desde 3.5 a 10, existen numerosas escalas que relacionan el pH del suelo con las características físicas y químicas de los mismos. Una de ellas es la de Slaterry *et al.* (1999) que se presenta en el Cuadro 1, la más usada en México es la de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Cuadro 2), que es la que se emplea fundamentalmente para uso en los estudios de fertilidad de suelos, ya que tiene escaso sentido adicionar más categorías, si no se sabe cómo manejar el problema de acidez del suelo.

Cuadro 1. Rangos de pH en suelo y sus principales características.

<b>pH H<sub>2</sub>O</b> <b>2:1</b>	<b>Características</b>
< 4.5	Suelos extremadamente degradados, baja fertilidad y baja capacidad de amortiguamiento. Pueden ser sujetos a prácticas agrícolas intensas que acidifican el suelo.
4.5 - 5.3	Estos valores de pH pueden deberse a procesos naturales o a prácticas agrícolas intensivas a largo plazo. Los cationes intercambiables Al y Mn pueden causar toxicidad a las plantas. Se presentan deficiencias de otros nutrientes como Mo, Ca, Mg y K. Las poblaciones de microorganismos del suelo se ven significativamente alteradas.
5.3 - 5.8	Suelos con un rango crítico para el desarrollo de cultivos tolerantes a suelos ácidos, en los que se puede presentar toxicidad por Al y Mn que limita la producción.
5.8 - 7.0	Es el rango de pH óptimo para la mayoría de las especies de plantas.
7.0 - 8.0	Suelo que se considera neutro a ligeramente alcalino. La disponibilidad de elementos como el Zn y Mn empieza a decrecer. Nutrientes como Ca y Mo empiezan a estar más disponibles. Estos suelos generalmente contienen altas cantidades de Mg y CaCO <sub>3</sub> .
> 8.0	Suelos alcalinos y dominados por carbonatos de Na, Ca y Mg. Pueden presentar deficiencia de micronutrientes y toxicidad por B. En pH extremadamente alto (> 8.5) domina el Na intercambiable y carbonatos. En algunos casos el suelo puede llegar a ser más alcalino con el tiempo, debido a un largo periodo de incorporación de Na (del agua de riego) lo que causa la pérdida de estructura del suelo.

Fuente: Slaterry *et al.* (1999).



Cuadro 2. Interpretación de pH del suelo de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Fuente: SEMARNAT (2000).

Alrededor del 30% de las tierras de cultivo del mundo tienen pH ácido, se presentan en algunas de las regiones productoras de alimentos más importantes (Prochnow, 2014). En México, los suelos ácidos se distribuyen principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Veracruz y Tabasco (Tasistro, 2013).

### 3.2 Origen de la acidez del suelo

La acidificación del suelo es un proceso que ocurre de manera natural, y puede ser acelerado por las actividades agrícolas intensivas y puede prevenirse con prácticas de manejo sustentables (Kunhikrishnan *et al.*, 2016). Las fuentes de incorporación de iones  $H^+$  al suelo pueden ser naturales, aunque las actividades humanas tienen un mayor impacto (Brady y Weil, 2008). La acidificación del suelo ocurre cuando hay una donación neta de protones al suelo y pérdida de iones básicos por lixiviación o remoción por cosechas (Bloom *et al.*, 2005). A continuación se describen los procesos que contribuyen a la acidificación del suelo.

- *Formación de ácido carbónico* (Bloom *et al.*, 2005): este es el proceso de acidificación natural más importante, ocurre porque el  $CO_2$  del aire atmosférico (que va en aumento por el cambio climático) se equilibra con el  $CO_2$  del agua del suelo, o por disolución generado por la respiración de las raíces o la respiración microbiana. El  $CO_2$  producido puede ser disuelto y luego generar ácido carbónico, el cual al ser un ácido débil se ioniza de acuerdo a la siguiente reacción:



- *Lixiviación*: ocurre en suelos de regiones con alta precipitación, que están sometidos a un continuo y amplio lavado; el agua disuelve las bases solubles que percolan y se pierden por lixiviación (Navarro y Navarro, 2003); lo que altera continuamente el equilibrio dinámico con la fase sólida y líquida, que tiende a enriquecer el suelo con iones  $H^+$ .

- *Remoción de nutrientes*: como las raíces de las plantas extraen los cationes y aniones del suelo, para mantener la electroneutralidad de este, las raíces de las plantas segregan  $H^+$ ,  $OH^-$  y  $HCO_3^-$ ; estos cambios suelen llegar a ser mucho más intensos en sistemas agrícolas (McBride, 1994).

- *Acumulación de materia orgánica* (Brady y Weil, 2016): la materia orgánica forma complejos solubles con cationes no ácidos como  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , lo que facilita la pérdida de estos cationes por lixiviación; también es fuente de  $H^+$  porque contiene numerosos grupos funcionales ácidos que se pueden disociar.

- *Nitrificación* (Brady y Weil, 2016): los iones amonio ( $NH_4^+$ ) están sujetos a la oxidación microbiana que los convierte a iones nitrato ( $NO_3^-$ ); la reacción con el oxígeno denominada nitrificación, libera dos iones  $H^+$  por cada ion  $NH_4^+$  oxidado.



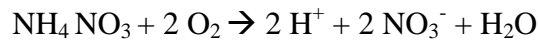
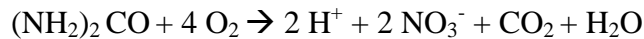
- *Influencia humana en la acidificación del suelo*: en ciertas situaciones los procesos de acidificación natural son acelerados por actividades humanas, principalmente por el uso de fertilizantes nitrogenados, lluvia ácida y el uso de materiales como el  $H_2SO_4$ , o de productos que emplean éste ácido en su fabricación (Brady y Weil, 2008).

- *Lluvia ácida*: se produce cuando el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), se emiten a la atmósfera y son transportados por las corrientes de aire; el  $SO_2$  y  $NO_x$  reaccionan con agua, oxígeno y otros productos químicos en la atmósfera para formar ácidos sulfúricos y nítricos (EPA, 2004), los cuales se depositan en el suelo y el agua, y así contribuyen al incremento de  $H^+$  al disociarse por ser ácidos fuertes (Brady y Weil, 2016).

- *Fertilización*: es la principal causa de acidificación del suelo en el corto plazo, se debe al uso de fertilizantes nitrogenados o estiércoles que tienen altas concentraciones de amonio o urea (Pagani *et al.*, 2011). Pierre (1928) demostró que la nitrificación de los fertilizantes que contenían  $NH_4^+$  produce acidez en el suelo, y concluyó que eso tiene un efecto directo en el pH

del suelo y en el rendimiento de los cultivos. FAO (2016) indica que entre 1961 y 2000 el uso de fertilizantes amoniacales se incrementó siete veces, lo que ha llevado a que la aplicación de éstos en los agrosistemas, sea la principal causa de acidificación del suelo.

Los fertilizantes nitrogenados acidifican el suelo por nitrificación del  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  lo cual produce iones  $\text{H}^+$ . Sin embargo, el grado de acidificación del suelo depende de la fuente de N (Chien *et al.*, 2010). Según Adams (1984), cada mol de N proveniente del sulfato de amonio produce 4 moles de  $\text{H}^+$ , mientras que cada mol de N proveniente de la urea o del nitrato de amonio produce 2 moles de  $\text{H}^+$ ; las siguientes reacciones corresponden a los fertilizantes nitrogenados más comúnmente usados sulfato de amonio, urea y nitrato de amonio:



Ghimire *et al.*, (2017) al evaluar los efectos de la fertilización nitrogenada sobre el pH del suelo entre 1995 a 2010 en el este de Oregon, USA, concluyeron que la aplicación de fertilizante nitrogenado aumentó la acidez del suelo en los primeros 10 cm de profundidad. Dicho aumento fue de 0.3 unidades de pH por cada 1000 kg de N de fertilizantes nitrogenados amoniacales aplicados.

Una manera de conocer el potencial acidificante de los fertilizantes es mediante la acidez equivalente de los mismos (Cuadro 3), la cual se refiere a los kg de  $\text{CaCO}_3$  requeridos para neutralizar los efectos ácidos de 100 kg de fertilizante aplicados.

Cuadro 3. Principales fertilizantes con efecto ácido.

Fertilizante	Formula química	Acidez equivalente <sup>y</sup>
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	110
Fosfato diamónico	$(\text{NH}_4)_2 \text{PO}_4$	74
Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	79
Superfosfato simple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	8
Superfosfato triple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	15

<sup>y</sup>kg de  $\text{CaCO}_3 \cdot 100 \text{ kg}^{-1}$  de fertilizante. Fuente: Kunhikrishnan *et al.* (2016).

La razón de la capacidad acidificante de los superfosfatos, es que en su fabricación usa roca fosfórica tratada con ácido sulfúrico (superfosfato simple) o con ácido fosfórico (superfosfato triple).

### **3.3 Fuentes de metales pesados en el suelo**

Los metales pesados, y en general los elementos traza, están presentes en concentraciones relativamente bajas en la corteza terrestre, suelos y plantas (Galán y Romero, 2008). Algunos de estos elementos resultan altamente tóxicos y otros, aunque son esenciales, en altas concentraciones pueden causar toxicidad. La naturaleza de las rocas determina el contenido de elementos pesados del suelo. Las rocas ultrabásicas y básicas incorporan principalmente elementos como Co, Ni, Zn y Cr, mientras que las rocas ácidas tienden a ser ricas en otros elementos como Ba, Pb, Cu y Mn. Los suelos derivados de rocas básicas contienen suficientes elementos traza y elementos esenciales, mientras que los suelos resultados de rocas ácidas tienden a ser bajos en éstos elementos (West y Coombs, 1981).

Los elementos traza en suelo tienen dos orígenes: geogénico y fuentes antropogénicas. Los primeros, son aquellos que pasan de la roca madre a los suelos tras ser liberados por intemperismo, incluyen los procedentes de emisiones volcánicas y lixiviados de mineralizaciones (Galán y Romero, 2008). Las fuentes antropogénicas son aportadas por los fertilizantes comerciales, materiales encalantes, lodos residuales, estiércoles, pesticidas, residuos de minería y transporte de emisiones (Hooda, 2010).

Los elementos traza están presentes en distintas especies químicas en los reservorios del suelo: el complejo de intercambio, los precipitados, la solución del suelo, iones libres o unidos a los coloides del suelo, formando parte de compuestos orgánicos e inorgánicos, adsorbidos u ocluidos en óxidos o carbonatos, y como componentes estructurales de los minerales (Tack, 2010). Una vez que un elemento pasa a la solución del suelo, está sujeto a distintas reacciones que determinarán la especie química predominante.

### **3.4 Factores del suelo que controlan la disponibilidad de metales**

Del total de elementos pesados presentes en el suelo, la fracción disponible es la de mayor interés por la posibilidad de pasar a formar parte de las plantas. La cantidad de metales disponibles está sujeta a factores físicos y químicos que la controlan, cuyos orígenes son multifactoriales. Los metales entran a la solución del suelo mediante procesos de desorción o disolución, dependiendo de las características del suelo, formación de complejos, pH, fuerza iónica de la solución, tipo y especies de posible intercambio iónico en la solución y de los efectos cinéticos (Selim y Amacher, 2001), condiciones de óxido-reducción, textura, materia orgánica, composición mineral de suelo y temperatura (Kabata, 2004).

Los óxidos de Fe y Mn, así como los carbonatos presentes en el suelo tienen la capacidad de adsorber elementos metálicos, incluso en el caso de los carbonatos éstos pueden ser incorporados a su estructura (Kabata y Pendias, 2000). El contenido de materia orgánica tiene una fuerte influencia en la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de amortiguación y en la retención de metales pesados (Olaniran *et al.*, 2013), puede formar complejos húmicos con Fe, Cu, Cd y Mn, los cuales se solubilizan a valores de pH que varían entre 3 y 9.5. A valores de pH menores (1 a 3) ocurre precipitación de éstos (Kabata y Pendias, 2000).

Otros aspectos que deben ser tomados en cuenta, corresponden a características propias de los elementos metálicos como su electronegatividad, tamaño iónico, afinidad para asociarse con partículas minerales u orgánicas y potencial de ionización. Así, elementos con potencial de ionización (PI) < 3 tienden a permanecer en forma libre como iones. Sin embargo, los elementos metálicos con PI > 3 como es el caso de Cu, Zn, Mn y Cd tienden a formar complejos o se hidrolizan. Elementos como Zn y Cd con mayor PI que Cu y Mn, pueden precipitar más fácilmente y son por lo tanto menos móviles (Kabata y Pendias, 2000).

### **3.5 Relación entre pH y disponibilidad de elementos en el suelo**

El pH se considera la variable maestra en el comportamiento de los metales del suelo, porque es el factor más importante que afecta a la especiación de éstos. Conocer el pH del suelo es necesario para entender los procesos químicos que se llevan a cabo en el suelo, la movilidad y equilibrio de los iones, reacciones de precipitación o disolución, así como la disponibilidad de

nutrientes, toxicidad de los elementos traza y la respuesta negativa de muchos cultivos a la acidez del suelo (Bloom *et al.*, 2005). Generalmente, la desorción de metales incrementa a medida que la acidez aumenta, es decir cuando baja el pH, por lo que los metales tienden a estar más solubles en ambientes ácidos.

Los metales pesados presentes en las partículas del suelo pueden ser disueltos por  $H^+$ , de manera que aumentan su biodisponibilidad y toxicidad (Jia *et al.*, 2017). Suelos fuertemente ácidos incrementan la absorción de Zn, Cd, Ni, Mn y Co por parte de las plantas e incrementan la probabilidad de fitotoxicidad de Cu, Zn y Ni (EPA, 2007). Valores de pH bajos incrementan la solubilidad de elementos metálicos pesados como Fe, Cu, Zn y Mn (Figura 1), de los cuales las plantas requieren solo pequeñas cantidades, por lo que un exceso de iones de estos elementos es tóxica (Bian *et al.*, 2013).

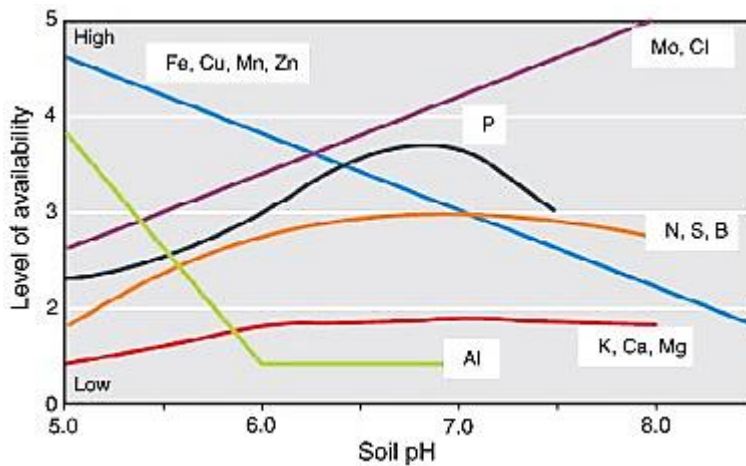


Figura 1. Relación entre disponibilidad de elementos y pH del suelo.

Fuente: Bian *et al.* (2013).

Chen *et al.* (2000) reportaron que la adición de enmiendas químicas al suelo (escorias de alto horno), en oxisoles de Jinghua, China, incrementó el pH de los mismos, de modo que disminuyó la toxicidad de Cd y aumentó el rendimiento de trigo y col china; también contribuyó a disminuir la absorción de Cd por las plantas de arroz, al bajar de  $4.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en el suelo testigo a  $0.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en el suelo tratado.

Ciertas enmiendas como el silicato de calcio hidratado, incrementan el pH del suelo, reducen la extractabilidad de Cd en el suelo y el contenido de Cd en la paja y el grano de arroz,

demostrando así que el suministro de silicio junto con un aumento del pH del suelo tiene potencial para reducir el contenido de cadmio en arroz (Zhao y Masaihico, 2007).

Wisawapipat *et al.* (2017) indican que una disminución del pH del suelo aumenta las cantidades de Zn disponible en suelos neutros y calcáreos de la planicie central de Tailandia, por lo que la acidificación moderada y controlada puede mitigar la posible deficiencia de Zn en suelos cultivados con arroz.

### **3.6 Efectos de los suelos ácidos en el cultivo de maíz**

La acidez de suelo puede incidir directa o indirectamente en el crecimiento de las plantas, afectando la disponibilidad de nutrientes, los niveles fitotóxicos de elementos, la actividad microbiana y otras propiedades del suelo. El contenido de elementos en el suelo se relaciona directamente con el crecimiento y desarrollo de la vegetación, y refleja la capacidad del suelo para suministrar nutrientes a las plantas (Zhanbin *et al.*, 2013).

El maíz es un cultivo con una amplia diversidad genética, se considera resistente a valores de pH ligeramente bajos, con un rango ideal para su desarrollo como cultivo de 5.8 a 7.2 (Castellanos *et al.*, 2000); cuando el pH del suelo está por debajo de estos valores, el maíz presenta efectos negativos a nivel morfológico y fisiológico.

Los suelos ácidos causan pérdidas de rendimiento de hasta 69 %, pudiendo variar en función del nivel de acidez, las condiciones agroclimáticas y las características genéticas del maíz (Tandzi *et al.*, 2018). Los bajos rendimientos se deben a la pobre fertilidad de los suelos ácidos, causada a la vez por dos factores principales: toxicidad por aluminio, manganeso o hierro y deficiencias nutrimentales, originadas a su vez por lixiviación y disminución de la disponibilidad de algunos nutrientes esenciales (Gupta *et al.*, 2014), adicionalmente en los suelos ácidos son comunes las deficiencias de Ca y Mg (Conyers, 2006).

A nivel morfológico el principal síntoma de toxicidad por Al ocasionado por un pH bajo, es la inhibición del crecimiento de las raíces y la subsecuente pobre absorción de nutrientes y agua (Mattiello *et al.*, 2010). Como consecuencia de lo anterior, se presenta una disminución en el rendimiento de maíz.

### **3.7 Elementos pesados en las plantas y su paso a la cadena trófica**

La presencia de metales pesados en el suelo tiene efectos en éste y en las plantas. La absorción de metales pesados por las plantas y su subsecuente acumulación a lo largo de la cadena trófica, es un riesgo potencial para la salud humana y animal (Wong y Selvam, 2006). Como resultado de la mayor solubilidad de los elementos del suelo, hay un aumento de la biodisponibilidad de los metales, lo que conlleva un riesgo de mayor toxicidad para la micro flora, la micro fauna, las plantas superiores, los animales y los seres humanos (Cyranik y Draszawka-Bolzan, 2014).

Una vez que los metales se encuentran en la solución del suelo, su absorción por la planta depende de factores como: características de la raíz, flujo de iones, cinética de transporte de la membrana, interacciones iónicas, destino metabólico de los iones absorbidos, y la capacidad de la planta para adaptarse al medio en que se están presentes los metales (Cataldo y Wildung, 1978).

Las plantas constituyen la base de la cadena trófica, por lo que las concentraciones tóxicas de ciertos elementos se pueden transportar a los estratos más altos de la cadena alimenticia (Peralta *et al.*, 2009). Como resultado de la acumulación de metales pesados en tejidos u órganos, se han documentado desde efectos cancerígenos hasta patologías a nivel neurológico, cardiovascular, hematológico, gastrointestinal, musculoesquelético, inmunológico y epidérmico (EPA, 2007).

### **3.8 Estrategias para contrarrestar la acidez del suelo**

El principal medio para contrarrestar la acidez del suelo es el encalado, que consiste en la adición de diferentes materiales básicos al suelo, los cuales de acuerdo a su naturaleza presentan distintas capacidades de neutralización. Los materiales encalantes más ampliamente usados son: óxido de calcio (CaO), hidróxido de calcio [Ca(OH)<sub>2</sub>], cal agrícola (CaCO<sub>3</sub>), dolomita (CaCO<sub>3</sub> · MgCO<sub>3</sub>), óxido de magnesio (MgO), magnesita (MgCO<sub>3</sub>) y conchas molidas (Bernier y Alfaro, 2006) a veces calcinadas.

La aplicación de estos materiales, permite elevar el pH del suelo y modificar toxicidades asociadas con la acidez del suelo. La toxicidad del Al se atribuye a la presencia de hidroxialuminios, producto del fenómeno de la hidrólisis [Al(OH)<sup>2-</sup> y Al(OH)<sub>2</sub><sup>-</sup>]. Los mecanismos de reacción de los materiales de encalado, neutralizan los iones H<sup>+</sup> en la solución



del suelo por medio de los iones  $\text{OH}^-$  producidos cuando éstos entran en contacto con el agua. El incremento del pH del suelo, induce la precipitación del  $\text{Al}^{3+}$  como hidróxido de aluminio  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$  que es un compuesto insoluble, eliminando así la toxicidad de Al para las plantas (Espinosa y Molina, 1999).

En suelos con pH menor a 4.5 y elevada capacidad amortiguadora, se requieren grandes cantidades de cal para regresar a su estado productivo, por lo que el encalado puede no resultar una práctica económicamente viable. Pero en suelos con pH 4.5 a 5.8 el encalado es económicamente viable y necesario si se quiere mantener la productividad; Los suelos con pH 5.8 a 7.0 se consideran los más productivos y en general no presentan deficiencias nutrimentales ni efectos por salinidad (Slaterry *et al.*, 1999). Pagani y Mallanrino (2012) reportaron que la aplicación de materiales encalantes a suelos con pH entre 5.3 y 5.7, incrementó su valor hasta 7.3, dependiendo de las características del suelo, este incremento en pH se relacionó directamente con un aumento en el rendimiento de maíz de aproximadamente  $2.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

En suelos con pH menor a 6 hay una alta probabilidad de respuesta a la aplicación de cal, en cultivos que son sensibles a la acidez, pero en suelos con pH 6.0 a 6.5, la respuesta es menor. Pagani *et al.* (2011) reportan que la aplicación de aproximadamente el equivalente a 3 toneladas de carbonato de calcio efectivo por hectárea, incrementó entre 0.5 a 1.5 unidades de pH en el primer año. Sin embargo, el aumento del pH es una función de la capacidad amortiguadora del suelo. En condiciones tropicales, se ha implementado la aplicación de dolomita pura con partículas de 80 a 100 mallas, que aporta al suelo hasta 21.7 % de Ca y 13.8 % de Mg, que tienden a solubilizarse durante el primer año (Zetina *et al.*, 2005). El material de encalado más común y más barato, cuando se desea aplicar Ca y Mg simultáneamente, es una cal agrícola que contiene niveles no definidos de magnesio.

La aplicación de biochar es otra estrategia para elevar el pH del suelo y disminuir la disponibilidad de metales pesados (Nuñez, 2017; Simansky *et al.*, 2018), el cual es un producto de la pirolisis de biomasa residual, frecuentemente proviene de residuos orgánicos que causan problemas de contaminación ambiental (Escalante *et al.*, 2016).

### 3.9 Rangos de concentración en suelo, hojas y granos

Para el caso de la concentración de metales en suelo, es importante considerar el método utilizado para la extracción. En el Cuadro 4 se presenta la clasificación propuesta por Castellanos *et al.* (2000) que usa DTPA como solución extractora.

Cuadro 4. Fertilidad del suelo en función de la cantidad de metales extraídos con DTPA.

Elemento	Muy bajo	Bajo	Mod bajo	Medio	Mod alto	Alto	Muy alto
	(mg·kg <sup>-1</sup> )						
Fe	<3	3-5	5-8	8-12	13-25	26-49	>50
Cu	<0.2	0.2-0.5	0.5-0.8	0.9-1.2	1.3-1.8	1.8-2.5	>2.5
Zn	<0.3	0.3-0.6	0.7-1.2	1.3-2.5	2.6-5.0	5.1-8.0	>8.1
Mn	<2	2-4	4-7	7-12	12-25	25-50	>50

Fuente: Castellanos *et al.* (2000).

La clasificación de las concentraciones de nutrientes en plantas varía de acuerdo al cultivo de interés, la etapa de desarrollo y el órgano muestreado. En el Cuadro 5, se presenta la concentración media general de cuatro elementos metálicos en los granos de maíz reportada por Fardet *et al.* (2008). En el Cuadro 6, se reportan los rangos de concentración que reportados por distintos autores en distintas etapas de desarrollo y órganos muestreados del cultivo de maíz.

Cuadro 5. Concentraciones medias de micronutrientes en grano de maíz.

Cultivo	Fe	Cu	Zn	Mn
	mg·kg <sup>-1</sup>			
Maíz amarillo, blanco y azul	15	2.4	17	4

Fuente: Fardet *et al.* (2008).

Cuadro 6. Rangos de concentración para distintos elementos en maíz.

Elemento	Órgano de referencia	Etapa de desarrollo	Deficiente	Marginal	Crítico	Adecuado	Alto	Crítico	Referencia
					(deficiencia)			(toxicidad)	
					mg·kg <sup>-1</sup>				
Cu	HM <sup>x</sup>	Floración femenina	<2	3 a 5		6 a 20	20 a 50	> 50	Grundon <i>et al.</i> (1999)
	HOIM <sup>w</sup>	Floración masculina			5				Grundon <i>et al.</i> (1999)
	HM	Floración masculina-femenina			5	5 a 25			Campbell y Planck (2000)
	HOIM	Floración masculina-femenina				6 a 20			Flyn <i>et al.</i> (1999)
	HM	Floración masculina-femenina				5 a 25			Rosen y Eliason (2005)
Fe	HM	Floración masculina-femenina			15	30-250			Campbell y Planck (2000)
	HOIM	Floración masculina			25				Grundon <i>et al.</i> (1999)
	HOIM	Floración masculina-femenina				21-250			Flyn <i>et al.</i> (1999)
	HM	Floración masculina-femenina				50-300			Rosen y Eliason (2005)
Zn	HM	Floración masculina-femenina			15	20-70			Campbell y Planck (2000)
	HOIM	Floración masculina			15				Grundon <i>et al.</i> (1999)
	HOIM	Floración masculina-femenina				20-70			Flyn <i>et al.</i> (1999)
	HOIM	Floración femenina			15				Grundon <i>et al.</i> (1999)
	HM	Floración masculina-femenina				20-100			Rosen y Eliason (2005)
Mn	HM	Floración masculina-femenina			15	15-150			Campbell y Planck (2000)
	HOIM	Floración masculina			15				Grundon <i>et al.</i> (1999)
	HOIM	Floración masculina-femenina				20-150			Flyn <i>et al.</i> (1999)
	HM	Floración masculina-femenina				30-300			Rosen y Eliason (2005)

<sup>x</sup>HM=Hoja de la mazorca; <sup>w</sup>HOIM=Hoja opuesta e inferior a la mazorca.

## **CAPÍTULO 4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **4.1 Objetivo general**

Comparar la concentración de los metales pesados Fe, Cu, Zn, Mn y Cd disponibles en los suelos agrícolas ácidos, suelos encalados y suelos con vegetación nativa (VN) sin cultivar, así como su acumulación en hojas y granos de maíz en la región La Frailesca, en el estado de Chiapas.

### **4.2 Objetivos específicos**

1. Cuantificar el grado de acidez (pH, aluminio e hidrógeno intercambiables) que presentan algunos suelos cultivados con maíz en la región La Frailesca.
2. Comparar los contenidos extraíbles de metales pesados (Fe, Mn, Cu, Zn y Cd) con DTPA pH 7.3 y  $\text{CaCl}_2$  0.01 M en suelos ácidos de La Frailesca.
3. Contrastar la cantidad de metales pesados que se extraen de suelos de La Frailesca que han sido tratados con cal dolomítica como estrategia para incrementar el pH del suelo, en comparación con suelos agrícolas sin aplicación de cal y suelos con VN sin cultivar.
4. Cuantificar los metales pesados (Fe, Mn, Cu, Zn y Cd) que pasan a ser parte de las hojas y granos de maíz.
5. Determinar si existe una relación entre la concentración de metales pesados extraíbles del suelo y la concentración de los mismos en hojas y granos de maíz.

### 4.3 Hipótesis

- La acidez de los suelos agrícolas muestreados en La Frailesca es mayor que lo reportado como tolerable por el maíz.
- La concentración en suelo de Fe, Mn, Cu, Zn y Cd extraídos con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M y Fe, Mn, Cu y Zn extraídos con DTPA supera los límites reportados como tóxicos.
- La adición de cal dolomítica incrementa el pH del suelo y disminuye la cantidad de metales pesados disponibles para las plantas.
- La concentración de metales pesados en hojas y granos de maíz en suelos sin aplicación de cal supera los límites reportados como tóxicos en hojas y granos de maíz.
- Existe una relación directa entre la concentración de metales pesados en el suelo extraídos con DTPA 0.005 M y  $\text{CaCl}_2$  0.01 M y su concentración en hojas y granos de maíz.

## CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Zona de estudio

El trabajo de campo se realizó en el municipio de Villa Flores y sus límites con el municipio de Villa Corzo, en la zona denominada La Frailesca del estado de Chiapas, ubicado entre las coordenadas 16° 10' y 16° 35' N y 93° y 93° 45' W entre la Llanura Costera del Pacífico y la Depresión Central de Chiapas.

#### 5.1.1 Clima

El clima de la zona corresponde a un cálido subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2015); de acuerdo con los datos reportados por la estación 7175 “Villa Flores” del Servicio Meteorológico Nacional (periodo de observación 1981-2010); en el municipio la temperatura media anual es de 25.2 °C, precipitación de 1182 mm anuales que se concentran en los meses de mayo a septiembre; y la evaporación total anual de 1774 mm. En la Figura 2 se presenta el climograma respectivo.

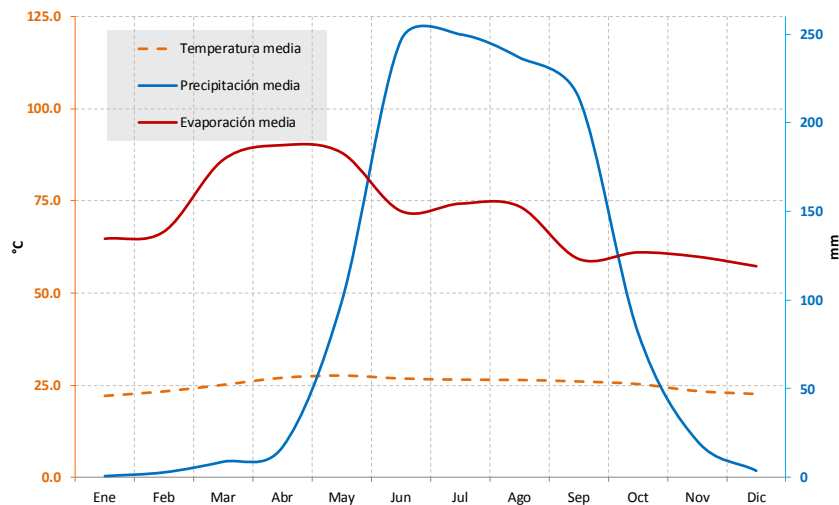


Figura 2. Temperatura, precipitación y evaporación.

Fuente: elaboración propia con información de estación climatológica 7175 “Villa Flores”, SMN (2010).

### 5.1.2 Geología

La región La Frailesca, se ubica en la provincia geológica Batolito de Chiapas, que consiste de un lineamiento de rocas metamórficas intrusionadas por metagranitos y metagranodioritas (SGM, 2015), así como extensiones importantes de rocas calizas y areniscas (Figura 3).

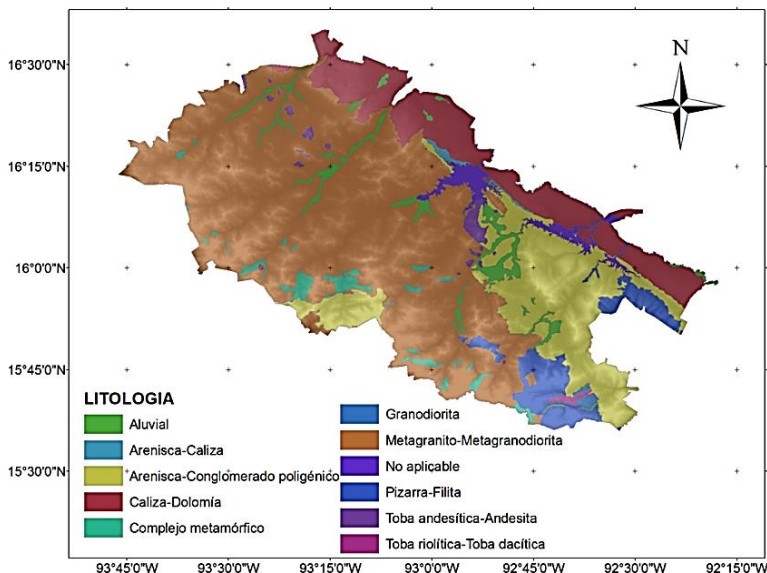


Figura 3. Tipos de rocas, Región Frailesca.

Fuente: SGM (2015).

### 5.1.3 Tipo de suelo

El suelo predominante en La Frailesca es el Leptosol (Figura 4) que ocupa el 36 % de la superficie de la región, seguido por Regosol (29 %), Luvisol (12 %) y Acrisol (9 %) (INEGI, 2007). Son suelos que en general, presentan limitaciones para el desarrollo de cultivos. Los Leptosoles son suelos muy someros sobre roca continua y extremadamente gravillosos o pedregosos (o ambos), que presentan limitación severa de enraizamiento. Los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados. Los Luvisoles tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos, como consecuencia tienen alta saturación de bases a ciertas profundidades. Los Acrisoles se caracterizan por ser suelos muy ácidos, fuertemente meteorizados con baja saturación de bases en alguna profundidad (FAO, 2008).

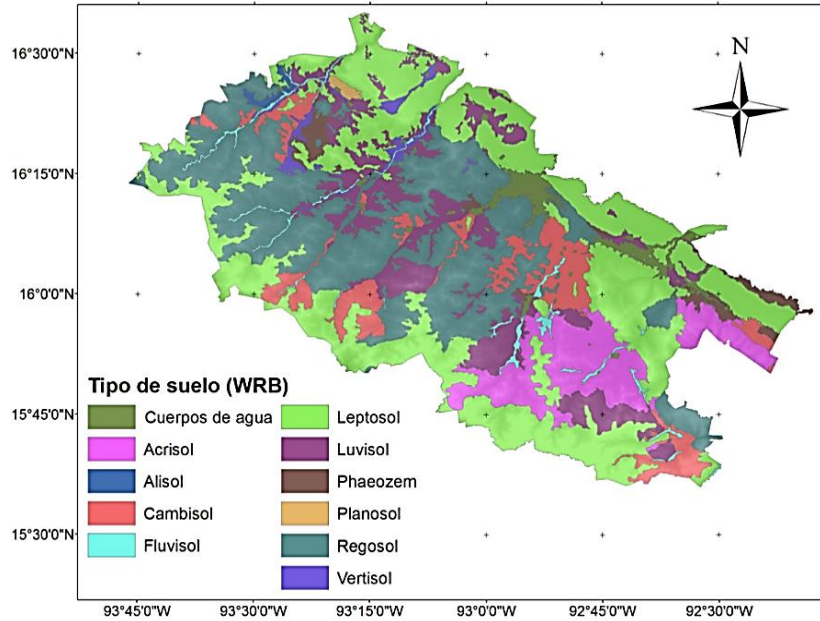


Figura 4. Tipos de suelo en La Frailesca, Chiapas.

Fuente: elaboración propia, extracción del Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1: 250 000 Serie II, INEGI (2007).

#### 5.1.4 Actividades agrícolas

El estado de Chiapas ocupa el sexto lugar en volumen de producción de maíz a nivel nacional con 1, 068, 000 toneladas y 702, 800 hectáreas, principalmente de temporal con un rendimiento medio de  $1.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . En La Frailesca, Chiapas, conocida también como “El granero de Chiapas” por su alta productividad especialmente en el cultivo de maíz de grano, se produce el 17% del total de maíz de grano en el estado con rendimientos medios por municipio de hasta  $4.2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (SIAP, 2017).

#### 5.2 Muestras

Se seleccionó un grupo de parcelas en las áreas agrícolas de la región que fueron encaladas en diferentes años y con distintas dosis (Cuadro 7), mismas que fueron ubicadas por medio de recorridos de campo con el apoyo de productores y técnicos que laboran en la zona, cada parcela fue georreferenciada.



Estas parcelas pertenecen a un grupo de trabajos experimentales realizados en la zona y dirigidos por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) e International Plant Nutrition Institute (IPNI). Además, se seleccionaron zonas circundantes a las parcelas agrícolas en las que prevalece la vegetación nativa (VN) del lugar, para de esta manera verificar si existía algún cambio en la extracción de los elementos pesados como efecto del manejo y de las prácticas agrícolas.

En las parcelas agrícolas seleccionadas se colectaron muestras de suelo, hojas y granos de maíz en las que se había establecido maíz de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2017. En total se obtuvieron 50 muestras de suelo distribuidas de la siguiente manera: 12 muestras de parcelas de validación con una dosis de encalado y sus respectivas 12 muestras de los testigos sin cal, 15 muestras de tres parcelas experimentales en la que CIMMYT e INIFAP establecieron experimentos con cinco dosis crecientes de cal dolomítica y 10 muestras de sitios con vegetación nativa (VN) con menor alteración.

Cuadro 7. Conjunto de parcelas muestreadas y características del encalado.

<b>Predio/Localidad</b>	<b>Propietario</b>	<b>Tipo parcela</b>	<b>Tipo de muestra obtenida<sup>y</sup></b>	<b>Año de encalado</b>	<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>PRNT<sup>z</sup></b>
El Jardín, Villa Hidalgo	Joaquín Altamirano	‡ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2014	1200	45
El Puente, Francisco Villa	Marcos Cigarroa	ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2015	2300	84
			VN	---	---	---
El Vergel, Villaflores	Rausel Camas Gómez	‡Padem-CIMMYT INIFAP	T	---	---	---
			E	2013	630	45
			VN	---	---	---
San Carlos, Francisco Villa	Efraín Gómez Solís	ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2014	2000	45
			VN	---	---	---
Santa Inés, Francisco Villa	Edray Velázquez	Padem CIMMYT-INIFAP	T	---	---	---
			E	2013	700	45
			VN	---	---	---
Juquila	Francisco Mario Rincón	ExpCIMMYT-INIFAP	T	---	---	---
			E	2017	2700	62
			VN	---	---	---

<b>Predio/Localidad</b>	<b>Propietario</b>	<b>Tipo parcela</b>	<b>Tipo de muestra obtenida<sup>y</sup></b>	<b>Año de encalado</b>	<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>PRNT<sup>z</sup></b>
Tehuacán, Francisco Villa	Rigoberto Padilla	ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2014	2200	45
Tehuacán, Francisco Villa	Mario Suchiapa	PademIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2017	1500	62
Tehuacán, Francisco Villa	Raquel Padilla Saldaña	ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2014	3600	45
			VN	---	---	---
Tehuacán, Francisco Villa	Eleazin López	Exp-IPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2015	800	84
Zitacuaro, Francisco Villa	Sinar Coutiño	ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2014	2300	45
			VN	---	---	---
Santa Inés, Francisco Villa.	Alfonso Velázquez	ExpIPNI-INIFAP	T	---	---	---
			E	2015	920	84
			VN	---	---	---
San Carlos, Francisco Villa	Efraín Gómez Solis	ExpCIMMYT-INIFAP	T	---	---	---
			D1	2014	2500	45
			D2	2014	5000	45
			D3	2014	7500	45

Predio/Localidad	Propietario	Tipo parcela	Tipo de muestra obtenida <sup>γ</sup>	Año de encalado	Dosis (t·ha <sup>-1</sup> )	PRNT <sup>λ</sup>
			D4	2014	10000	45
			VN	---	---	---
			T	---	---	---
Tehuacán, Francisco Villa	Eduard Padilla	ExpCIMMYT-INIFAP	D1	2015	750	84
			D2	2015	1500	84
			D3	2015	2250	84
			D4	2015	3000	84
			VN	---	---	---
Tehuacán, Francisco Villa	Rigoberto Padilla	ExpCIMMYT-INIFAP	T	---	---	---
			D1	2014	2500	45
			D2	2014	5000	45
			D3	2014	7500	45
			D4	2014	10000	45
			VN	---	---	---

<sup>γ</sup> T: Testigo; E: Encalado; VN: Vegetación nativa; D1: Dosis 1; D2: Dosis 2; D3: Dosis 3; D4: Dosis 4.

<sup>λ</sup> PRNT: Poder Relativo de Neutralización Total.

¥ Exp: Experimento.

ψ Padem: Parcela demostrativa.

### 5.2.1 Muestreo de suelo

De cada parcela se obtuvo una muestra compuesta resultante de mezclar 15 muestras individuales. Las muestras individuales se recolectaron a una profundidad 0 a 20 cm y a 10 cm de distancia de las plantas de maíz. Se usó una barrena tubular de acero inoxidable (Figura 5), para garantizar que cada muestra individual contribuyese con el mismo volumen de suelo a la muestra compuesta final.

Los puntos para la toma de muestras individuales de cada parcela fueron establecidos a juicio del investigador siguiendo un patrón en zig-zag. Los puntos de muestreo fueron geoposicionados, el material colectado en cada punto fue introducido en bolsas de plástico con su respectiva identificación para su posterior traslado al laboratorio.



Figura 5. Detalles del muestreo de suelos. (a) geoposicionamiento de los sitios de muestreo; (b) y (c) toma de muestras individuales de suelo.

La toma de las muestras de suelo se realizó en dos periodos: el primero en los meses de agosto y septiembre de 2017 en el que se colectaron 39 muestras compuestas de suelo de las parcelas que habían recibido tratamiento con cal dolomítica y su respectivo testigo. Durante el segundo

muestreo efectuado en el mes de febrero de 2018, se obtuvieron 10 muestras de suelo de zonas con vegetación nativa en áreas circundantes a las parcelas agrícolas, todas ubicadas en el municipio de Villa Flores y en los límites con el municipio de Villa Corzo (Figura 6).

Debido las condiciones de sequía y a la compactación del terreno que prevalecían en el muestreo de febrero de 2018, fue imposible tomar las muestras con la barrena descrita anteriormente, por lo que se optó por tomar una muestra individual con pala recta de las zonas con vegetación nativa a 20 cm de profundidad.

### **5.2.2 Muestreo de hojas**

Se realizó durante los meses de agosto y septiembre de 2017, para coleccionar las muestras de hojas cuando el cultivo se encontraba en floración femenina (estado reproductivo R1 según la escala de Ritchie y Hanway, 1986). Se obtuvo una muestra compuesta por 15 hojas en cada parcela: una hoja de las plantas más cercanas a los puntos de muestreo individual de suelo descrita previamente. La hoja muestreada fue la opuesta e inferior a la primera mazorca (Figura 7) con base en la metodología de muestreo propuesta por Reuter y Robinson (1988). Las plantas muestreadas se marcaron con hilo de rafia con el fin de identificarlas posteriormente en el muestreo de granos. Las hojas recolectadas fueron lavadas con agua potable y se secaron a temperatura ambiente, fueron almacenadas en bolsas de papel de estraza y marcadas con su respectiva identificación para su traslado al laboratorio.

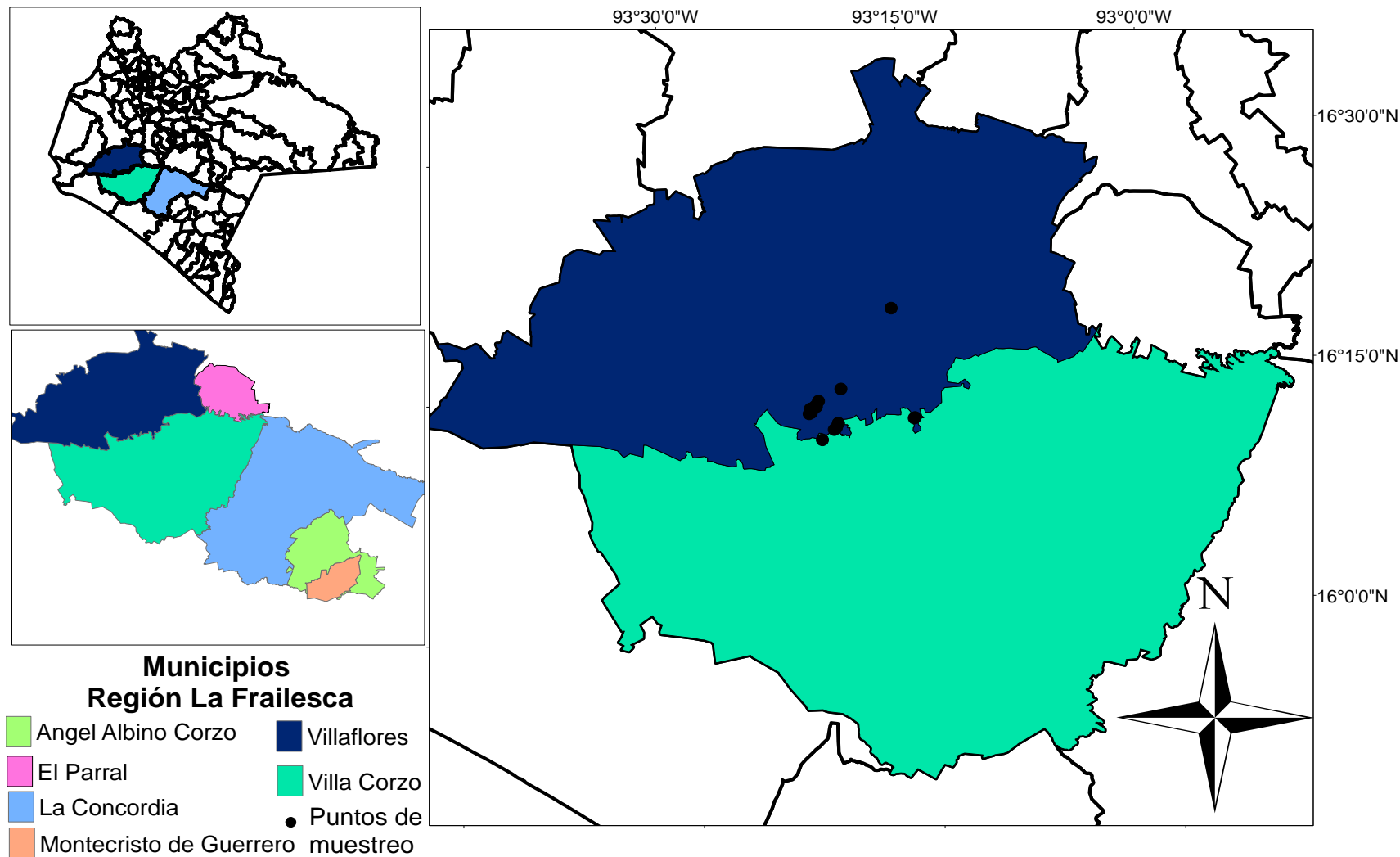


Figura 6. Macro y microlocalización de los puntos de muestreo en La Frailesca, Chiapas.

Fuente: Elaboración propia. Extracción del Marco Geoestadístico INEGI (2018).



Figura 7. Muestreo de hojas de maíz en etapa reproductiva R1 de la escala de Ritchie y Hanway (1986).

### **5.2.3 Muestreo de granos**

Las muestras de granos se colectaron en los meses de diciembre 2017 y enero 2018, cuando el cultivo alcanzó la madurez fisiológica (R6, escala de Ritchie y Hanway, 1986), la cual se identificó una vez que el granó se llenó completamente y un punto negro apareció en la base del grano, justo en el sitio de unión con el raquis de la mazorca. En cada parcela se recolectaron 15 mazorcas, de las mismas plantas en las que se obtuvieron las muestras de hojas y suelo. Las mazorcas se desgranaron y homogeneizaron para obtener una muestra compuesta, se almacenaron en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio.

## **5.3 Tratamiento de las muestras**

### **5.3.1 Secado**

Una vez en el laboratorio, las muestras de suelo se secaron a la sombra y a temperatura ambiente en charolas de plástico; las muestras de hojas y granos se secaron en bolsas de papel estraza en una estufa de secado de aire forzado Heraeus a 70 °C por 72 horas.



### **5.3.2 Molienda y tamizado**

La molienda de las muestras de suelo secas se hizo de forma manual con un mazo de madera, los fragmentos de la muestra se pasaron por un tamiz malla 2 mm; la fracción más gruesa de la muestra correspondió a pequeños fragmentos de rocas, los cuales fueron retirados para evitar su molienda.

Las muestras de hojas y granos se molieron en molino de acero inoxidable marca Arthur H. Thomas CO. Model 4 Wiley Mill, pasando la muestra por malla de 1 mm, tomando cuidado de que pasase 100% de la muestra para evitar segregación. Todas las muestras fueron mezcladas hasta homogeneizarlas y almacenadas en bolsas de plástico.

### **5.4 Análisis químico de suelo y muestras vegetales**

Se realizaron los siguientes análisis químicos de suelo: pH en agua, H y Al intercambiables, Fe, Cu, Zn, Mn y Cd en sus formas extraíbles con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M con base en la metodología de Houba *et al.* (2000) y Fe, Cu, Zn y Mn con DTPA de acuerdo a la metodología de Lindsay y Norvell (1978). Los metales se cuantificaron por espectrometría de absorción atómica con el equipo Varian SpectrAA 220 FS AAS.

Las muestras de tejido vegetal se digirieron con una mezcla de  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  y las concentraciones solubilizadas de Fe, Cu, Zn, Mn y Cd en hojas y granos se cuantificaron por la técnica de espectrometría de absorción atómica y Al por emisión atómica, usando espectrómetro de absorción atómica Varian SpectrAA 220 FS AAS.

Como parte del control de calidad se incluyeron análisis de blancos y muestras patrones internas del Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Programa de Posgrado en Edafología del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.

#### **5.4.1 Acidez: Hidrógeno y Aluminio intercambiables**

A 10 g de suelo se le añadieron 50 mL de KCl 1 N, mismos que se agitaron por 30 min en agitador de acción recíproca, se realizó el filtrado en papel Whatman #2, seguido de cinco lavados de suelo con 10 mL de KCl 1 N y luego se aforó a 100 mL. La cuantificación se hizo por titulación con NaOH 0.005 N, se tomaron dos alícuotas de 25 mL del extracto: una para acidez

total y otra para hidrógeno intercambiable, usando como indicadores fenoftaleína y anaranjado de metilo, respectivamente. El aluminio intercambiable se obtuvo por diferencia de los anteriores con base en las siguientes expresiones:

$$Acidez\ total\ (meq \cdot 100\ g\ de\ suelo^{-1}) = \frac{(N\ NaOH)(Vol\ NaOH) \cdot 100 \cdot 100}{25\ mL \cdot 10\ g}$$

$$H\ intercambiable\ (meq \cdot 100\ g\ de\ suelo^{-1}) = \frac{(N\ NaOH)(Vol\ NaOH) \cdot 100 \cdot 100}{25\ mL \cdot 10\ g}$$

$$Al\ intercambiable = Acidez\ total - H\ intercambiable$$

dónde:

*N NaOH.* Normalidad exactamente conocida de NaOH

*Vol NaOH.* Volumen de NaOH gastado en la titulación

*25 mL.* Alícuota tomada del extracto original

*10 g.* Peso de la muestra de suelo

Para conocer la normalidad exacta del NaOH se realizaron estandarizaciones por triplicado con  $KHC_8H_4O_4$  como el titulante.

#### **5.4.2 Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extractables con $CaCl_2$ 0.01 M**

Se siguió la metodología propuesta por Houba *et al.* (2000), basada en la extracción de elementos con  $CaCl_2$  0.01 M y acidificando el extracto con  $HNO_3$  para evitar la absorción de elementos por parte del material de trabajo (plástico o vidrio). Tanto para la preparación de reactivos como para el lavado de material, se utilizó agua desionizada tipo I. Los elementos se leyeron por espectrometría de absorción atómica en diluciones 1:5, empleando la misma matriz para preparar las curvas de calibración ( $CaCl_2$  0.01 M). Además de los elementos esenciales Fe, Cu, Zn y Mn se midió Cd tomando como referencia información reportada por Hooda (2010) quien indica que la adición de cal al suelo es una fuente de entrada de metales pesados como el Cd.

### 5.4.3 Fe, Cu, Zn y Mn extractables con DTPA pH 7.3

Conforme al método de Lindsay y Norvell (1978), a 10 g de la muestra de suelo se añadieron 20 mL de la solución DTPA pH 7.3 y se agitaron por 2 h; luego se filtró con papel Whatman #2. En la preparación de reactivos y en el lavado de material, se utilizó agua desionizada tipo I.

### 5.4.4 Análisis en tejido vegetal

Se realizó la digestión de las muestras de hojas y granos con la técnica de HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>. Se preparó la mezcla digestora en una relación 2:1 respectivamente; se pesaron 0.5 g de material vegetal seco y molido y se agregaron 6 mL de la mezcla digestora; enseguida se elevó la temperatura gradualmente a 150 °C, y posteriormente a 210 °C. El digerido resultante se aforó a 25 mL con agua desionizada tipo I.

### 5.4.5 Cuantificación de elementos

Para la extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M, todos los elementos se leyeron en una dilución de 4.9 mL en 5 mL agregando 0.1 mL de HCL 6 N para acidificar el extracto; en la extracción con DTPA, Mn y Cu se leyeron directamente en los extractos, Fe, Zn y Al en diluciones en agua en relación 1:10.

Los elementos Fe, Cu, Zn y Cd se cuantificaron por espectrometría de absorción atómica con llama aire-acetileno; Mn por espectrometría de absorción atómica con llama acetileno-óxido nitroso; Al se cuantificó por espectrometría de emisión atómica y llama acetileno-óxido nitroso. Los cálculos se realizaron con base en las siguientes expresiones:

$$ppm \text{ Fe, Cu, Zn, Mn, Cd, Al} = \text{lectura en CC} \cdot FDM \cdot FDV$$

dónde:

*Lectura en CC* = lectura en curva de calibración (mg L<sup>-1</sup>)

*FDM* = Factor de dilución de masa

*FDV* = Factor de dilución de volumen

$$FDM = \frac{\text{Volumen del extractante (mL)}}{\text{Peso de la muestra (g)}}$$

$$FDV = \frac{\text{Volumen total (mL)}}{\text{Alícuota (mL)}}$$

### 5.5 Análisis de datos

Los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de suelo, hojas y granos se analizaron haciendo una agrupación previa con base en la dosis de encalado que recibieron las parcelas (Cuadro 8). Se usó el análisis de modelos mixtos del software Minitab 18.0, en el que se consideraron variables de efectos fijos: dosis de encalado, covariable: poder relativo de neutralización total de la cal (PRNT) y variables de efectos aleatorios: parcela y año de aplicación de cal. Para la comparación de medias se aplicó una prueba de medias de Tukey al 5 % de significancia.

Cuadro 8. Clasificación de los tratamientos de acuerdo a la dosis de encalado

<b>Tratamiento</b>	<b>Dosis de encalado (t·ha<sup>-1</sup>)</b>
1	Testigos sin cal
2	0.6 a 2
3	2.2 a 3.6
4	5.0
5	7.5
6	10
7	Vegetación nativa

Para establecer relaciones entre las concentraciones de los metales analizados en suelo y hojas y granos, se hicieron correlaciones múltiples entre las variables independientes: concentración de los metales en el suelo, pH y aluminio intercambiable, y la variable dependiente: concentración en hojas y granos.

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentarán consideran cinco grupos de suelos que se generaron con base en la dosis de encalado aplicada: 0.6 a 2.0, 2.2 a 3.6, 5, 7.5 y 10 t·ha<sup>-1</sup>, también se incluye el grupo de suelos testigo sin cal y el de los sitios de vegetación nativa (VN). Esta forma de presentar los resultados obedece al objetivo general de este trabajo en el que se plantea evaluar los elementos metálicos presentes en suelos ácidos, encalados y con VN de la Frailesca de Chiapas. En las figuras se presenta la información correspondiente a una sola desviación estándar para cada tratamiento. La alta desviación estándar de las mediciones obtenidas se explica por la variabilidad de los sitios que constituyen los grupos de suelos. Se recuerda que en esta región se presentan cuatro órdenes de suelos Regosoles, Leptosoles, Luvisoles, Acrisoles. Resultados complementarios a los que se presentan en las figuras, así como los de los análisis de varianza y las pruebas Tukey se incluyen en los anexos.

### 6.1 pH del suelo

Los resultados del análisis de pH se muestran en la Figura 8. La condición natural de los suelos de La Frailesca es ácida. Los suelos con vegetación nativa (VN) ubicados en sitios circundantes a los cultivados tuvieron pH moderadamente ácidos (pH de 5-6) y significativamente mayores que la de los testigos cultivados sin cal, cuyo pH presentó un valor medio es de pH 4.39, por lo que se clasifican como suelos fuertemente ácidos (pH 4-5). Lo anterior evidencia que las prácticas agrícolas tienen un efecto acidificante en el suelo, debido fundamentalmente a la pérdida de bases intercambiables y aumento de la presencia de aluminio intercambiable, que constituye la mayor parte de la fracción acidez intercambiable.

Independientemente de la dosis aplicada y del año de aplicación, la práctica de encalado del suelo, con la dosis máxima incrementó significativamente el pH del suelo en 1.54 unidades de pH con respecto al de los suelos testigos (ver Figura 8). Este incremento significó un cambio en la clasificación de la acidez de los suelos encalados, los cuales pasaron de fuertemente ácidos a ligeramente ácidos en las parcelas que recibieron 7.5 y 10 t·ha<sup>-1</sup> de cal. En todos los casos los valores de pH no alcanzaron valores mayores a 6. Se sabe que en estas condiciones de ligera acidificación, es poco frecuente la formación de complejos estables en el suelo. Karalić *et al.* (2013) reportaron incrementos de 1.89 unidades de pH como resultado del encalado, e indican

que si los suelos son moderadamente ácidos, este incremento sólo es de 1.3 unidades de pH, sin embargo estos son ejemplos puntuales que obedecen a las características de la capacidad amortiguadora que exhibe cada suelo en particular.

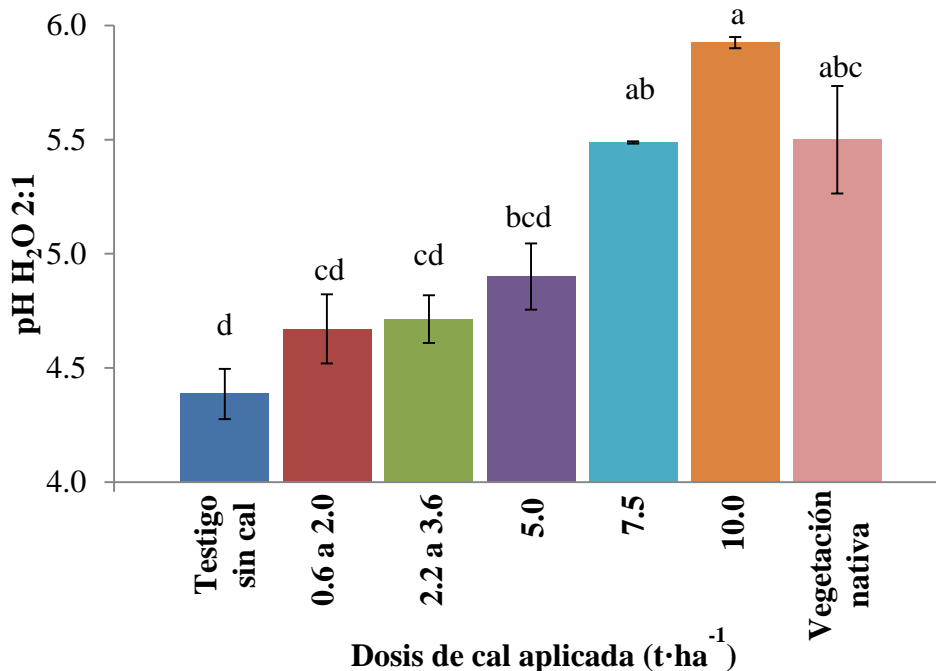


Figura 8. Variación del pH del suelo en función a la dosis de encalado

En la Figura 8 se observa que los suelos que recibieron la mayor dosis de encalado (10 t·ha<sup>-1</sup>), alcanzaron el mayor valor de pH superior al que mostraron los suelos con VN y con dosis de encalado de 7.5 ton·ha<sup>-1</sup> (pH 5.5). Según Bolan *et al.* (2003), desde el punto de vista químico, el incremento de pH por efecto del encalado es consecuencia de la hidrólisis de los cationes básicos de la cal, proceso que produce iones OH<sup>-</sup> que neutralizan a los cationes H<sup>+</sup> reduciendo su actividad. Adicionalmente, se puede concluir que a lo largo de los años de cultivo los suelos de la región estudiada, han perdido aproximadamente un equivalente a 7.5 t de cal agrícola, esto es unas 2 a 3 t·ha<sup>-1</sup> de calcio elemental.

La disminución del pH del suelo en parcelas agrícolas es un fenómeno comúnmente reportado en la literatura. Lungu y Dynoodt (2008) indican que la aplicación de fertilizantes nitrogenados tiene un efecto acidificante y que la disminución del pH, ocurre a una tasa de 0.04 unidades por mes a partir del tercer año consecutivo fertilización. En el caso de La Frailesca, el proceso de acidificación del suelo fue reportado en 1999 por Nieuwkoop *et al.*, quienes señalaron que los

suelos de esta región estaban sometidos a un proceso de acidificación como resultado de un incremento en el uso de fertilizantes nitrogenados amoniacales. Tal reporte coincide con las prácticas realizadas por los agricultores de las parcelas muestreadas en el presente trabajo, quienes utilizan hasta 200 kg de nitrógeno por hectárea y usan como fuentes principales el sulfato de amonio, nitrato de amonio y en menor grado la urea.

En la Figura 9, se muestra la existencia de una relación lineal entre el incremento del pH del suelo en función de la dosis de cal aplicada. Esta relación ( $R^2 = 0.74$ ) indica que por cada tonelada de cal aplicada, el pH del suelo incrementa 0.14 unidades. Resultados similares han sido reportados por Castro y Munevar (2013).

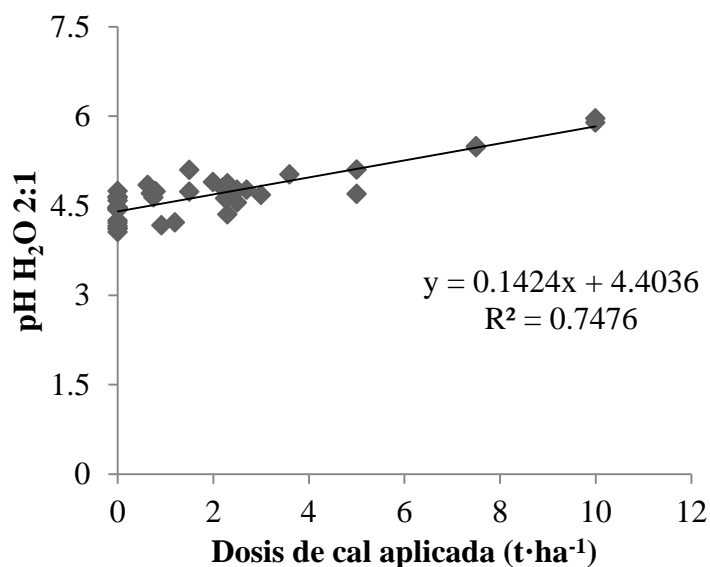


Figura 9. Relación entre pH del suelo y dosis de encalado.

La aplicación de un exceso de cal o sobre-encalado, puede devenir en problemas de disminución de la disponibilidad de micronutrientes como Fe, Cu, Zn y Mn además de fósforo. También aumenta el calcio en el suelo que en condiciones de sobreencalado es posible que llegue a ocupar hasta el 90 % del total de los cationes de intercambio, en esas condiciones el calcio gobierna el estado soluble de los elementos traza en el suelo. Se ha reportado que el calcio en solución puede formar complejos orgánicos en presencia de cantidades importantes de materia orgánica (MO). Sin embargo, este no es el caso que se presenta en los suelos estudiados en donde las parcelas agrícolas tienen entre un 0.7 y 1.8% MO.

Por lo anterior es indispensable cuidar que no se alcancen niveles muy elevados de pH (mayores de 8.0) de forma permanente. Incrementos bruscos de pH ocurren cuando se hacen aplicaciones elevadas de productos encalantes, particularmente de aquellos altamente reactivos y finamente molidos como el CaO.

## 6.2 Acidez total intercambiable ( $\text{Acidez}_{\text{int}}$ ) y aluminio intercambiable ( $\text{Al}_{\text{int}}$ )

La relación entre pH-acidez $_{\text{int}}$  ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ) y pH- $\text{Al}_{\text{int}}$  resultó ser de tipo cuadrática (Figura 10) y negativa, esta correlación era esperada, siendo mucho más fuerte con acidez intercambiable que con el aluminio y está bien documentada en la literatura (Tao *et al.*, 2019; Lollato *et al.*, 2018; Abreu *et al.*, 2013).

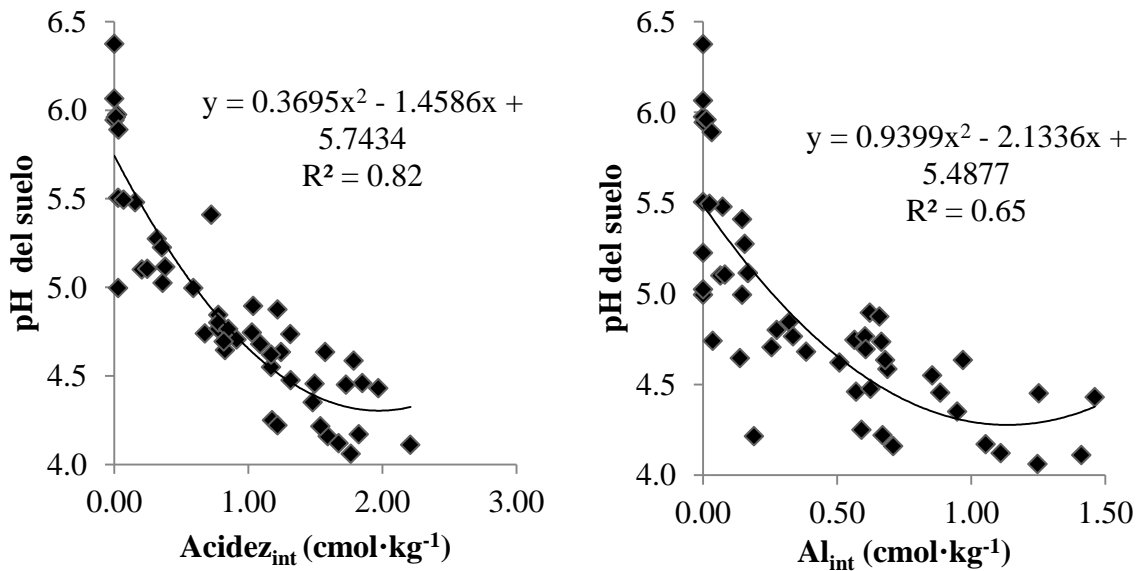


Figura 10. Relación entre pH-acidez y aluminio intercambiables en suelo.

La acidez ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$  intercambiables) y  $\text{Al}_{\text{int}}$  presentaron los valores más altos (2.2  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y 1.4  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivamente) a pH cercanos a 4 y los más bajos ( $\leq 0.1$   $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en ambos casos) a pH mayor a 5.5 (Figura 11). Estos resultados coinciden con lo reportado por Slaterry *et al.* (1999), quienes indican que el aluminio empieza a solubilizarse por debajo de pH 5.5 y a pH menores a 5.0 frecuentemente produce toxicidad.

Los sitios con VN prácticamente no presentaron  $\text{Al}_{\text{int}}$  (0.07  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), mientras que los sitios testigos sin cal mostraron la mayor concentración (0.83  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Las diferencias en la



concentración de  $Al_{int}$  entre los suelos testigos, con VN y los que recibieron distintas dosis de encalado fueron significativas, estos resultados sugieren que el tipo de manejo del suelo (cultivados y no cultivados) así como la adición de fertilizantes nitrogenados tienen como consecuencia un aumento en la concentración de  $Al_{int}$ . El encalado condujo a una disminución significativa del  $Al_{int}$  de  $0.34 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en sitios con dosis de encalado entre  $0.6$  a  $2.2 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ , lo que corresponde a la neutralización del 41% del  $Al_{int}$  comparado con los testigos sin cal; en las parcelas que recibieron  $10 \text{ t}$  de cal el aluminio disminuyó  $0.81 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  que equivale al 97.5% de  $Al_{int}$  neutralizado en comparación con los testigos sin cal (Figura 12).

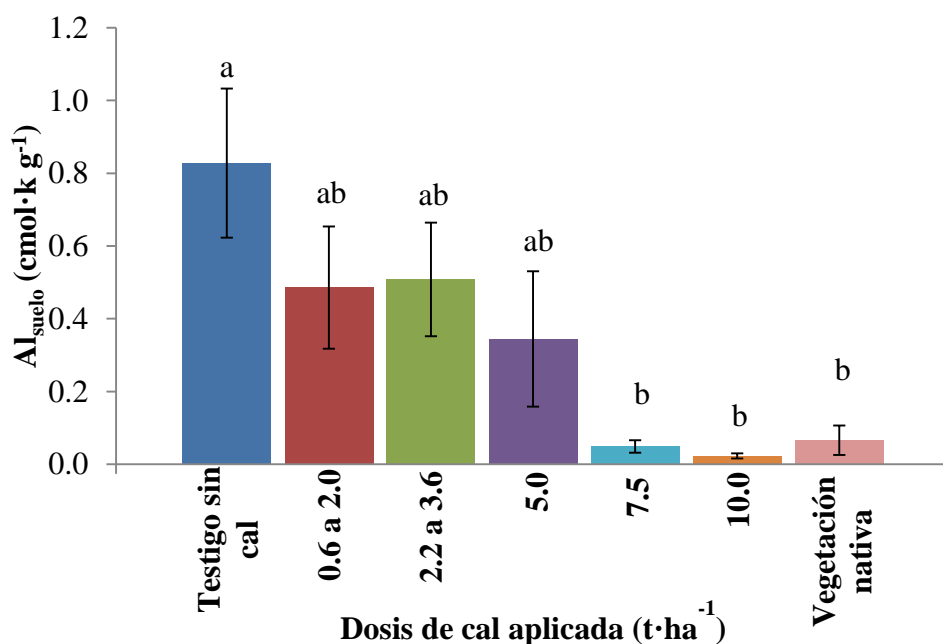


Figura 11. Efecto del encalado sobre la concentración de aluminio intercambiable.

Mapiemfu *et al.* (2012) señalaron que la concentración tóxica de Al en suelo para variedades de maíz resistentes a la presencia de este elemento es de  $1.99 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , por lo anterior, en ningún caso, las muestras analizadas alcanzan dicha concentración, sin embargo Slaterry *et al.* (1999) indicaron que Al en el rango de  $0.06$  a  $0.78 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  puede llegar a ser tóxico para el crecimiento de las plantas, afectar el crecimiento de raíces y como consecuencia reducir la absorción de nutrientes y agua.

La adición de  $7.5$  y  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal dolomítica con PRNT 45 redujo el  $Al_{int}$  a una concentración similar a la de las zonas con VN ( $0.07 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Estos resultados coinciden con los

encontrados por Nduwumuremyi (2013), quién reportó que el requerimiento de cal para reducir entre el 85 y 90% de aluminio intercambiable en suelo con  $\text{pH} \leq 4.7$  es mayor a 4.5 t de  $\text{CaCO}_3$  por ha, este resultado es informativo, porque tal como se mencionó antes, la dosis de cal que resulte más efectiva dependerá de la capacidad amortiguadora del suelo.

### **6.3 Metales en el suelo y métodos de extracción**

En todos los suelos de los sitios evaluados, la solución DTPA extrajo mayor cantidad de los elementos metálicos que la solución  $\text{CaCl}_2$  0.01 M de las muestras de suelo, lo que concuerda con lo reportado por otros autores (Esnaola *et al.*, 2000; Bakircioglu *et al.*, 2011). El  $\text{CaCl}_2$  0.01 M es una solución salina, que solubiliza los elementos metálicos de la fracción intercambiable, adsorbidos por fuerzas electrostáticas y que son liberados en el proceso de intercambio iónico (Filgueiras *et al.*, 2002). Mientras que el DTPA es una solución quelante que no sólo extrae la fracción intercambiable, sino también la fracción retenida más fuertemente en los hidróxidos del suelo (Bakircioglu *et al.*, 2011). Sin embargo Houba *et al.* (2000) recomiendan el uso de  $\text{CaCl}_2$  0.01 M para extraer elementos metálicos.

Las concentraciones de todos los elementos metálicos extraídos con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M y DTPA, en los cinco grupos de suelo definidos por la dosis de cal aplicada, presentaron una alta desviación estándar, lo cual se explica por la variabilidad espacial del suelo, el tiempo transcurrido entre la fecha de aplicación de cal y la toma de la muestra, que no fue la misma para los distintos sitios, así como por el poder relativo de neutralización total (PRNT) de la cal aplicada, que tampoco fue el mismo en todos los años. Según Li *et al.* (2019) el efecto neutralizante de la cal aplicada perdura por 2 años y después se presenta un proceso de re-acidificación del suelo, por lo que para conservar la productividad de los sistemas agrícolas es recomendable aplicar una dosis de cal de mantenimiento.

#### **6.3.1 Fe**

La solución DTPA extrajo mayor cantidad de Fe ( $47\text{-}138 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) que la solución  $\text{CaCl}_2$  0.01 M ( $0.7$  a  $1.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). En la cantidad de Fe extraído con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M se detectó más claramente la tendencia a que a mayor cantidad de cal aplicada el Fe extraído decrecía, con este extractante la concentración de Fe fue desde  $1.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en los testigos sin encalar a  $0.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en sitios con dosis de cal de  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ . El análisis de varianza y la prueba de Tukey muestran que estos

suelos se tuvo una disminución significativa en la concentración de Fe a partir de la dosis  $\geq 5$  t·ha<sup>-1</sup> de cal (Figura 12).

Cuando se empleó DTPA como solución extractora, también se observó la tendencia de que la concentración de Fe disminuyó al incrementar la dosis de cal aplicada (Figura 13); la mayor concentración fue de 133 mg·kg<sup>-1</sup> y correspondió a los testigos sin cal y la menor de 47 mg·kg<sup>-1</sup> a los que recibieron 10 t·ha<sup>-1</sup> de cal. Con aplicación de dosis mayores a 5 t·ha<sup>-1</sup> el Fe en suelo disminuyó incluso por debajo de la concentración de Fe en sitios con VN. Concentraciones menores (81-25 mg kg<sup>-1</sup>) de Fe extraído con DTPA fueron reportadas por Takáč *et al.* (2009).

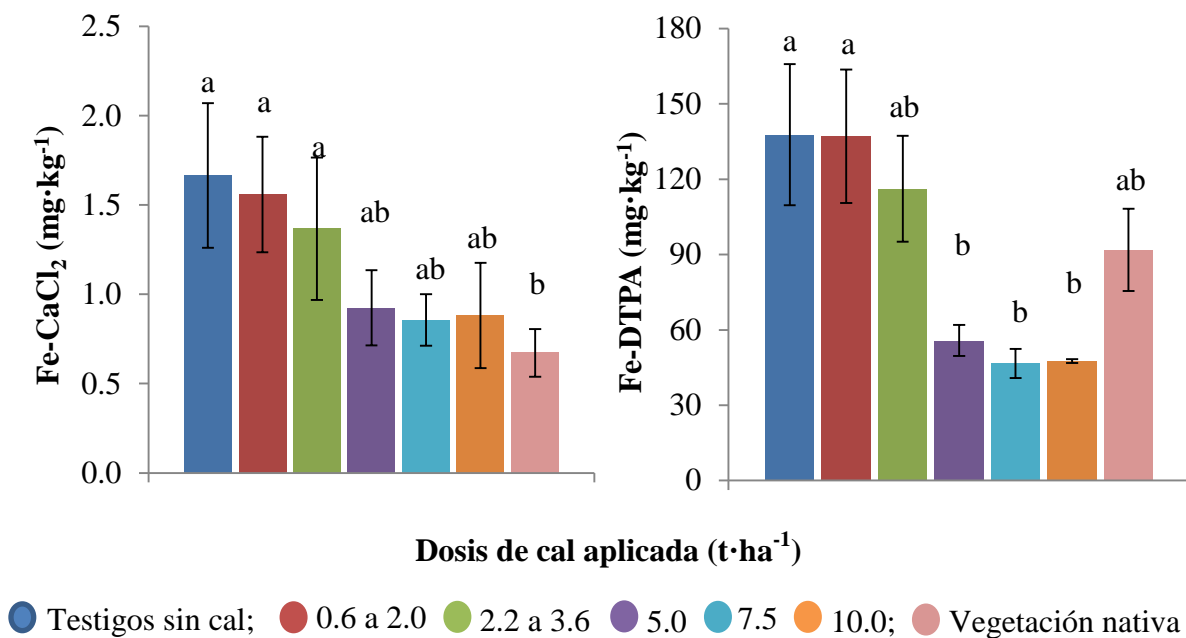


Figura 12. Efecto del encalado sobre la concentración de Fe, mediante extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y DTPA.

La disminución en la concentración de Fe extraíble está asociada al incremento del pH del suelo por efecto del encalado. La aplicación de cal modifica el equilibrio de este elemento en el suelo, debido a reacciones de precipitación que afectan su solubilidad. Takáč *et al.* (2009) señalaron que al aumentar el pH por el encalado se tiene una correlación negativa respecto a la concentración de Fe en solución. El aumento de la dosis de encalado incorpora mayor cantidad de calcio, con lo cual es probable que se produzca la formación de FeCO<sub>3</sub> donde el Fe se incorpora a la estructura de los carbonatos y precipita (Kabata y Pendias, 2000).

Aun cuando la concentración de Fe en el suelo disminuyó por efecto del encalado en todos los sitios analizados (testigos sin cal, encalados con distintas dosis y VN), la concentración de Fe extraíble en suelo se ubica en los niveles alto (26 a 49 mg·kg<sup>-1</sup>) y muy alto (> 50 mg·kg<sup>-1</sup>) de acuerdo con la clasificación propuesta por Castellanos *et al.* (2000) cuando la extracción se hace con DTPA. En los suelos de La Fraileasca prevalecen las altas concentraciones de Fe, dado que bajas concentraciones de este elemento en suelo solo se alcanzan cuando los valores de pH son mayores a 6.5 (Lalljee y Facknath, 2001); estos valores de pH no se encontraron en los suelos analizados ni aún después del encalado.

### 6.3.2 Cu

De manera similar a lo observado en el caso del Fe, la solución DTPA extrajo más Cu (0.32 a 0.66 mg·kg<sup>-1</sup>) (aproximadamente diez veces más) que con la solución de CaCl<sub>2</sub> 0.01 M (0.02 a 0.07 mg·kg<sup>-1</sup>). El efecto del encalado sobre la concentración de Cu extraíble en el suelo, no fue muy claro cuando su extracción se hizo con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M. En el caso de la extracción con DTPA no se observó efecto estadísticamente significativo, prácticamente tanto los sitios testigos, encalados con distintas dosis y con VN presentaron concentraciones similares de Cu. Sin embargo, es posible concluir con base a la extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M, que hay una disminución significativa en el Cu soluble en el suelo a partir de la aplicación de cal mayor a 2 t·ha<sup>-1</sup> de cal (Figura 13). Resultados similares fueron reportados por Buni (2014).

Todos los sitios se ubican en las clases de concentración de Cu baja (0.2 a 0.5 mg·kg<sup>-1</sup>) a moderadamente baja (0.5 a 0.8 mg·kg<sup>-1</sup>) de acuerdo con clasificación propuesta por Castellanos *et al.* (2000) para Cu extraído con DTPA. Valores semejantes (0.18-0.47 mg·kg<sup>-1</sup>) fueron reportados por Jaskulska *et al.* (2014) también en DTPA. Concentraciones bajas de Cu extraíble también han sido reportadas por Álvarez *et al.* (2010), quienes los asocian a una baja concentración total de este elemento en los suelos. Fageria (2001) reportó que la concentración de Cu extraído con DTPA considerada como adecuada para maíz es de 1.5 mg·kg<sup>-1</sup> y el nivel tóxico con el mismo extractante de 32 mg·kg<sup>-1</sup>, por lo que todas las muestras analizadas (testigos sin cal, encaladas y VN) se encuentran debajo de la concentración adecuada.

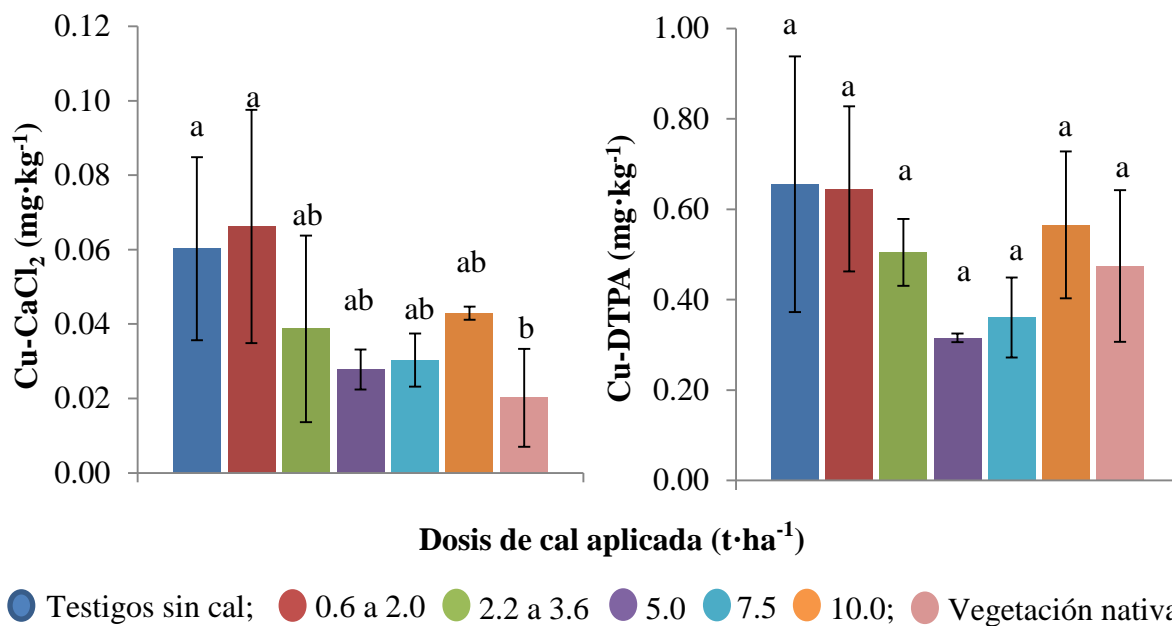


Figura 13. Efecto del encalado sobre la concentración de Cu, extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y DTPA.

### 6.3.3. Zn

En la figura 14 se presentan los resultados de concentración de Zn extraído con CaCl<sub>2</sub> y DTPA. De manera similar a lo observado en el caso del Fe y Cu la solución DTPA extrajo más Zn (0.19 a 1.09 mg·kg<sup>-1</sup>) que la solución de CaCl<sub>2</sub> 0.01 M (0.03 a 0.39 mg·kg<sup>-1</sup>), valores similares de Zn extraído con DTPA fueron señalados por Jaskulska *et al.* (2014) quienes reportan Zn en un rango de 0.57-0.69 mg·kg<sup>-1</sup>.

La extracción de Zn con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M mostró que a partir de las primeras dosis de cal aplicada al suelo (0.6 a 2.0 t·ha<sup>-1</sup>), se produjo una reducción significativa del Zn extraído. Estos resultados indican que aportes mayores de cal, que aumentan el pH del suelo (de pH 4.4 a pH 5.9), disminuyen la disponibilidad de Zn, esto confirma preliminarmente la correlación negativa que se reporta en la literatura entre el pH y el Zn (Kabata y Pendias, 2000), aunque en nuestro caso el pH no llegó a ser mayor a 6.0. Cuando se usó DTPA como extractante se observó una tendencia que al aumentar la dosis de encalado se extrajo menos Zn (ver Figura 14), sin embargo, las diferencias fueron no significativas para todos los sitios (testigos sin cal, encalados con distintas dosis y VN), este comportamiento también fue reportado por Karalić *et al.* (2013) al usar como extractante una mezcla de EDTA 0.01 M con (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 1 M.

La menor cantidad de Zn extraído con ambas soluciones extractantes a medida que aumentaba la dosis de cal, puede deberse a la redistribución de formas químicas de este elemento (Araújo *et al.*, 2007), como consecuencia del aumento de la cantidad de cal adicionada que puede conducir a la formación de  $ZnCO_3$ , donde el Zn es poco disponible.

Todos los sitios presentaron concentraciones de Zn de muy bajas a moderadamente bajas ( $< 0.03$  a  $1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) según la clasificación con base en extracción con DTPA de Castellanos *et al.* (2000). La deficiencia de Zn en suelos ácidos también fue reportada por Maqbool y Beshir (2019) quienes la asociaron a material parental altamente intemperizado, con concentraciones inherentes bajas y a suelos con textura arenosa fuertemente lixiviados, como es el caso de los arenosoles, regosoles, leptosoles y fluvisoles (Mertens y Smolders, 2009) que están presentes en La Frailesca.

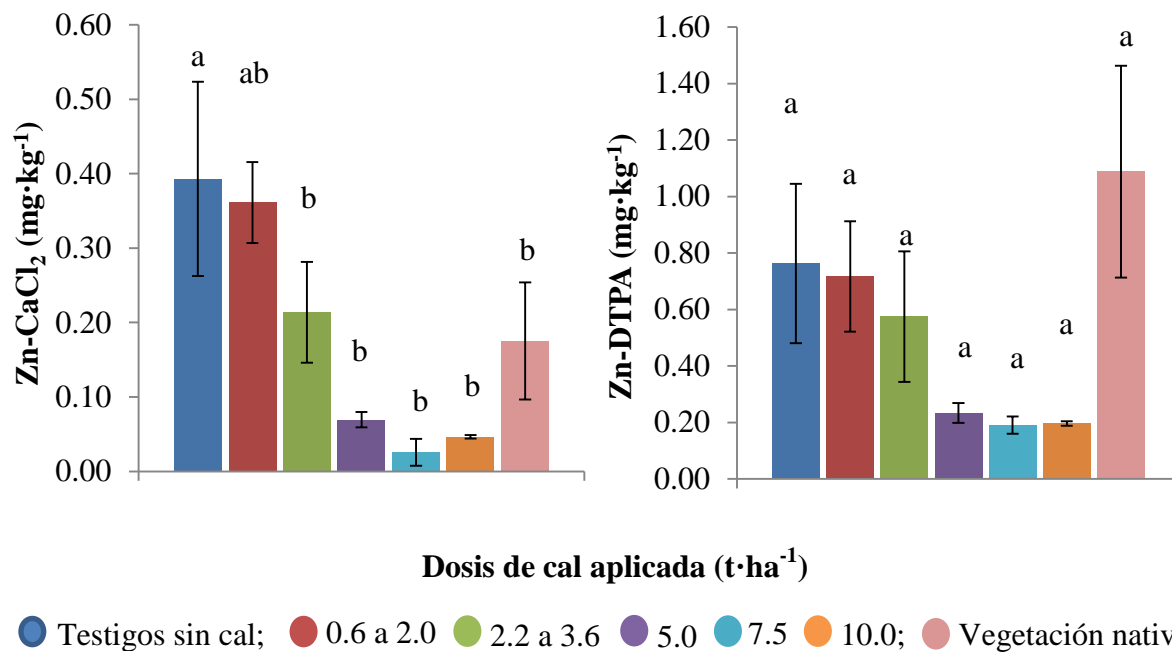


Figura 14. Efecto del encalado sobre la concentración de Zn, extracción con  $CaCl_2$  0.01 M y DTPA.

La cantidad de Zn extraída con DTPA, fue mayor en los sitios con VN que en los testigos y encalados con distintas dosis, lo cual puede deberse a la remoción de este metal por los cultivos. Wei *et al.* (2006) reportaron concentraciones de Zn más bajas y deficientes en parcelas cultivadas durante 18 años consecutivos respecto a parcelas sin cultivos establecidos. Una mayor

disponibilidad de nutrientes como el Zn también está altamente relacionada con un mayor contenido de materia orgánica en la superficie del suelo (Moreira *et al.*, 2016).

La desviación estándar de la concentración de Zn extraído con DTPA en los diferentes tratamientos de cal aplicada es muy alta, por lo cual el análisis de varianza y la prueba Tukey no mostraron diferencias significativas entre dosis de encalado. La extracción con  $\text{CaCl}_2$  indica una reducción significativa a partir de la primera dosis de cal aplicada.

### 6.3.4. Mn

La concentración de Mn extraída con DTPA y  $\text{CaCl}_2$  0.01 M en el suelo disminuyó a medida que aumentó la dosis de cal aplicada (Figura 15). Los testigos sin cal presentaron las concentraciones más altas de Mn ( $14.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con  $\text{CaCl}_2$  y  $20.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con DTPA), mientras que las concentraciones más bajas corresponden a las dosis mayores de cal ( $7.5$  y  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ,  $3.15$  y  $5.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en la extracción con  $\text{CaCl}_2$  y DTPA respectivamente), incluso fueron menores que en suelos con VN ( $6.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con  $\text{CaCl}_2$  y  $13.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con DTPA). Sin embargo, los resultados de la prueba Tukey no indicaron diferencias estadísticas significativas entre las dosis de encalado y la cantidad de Mn extraído con DTPA.

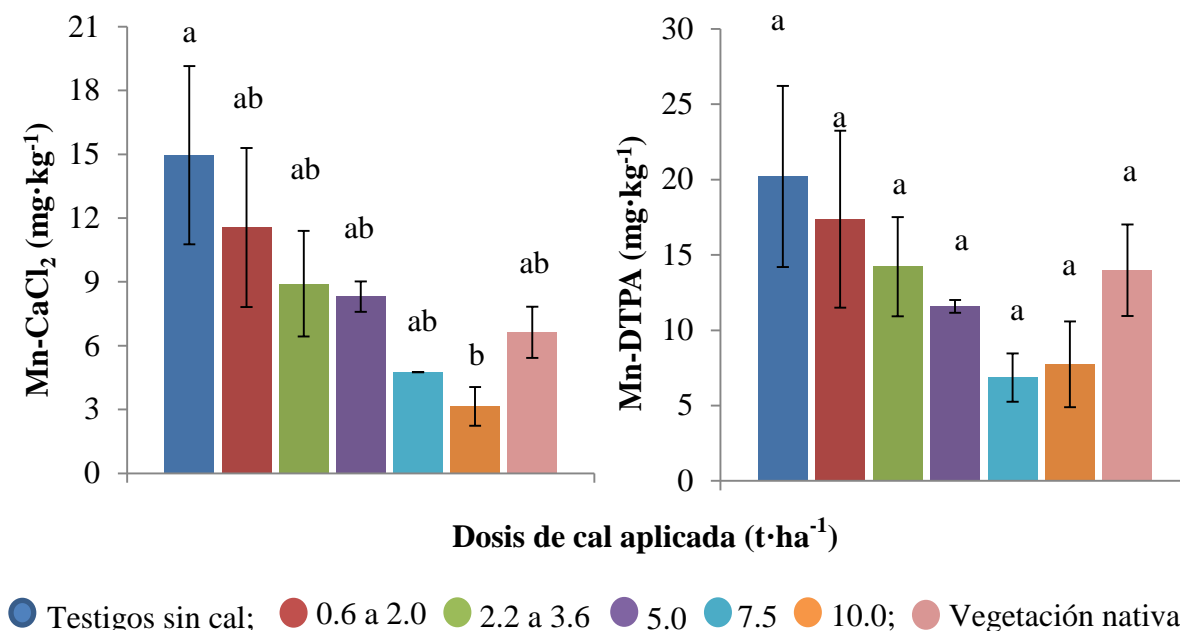


Figura 15. Efecto del encalado sobre la concentración de Mn, extracción con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M y DTPA

Según la clasificación de Castellanos *et al.* (2000) para la concentración de Mn extraído con DTPA, los testigos y las parcelas que recibieron las menores dosis de encalado (0.6 a 2 y 2.2 a 3.6 ton·ha<sup>-1</sup>) se clasifican con concentración moderadamente alta a muy alta (12 a > 50 mg·kg<sup>-1</sup>). A partir de la aplicación al suelo de 5 t·ha<sup>-1</sup> de cal, el Mn extraído pasó al rango medio (7-12 mg·kg<sup>-1</sup>). Por su parte los sitios con VN también tuvieron concentraciones altas de Mn; Jaskulka *et al.* (2014) reportaron concentraciones de Mn extraído con DTPA que varían entre 8 y 18 mg·kg<sup>-1</sup>. Según Fageria (2001), una concentración de Mn extraído con DTPA de 336 mg·kg<sup>-1</sup>, se considera tóxica para el cultivo de maíz, las concentraciones registradas en las parcelas aquí analizadas están debajo de ese valor.

El Mn es un elemento altamente sensible a variaciones de pH, que permiten la formación de complejos de Mn con la fracción orgánica del suelo, especialmente con los ácidos húmicos (Moreira, 2016). La reducción aquí registrada en la concentración en suelo a medida que incrementa la dosis de cal aplicada, está ligada al incremento del pH del suelo que pasó de 4.4 en los testigos sin cal a 5.9 en parcelas con aplicación de 10 t, lo que probablemente conduce a la formación de MnCO<sub>3</sub>.

### 6.3.5 Cd

La concentración media más alta de Cd extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M correspondió a los testigos sin aplicación de cal con 0.031 mg·kg<sup>-1</sup>. En la Figura 16 se observa que la concentración de Cd extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M disminuye al incrementar la dosis de cal recibida, sin que dicho decremento sea estadísticamente significativo (Cuadro 9). Esta disminución ha sido reportada en la literatura y puede estar asociada al incremento del pH del suelo, Karalić *et al.* (2013) indican que es probable una disminución de 4 a 6 veces la actividad de Cd en la solución del suelo por cada unidad que se incrementa el pH.

La concentración de Cd extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M fue inferior a la concentración máxima de 2 mg·kg<sup>-1</sup> de Cd reportada en suelos ácidos. Esto indicaría que las concentraciones de este elemento no representan un problema en los suelos muestreados. Sin embargo, las bajas concentraciones de Cd y la alta desviación estándar asociada, encontradas por el procedimiento experimental empleado, invitan a revisar más profundamente las mediciones, empleando técnicas más sensibles para medir este elemento.



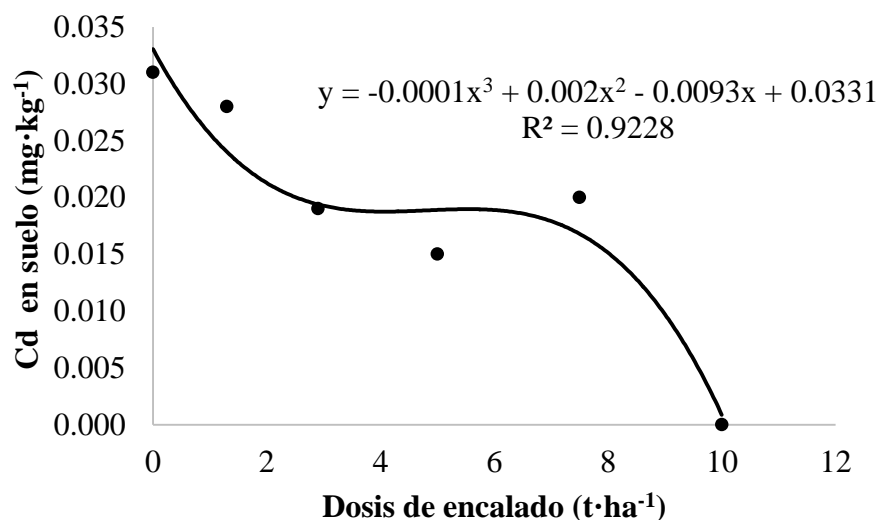


Figura 16. Relación entre la concentración de Cd en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> y la dosis de cal aplicada.

Cuadro 9. Concentraciones medias de Cd en suelo, extracción con CaCl<sub>2</sub>

Dosis (t·ha <sup>-1</sup> )	Promedio	Desviación estándar
	mg·kg <sup>-1</sup>	
Testigos sin cal	0.031 a	0.04
0.6 a 2.0	0.028 a	0.04
2.2 a 3.6	0.019 a	0.03
5	0.015 a	0.02
7.5	0.020 a	0.03
10	0.000 a	0.00
Vegetación nativa	0.021 a	0.03

#### 6.4 Concentraciones de metales pesados en hojas y granos de maíz

La concentración de Fe, Cu, Zn y Al en hojas no fue afectada significativamente por la dosis de encalado; en contraste, la concentración de Mn sí presentó una reducción significativa en hojas, sin estar por debajo del rango de suficiencia. En granos, se encontró una disminución significativa de Fe y Al a partir de la aplicación de cal de 2 t·ha<sup>-1</sup>; Cu y Zn no fueron afectados

significativamente; Cd aumentó significativamente a partir de la aplicación de 5 t de cal, sin que se presente en concentraciones superiores al límite permisible.

### 6.4.1 Fe

Las concentraciones medias de Fe en hojas de maíz se encontraron en el rango de 123.39 a 136.21 mg·kg<sup>-1</sup> en las distintas dosis de encalado, esta variación no evidenció diferencias estadísticas significativas por efecto de la dosis de cal aplicada (Figura 17), a pesar de que en suelo se observó la tendencia a disminuir el Fe al aumentar la dosis de cal aplicada tanto en la extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M como con DTPA. Jurkovic *et al.* (2009) reportan Fe en hojas en un rango que va de 173-142 mg·kg<sup>-1</sup> el cual es superior a la concentración de las hojas de parcelas de La Frailesca. Sin embargo, todas las muestras de las parcelas con distintas dosis de cal aplicada están en el rango de concentración adecuado que comprende de 50 a 300 mg·kg<sup>-1</sup> de acuerdo con Rosen y Eliason (2005).

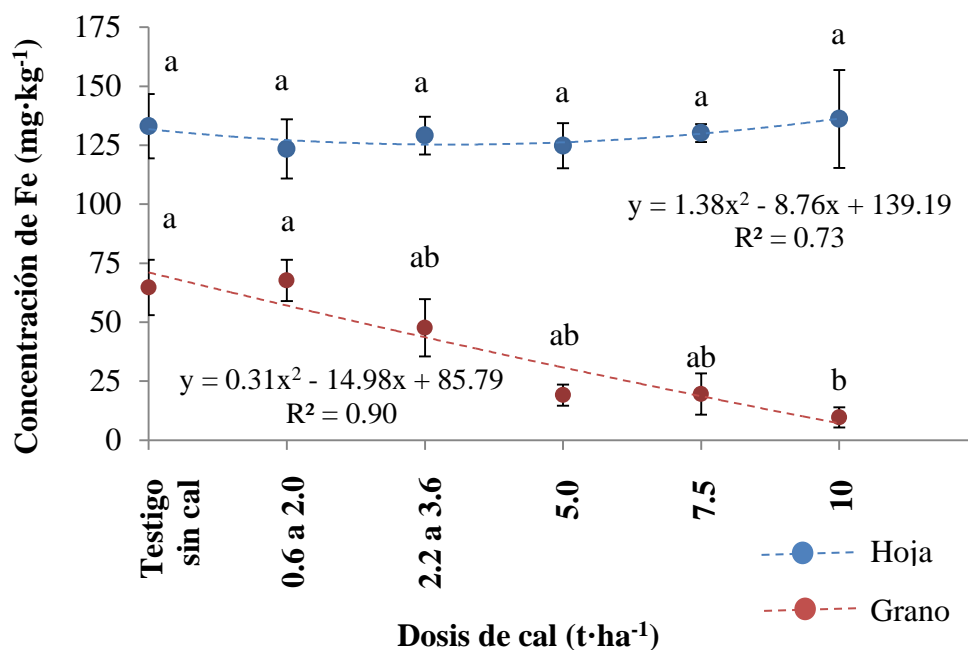


Figura 17. Relación entre concentración de Fe en hojas y granos y dosis de cal aplicada.

En contraste, en los granos de maíz la concentración de Fe disminuyó significativamente a partir de aplicaciones de cal mayores a 2 t·ha<sup>-1</sup> (ver Figura 17). La concentración en los testigos sin cal fue de 64.7 mg·kg<sup>-1</sup> y de 9.7 mg·kg<sup>-1</sup> en los granos de las plantas cultivadas en las parcelas que recibieron 10 t·ha<sup>-1</sup> de cal. Según datos reportados en la literatura, la concentración media de Fe

en granos de maíz es de  $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Fardet *et al.*, 2008). Si tomamos esta referencia como guía, todas las muestras de granos de las parcelas muestreadas a excepción de las que recibieron 10 t de cal, están por encima de la media reportada por este autor. Jurkovic *et al.* (2009) reportan Fe en grano en un rango que varía de  $21\text{-}30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Sin embargo, la recomendación hecha por CYMMYT considera que una concentración adecuada de Fe en granos de maíz para consumo humano, es de  $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Ortiz *et al.*, 2007), la cual únicamente se alcanzó en las parcelas testigo sin cal y con la aplicación máxima de  $2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal; lo anterior indica que dosis mayores de encalado tienen un efecto en la reducción de la calidad nutrimental del grano de maíz.

### 6.4.2 Cu

La concentración promedio de Cu en las hojas de maíz recolectadas en las parcelas encaladas en sus distintas dosis osciló de  $7.4$  a  $10.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y el análisis de varianza no mostró diferencias significativas por efecto de la dosis de cal aplicada (Figura 18). Estos valores son similares a los reportados por Bergmann (1992) quién encontró de  $6\text{-}12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en hojas de maíz. El rango de concentración a adecuada comprende de  $5$  a  $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  según lo indicado Flynn *et al.* (1999), por lo que la concentración de las hojas de maíz cultivado en todas las parcelas analizadas están en el límite inferior de la concentración adecuada.

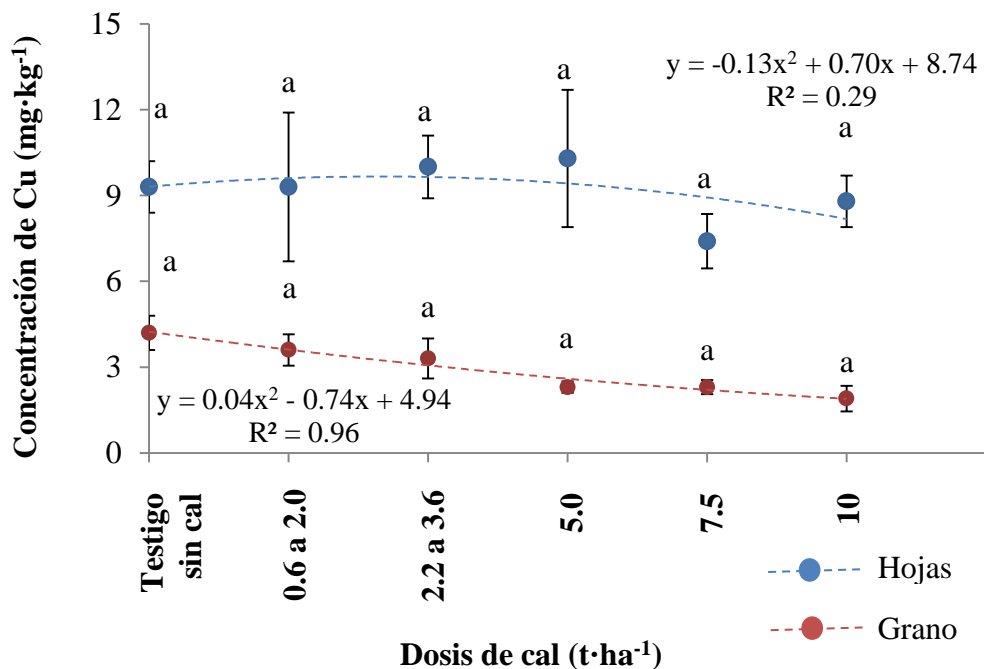


Figura 18. Relación entre concentración de Cu en hojas y granos y dosis de cal aplicada.

En granos, la concentración disminuyó sin que las diferencias fuesen estadísticamente significativas (ver Figura 18). La concentración de Cu más alta se encontró en los granos recolectados en las parcelas testigo sin cal (media de  $4.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), y la concentración disminuyó hasta  $1.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en granos de las plantas cultivadas en parcelas con  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal. Estos resultados son inferiores a los reportados por Ibrahim *et al.* (2015), quienes señalan que la concentración media de Cu en granos de maíz de plantas desarrolladas en suelos ácidos fue de  $5.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . La concentración de Cu en grano de maíz reportada por Kabata y Pendias (2001) es de  $2.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Los sitios testigo y con aplicación de cal menor a  $5 \text{ t}$  presentaron concentraciones de Cu superiores a  $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Estos resultados indican que la acidificación del suelo contribuye a incrementar la disponibilidad de este elemento para las plantas y que hay que observar la nutrición de este elemento en aquellos casos que se apliquen dosis elevadas de cal para neutralizar el exceso de acidez.

#### **6.4.3 Zn**

La concentración más alta de Zn se presentó en hojas recolectadas en las parcelas testigos sin cal, con aplicación de  $0.6$  a  $2.0$  y de  $2.6$  a  $3.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  con  $15.6$ ,  $15.7$  y  $25.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivamente, concentración que se fue haciendo menor a medida que la dosis de cal aplicada aumentaba, sin alcanzar una diferencia estadística significativa entre ellas (Figura 19). De acuerdo con la clasificación de Campbell y Planck (2000), las concentraciones medias de Zn de las hojas recolectadas en las parcelas testigos sin cal y en las que se aplicó de  $0.6$  a  $2.0$  y de  $2.2$  a  $3.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  están muy cercanas al nivel crítico de deficiencia ( $15$  a  $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), las hojas tomadas de parcelas que recibieron cal en dosis de  $5$ ,  $7.5$  y  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  están por debajo del nivel crítico de deficiencia ( $<15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Jurkovic *et al.* (2008) reportaron valores de  $13$ - $28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en hojas de maíz, lo cual es superior a la concentración de las hojas analizadas.

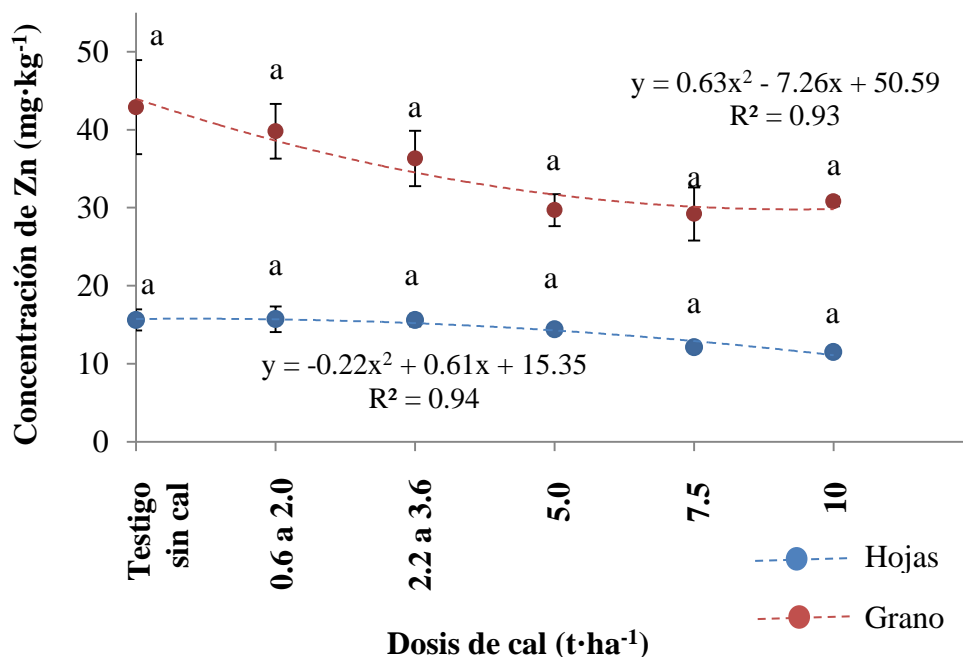


Figura 19. Relación entre concentración de Zn en hojas y granos y dosis de cal aplicada.

La deficiencia de Zn en suelos cultivados es muy común a nivel mundial siendo el maíz el cultivo más susceptible a deficiencias de este elemento (Noulas *et al.*, 2018). La deficiencia de este elemento en plantas cultivadas en suelos ácidos, generalmente se asocia con una baja concentración total de Zn en el suelo (Sadeghzadeh, 2013). Este es el caso de los suelos de La Frailesca, en donde el suelo de las parcelas analizadas presentó concentraciones bajas y moderadamente bajas de Zn, lo que se vio reflejado en una deficiencia de este elemento en hojas de maíz. Las bajas concentraciones de Zn en planta pudieran deberse también a la interacción negativa con P en suelo; Mills y Jones (1991) indicaron que un exceso de P interfiere con la absorción de Zn por parte de la planta, así como en su translocación y metabolismo. Concentraciones bajas de Zn en hojas tiene un impacto en la nutrición del cultivo, las bajas reservas de este elemento son críticas para la calidad y viabilidad de las semillas (Kabata, 2001).

En granos, la concentración más alta de Zn la tuvieron los testigos sin cal con  $42.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , que fue disminuyendo a medida que aumenta la dosis de cal llegando a  $30.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en granos de maíz recolectados en las parcelas que recibieron  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal, pero sin alcanzar una diferencia estadística significativa entre ellas (ver Figura 19). La concentración media de Zn en granos de maíz reportada por Fardet *et al.* (2008) es de  $17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , un valor similar fue reportado por

Jurkovic *et al.* (2008) quienes encontraron valores de 17-24 mg·kg<sup>-1</sup> de Zn en granos de maíz; según estas referencias, todas las muestras de grano aquí analizadas estuvieron por arriba de lo indicado en la literatura. Sin embargo, CIMMYT en su programa HarvestPlus, considera que una concentración adecuada de Zn en granos de maíz debe ser 60 mg·kg<sup>-1</sup> para una población que consume 200 g de maíz al día (Ortiz *et al.*, 2007), con base en estos últimos autores, el 100% de las muestras se encuentran por debajo de la concentración recomendada de Zn.

La concentración de Zn fue mayor en granos que en hojas recolectadas en todas las parcelas con distintas dosis de aplicación de cal, lo cual también fue reportado por Bak *et al.* (2016), quienes señalaron que la distribución de Zn en plantas de maíz ocurre en el gradiente de raquis de la mazorca > tallo > granos > hojas. Según García *et al.* (2018) la removilización del Zn de las hojas es un proceso importante desde la senescencia de las hojas hasta el llenado del grano, que contribuye a la acumulación en las semillas.

#### **6.4.4 Mn**

La concentración de Mn en hojas decayó significativamente al incrementar la dosis de cal aplicada. La concentración media en los testigos sin cal fue de 105.2 mg·kg<sup>-1</sup>, misma que disminuyó hasta 31.0 mg·kg<sup>-1</sup> con la aplicación de 10 t ha<sup>-1</sup> de cal (Figura 20). Estas concentraciones son similares a las encontradas por Bergmann (1992), quien reportó Mn en hojas de maíz en el rango de 35 a 100 mg·kg<sup>-1</sup>. La disminución de Mn en las hojas de maíz al aplicar dosis mayores de cal para elevar el pH ha sido reportada por Jurkovic *et al.* (2008) y por Shuman y McCracken (1999).

Todas las muestras de hojas sin importar la dosis de cal aplicada al suelo, se encontraron en concentración adecuada que va de 30 a 200 mg·kg<sup>-1</sup> de acuerdo con Rosen y Eliason (2005). La concentración media en hojas de las parcelas que recibieron 10 t·ha<sup>-1</sup> de cal dolomítica está en el límite inferior de concentración media, lo que indica que es posible que a dosis mayores el Mn disponible en suelo pudiera disminuir a tal grado de provocar un déficit en planta.

La concentración media de Mn en granos de las plantas desarrolladas en los testigos sin cal fue de 23.1 mg·kg<sup>-1</sup> y en los granos de las parcelas con 10 t·ha<sup>-1</sup> de cal de 11.4 mg·kg<sup>-1</sup>, sin que dicha disminución fuese significativa (ver Figura 20). Por lo anterior, todas las muestras sin importar

la dosis de cal aplicada al suelo se encuentran por arriba de lo indicado por Fardet *et al.*, (2008) quienes reportan una media de  $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de Mn en granos de maíz, mientras que Jurkovic *et al.* (2008) encontraron concentraciones de  $8\text{-}17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en este órgano, lo que es similar a la concentración en granos de maíz de platas cultivadas en suelos de La Frailesca.

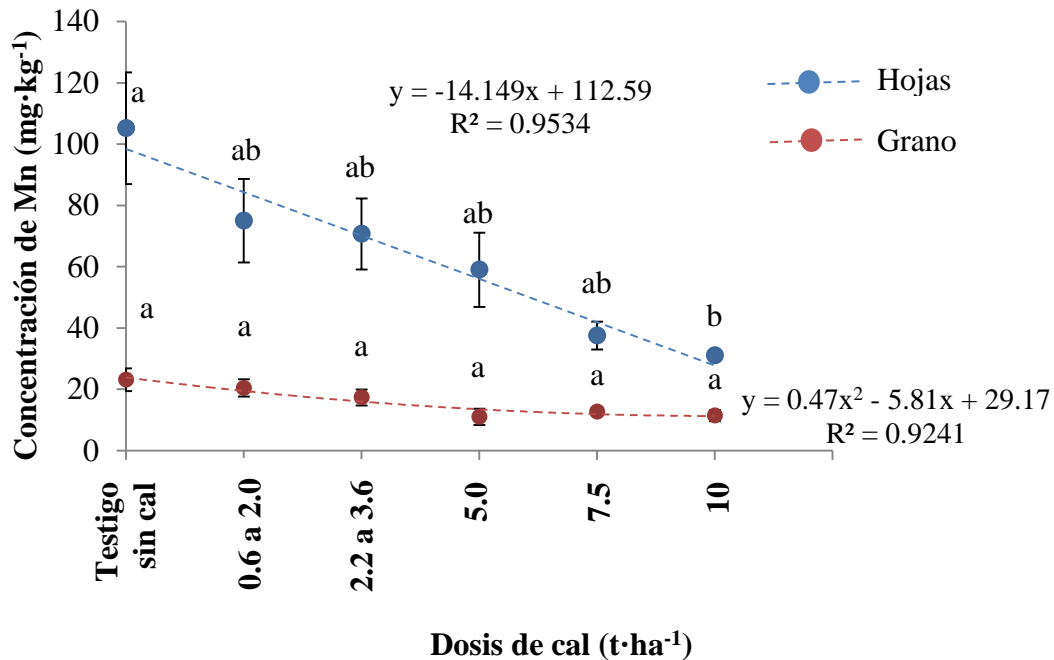


Figura 20. Relación entre concentración de Mn en hojas y granos y dosis de cal aplicada.

#### 6.4.5 Al

La concentración media de Al en las hojas de las plantas que crecieron en las parcelas testigo sin aplicación de cal fue de  $142.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  disminuyendo a medida que la dosis de cal aumentó, alcanzando a un mínimo de  $51.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con la aplicación de  $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal (Figura 21). La concentración de Al en hojas disminuyó significativamente con la aplicación de más de  $5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal (Cuadro 10). El Al en las muestras de hojas de maíz recolectadas en La Frailesca fueron inferiores a los reportados por Khan *et al.* (2012), quienes señalaron que una concentración entre  $308$  a  $351 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de este elemento en las partes no comestibles de maíz es alta. Reuter y Robinson (1988) reportaron que una concentración adecuada de Al en hojas de maíz es menor a  $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , llegando a ser tóxico cuando excede los  $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; al superar estos valores, la calidad de los alimentos y la salud humana pudiera ser afectada si las partes no comestibles como las hojas son usadas para alimento animal (Khan *et al.*, 2012).

Lidon *et al.* (1999) reportan que concentraciones entre 9 y 80 mg·kg<sup>-1</sup> de aluminio en hojas de maíz producen una reducción significativa en el transporte de electrones fotosintéticos asociados al fotosistema I. Por lo anterior, pudiera ser que la actividad fotosintética de las plantas de maíz de La Frailesca sea afectada por la presencia de Al en hojas.

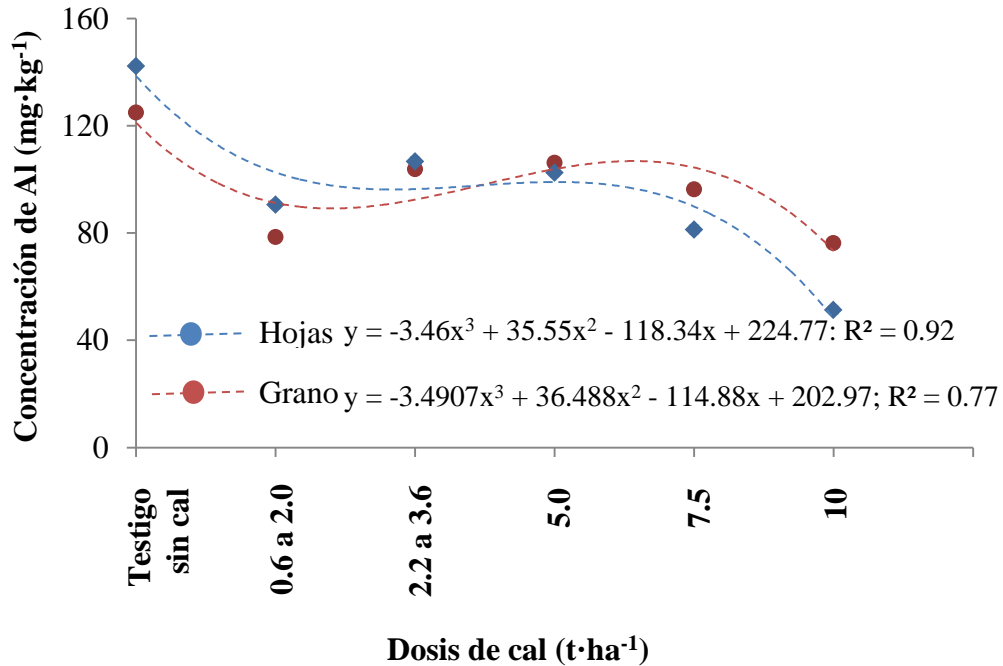


Figura 21. Relación entre concentración de Al en hojas y granos y dosis de cal aplicada.

La concentración media de Al en granos de las plantas desarrolladas en los testigos sin cal fue de 125 mg·kg<sup>-1</sup> y en los granos de las parcelas que recibieron 10 t·ha<sup>-1</sup> de cal fue de 76.3 mg·kg<sup>-1</sup>, sin que dicha disminución fuese significativa (ver Cuadro 10).



Cuadro 10. Concentraciones medias de Al en hojas y granos de maíz de La Frailesca.

Dosis de cal aplicada (t·ha <sup>-1</sup> )	Hojas	Granos
	mg·kg <sup>-1</sup>	
Testigos sin cal	142.3 ± 80.9 a	125.0 ± 50.00 a
0.6 a 2.0	90.6 ± 55.1 a	78.6 ± 42.8 a
2.2 a 3.6	106.7 ± 74.2 a	103.9 ± 33.00 a
5	102.5 ± 74.3 a	106.3 ± 40.7 a
7.5	81.3 ± 93.7 ab	96.3 ± 50.0 a
10	51.3 ± 54.8 b	76.3 ± 51.3 a

<sup>λ</sup> Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas resultados de la prueba Tukey al 5%.

#### 6.4.6 Cd

La concentración de Cd en hojas de plantas de maíz cultivadas en suelos testigo sin aplicación de cal fue de 0.4 mg·kg<sup>-1</sup>, en hojas de las plantas cultivadas en las parcelas que recibieron dosis mayores a 5 t·ha<sup>-1</sup> no se detectó la presencia de este elemento; el análisis estadístico no indica diferencias significativas (Cuadro 11). Mills y Jones (1991) reportaron que la concentración máxima permisible de Cd en hojas de maíz es de 1-3 mg·kg<sup>-1</sup>, por lo que en ninguna de las muestras analizadas supera ese límite.

La concentración de Cd en granos de las plantas que crecieron en parcelas que recibieron dosis mayores a 5 t de cal fue entre 0.5 y 0.7 mg·kg<sup>-1</sup>, lo cual no supera el límite máximo permisible según lo indicado por la FAO/WHO (2001) que es de 1 mg·kg<sup>-1</sup>. La tendencia de los resultados indica que si la dosis de cal aumenta es posible que la concentración de Cd en granos incremente y pudiera superar los límites permisibles.

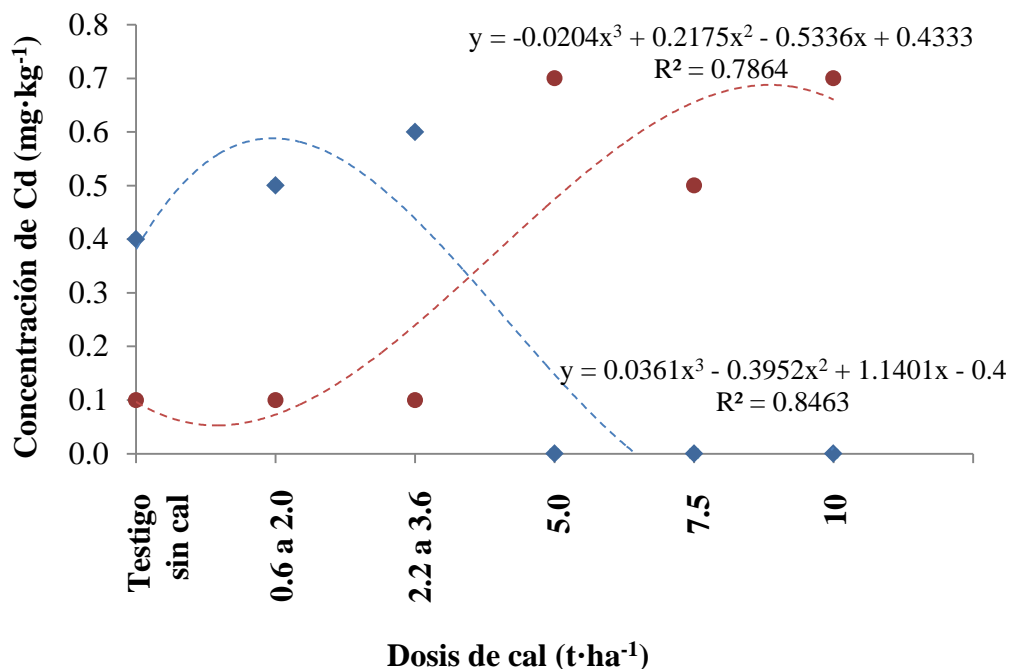


Figura 22. Relación entre concentración de Cd en hojas y granos y dosis de cal aplicada.

Cuadro 11. Concentraciones medias de Cd en hojas y granos de maíz de La Frailesca.

Dosis de cal aplicada (t·ha <sup>-1</sup> )	Hojas	Granos
	<sup>λ</sup> mg·kg <sup>-1</sup>	
Testigos sin cal	0.4 ± 0.6 a	0.1 ± 0.2 b
0.6 a 2.0	0.5 ± 0.5 a	0.1 ± 0.2 b
2.2 a 3.6	0.6 ± 0.9 a	0.1 ± 0.2 b
5	0.0 ± 0.0 a	0.7 ± 0.3 a
7.5	0.0 ± 0.0 a	0.5 ± 0.1 ab
10	0.0 ± 0.0 a	0.7 ± 0.3 a

<sup>λ</sup> Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas resultados de la prueba Tukey al 5%.

## 6.5 Relación de la concentración de metales extraíbles en el suelo con los metales en la planta.

Al hacer un análisis de la dispersión de los datos, se detectaron dos grupos de parcelas cuyas características están indicadas en el Cuadro 12. Solo las parcelas encaladas entre 2015 y 2017 tuvieron ajustes aceptables en las ecuaciones de regresión entre concentración de Fe y Mn en hojas y concentración de los mismos elementos en el suelo. La heterogeneidad de los elementos analizados en las muestras de suelo, no permite obtener buenos ajustes que nos sirvan para relacionarlas con su concentración en planta ni considerar estos ajustes como ecuaciones de predicción.

Cuadro 12. Agrupación de parcelas muestreadas con base a las características de encalado.

<b>Grupo</b>	<b>Año de encalado</b>	<b>PRNT<sup>¥</sup></b>	<b>Rango de dosis de cal aplicada (t·ha<sup>-1</sup>)</b>
1	2013 y 2014	45	0.63 a 10
2	2015 y 2017	62 y 84	0.75 a 3

<sup>¥</sup> Poder relativo de neutralización total de la cal aplicada.

Después de hacer un análisis de regresión lineal simple, se encontró que en ninguno de los metales analizados (Fe, Cu, Zn, Mn, Al y Cd) hay una relación directa entre la concentración en suelo y la concentración de los mismos en hojas y granos de maíz. Sin embargo, mediante regresiones múltiples considerando también la concentración de  $Al_{int}$  y el pH del suelo como variables independientes se obtuvieron mejores ajustes.

Las mejores ecuaciones de regresión múltiple se obtuvieron para Fe (Cuadro 13) y Mn (Cuadro 14) en suelo y su relación con la concentración de los mismos elementos en hojas, en parcelas encaladas entre 2015 y 2017. Los valores de  $R^2$  para Fe fueron de 0.71 para la extracción con  $CaCl_2$  y de 0.65 con DTPA; para Mn las  $R^2$  de las ecuaciones de ajuste fueron de 0.62 en la extracción con  $CaCl_2$  y de 0.72 con DTPA. Resultados similares fueron reportados por Behera y Shukla (2014) quienes indicaron que la solución extractante DTPA es adecuada para la extracción de Fe y Mn en suelos ácidos.

La correlación entre concentración de Cu en suelo y hojas y granos de maíz (Cuadro 15), no fue buena, el valor de  $R^2$  mayor fue apenas de 0.32 y correspondió a la relación  $Fe_{DTPA}-Fe_{hojas}$  en parcelas encaladas entre 2015 y 2017. Los bajos coeficientes de determinación pueden deberse a que la fracción extraída por las soluciones utilizadas no corresponde a lo que la planta está absorbiendo. Joshi *et al.* (2015), indican que la fracción de Cu que se correlaciona mejor con lo absorbido por la planta en suelos ácidos corresponde a la soluble en agua y unida a la materia orgánica, siendo los extractantes DTPA (pH 5.3) y Melich 3 (pH 2.0) los que presentan los mejores resultados.

Los valores de  $R^2$  para la regresión múltiple para Zn (Cuadro 16) también son bajos para ambas soluciones extractantes, y fueron algo mayores (de 0.20 a 0.33) en las parcelas encaladas entre 2013 y 2014 en comparación con las encaladas entre 2015 y 2017 ( $R^2$  entre 0.13 a 0.22). Joshi *et al.* (2014) encontraron que la solución extractante que mejor se correlaciona con la concentración de Zn en hojas de maíz en suelos ácidos fue DTPA (pH 5.3).

Las ecuaciones de ajuste para Al se presentan en el Cuadro 17, donde los valores de  $R^2$  fueron menores a 0.24 en hojas y en granos sin importar el año de encalado. En el Cuadro 18 se presentan las ecuaciones de regresión múltiple para la relación Cd en suelo-Cd en hojas y granos de maíz, con valores de  $R^2$  menores a 0.21 tanto para hojas y granos en los diferentes años de encalado. Estos resultados indican que la solución extractante  $CaCl_2$  0.0.1 M no es buen indicadora para medir la disponibilidad de este elemento.

Cuadro 13. Regresiones múltiples para la relación entre Fe en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y DTPA y Fe total en hojas y granos de maíz.

Elemento	Año	Órgano	Solución extractante	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>
Fe	2013-2014	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Fe_{hojas} = 76.3 - 5.78 Fe_{CaCl_2} + 19.0 Al_{int} + 10.9 pH$	0.17
			DTPA	$Fe_{hojas} = 42.6 - 0.023 Fe_{DTPA} + 22.7 Al_{int} + 16.2 pH$	0.12
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Fe_{granos} = 135.2 + 15.16 Fe_{CaCl_2} - 12.5 Al_{int} - 21.3 pH$	0.36
			DTPA	$Fe_{granos} = 108.3 + 0.363 Fe_{DTPA} - 14.0 Al_{int} - 17.8 pH$	0.39
	2015-2017	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Fe_{hojas} = 238 - 17.77 Fe_{CaCl_2} + 48.7 Al_{int} - 25.2 pH$	0.71
			DTPA	$Fe_{hojas} = 177 + 0.205 Fe_{DTPA} + 26.3 Al_{int} - 21.5 pH$	0.65
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Fe_{granos} = 154 + 13.21 Fe_{CaCl_2} + 4.0 Al_{int} - 24.5 pH$	0.46
			DTPA	$Fe_{granos} = 224 - 0.103 Fe_{DTPA} + 14.5 Al_{int} - 33.6 pH$	0.35

Cuadro 14. Regresiones múltiples para la relación entre Mn en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y DTPA y Mn total en hojas y granos de maíz.

Elemento	Año	Órgano	Solución extractante	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>
Mn	2013-2014	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Mn_{hojas} = 294 + 0.74 Mn_{CaCl_2} - 11.2 Al_{int} - 45.9 \text{ pH}$	0.39
			DTPA	$Mn_{hojas} = 303 + 0.525 Mn_{DTPA} - 12.3 Al_{int} - 47.48 \text{ pH}$	0.39
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Mn_{granos} = 110.4 - 0.778 Mn_{CaCl_2} - 9.47 Al_{int} - 16.88 \text{ pH}$	0.46
			DTPA	$Mn_{granos} = 99.3 - 0.536 Mn_{DTPA} - 8.13 Al_{int} - 14.76 \text{ pH}$	0.45
	2015-2017	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Mn_{hojas} = 107 + 4.21 Mn_{CaCl_2} + 9.4 Al_{int} - 15.9 \text{ pH}$	0.62
			DTPA	$Mn_{hojas} = 279 + 4.30 Mn_{DTPA} - 12.8 Al_{int} - 56.0 \text{ pH}$	0.72
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Mn_{granos} = 105.4 + 0.999 Mn_{CaCl_2} - 13.24 Al_{int} - 19.05 \text{ pH}$	0.50
			DTPA	$Mn_{granos} = 132.7 + 0.889 Mn_{DTPA} - 16.23 Al_{int} - 25.41 \text{ pH}$	0.49

Cuadro 15. Regresiones múltiples para la relación entre Cu en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y DTPA y Cu total en hojas y granos de maíz.

Elemento	Año	Órgano	Solución extractante	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>
Cu	2013-2014	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Cu_{hojas} = 12.2 - 11.5 Cu_{CaCl_2} + 0.16 Al_{int} - 0.52 pH$	0.06
			DTPA	$Cu_{hojas} = 10.62 + 0.18 Cu_{DTPA} - 0.04 Al_{int} - 0.34 pH$	0.007
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Cu_{granos} = 9.26 + 3.58 Cu_{CaCl_2} - 0.310 Al_{int} - 1.27 pH$	0.30
			DTPA	$Cu_{granos} = 9.72 + 0.89 Cu_{DTPA} - 0.284 Al_{int} - 1.40 pH$	0.28
	2015-2017	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Cu_{hojas} = -16.5 - 22.6 Cu_{CaCl_2} + 46.32 Al_{int} + 5.09 pH$	0.19
			DTPA	$Cu_{hojas} = 27.6 + 18.7 Cu_{DTPA} - 2.94 Al_{int} - 5.63 pH$	0.32
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Cu_{granos} = 5.6 + 22.7 Cu_{CaCl_2} - 1.12 Al_{int} - 0.26 pH$	0.22
			DTPA	$Cu_{granos} = 24.9 + 9.14 Fe_{DTPA} - 3.86 Al_{int} - 4.94 pH$	0.12

Cuadro 16. Regresiones múltiples para la relación entre Zn en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y DTPA y Zn total en hojas y granos de maíz.

Elemento	Año	Órgano	Solución extractante	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>
Zn	2013-2014	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Zn_{hojas} = 38.58 - 4.72 Zn_{CaCl_2} - 3.09 Al_{int} - 4.59 pH$	0.33
			DTPA	$Zn_{hojas} = 30.03 + 1.47 Zn_{DTPA} - 2.05 Al_{int} - 3.23 pH$	0.33
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Zn_{granos} = 20.8 + 30.4 Zn_{CaCl_2} + 6.73 Al_{int} + 1.29 pH$	0.30
			DTPA	$Zn_{granos} = 64.6 + 4.17 Zn_{DTPA} + 0.97 Al_{int} - 6.36 pH$	0.20
	2015-2017	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Zn_{hojas} = 25.0 + 0.26 Zn_{CaCl_2} + 1.38 Al_{int} - 1.99 pH$	0.22
			DTPA	$Zn_{hojas} = 25.7 + 0.26 Zn_{DTPA} + 1.26 Al_{int} - 2.17 pH$	0.22
		Granos	CaCl <sub>2</sub>	$Zn_{granos} = -17.0 + 16.2 Zn_{CaCl_2} + 5.2 Al_{int} + 10.6 pH$	0.15
			DTPA	$Zn_{granos} = 21.3 + 6.91 Zn_{DTPA} + 0.9 Al_{int} + 2.9 pH$	0.13



Cuadro 17. Regresiones múltiples para la relación entre Al intercambiable en suelo extraído con KCl 1 N y Al total en hojas y granos de maíz.

. Elemento	Año	Órgano	Solución extractante	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>
Al	2013-2014	Hojas	KCl	$Al_{\text{hojas}} = -594 + 144.7 Al_{\text{int}} + 137.1 \text{ pH}$	0.24
		Granos		$Al_{\text{granos}} = 162 - 24.8 Al_{\text{int}} + 7.20 \text{ pH}$	0.06
	2015-2017	Hojas	KCl	$Al_{\text{hojas}} = 1025 - 108.6 Al_{\text{int}} - 181 \text{ pH}$	0.15
		Granos		$Al_{\text{granos}} = 149 + 3.0 Al_{\text{int}} + 0.7 \text{ pH}$	0.008

Cuadro 18. Regresiones múltiples para la relación entre Cd en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M y Cd total en hojas y granos de maíz.

Elemento	Año	Órgano	Solución extractante	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>
Cd	2013-2014	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Cd_{\text{hojas}} = 0.69 - 0.67 Cd_{\text{CaCl}_2} + 0.0096 Al_{\text{int}} - 0.103 \text{ pH}$	0.03
		Granos		$Cd_{\text{granos}} = -1.86 + 1.94 Cd_{\text{CaCl}_2} + 0.146 Al_{\text{int}} + 0.433 \text{ pH}$	0.15
	2015-2017	Hojas	CaCl <sub>2</sub>	$Cd_{\text{hojas}} = -3.46 - 5.72 Cd_{\text{CaCl}_2} + 0.162 Al_{\text{int}} + 0.93 \text{ pH}$	0.21
		Granos		$Cd_{\text{granos}} = -0.81 - 1.47 Cd_{\text{CaCl}_2} + 0.074 Al_{\text{int}} + 0.206 \text{ pH}$	0.008

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

El pH de los suelos agrícolas con o sin encalar, es menor al límite reportado para maíz. El encalado disminuye la concentración de Al intercambiable, de manera que este elemento no es una limitante para el desarrollo del maíz en suelos agrícolas con dosis superiores a  $5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal.

Las actividades agrícolas han acidificado los suelos de La Frailesca y como consecuencia se ha incrementado la extractabilidad de Fe y Mn y disminuido la de Cu y Zn. La concentración de Fe y Mn en suelos agrícolas de La Frailesca es alta sin llegar a nivel de toxicidad, Cu y Zn en suelo está en el rango de deficiencia. El Cd en suelo no supera los límites reportados como tóxicos.

La aplicación de cal dolomítica al suelo incrementó el pH del mismo, lo que llevó a una disminución de los metales Fe, Cu, Zn y Mn disponibles para las plantas. A pesar de esta disminución, el Fe se mantuvo en concentraciones altas. La aplicación al suelo de dosis mayores a  $5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  de cal conduce a la deficiencia de Cu, Zn y Mn.

La alta concentración de Fe y Mn en suelos sin encalar no afecta la concentración adecuada en planta. La deficiencia de Zn y Cu en suelos se refleja en una deficiencia las hojas y granos de maíz. Cd no supera los límites permisibles.

El tiempo transcurrido entre el encalado y la toma de las muestras influye negativamente en la relación entre metales en suelo extraídos con  $\text{CaCl}_2$  0.01 M y DTPA (pH 7.3) y metales en hojas y granos de maíz. Las soluciones extractoras  $\text{CaCl}_2$  0.01 M y DTPA (pH 7.3) son buenas indicadoras para medir la disponibilidad de Fe y Mn en suelos ácidos y con antigüedad de encalado menor a 4 años.

## CAPÍTULO 7. LITERATURA CITADA

Abreu C.H., T. Muraoka and A.F. Lacorante. 2013. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian Soils. *Scientia Agricola* 60: 337-343.

Adams F. 1984. Crop response to lime in the Southern United States. *In: Soil Acidity and Liming, Agronomy Monograph 12. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America (Ed.)* pp: 211-265.

Aguirre G, A. 2001. Química de los Suelos Ácidos Templados y Tropicales. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. 272 p.

Álvarez-Sánchez M.E., J. Velázquez-Mendoza, R. Maldonado-Torres, G. Almaguer-Vargas y A.L Solano-Agama. 2010. Diagnóstico de la fertilidad y requerimiento de cal de suelos cultivados con agave azul (*Agave Tequilana Weber*). *Terra Latinoamericana* 28: 287-293.

Araújo D.C., E.E. Chavez M., R.S. de Melo P. and P.V. Valeriano L. 2007. Effect of liming on the plant availability and distribution of zinc and copper among soil fractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 545–560.

Bak K., R. Gaj and A. Budka. 2016. Distribution of zinc in maize fertilized with different doses of phosphorus and potassium. *Journal of Elementology* 21: 989-999.

Bakircioglu D., Y. Bakircioglu, and H. Íbar. 2011. Comparison of extraction procedures for assessing soil metal bioavailability of wheat grains. *Clean – Soil, Air, Water* 39: 728–734.

Behera S.K. and A.K. Shukla. 2014. Total and extractable manganese and iron in some cultivated acid soils of India: status, distribution and relationship with some soil properties. *Pedosphere* 24 (2): 196–208.

Bergman W. 1992. Nutritional Disorders of plants – development, visual, and analytical diagnosis. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, New York.

Bernier, R. y M. Alfaro. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA 151. Osorno, Chile. pp: 28-35.

- Bian M., M. Zhou, D. Sun and C. Li. 2013. Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. *The Crop Journal* 1: 91-104.
- Bloom P.R., U.L. Skylberg and M.E. Sumner. 2005. Soil Acidity. *In: Chemical Processes in Soils*. W.A Dick (Ed). Soil Science Society of America Book Series. Madison, Wisconsin, USA. pp: 411-459.
- Bolan N.S., D.C. Adriano, and D. Curtin. 2003. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy* 78: 215-272.
- Buni A. 2014. Effects of Liming Acidic Soils on Improving Soil Properties and Yield of Haricot Bean. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology* 5. 4 p.
- Campbell C.R. and C.O. Planck. 2000. Reference Sufficiency Ranges — Field Crops. Corn. *In: Reference Sufficiency Ranges for Plant Analysis in the Southern Region of the United States*. C.R. Campbell (Ed.). Southern Cooperative Series Bulletin #394. North Carolina Department of Agriculture and Consumer Services Agronomic Division pp: 11-14.
- Castro H. y O. Munevar. 2013. Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 16: 409-416.
- Castellanos J.Z., J.X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2ª ed. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. México.
- Cataldo D.A. y Wildung R.E., 1978. Soil and Plant Factors Influencing the Accumulation of Heavy Metals by Plants. *Environmental Health Perspectives* 27: 149-159.
- Chen H.M., C.R. Zheng, C. Tu, and Z.G. Shen. 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere* 41: 229-234.
- Chien S.H., R.L. Kallenbach, and M.M Gearhart. 2010. Liming Requirement for Nitrogen Fertilizer-Induced Soil Acidity: A New Examination of AOAC Guidelines. *Better Crops* 94: 8-9.

Conyers M.K. 2006. Liming and lime materials. *In: Encyclopedia of Soil Science*, Vol 2. 2nd ed. R. Lal (Ed). Taylor & Francis Group. pp: 1034-1036.

Cyraniak E. y B. Draszawka-Bolzan. 2014. Heavy metals in circulation biogeochemical. *World Scientific News* 6: 30-36.

EPA. 2004. Acid Rain Program 2004 Progress Report. U.S. Environmental Protection Agency. pp: 2-13.

EPA. 2007. Framework for Metal Risk Assessment. U.S. Environmental Protection Agency. Office of the Science Advisor. Risk Assessment Forum. Washington D.C. pp: 3-21.

Escalante-Rebolledo A., G. Pérez-López, C. Hidalgo-Moreno, J. López-Collado, J. Campo-Alves, E. Valtierra-Pacheco y J. Etchevers-Barra. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.

Esnaola M.V., A. Bermond and E. Millan. 2000. Optimization of DTPA and calcium chloride extractants for assessing extractable metal fraction in polluted soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31: 13-29.

Espinosa J. y Molina E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. International Plant Nutrition Institute (IPNI). pp: 1-9.

Fageria N.K. 2001. Adequate and toxic levels of copper and manganese in upland rice, common bean, corn, soybean, and wheat grown on an oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32: 1659–1676.

FAO. 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para la clasificación, correlación y comunicación internacional. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 117 p.

FAO. 2016. Estado Mundial del Recurso Suelo. Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia. 79 p.

FAO/WHO. 2012. Food Standards Programme Report of the 33rd Session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants Hague, The Netherlands.

Fardet A., E. Rock and C. Rémésy. 2008. Is the in vitro antioxidant potential of whole-grain cereals and cereal products well reflected in vivo? *Journal of Cereal Science* 48: 258-276.

Filgueiras A.V., I. Lavilla and C. Bendicho. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *Journal of Environmental Monitoring* 4: 823–857.

Flynn R., S. Ball and R. Baker. 1999. Sampling for Plant Tissue Analysis. Guide A-123. Cooperative Extension Service College of Agriculture and Home Economics. New Mexico State University. 8 p.

Galán-Huertos E. y A. Romero-Baena. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. *MACLA. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía* 10: 48-60.

García-Oliveira A., S. Chander, R. Ortiz, A. Mnekir and M. Gedil. 2018. Genetic Basis and Breeding Perspectives of Grain Iron and Zinc Enrichment in Cereals. *Frontier in Plant Science* 9: 1-13.

Ghimire R., S. Machado and P. Bista. 2017. Soil pH, Soil Organic Matter, and Crop Yields in Winter Wheat–Summer Fallow Systems. *Agronomy Journal* 109: 706-717.

Grundon N.J., A. D. Robson, M.J. Lambert and K. Snowball. 1999. Nutrient Deficiency and Toxicity Symptoms. *In: Soil Analysis: An Interpretation Manual*. Sparrow L. and Reuter D. (Ed.) CSIRO Publishing. pp 37-125.

Gupta N., S.S. Gaurav and A. Kumar. 2013. A. Molecular Basis of Aluminium Toxicity in Plants: A review. *American Journal of Plant Science* 4: 21–37.

Hooda S.P. 2010. Basic Principles, Processes, Sampling and Analytical Aspects. *In: Trace Elements in Soils*. P.S Hooda (Ed.). pp: 3-9.

Houba V.J.G., E.J. Temminghoff, G.A. Gaikhorst, and W. van Vark. 2000. Soil Analysis Procedures Using 0.01 M Calcium Chloride as Extraction Reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31: 1299-1396.

Ibrahim K.N., Z.R. Yet, A.M. Som, N. Razali, N.A. Mohamed-Rahaizah, E.N. Othman, N.A. Burok, Y.M. Yunos, R. Othman, T. F. Tengku-Yahya. 2015. Heavy Metal Concentration (Pb, Cu, Fe, Zn, Ni) in Plant Parts of *Zea Mays* L. Cultivated in Agricultural Area Near Alor Gajah, Melaka, Malaysia. American Journal of Environmental Engineering 5: 8-12

INEGI. 2007. Conjunto Nacional de Datos Vectorial Edafológico, escala 1: 250 000. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

INEGI. 2015. Datos vectoriales de la carta climática escala 1: 1,000,000. Biblioteca digital de mapas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

INEGI, 2018. Marco Geoestadístico Nacional. Biblioteca digital de mapas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Jaskulska I. D. Jaskulski and M. Kobierski. 2014. Effect of liming on the change of some agrochemical soil properties in a long-term fertilization experiment. Plant Soil Environ 60: 146-150.

Jia W., B. Wang, C. Wang and H. Sun. 2017. Tourmaline and biochar for the remediation of acid soil polluted with heavy metals. Journal of Environmental Chemical Engineering 5: 2107-2114.

Jurkovic Z., M. Josipovic, G. Drezner, V. Jurkovic and D. Banaj. 2008. Residual effects of liming with carbocalk on Maize and wheat status. Cereal Research Communications 767-770.

Joshi D., P.C. Srivastava., R. Dwivedi and S.P. Pachauri. 2014. Chemical speciation of Zn in acidic soils: suitable soil extractant for assessing Zn availability to maize (*Zea mays* L.). Chemical Speciation & Bioavailability 26 (3): 148-157.

Joshi D., P.C. Srivastava., R. Dwivedi., S.P. Pachauri and A.K. Shukla. 2015. Chemical speciation and suitability of soil extractants for assessing Cu availability to maize (*Zea mays* L.) in acidic soils. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 15: 1024-1034.

Kabata P.A and H. Pendias. 2000. Trace elements in soils and plants. 3<sup>rd</sup> ed. CRC Press LLC. 400 p.

Kabata P.A. 2004. Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma* 122: 143-149.

Karalić K., Z. Lončarić, B. Popović, V. Zebec and D. Kerobek. 2013. Liming effect on soil heavy metals availability. *Poljoprivreda* 19: 59-64.

Khan S., T.G. Kazi, N.F. Kolachi, H.I. Afridi, J.A. Baig, A.Q. Shah, S. Kumar and F. Shah. 2012. Translocation of Aluminum to Grain Crops Grown in Different Agricultural Systems. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry* 13: 63-69.

Kunhikrishnan A., R. Thangarajan, N. Bolan, Y. Xu, S. Mandal, D.B. Gleeson, B. Seshadri, M. Zaman, L. Barton, C. Tang, J. Luo, R. Dalal, W. Ding, M.B. Kirkham and R. Naidu. 2016. Functional Relationships of Soil Acidification, Liming and Greenhouse Gas Flux. *In: Advances in Agronomy*, D. L. Sparks (Ed). 139: 1-71.

Lalljee B. and S. Facknath, 2001. Effect of lime on nutrient content of soils, yield and nutrient content of potato and infestation by leafminers. Food and Agricultural Research Council, Réduit, Mauritius. Conference paper. Conference AMAS. 139-147. [https://www.researchgate.net/publication/235924011\\_Effect\\_of\\_lime\\_on\\_nutrient\\_content\\_of\\_soils\\_yield\\_and\\_nutrient\\_content\\_of\\_potato\\_and\\_infestation\\_by\\_leafminers](https://www.researchgate.net/publication/235924011_Effect_of_lime_on_nutrient_content_of_soils_yield_and_nutrient_content_of_potato_and_infestation_by_leafminers). (Consultado mayo 2019).

Li G., M. Conyers, K. Heylar, C. Lisle and G. Poile. 2019. Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. *Geoderma* 338: 236-249.

Lidon F.C., M.G. Barreiro, J.C. Ramalho and J.A. Lauriano. 1999. Effects of aluminum toxicity on nutrient accumulation in maize shoots: implications on photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition* 22: 297-416.

Lindsay W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal Abstract* 42: 421-428.



- Lollato R., T. Ochsner, D. Arnall, T. Griffin and J. Edwards. 2018. From Field Experiments to Regional Forecasts: Upscaling Wheat Grain and Forage Yield Response to Acidic Soils. *Agronomy Journal* 11: 287-302.
- Lungu O. and R. Dynoodt. 2008. Acidification from Long-term Use of Urea and its Effect on Selected Soil Properties. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 8: 63-67.
- Mapiemfu-Lamaré D., S. Ndindeng, A. Ngome, C. Thé, E. Tsoata, C. Zonkeng, M. Mfopou, L. Bihchang and F. Etame. 2012. Early Criterion to Screen Maize Varieties for Their Tolerance to Aluminium Toxic Soil. *International Journal of Agriculture and Forestry* 2: 161-165.
- Maqbool M.A. and A. Beshir. 2019. Zinc biofortification of maize (*Zea mays* L.): Status and Challenges. *Plant Breeding* 138: 1-28.
- Mattiolo L., M. Kirsst, F.R da Silva, R.A Jorge and M. Menossi. 2010. Transcriptional profile of maize roots under acid soil growth. *BMC Plant Biology* 10. 14 p.
- McBride M.B. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press. New York. pp. 169-203.
- Mendoza-Pérez S., C.E Aguilar J., J. Galdámez G. y A. Gutiérrez M. 2008. Alternativas para la producción de maíz en La Frailesca, Chiapas, México, Universidad Autónoma de Chiapas. 8 p.
- Mertens J. and E. Smolders. 2013. Zinc. *In: Heavy metals in soils*. Slaterry B.J. (Ed.). Springer. Pp 465-493. Londres, Inglaterra.
- Mills H. and J. Jones. 1991. *Plan Analysis Handbook II. A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide*. MicroMacro Publishing, Inc. pp 51-54.
- Moreira S.G., L.I. Prochnow, J. de Castro K., V. Pauletti and L. Martin-Neto. 2016. Chemical forms in soil and availability of manganese and zinc to soybean in soil under different tillage systems. *Soil and Tillage Research* 163:41-53.
- Navarro-García G. y S. Navarro G. 2003. *Química Agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida*. 2a ed. Ediciones Mundi-Prensa. pp 119-121.

Nduwumuremyi A. 2013. Soil Acidification and Lime Quality: Sources of Soil Acidity, Effects on Plant Nutrients, Efficiency of Lime and Liming Requirements. *Research and Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences* 2: 26-34.

Nieuwkoop M., W. López B., A. Zamarripa M. R. de la Piedra C., F. Cruz C., R. Camas G. y J. López M. 1994. La adopción de tecnologías de labranza de conservación en La Fraylesca, Chiapas. Centro Nacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). 93 p.

Noulas C., M. Tzioouvalekas and T. Karyotis. 2018. Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 49: 252-260.

Núñez B.V. 2017. Agroestabilización de residuos mineros y suelos contaminados con alto contenido de metales pesados. Tesis de Maestría. Posgrado en Edafología, Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Olaniran A., A. Balgobind and B. Pillay. Bioavailability of Heavy Metals in Soil: Impact on Microbial Biodegradation of Organic Compounds and Possible Improvement Strategies. *International Journal of Molecular Sciences* 14: 10197-10228.

Ortiz-Monasterio J.I., N. Palacios-Rojas, E. Meng, K. Pixley, R. Trethowan and R.J. Peña. 2007. Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding. *Journal of Cereal Science* 46: 293–307.

Pagani A., A. P. Mallarino and J.E. Sawyer. 2011. Soil pH and lime management for corn and soybean: an ongoing on-farm project. *North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference* 25: 106-112.

Pagani A. y A.P. Mallarino. 2012. Soil pH and crop grain yield as affected by the source and rate of lime. *Soil Science Society of America Journal* 76: 1877-1886.

Pagani A. and A.P. Mallarino. 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. *Agronomy Journal* 107: 71-82.

- Peralta-Videa J.R., M. López, M. Narayan, G. Saupe and J. Gardea-Torresdey. 2009. The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* 41: 1665-1677.
- Pierre W.H. 1928. Nitrogenous fertilizers and soil acidity. I. Effect of various nitrogenous fertilizers on soil reaction. *Journal of the American Society of Agronomy* 20: 254-269.
- Prochnow L. 2014. Soil Acidity Evaluation and Management. *Better Crops with Plant Food* 98: 22-25.
- Reuter D.J. and J.B. Robinson. 1988. *Plant Analysis, an Interpretation Manual*. CSIRO, Melbourne, Australia.
- Ritchie S.W. and J.J Hanway. 1986. How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. 18 p.
- Rosen C.J. and R. Eliason. 2005. Nutrient Management for Comercial Fruit & Vegetables Crops in Minnesota. University of Minnesota Extension Service Bulletin BU-05886. Minnesota. USA. 38 p.
- Sadeghzadeh B. 2013. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13: 905-927.
- Selim H.M. and M.C. Amacher. 2001. Sorption and Release of Heavy Metals in Soils: Nonlinear Kinetics. *In: Heavy Metals Release in Soils*. H.M Selim and D.L Sparks (Ed.) Lewis Publisher. pp: 1-30.
- SEMARNAT. 2000. Norma Oficial Mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. México. 85 p.
- SGM. 2015. Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1: 250,000. Servicio Geológico Mexicano. México.
- Shuman L. and D. McCracken. 1999. Tillage, lime, and poultry litter effects on plant concentrations of zinc, manganese, and copper. *Journal of plant nutrition* 22: 609-620.

SIAP. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadísticos de producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> (Consultada noviembre 2018).

SMN. 2010. Normales Climatológicas. Estación 7175. Villaflores. Periodo 1971-2000. Servicio Meteorológico Nacional. México.

Slaterry W.J., M.K. Conyers, R.L. Aitken. 1999. Soil pH, aluminum, manganese and lime requirement. *In: Soil Analysis: An Interpretation Manual*. Sparrow L.A. and Reuter D.J. (Ed.) CSIRO Publishing. Collingwood. pp: 103-128.

Tack, M.G.F. 2010. Trace Elements: General Soil Chemistry, Principles and Processes. *In: Trace Elements in Soils*, P.S Hooda (Ed.). pp: 9-38.

Takáč P., T. Szabová, L. Kazóková and M. Benková. Heavy metals and their bioavailability from soils in the long-term polluted Central Spiš region of SR. *Plant Soil Environ* 55: 167-172.

Tandzi L.N., C.S. Mutengwa, E.L. Ngonkeu and V. Gracen. 2018. Breeding Maize for Tolerance to Acidic Soils: A Review. *Agronomy* 84: 1-20.

Tao L., F. Li, C. Liu, X. Feng, L. Gu, B. Wang, S. Wen and M. Xu. 2019. Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in southern China. *Catena* 174: 227-234.

Tasistro A. 2013. Acidez del suelo. International Plant Nutrition Institute. Georgia, E.U.A. 194 p.

Teklić T., Z. Lončarić, V. Kovačević and B.R. Singh. 2013. Metallic trace elements in cereal grain – a review: how much metal do we eat? *Food and Energy Security* 2: 81-95.

Wei X., M. Hao, M Shao, and W.J Gale. 2006. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil and Tillage Research* 91: 120-130.

Weil R. and N. Brady. 2016. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Pearson. pp 375-379.

West, T.S. and T.L. Coombs. 1981. Soil as the Source of Trace Elements (and Discussion). *Philosophical Transactions of the Royal Society of Biological Sciences* 294:19-39.

Wong, J. and Selvam A. 2006. Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere* 63: 980–986.

Wisawapipat W., Y. Janlaksana and I. Christl. 2017. Zinc solubility in tropical paddy soils: A multi-chemical extraction technique study. *Geoderma* 301: 1-10.

Zetina-Lezama R., A Trinidad-Santos, J. Oropeza-Mota., V. Volke-Haller. y L. Landois-Palencia. Relación bases intercambiables–rendimiento de maíz en un cambisol dístrico con labranza, encalado y abono verde. *Terra Latinoamericana* 23: 389-397.

Zhanbin. L., Z. Qinling and L. Peng. 2013. Distribution characteristics of available trace elements in soil from a reclaimed land in a mining area of north Shaanxi, China. *International Soil and Water Conservation Research* 1: 65-75.

## ANEXOS

Anexo 1a. Componentes de la varianza para pH.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Año	0.018	0.177	0.022	0.208
Parcela	0.000	*	*	*
Error	0.085	0.823	0.019	0.000
Total	0.103			

Anexo 1b. Prueba de efectos fijos pH.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	41.49	22.91	< 0.001

Anexo 1c. Resultados prueba Tukey al 5% para pH.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>		
10	2	5.93	A		
7.5	2	5.49	A	B	
Vegetación nativa	12	5.5	A	B	C
5	2	4.9		B	C
2.2 a 3.6	9	4.71			C
0.6 a 2	9	4.67			C
Testigos sin cal	15	4.39			D

Anexo 2a. Componentes de la varianza para aluminio intercambiable.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.0391	39.73%	0.0248	0.057
Año	0.000	*	*	*
Error	0.059	60.27%	0.016	0
Total	0.098			

Anexo 2b. Prueba de efectos fijos aluminio intercambiable.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	32.7	13.09	< 0.001

Anexo 2c. Resultados prueba Tukey al 5% para aluminio intercambiable.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
Testigos sin cal	15	0.828	A	
2.2 a 3.6	9	0.508	A	B
0.6 a 2	9	0.486	A	B
5.0	2	0.344	A	B
Vegetación nativa	12	0.066	B	
7.5	2	0.049	B	
10	2	0.023	B	

Anexo 3a. Componentes de la varianza para Fe en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.180	0.409	0.106	0.045
Año	0.000	0.000	*	*
Error	0.260	0.591	0.068	0.000
Total	0.440			

Anexo 3b. Prueba de efectos fijos para Fe en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	32.71	4.61	0.002

Anexo 3c. Resultados prueba Tukey al 5% para Fe extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Numero de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigo sin cal	15	1.67	A
0.6 a 2.0	9	1.56	A
2.2 a 3.6	9	1.37	A
5	2	0.92	A B
7.5	2	0.86	A B
10	2	0.88	A B
Vegetación nativa	12	0.67	B



Anexo 4a. Componentes de la varianza para Fe en suelo extraído con DTPA.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	950.730	0.449	528.475	0.036
Año	0.000	0.000	*	*
Error	1165.522	0.551	302.079	0.000
Total	2116.252			

Anexo 4b. Prueba de efectos fijos para Fe en suelo extraído con DTPA.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	32.52	3.86	0.005

Anexo 4c. Resultados prueba Tukey al 5% para Fe extracción con DTPA.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
Testigos	15	133.73	A	
Vegetación nativa	12	91.83	A	B
0.6 a 2	9	143.74	A	
2.2 a 3.6	9	116.18	A	B
5	2	55.79	B	
7.5	2	46.66	B	
10	2	47.58	B	

Anexo 5a. Componentes de la varianza para Cu en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Año	0.000	0.000	*	*
Parcela	0.001	0.488	0.001	0.031
Error	0.001	0.512	0.000	0.000
Total	0.002			

Anexo 5b. Prueba de efectos fijos para Cu en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	32.53	3.42	0.01

Anexo 5c. Resultados prueba Tukey al 5% para Cu extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
0.6 a 2.0	9	0.066	A	
2.2 a 3.6	9	0.039	A	B
10	2	0.043	A	B
7.5	2	0.030	A	B
5	2	0.028	A	B
Testigo sin cal	15	0.060	A	
Vegetación nativa	12	0.020		B

Anexo 6a. Componentes de la varianza para Cu en suelo extraído con DTPA.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Año	0.000	0.000	*	*
Parcela	0.143	0.769	0.061	0.010
Error	0.043	0.232	0.011	0.000
Total	0.187			

Anexo 6b. Prueba de efectos fijos para Cu en suelo extraído con DTPA.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	30.02	1.03	0.425

Anexo 6c. Resultados prueba Tukey al 5% para Cu extracción con DTPA.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
10	2	0.57	A
Testigo sin cal	15	0.66	A
2.2 a 3.6	9	0.50	A
Vegetación nativa	12	0.47	A
7.5	2	0.36	A
0.6 a 2.0	9	0.65	A
5	2	0.32	A

Anexo 7a. Componentes de la varianza para Zn en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.002	0.046	0.006	0.403
Año	0.000	*	*	*
Error	0.031	0.954	0.009	0.000
Total	0.032			

Anexo 7b. Prueba de efectos fijos para Zn en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	34.73	3.24	0.012

Anexo 7c. Resultados prueba Tukey al 5% para Zn extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigos sin cal	15	0.393	A
0.6 a 2	9	0.361	A B
2.2 a 3.6	9	0.214	B
Vegetación nativa	12	0.175	B
5	2	0.069	B
10	2	0.046	B
7.5	2	0.026	B

Anexo 8a. Componentes de la varianza para Zn en suelo extraído con DTPA.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.015	0.042	0.049	0.378
Año	0.128	0.355	0.128	0.159
Error	0.218	0.603	0.061	0.000
Total	0.361			

Anexo 8b. Prueba de efectos fijos para Zn en suelo extraído con DTPA.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	32.31	0.76	0.609

Anexo 8c. Resultados prueba Tukey al 5% para Zn extracción con DTPA.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Vegetación nativa	12	1.088	A
Testigos sin cal	15	0.763	A
2.2 a 3.6	9	0.575	A
0.6 a 2	9	0.717	A
5	2	0.234	A
10	2	0.196	A
7.5	2	0.190	A

Anexo 9a. Componentes de la varianza para Mn en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Año	0.000	0.000	*	*
Parcela	18.806	0.455	10.785	0.041
Error	22.531	0.545	5.994	0.000
Total	41.337			

Anexo 9b. Prueba de efectos fijos para Mn en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	32.34	3.91	0.005

Anexo 9c. Resultados prueba Tukey al 5% para Mn extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
0.6 a 2	9	11.56	A	B
Testigos sin cal	15	14.96	A	
2.2 a 3.6	9	8.92	A	B
5	2	8.31	A	B
7.5	2	4.76	A	B
Vegetación nativa	12	6.63	A	B
10	2	3.15		B

Anexo 10a. Componentes de la varianza para Mn en suelo extraído con DTPA.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Año	0.000	0.000	*	*
Parcela	66.779	0.681	30.134	0.013
Error	31.341	0.319	8.272	0.000
Total	98.120			

Anexo 10b. Prueba de efectos fijos para Mn en suelo extraído con DTPA.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	30.76	1.78	0.135

Anexo 10c. Resultados prueba Tukey al 5% para Mn extracción con DTPA

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigos sin cal	15	19.84	A
0.6 a 2	9	17.81	A
2.2 a 3.6	9	14.38	A
Vegetación nativa	12	13.99	A
5	2	11.58	A
10	2	7.74	A
7.5	2	6.86	A

Anexo 11a. Componentes de la varianza para Cd en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.001	0.811	0.001	0.009
Año	0.000	0.000	*	*
Error	0.000	0.190	0.000	0.000
Total	0.002			

Anexo 11b. Prueba de efectos fijos para Cd en suelo extraído con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	6	29.62	0.34	0.911

Anexo 11c. Resultados prueba Tukey al 5% para Cd extracción con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

<b>Dosis de cal (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigos sin cal	15	0.031	A
0.6 a 2.0	9	0.028	A
2.2 a 3.6	9	0.019	A
5	2	0.015	A
7.5	2	0.020	A
10	2	0.000	A
Vegetación nativa	12	0.021	A



Anexo 12a. Componentes de la varianza para concentración de Fe en hojas.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	418.815	0.643	206.890	0.021
Año	0.000	0.000	*	*
Error	232.415	0.357	77.497	0.001
Total	651.230			

Anexo 12b. Prueba de efectos fijos para concentración de Fe en hojas.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	21.12	0.41	0.836

Anexo 12c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Fe en hojas.

<b>Dosis (<math>t \cdot ha^{-1}</math>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigos sin cal	15	133.07	A
0.6 a 2	9	123.39	A
2.2 a 3.6	9	129.10	A
5	2	124.83	A
7.5	2	130.21	A
10	2	136.21	A

Anexo 13a. Componentes de la varianza para concentración de Fe en granos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.000	0.000	*	*
Año	0.000	0.000	*	*
Error	470.799	1.000	123.638	0
Total	470.799			

Anexo 13b. Prueba de efectos fijos para concentración de Fe en granos.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	29	5.02	0.002

Anexo 13c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Fe en granos.

<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
0.6 a 2	7	67.67	A	
Testigos sin cal	13	64.73	A	
2.2 a 3.6	9	47.71	A	B
7.5	2	19.62	A	B
5	2	19.12	A	B
10	2	9.75		B

Anexo 14a. Componentes de la varianza para concentración de Cu en hojas.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	1.206	0.127	1.621	0.229
Año	0.000	0.000	*	*
Error	8.320	0.873	2.428	0
Total	9.526			

Anexo 14b. Prueba de efectos fijos para concentración de Cu en hojas.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	28.62	0.47	0.797

Anexo 14c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Cu en hojas.

<b>Dosis (<math>t \cdot ha^{-1}</math>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
5	2	10.25	A
2.2 a 3.6	9	9.99	A
Testigo sin cal	15	9.25	A
10	2	8.76	A
0.6 a 2.0	9	9.31	A
7.5	2	7.42	A

Anexo 15a. Componentes de la varianza para concentración de Cu en granos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	1.222	0.728	0.622	0.025
Año	0.000	0.000	*	*
Error	0.458	0.273	0.169	0.003
Total	1.680			

Anexo 15b. Prueba de efectos fijos para concentración de Cu en granos.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	16.61	0.89	0.512

Anexo 15c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Cu en granos.

<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigo sin cal	12	4.20	A
5	2	2.33	A
7.5	2	2.33	A
0.6 a 2.0	7	3.64	A
10	2	1.94	A
2.2 a 3.6	9	3.34	A

Anexo 16a. Componentes de la varianza para concentración de Zn en hojas.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.167	0.023	1.487	0.455
Año	2.182	0.297	2.787	0.217
Error	5.009	0.681	1.854	0.003
Total	7.357			

Anexo 16b. Prueba de efectos fijos para concentración de Zn en hojas.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	21.79	0.81	0.556

Anexo 16c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Zn en hojas.

<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
5	2	14.40	A
2.2 a 3.6	9	15.63	A
Testigo sin cal	15	15.64	A
10	2	11.49	A
0.6 a 2.0	9	15.69	A
7.5	2	12.06	A

Anexo 17a. Componentes de la varianza para concentración de Zn en granos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	46.473	0.422	30.947	0.067
Año	29.013	0.264	46.259	0.265
Error	34.554	0.314	12.377	0.003
Total	110.040			

Anexo 17b. Prueba de efectos fijos para concentración de Zn en granos.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	17.68	0.08	0.995

Anexo 17c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Zn en granos.

<b>Dosis (<math>t \cdot ha^{-1}</math>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigo sin cal	13	42.92	A
10.0	2	30.84	A
5.0	2	29.70	A
0.6 a 2.0	7	39.81	A
7.5	2	29.22	A
2.2 a 3.6	9	36.27	A

Anexo 18a. Componentes de la varianza para concentración de Mn en hojas.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	391.956	0.339	262.095	0.067
Año	371.520	0.321	500.111	0.229
Error	394.049	0.340	132.873	0.002
Total	1157.525			

Anexo 18b. Prueba de efectos fijos para concentración de Mn en hojas.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	20.47	1.63	0.197

Anexo 18c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Mn en hojas.

<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
Testigo sin cal	15	105.21	A	
0.6 a 2.0	9	75.03	A	B
2.2 a 3.6	9	70.69	A	B
5.0	2	59.04	A	B
7.5	2	37.54	A	B
10.0	2	31.04		B

Anexo 19a. Componentes de la varianza para concentración de Mn en granos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	21.324	0.378	11.551	0.032
Año	29.204	0.518	34.981	0.202
Error	5.850	0.104	2.070	0.002
Total	56.379			

Anexo 19b. Prueba de efectos fijos para concentración de Mn en granos.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	16.8	1.1	0.399

Anexo 19c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Mn en granos.

<b>Dosis (<math>t \cdot ha^{-1}</math>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigo sin cal	13	23.05	A
7.5	2	12.63	A
2.2 a 3.6	9	17.34	A
10	2	11.38	A
5	2	11.00	A
0.6 a 2.0	7	20.37	A



Anexo 20a. Componentes de la varianza para concentración de Cd en hojas.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.133	0.389	0.081	0.051
Año	0.000	0.000	*	*
Error	0.209	0.611	0.065	0.001
Total	0.342			

Anexo 20b. Prueba de efectos fijos para concentración de Cd en hojas.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	25.92	0.96	0.46

Anexo 20c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Cd en hojas.

<b>Dosis (<math>t \cdot ha^{-1}</math>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
Testigo sin cal	15	0.44	A
0.6 a 2.0	9	0.53	A
2.2 a 3.6	9	0.56	A
5.0	2	0.00	A
7.5	2	0.00	A
10.0	2	0.04	A

Anexo 21a. Componentes de la varianza para concentración de Cd en granos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	0.012	0.318	0.008	0.076
Año	0.000	0.000	*	*
Error	0.025	0.682	0.008	0.001
Total	0.037			

Anexo 21b. Prueba de efectos fijos para concentración de Cd en granos.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	24.03	5.9	0.001

Anexo 21c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Cd en granos.

<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
10.0	2	0.69	A	
5.0	2	0.68	A	
7.5	2	0.53	A	B
0.6 a 2.0	7	0.11	B	
2.2 a 3.6	9	0.12	B	
Testigo sin cal	13	0.08	B	

Anexo 22a. Componentes de la varianza para concentración de Al en hojas.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	4941.212	0.929	1935.110	0.005
Año	0.000	0.000	*	*
Error	375.662	0.071	124.870	0.001
Total	5316.875			

Anexo 22b. Prueba de efectos fijos para concentración de Al en hojas.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	18.66	4.73	0.006

Anexo 22c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Al en hojas.

<b>Dosis (t·ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>	
Testigos	15	142.33	A	
0.6 a 2	9	90.56	A	
2.2 a 3.6	9	106.67	A	
5	2	102.5	A	B
7.5	2	81.25	A	B
10	2	51.25		B

Anexo 23a. Componentes de la varianza para concentración de Al en granos.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Varianza</b>	<b>% del total</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Valor p</b>
Parcela	1574.268	0.670	950.830	0.049
Año	418.725	0.178	1400.666	0.382
Error	355.756	0.152	126.834	0.003
Total	2348.748			

Anexo 23b. Prueba de efectos fijos para concentración de Al en granos.

<b>Factor fijo</b>	<b>GL numerador</b>	<b>GL denominador</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Dosis	5	16.58	1.67	0.196

Anexo 23c. Resultados prueba Tukey al 5% para concentración de Al en granos.

<b>Dosis (<math>t \cdot ha^{-1}</math>)</b>	<b>Número de observaciones</b>	<b>Media</b>	<b>Agrupación</b>
10.0	2	76.25	A
5.0	2	106.25	A
7.5	2	96.25	A
0.6 a 2.0	7	78.57	A
2.2 a 3.6	9	103.89	A
Testigo sin cal	13	125.00	A

Anexo 24. Resultados de pruebas laboratorio: pH, Al; Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extraídos en suelo con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

Propietario	Año de encalado	PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	pH H <sub>2</sub> O 2:1	Aluminio	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
					KCl 1 N					
					cmol·kg <sup>-1</sup>	mg·kg <sup>-1</sup>				
Joaquín Altamirano	2014	45	‡T-SC	4.16	0.71	2.07	0.09	0.24	28.65	0.00
			1200	4.22	0.67	2.55	0.08	0.21	17.77	0.01
Marcos Cigarroa	2015	84	‡VN	5.51	0.00	1.31	0.08	0.26	4.64	0.03
			T-SC	4.25	0.59	2.30	0.08	0.31	6.55	0.01
			2300	4.35	0.95	1.93	0.08	0.22	4.99	0.00
Rausel Camas	2013	45	VN	5.95	0.00	0.55	0.01	0.06	4.66	0.03
			T-SC	4.75	0.56	3.04	0.08	0.37	35.62	0.02
			630	4.85	0.32	1.98	0.12	0.35	28.15	0.03
Efraín Gómez Solís	2014	45	VN	5.12	0.17	0.50	0.01	0.29	8.13	0.00
			T-SC	4.11	1.41	0.88	0.11	0.32	8.97	0.04
			2000	4.90	0.62	0.67	0.13	0.17	5.52	0.04

Continuación Anexo 24. Resultados de pruebas laboratorio: pH, Al; Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extraídos en suelo con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

Propietario	Año de encalado	PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	pH H <sub>2</sub> O 2:1	Aluminio	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
					KCl 1 N					
					cmol·kg <sup>-1</sup>	mg·kg <sup>-1</sup>				
Edray Velázquez	2013	45	VN	6.38	0.00	0.51	0.01	0.00	2.69	0.00
			T-SC	4.06	1.25	3.16	0.14	0.20	6.10	0.04
			700	4.71	0.26	1.62	0.17	0.34	5.66	0.03
Francisco Mario Rincón	2017	62	VN	5.28	0.16	0.86	0.04	0.57	9.67	0.11
			T-SC	4.64	0.97	1.34	0.14	0.49	20.76	0.03
			2700	4.77	0.60	2.30	0.15	0.47	20.29	0.04
Rigoberto Padilla	2014	45	2200	4.80	0.28	2.82	0.05	0.08	5.31	0.00
			T-SC	4.46	0.57	2.69	0.07	0.40	9.01	0.00
Mario Suchiapa	2017	62	1500	5.10	0.06	0.82	0.04	0.22	11.13	0.00
			T-SC	4.65	0.14	0.89	0.01	0.99	13.66	0.05

Continuación Anexo 24. Resultados de pruebas laboratorio: pH, Al; Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extraídos en suelo con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

Propietario	Año de encalado	PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	pH	Aluminio	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
				H <sub>2</sub> O 2:1	KCl 1 N					
				cmol·kg <sup>-1</sup>			mg·kg <sup>-1</sup>			
Raquel Padilla Saldaña	2014	45	VN	5.23	0.00	0.81	0.00	0.14	7.46	0.06
			3600	5.03	0.00	1.05	0.00	0.33	7.47	0.09
			T-SC	4.22	0.19	1.65	0.00	0.54	21.36	0.11
Eleazin López	2015	84	800	4.74	0.04	2.10	0.00	0.55	4.51	0.14
			T	4.48	0.62	1.14	0.00	0.28	9.90	0.16
Sinar Coutiño	2014	45	VN	5.98	0.00	0.79	0.01	0.07	5.46	0.00
			2300	4.88	0.66	1.08	0.03	0.14	9.05	0.00
Alfonso Velázquez	2015	84	T-SC	4.43	1.46	1.25	0.03	0.23	11.59	0.01
			VN	6.07	0.00	0.60	0.03	0.05	5.15	0.00
			920	4.17	1.05	1.18	0.06	0.40	8.08	0.01
			T-SC	4.12	1.11	1.80	0.08	0.93	15.50	0.01

Continuación Anexo 24. Resultados de pruebas laboratorio: pH, Al; Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extraídos en suelo con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

Propietario	Año de encalado	PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	pH	Aluminio	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
				H <sub>2</sub> O 2:1	KCl 1 N					
				cmol·kg <sup>-1</sup>			mg·kg <sup>-1</sup>			
Efraín Gómez Solís	2014	45	VN	5.12	0.17	0.50	0.01	0.29	8.13	0.00
			T-SC	4.46	0.89	0.90	0.09	0.14	11.42	0.02
			2500	4.55	0.85	0.86	0.01	0.06	8.57	0.04
			5000	4.70	0.61	0.63	0.02	0.06	9.33	0.03
			7500	5.48	0.07	0.65	0.02	0.00	4.74	0.04
			10000	5.96	0.01	0.46	0.04	0.05	1.86	0.00
Eduard Padilla	2015	84	VN	5.41	0.15	0.69	0.07	0.06	4.38	0.00
			T-SC	4.45	1.25	1.10	0.00	0.44	15.02	0.00
			750	4.64	0.68	2.01	0.00	0.38	12.29	0.00
			1500	4.74	0.67	1.11	0.00	0.48	10.95	0.00
			2250	4.62	0.51	0.64	0.00	0.25	10.56	0.00
			3000	4.68	0.38	0.73	0.01	0.14	0.88	0.00



Continuación Anexo 24. Resultados de pruebas laboratorio: pH, Al; Fe, Cu, Zn, Mn y Cd extraídos en suelo con CaCl<sub>2</sub> 0.01 M.

Propietario	Año de encalado	PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	pH	Aluminio	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
				H <sub>2</sub> O 2:1	KCl 1 N					
				cmol·kg <sup>-1</sup>			mg·kg <sup>-1</sup>			
Rigoberto Padilla	2014	45	VN	5.00	0.00	0.22	0.00	0.13	9.57	0.01
			T-SC	4.59	0.69	0.78	0.01	0.17	10.26	0.00
			2500	4.77	0.34	0.90	0.03	0.23	13.18	0.00
			5000	5.11	0.08	1.22	0.04	0.08	7.29	0.00
			7500	5.50	0.02	1.06	0.04	0.05	4.77	0.00
			10000	5.89	0.03	1.30	0.05	0.04	4.43	0.00

ψ Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT).

¥ Testigo sin cal (T-SC).

⋈ Vegetación nativa (VN).

Anexo 25. Resultados de laboratorio Fe, Cu, Zn y Mn extraídos de suelo con DTPA pH 7.3.

Propietario	Año de encalado	‰PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Extracción con DTPA pH 7.3			
				Fe	Cu	Zn	Mn
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Joaquín Altamirano	2014	45	‡T-SC	72.88	1.35	0.27	34.96
			1200	86.10	1.26	0.21	26.15
Marcos Cigarroa	2015	84	‡VN	112.65	0.25	0.77	6.19
			T-SC	186.35	0.39	0.65	7.66
			2300	161.75	0.42	0.38	6.24
Rausel Camas	2013	45	VN	145.40	1.47	2.05	25.00
			T-SC	156.33	2.46	1.03	53.60
			630	153.85	1.24	0.88	43.73
Efraín Gómez Solís	2014	45	VN	97.42	0.43	1.20	14.91
			T-SC	94.84	0.62	0.55	12.44
			2000	74.61	0.33	0.22	8.41
Edray Velázquez	2013	45	VN	53.90	0.41	2.39	13.34
			T-SC	127.93	0.31	0.48	8.35
			700	152.70	0.39	0.38	7.20
Francisco Mario Rincón	2017	62	VN	87.98	0.31	1.20	14.75
			T-SC	167.30	0.85	1.18	31.10
			2700	172.05	0.70	1.23	26.67

Continuación Anexo 25. Resultados de laboratorio Fe, Cu, Zn y Mn extraídos de suelo con DTPA pH 7.3.

Propietario	Año de encalado	PRNT	Muestra o dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Extracción con DTPA pH 7.3			
				Fe	Cu	Zn	Mn
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Rigoberto Padilla	2014	45	2200	77.53	0.27	0.20	7.38
			T-SC	172.95	0.45	0.58	11.90
Mario Suchiapa	2017	62	1500	122.55	0.49	1.39	18.44
			T-SC	112.10	0.41	1.72	16.98
Raquel Padilla Saldaña	2014	45	VN	97.93	0.39	0.25	12.65
			3600	109.35	0.54	1.46	10.44
			T-SC	92.67	0.39	0.32	23.67
Eleazin López	2015	84	800	87.58	0.33	0.70	5.91
			T	61.70	0.37	0.16	12.89
Sinar Coutiño	2014	45	VN	33.03	0.29	0.48	14.83
			2300	86.09	0.70	0.51	12.82
			T-SC	130.85	0.44	0.60	14.12
Alfonso Velázquez	2015	84	VN	46.45	0.52	2.10	23.02
			920	209.75	0.46	0.98	13.70
			T-SC	188.05	0.53	1.99	21.28

Continuación Anexo 25. Resultados de laboratorio Fe, Cu, Zn y Mn extraídos de suelo con DTPA pH 7.3.

Propietario	Año de encalado	$\psi$ PRNT	Muestra o dosis de cal ( $t \cdot ha^{-1}$ )	Extracción con DTPA pH 7.3			
				Fe	Cu	Zn	Mn
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Efraín Gómez Solís	2014	45	$\gamma$ VN	97.42	0.43	1.20	14.91
			¥T-SC	69.53	0.35	0.19	16.71
			2500	67.75	0.59	0.16	11.50
			5000	64.55	0.33	0.28	12.17
			7500	54.89	0.49	0.23	4.58
			10000	46.48	0.80	0.21	3.70
Eduard Padilla	2015	84	VN	93.36	0.31	0.18	5.61
			T-SC	262.45	0.60	1.33	21.04
			750	193.25	0.75	0.75	16.32
			1500	213.30	0.56	0.94	16.42
			2250	162.25	0.54	0.59	17.72
			3000	135.15	0.38	0.42	14.32
Rigoberto Padilla	2014	45	VN	112.65	0.25	0.77	6.19
			T-SC	110.05	0.33	0.40	20.92
			2500	73.66	0.41	0.22	16.41
			5000	47.03	0.30	0.18	10.99
			7500	38.43	0.24	0.15	9.13
			10000	48.69	0.34	0.18	11.77

$\psi$  Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT).

¥ Testigo sin cal (T-SC).

$\gamma$  Vegetación nativa (VN).

Anexo 26. Resultados de laboratorio: Fe y Cu en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	‡PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Fe hojas	Fe granos	Cu hojas	Cu granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Joaquín Altamirano	2014	45	‡T-SC 1200	105.00 98.00	Sin datos	8.08 8.03	Sin datos
Marcos Cigarroa	2015	84	T-SC 2300	124.75 102.75	76.58 95.08	8.15 10.85	4.28 3.83
Rausel Camas	2013	45	T-SC 630	142.00 134.75	Sin datos	11.18 9.20	Sin datos
Efraín Gómez Solís	2014	45	T-SC 2000	186.50 134.75	70.58 86.33	8.08 5.70	3.93 3.66
Edray Velázquez	2013	45	T-SC 700	113.75 118.25	87.08 96.58	10.15 7.55	3.98 3.63
Francisco Mario Rincón	2017	62	T-SC 2700	142.25 111.00	77.83 61.33	9.55 9.20	6.31 4.12
Rigoberto Padilla	2014	45	2200 T-SC	141.58 129.83	54.33 64.08	8.21 8.96	3.11 5.98
Mario Suchiapa	2017	62	1500 T-SC	106.58 98.83	60.58 72.08	6.13 6.46	2.68 5.93

Continuación Anexo 26. Resultados de laboratorio: Fe y Cu en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	‡PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Fe hojas	Fe granos	Cu hojas	Cu granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Raquel			3600	116.83	53.08	7.71	3.33
Padilla Saldaña	2014	45	‡T-SC	119.83	83.58	10.78	4.43
Eleazin López	2015	84	800 T	90.58 110.08	57.33 58.33	7.98 6.83	5.98 5.50
Sinar Coutiño	2014	45	2300 T-SC	124.83 120.33	59.08 44.33	11.83 12.38	4.46 4.68
Alfonso Velázquez	2015	84	920 T-SC	174.83 179.83	68.83 102.83	6.73 10.78	3.58 3.96
Efraín Gómez	2014	45	T-SC 2500 5000	140.83 142.83 138.33	33.70 16.25 12.75	8.06 7.36 6.83	1.93 1.53 2.03
Solís			7500 10000	124.83 165.58	7.25 3.75	6.08 7.48	2.00 1.33
Eduard Padilla	2015	84	T-SC 750 1500 2250 3000	170.25 120.50 132.25 142.75 132.00	54.75 54.25 49.75 38.50 31.50	11.23 22.78 9.65 11.00 9.50	2.88 3.05 2.90 2.43 2.70

Continuación Anexo 26. Resultados de laboratorio: Fe y Cu en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	‰PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Fe hojas	Fe granos	Cu hojas	Cu granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
			‡T-SC	112.00	15.75	8.15	2.88
			2500	147.33	20.25	14.23	2.40
Rigoberto	2014	45	5000	111.33	25.50	13.66	2.63
Padilla			7500	135.58	32.00	8.76	2.65
			10000	106.83	15.75	10.03	2.55

ψ Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT).

‡ Testigo sin cal (T-SC).

Anexo 27. Resultados de laboratorio: Zn y Mn en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	‡PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Zn hojas	Zn granos	Mn hojas	Mn granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Joaquín Altamirano	2014	45	‡T-SC 1200	16.04 15.11	Sin datos	81.00 64.25	Sin datos
Marcos Cigarroa	2015	84	T-SC 2300	17.96 16.21	46.42 45.01	49.00 48.25	21.92 20.67
Rausel Camas	2013	45	T-SC 630	11.58 13.04	Sin datos	167.75 61.00	Sin datos
Efraín Gómez Solís	2014	45	T-SC 2000	18.24 9.75	54.64 52.65	82.25 32.50	25.42 22.17
Edray Velázquez	2013	45	T-SC 700	15.91 18.78	48.19 44.20	158.00 108.00	33.92 28.92
Francisco Mario Rincón	2017	62	T-SC 2700	18.21 16.67	69.48 41.79	144.25 97.25	35.42 25.67
Rigoberto Padilla	2014	45	2200 T-SC	16.03 12.00	44.71 41.05	70.17 120.17	21.92 19.92
Mario Suchiapa	2017	62	1500 T-SC	15.35 13.04	41.57 57.10	100.67 96.92	20.67 30.92



Continuación Anexo 27. Resultados de laboratorio: Zn y Mn en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	‡PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Zn hojas	Zn granos	Mn hojas	Mn granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Raquel			3600	18.51	36.44	116.83	19.92
Padilla Saldaña	2014	45	‡T-SC	15.15	41.04	119.83	27.92
Eleazin López	2015	84	800 T	20.51 16.85	33.93 33.35	58.17 62.92	18.42 20.17
Sinar Coutiño	2014	45	2300 T-SC	15.10 13.43	30.95 33.31	54.92 79.67	14.92 14.92
Alfonso Velázquez	2015	84	920 T-SC	18.56 19.05	33.88 41.19	114.67 134.92	24.92 24.17
Efraín			T-SC	13.97	27.96	98.92	12.25
Gómez	2014	45	2500	12.79	31.40	70.17	8.75
Solís			5000	13.84	26.78	76.17	7.25
			7500	12.01	24.43	31.17	10.75
			10000	11.38	31.72	31.67	8.75
Eduard Padilla	2015	84	T-SC 750 1500 2250 3000	20.10 14.77 15.32 15.32 15.53	34.74 38.81 33.64 38.71 34.08	122.00 75.75 60.25 74.25 53.75	14.50 13.75 13.75 16.25 14.75

Continuación Anexo 27. Resultados de laboratorio: Zn y Mn en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	‰PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Zn hojas	Zn granos	Mn hojas	Mn granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Rigoberto Padilla	2014	45	‡T-SC	13.08	29.44	60.50	18.25
			2500	14.55	23.34	50.67	13.25
			5000	14.97	32.62	41.92	14.75
			7500	12.11	34.02	43.92	14.50
			10000	11.60	29.96	30.42	14.00

‡ Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT).

‡ Testigo sin cal (T-SC).

Anexo 28. Resultados de laboratorio: Al y Cd en hojas y granos de maíz.

Propietario	Año de encalado	%PRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Al hojas	Al granos	Cd hojas	Cd granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Joaquín Altamirano	2014	45	T-SC 1200	102.50 50.00	Sin datos	0.00 0.00	Sin datos
Marcos Cigarroa	2015	84	T-SC 2300	70.00 47.50	147.5 122.5	0.80 0.00	0.00 0.00
Rausel Camas	2013	45	T-SC 630	57.50 40.00	Sin datos	0.63 0.50	Sin datos
Efraín Gómez Solís	2014	45	T-SC 2000	87.50 62.50	60 35	0.78 0.45	0.00 0.00
Edray Velázquez	2013	45	T-SC 700	85.00 50.00	185 157.5	0.25 0.98	0.00 0.45
Francisco Mario Rincón	2017	62	T-SC 2700	87.50 45.00	72.5 67.5	0.93 0.63	0.00 0.00
Rigoberto Padilla	2014	45	2200 T-SC	137.50 180.00	92.5 132.5	0.00 0.00	0.00 0.00
Mario Suchiapa	2017	62	1500 T-SC	132.50 140.00	50 37.5	0.00 0.00	0.00 0.00

Propietario	Año de encalado	ΨPRNT	Tipo de muestra/dosis de cal (t·ha <sup>-1</sup> )	Al hojas	Al granos	Cd hojas	Cd granos
				mg·kg <sup>-1</sup>			
Raquel Padilla Saldaña	2014	45	3600	147.50	147.5	0.08	0.00
			T-SC	165.00	160	0.03	0.28
Eleazin López	2015	84	800	155.00	60	0.33	0.00
			T	205.00	140	0.00	0.00
Sinar Coutiño	2014	45	2300	227.50	112.5	0.00	0.00
			T-SC	327.50	195	0.00	0.00
Alfonso Velázquez	2015	84	920	192.50	50	0.00	0.00
			T-SC	247.50	65	0.00	0.00
Efraín Gómez Solís	2014	45	2500	230.00	140	0.00	0.30
			5000	205.00	87.5	0.00	0.34
			7500	155.00	77.5	0.00	0.90
			10000	147.50	65	0.00	0.63
				90.00	40	0.08	0.87
Eduard Padilla	2015	84	T-SC	87.50	135	1.20	0.43
			750	75.00	105	1.30	0.35
			1500	57.50	92.5	1.20	0.00
			2250	45.00	77.5	2.05	0.00
			3000	42.50	72.5	2.30	0.65
Rigoberto Padilla	2014	45	T-SC	62.50	155	1.93	0.00
			2500	62.50	155	0.00	0.05
			5000	50.00	135	0.00	0.45
			7500	15.00	127.5	0.00	0.43
			10000	12.50	112.5	0.00	0.50

Ψ Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT).

¥ Testigo sin cal (T-SC).

Anexo 29. Concentraciones de los metales analizados en hojas y granos de maíz de La Frailesca.

Metal	Órgano	Dosis de cal dolomítica aplicada (t·ha <sup>-1</sup> )					
		Testigos sin cal	0.6 a 2.0	2.2 a 3.6	5.0	7.5	10
		<sup>λ</sup> mg·kg <sup>-1</sup>					
Fe	Hojas	133.1 ± 27.2 a	123.4 ± 25.1 a	129.1 ± 16.1 a	124.8 ± 19.1 a	130.2 ± 7.6 a	136.2 ± 41.5 a
	Granos	64.7 ± 23.5 a	67.7 ± 17.5 a	47.7 ± 24.3 ab	19.1 ± 9.0 ab	19.6 ± 17.5 ab	9.7 ± 8.5 b
Cu	Hojas	9.3 ± 1.8 a	9.3 ± 5.2 a	10.0 ± 2.2 a	10.3 ± 4.8 a	7.4 ± 1.9 a	8.8 ± 1.8 a
	Granos	4.2 ± 1.2 a	3.6 ± 1.1 a	3.3 ± 1.4 a	2.3 ± 0.4 a	2.3 ± 0.5 a	1.9 ± 0.9 a
Zn	Hojas	15.6 ± 2.7 a	15.7 ± 3.3 a	15.6 ± 1.6 a	14.4 ± 0.8 a	12.1 ± 0.1 a	11.5 ± 0.2 a
	Granos	42.9 ± 12.1 a	39.8 ± 7.0 a	36.3 ± 7.1 a	29.7 ± 4.1 a	29.2 ± 6.8 a	30.8 ± 1.2 a
Mn	Hojas	105.2 ± 36.5 a	75.0 ± 27.3 ab	70.7 ± 23.2 ab	59.0 ± 24.2 ab	37.5 ± 9.0 ab	31.0 ± 0.9 b
	Granos	23.1 ± 7.4 a	20.4 ± 5.6 a	17.3 ± 5.2 a	11.0 ± 5.3 a	12.6 ± 2.7 a	11.4 ± 3.7 a
Cd	Hojas	0.4 ± 0.6 a	0.5 ± 0.5 a	0.6 ± 0.9 a	0.0 ± 0.0 a	0.0 ± 0.0 a	0.0 ± 0.00 a
	Granos	0.1 ± 0.2 b	0.1 ± 0.2 b	0.1 ± 0.2 b	0.7 ± 0.3 a	0.5 ± 0.1 ab	0.7 ± 0.3 a
Al	Hojas	142.3 ± 80.9 a	90.6 ± 55.1 a	106.7 ± 74.2 a	102.5 ± 74.3 a	81.3 ± 93.7 ab	51.3 ± 54.8 b
	Granos	125.0 ± 50.00 a	78.6 ± 42.8 a	103.9 ± 33.00 a	106.3 ± 40.7 a	96.3 ± 50.0 a	76.3 ± 51.3 a

<sup>λ</sup> Letras diferentes en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas resultados de la prueba Tukey al 5%.

