

Disponibilidad de Zinc en suelos de la región Oriental del Paraguay

Availability of Zinc in soils of the Eastern region of Paraguay

Mirelly Paola Rolón Galeano¹ , Jimmy Walter Rasche Alvarez¹ , Diego Augusto Fatecha Fois¹ , Carlos Andrés Leguizamón Rojas¹ , Gustavo Adolfo Rolón Paredes¹  y Camila Erna Aurora Ortiz Grabski¹ 

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

***Autor para correspondencia:**
jwrasche@agr.una.py

Conflictos de interés:
Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución de autores:
MPRG: Clasificación, verificación y análisis de los datos, realización del mapa de Zn.
JWRA: Planificación del experimento. Análisis e interpretación de datos, redacción del manuscrito y aprobación de la versión final.
DAFF: Planificación del experimento, obtención de los datos, revisión del manuscrito.
CALR: Financiamiento del proyecto. Interpretación de los resultados, revisión del manuscrito.
GARP: Interpretación de los resultados, realización del mapa de Zn en el suelo a nivel de distrito.
CEAOG: Obtención de los datos, clasificación de los mismos y análisis parcial de los datos. Todos los autores asumen la responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Financiamiento:
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), proyecto 14-INV-130.

Periodo de publicación:
Enero-Junio de 2023

Historial:
Recibido: 15/03/2022;
Aceptado: 13/03/2023

Editor responsable:
Enrique Benítez León y Nadia Sanabria Verón

Licencia:
Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

RESUMEN

El Zinc (Zn) es un nutriente esencial para las plantas, existe limitada información de su disponibilidad en los suelos de Paraguay. El objetivo de la investigación consistió en evaluar y clasificar la disponibilidad de Zn en suelos de la región Oriental del Paraguay. Para ello fue generada una base de datos con los resultados de análisis de suelo de los laboratorios de la FCA-UNA, CIHB-IPTA y FUCAI-UCA. Se clasificó la concentración de Zn disponible de los suelos en nivel "alto" ($>1,2$ mg kg⁻¹); "medio" (0,5 - 1,2 mg kg⁻¹) y "bajo" ($<0,5$ mg kg⁻¹), generándose un mapa de disponibilidad de Zn a nivel distrital. Se evaluó la disponibilidad de Zn a nivel distrital, departamental, así como, con parámetros de estadística descriptiva. Considerando la media de los niveles de Zn a nivel de distrito, de los 234 distritos que conforman la región Oriental del Paraguay, en el 74% de los distritos (174 distritos) presentaron nivel "alto", 6% nivel "medio" (15 distritos) y el 3% nivel "bajo" de Zn (6 distritos). Considerando el número total de muestras de suelo analizadas (11.395 muestras), el 79% (9.038 muestras) presentaron niveles "alto" de Zn, el 12% (1.316 muestras) presentaron niveles "medio" de Zn, y solo el 9% (1.041 muestras) presentaron niveles "bajo" de Zn. La media nacional considerando las 11.395 muestras de suelo fue de 6,5 mg kg⁻¹ de Zn, por lo tanto, en 79% de los suelos analizados de la región Oriental hay niveles de Zn superior al nivel crítico de Zn para las actividades agrícolas, de forrajes y forestales de producción.

Palabra clave: micronutrientes, oligoelemento, metales pesados

ABSTRACT

Zinc (Zn) is an essential nutrient for plants, and there is limited information on its availability in Paraguayan soils. The objective of the research was to evaluate and classify the availability of Zn in soils of the Eastern region of Paraguay. For this, a database was generated with the results of soil analyses from the FCA-UNA, CIHB-IPTA and FUCAI-UCA laboratories. The concentration of available Zn in soils was classified as "high" (>1.2 mg kg⁻¹); "medium" (0.5 - 1.2 mg kg⁻¹) and "low" (<0.5 mg kg⁻¹), generating a Zn availability map at the district level. The availability of Zn was evaluated at the district and departmental levels, as well as with descriptive statistics parameters. Considering the average Zn levels at the district level, of the 234 districts that make up the Eastern region of Paraguay, 74% of the districts (174 districts) presented a "high" level, 6% a "medium" level (15 districts) and 3% "low" level of Zn (6 districts). Considering the total number of soil samples analyzed (11,395 samples), 79% (9,038 samples) presented "high" levels of Zn, 12% (1,316 samples) presented "medium" levels of Zn, and only 9% (1,041 samples) presented "low" levels of Zn. The national average, considering the 11,395 soil samples, was 6.5 mg kg⁻¹ of Zn, therefore, in 79% of the soils analyzed in the Eastern region there are Zn levels above the critical level of Zn for agricultural activities, forage and forestry production.

Keywords: micronutrients, trace element, heavy metals

INTRODUCCIÓN

El Zn del suelo es procedente de los minerales que presentan en el material de origen como el sulfuro de Zn (esfarelita, blenda), el carbonato de Zn (esmitsonita), el silicato de Zn (willemita), el espinelio de zinc y hierro (franklinita) y el óxido de Zn (zinczita) (Evanko y Dzomback, 1997; Misi 2016). La concentración de Zn en la roca varía de acuerdo a su origen, en rocas ígneas como granitos y basaltos,

su concentración varía de 40 a 100 mg kg⁻¹, en rocas sedimentarias como las calizas de 10 a 450 mg kg⁻¹, con un valor promedio de 50 mg kg⁻¹, y la concentración de Zn total en el suelo varía entre 10 a 300 mg kg⁻¹, pero solo una pequeña parte se encuentra disponible a las plantas (Kabata-Pendias y Pendias, 2001, Pelozato et al., 2011; Huguen et al., 2013).

En el suelo el nivel de Zn disponible para las plantas varía

de acuerdo al material de origen, clase textural, valores de pH, contenido de materia orgánica, profundidad del suelo y del propio sistema de manejo del suelo (Linhares, Bellis, dos Santos y Ianhez, 2010; Prieto, 2018).

Linhares et al. (2010) y Torri, Urricarriet, Ferraris y Lavado (2010) mencionan que el aumento del pH del suelo favorece los procesos de adsorción de Zn, en los coloides edáficos de carga variable, así como los procesos de precipitación de sales inorgánicas y oclusión en óxidos e hidróxidos. El Zn en el suelo, al contrario de lo que ocurre en la roca, se presenta principalmente como ion bivalente Zn^{+2} y las plantas lo absorben como tal (Taiz y Zeiger, 2013).

El Zn es un nutriente que habitualmente se encuentra deficiente en la mitad de los suelos de uso agrícola situados en los trópicos (Sadeghzadeh, 2013). Según Cediell, Olivares, Brito, Cori y López (2015) el 37,8% de la población de Paraguay no consume cantidad adecuada de Zn por haber deficiencia de este elemento en los alimentos.

Aunque actualmente existen algunos experimentos realizados en Paraguay relacionados a la respuesta de los cultivos a la aplicación de Zn (Fretes, Rasche, Fatecha, Karajallo y Aguayo, 2017; González, Szostak y Morel, 2017; López, Vera y González, 2019; Osorio, Rasche, González, Leguizamón y Fatecha, 2021), aún es escasa la información generada sobre la situación de los niveles de Zn en los suelos, cuya disponibilidad juega un papel importante tanto productivo como económicamente en los cultivos agrícolas, forrajes y forestales de producción, por lo que resulta necesario generar informaciones relevantes que permitan diagnosticar la situación de la fertilidad de los suelos, principalmente porque se recomienda la utilización de zinc en cultivos agrícolas como maíz y trigo, sin embargo, en el Paraguay aún no hay estudios suficientes sobre la disponibilidad de este nutriente en el suelo, así como del nivel crítico de Zn para los cultivos, por lo tanto, las recomendaciones están basadas en resultados de experimentos realizados fuera del país.

El objetivo general de este trabajo consistió en evaluar y clasificar la disponibilidad de Zn en suelos de la región Oriental del Paraguay a nivel de distrito considerando el nivel de crítico de Zn para las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio abarca la región Oriental del Paraguay con una superficie de 159.827 km², lo que constituye el 39% de la superficie total del país. Inicialmente sobre el material basáltico la vegetación preponderante eran bosques tropicales y en las llanuras pasturas naturales, siendo intermedio a estas dos vegetaciones en las areniscas. El clima de la región Oriental es tropical de sabana (Aw), al norte y subtropical húmedo (Cfa) al sur (Pastén, González y Espínola, 2011). La temperatura media anual varía de 20° C hacia el sur a 24 °C al norte de la RO y la precipitación oscila entre 1800 mm al sur hasta 1250 mm al norte de la RO, las lluvias están mejor distribuidas durante el año hacia el sur que hacia el norte (González, 2017; Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH), 2005). La misma posee relieve plano a ligeramente ondulado, donde el 80%

está por debajo de los 300 msnm, con la menor altitud de 55 msnm hacia la desembocadura del río Paraguay y las tierras más altas se encuentran hacia el noreste, en el departamento de Amambay superando los 450 msnm, el pico más alto es el cerro Tres Candú con 882 msnm.

Los órdenes de suelo reconocidos en esta región, según su extensión decreciente en porcentaje son: Ultisol (35,6%), Alfisol (32,5%), Entisol (13,6%), Inceptisol (5,7%), Oxisol (5,6%), Vertisol (1,2%) y Mollisol (1,0%) (López et al., 1995). De las muestras que llegaron al laboratorio, la mayor parte de las mismas provienen de suelos clasificados como ultisoles y alfisoles, ya que estos además de ser los suelos predominantes, son sobre estos suelos que se realizan agricultura y de donde provinieron más del 80% de las muestras. Los suelos de la zona centro y oeste son originarios de arenisca; en la zona este son de origen basáltico; en el extremo este y sureste son originarios de sedimentos aluviales, estos suelos se encuentran en los departamentos de Ñeembucú y Misiones, los cuales permanecen saturados de agua gran parte del año (Gardi et al., 2014).

Los resultados de los análisis de suelo provinieron de los archivos de la base de datos de los laboratorios del Centro de Investigación Hernando Bertoni – CIHB dependiente del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA), ubicado en el distrito de Caacupé, departamento Cordillera; de la Fundación Universitaria Ciencias Agrarias Itapúa (FUCAI) situada en el distrito de Hohenau, departamento Itapúa y de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA) ubicada en el distrito de San Lorenzo, departamento Central. Fue elaborada la base de datos de los resultados de Zn con 11.395 datos, a partir de la recolección de análisis de suelos comprendidos entre los años 2006 y 2017. Fueron registrados 11.395 resultados para Zn, de los cuales 893 muestras provinieron del IPTA, 4312 muestras de la FUCAI y 6190 muestras de la FCA-UNA. Más información sobre la distribución de las muestras de suelo a nivel de distrito puede encontrarse en Rolón (2021). Las muestras de suelo no fueron discriminadas por uso, ni profundidad de muestreo, sin embargo, más del 70% de las muestras son de uso agrícola y colectado en la camada de 0-20 cm de profundidad. En relación al método de análisis de Zn, los tres laboratorios que cedieron sus resultados de análisis de suelo realizan la extracción de Zn por el método de Mehlich 1 y la cuantificación del mismo mediante el uso de espectrofotómetro de absorción atómica como descrito por Tedesco et al. (1995).

La concentración de Zn disponible en el suelo se clasificó en nivel "alto" (>1,2 mg kg⁻¹); "medio" (0,5 - 1,2 mg kg⁻¹) y "bajo" (<0,5 mg kg⁻¹), niveles de interpretación establecidos por Van Raij (2011).

La clasificación de Zn en el suelo de la región Oriental fue presentado en un mapa, siendo utilizada como unidad cartográfica la división política a nivel distrital, provista por la Dirección General de Encuestas Estadísticas y Censos de la Secretaría Técnica de Planificación (DGEEC, 2018).

Fue empleado el SIG del Área de Suelos y Ordenamiento Territorial de la FCA-UNA, con la utilización del software

ArcGIS®, en el cual fueron introducidos los resultados de la clasificación de los niveles de Zn con la generación de los mapas correspondientes. Los datos fueron sometidos a análisis estadístico descriptivo (media, mediana, desviación estándar, cuartiles inferior y superior, intercuartil, coeficiente de variación) la ayuda del programa AgroEstat (2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respecto a los niveles de Zn, de 174 distritos de la región Oriental se observó nivel "alto" de Zn en el 74% del total de los municipios; 15 distritos fueron clasificados con nivel "medio" (6%), y 6 distritos con nivel "bajo" (3%). Los distritos que presentaron nivel "bajo", tres de ellos están ubicados en el departamento de Concepción (Belén, San Alfredo y San Carlos), dos en el departamento de Cordillera (Santa Elena y Tobatí) y uno en el departamento de Ñeembucú (General Díaz) (Figura 1).

Los suelos con deficiencia de Zn en el departamento de Concepción se dan principalmente por dos razones, uno es el material de origen, en algunos casos suelos cuyo material de origen son rocas calizas y también en el caso

de San Carlos, el suelo es clasificado como oxisol con vegetación típica de cerrado, lo que hace con que por más que el pH sea ácido hay deficiencia de Zn, debido el alto interperismo del suelo ya que además del valor de pH, MOS, otros factores como el porcentaje de arcilla, hierro y manganeso poseen influencia sobre el nivel de Zn en el suelo (Fadigas, Sobrinho, Mazur, Anjos y Freixo, 2006; López et al., 1995). Por otro lado, hacia el centro y suroeste de la región Oriental del país, los suelos arenosos y en ocasiones el bajo nivel de MOS hace con que los niveles de Zn puedan ser clasificados como "medio" a "bajo", ya que en todos estos distritos presentan niveles medio a bajos de MOS (Encina-Rojas et al., 2023).

De los 174 distritos, 39 distritos no fueron clasificados por falta de datos (17% del total), principalmente distritos de Ñeembucú (8 distritos), Cordillera (5 distritos), Guairá (5 distritos), Central (5 distritos), Canindeyú (3 distritos) y Alto Paraná (3 distritos), algunos por ser distritos prácticamente urbanos, como es el caso de Central, otros por ser municipios nuevos o poseer escasa actividad agrícola (Figura 1).

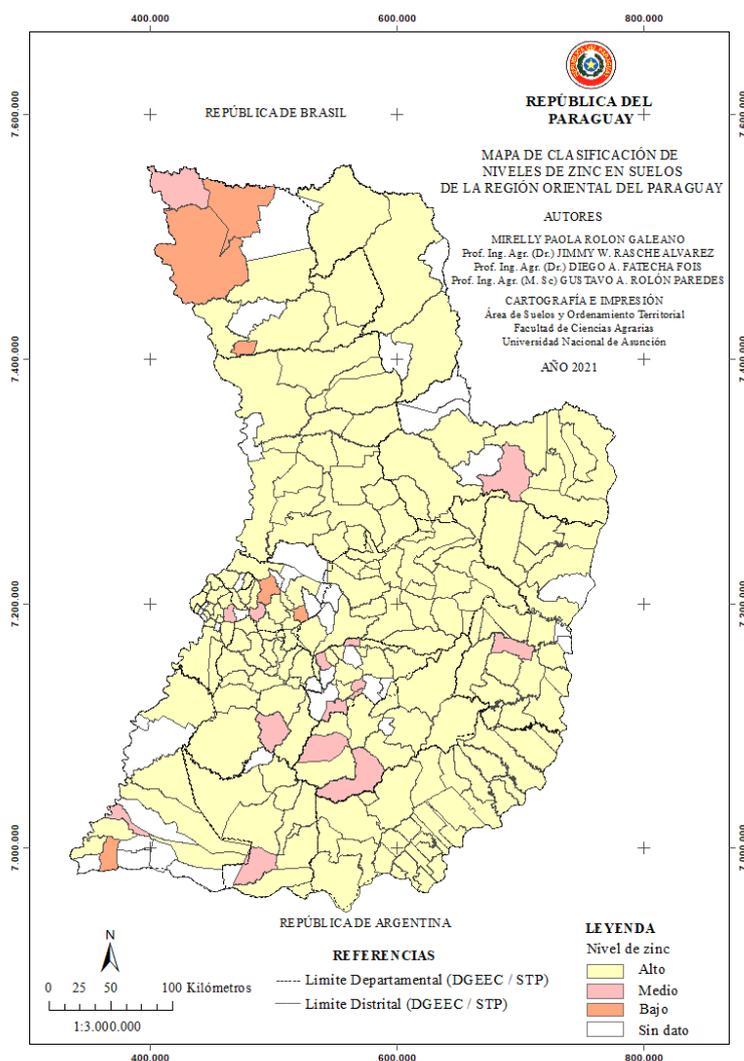


Figura 1. Clasificación de niveles de zinc disponible en suelos de los distritos de la región Oriental del Paraguay, basados en 11.395 resultados de análisis de suelos procesados entre 2006 y 2017.

Desglosando los datos a nivel departamental, se puede observar que en todos los casos el valor de la mediana es inferior al valor del promedio (Tabla 1), por lo tanto, la distribución del conjunto de datos es asimétrica, sesgado a la izquierda, es decir hay mayor cantidad de muestras con valores inferiores al promedio de concentración de Zn. También se puede observar que en todos los departamentos, con excepción de Caazapá, el valor del cuartil inferior es superior a 0,5 mg kg⁻¹ de Zn, que se consideraría clasificado cómo nivel “bajo” de Zn en el suelo.

Evaluando el desvío estándar y el coeficiente de variación se observa alta dispersión de los datos, con valores muy altos (Tabla 1), que en los resultados de análisis de suelo podría considerarse aceptable esta dispersión, debido a que el suelo de por sí es heterogéneo y además los factores antrópicos como la fertilización con fertilizantes químicos y enmiendas orgánicas, conjuntamente con el uso del suelo aumentan la variabilidad de los niveles de Zn en el suelo, comparado con la variación natural existente a causa del material de origen, o la formación del suelo. Probablemente esto hizo que los valores medios sean altos por más que existan mayor cantidad de muestras de Zn inferior a la media (asimétrica, sesgado a la izquierda).

Se puede resaltar que el cuartil superior (14 mg kg⁻¹) y el intercuartil del departamento de Itapúa que es de 12 mg kg⁻¹, lo que demuestra que existe mayor amplitud en el valor de Zn en el suelo de Itapúa, comparado con otros departamentos (Tabla 1).

El uso de enmiendas orgánicas como el estiércol suino en la agricultura en general permite el aumento de la concentración de Zn en el suelo (Giroto et al., 2010), posiblemente eso puede ser una explicación para los

valores de Zn muy altos encontrados en el departamento de Itapúa, aunque de manera generalizada, aún no se visualiza tales efectos en los distritos que poseen cría intensiva de cerdo en nuestro país, ubicados en los departamentos de Itapúa, Alto Paraná y San Pedro, responsables del 61,2% del total de suinos en Paraguay (369.358 cabezas) (SENACSA, 2020).

En relación al número total de muestras, se observa que a nivel de región Oriental el 79% de las muestras analizadas se encuentran con niveles clasificados como “alto” (9.038 muestras) y solo el 9% de las 1.395 muestras analizadas poseen valor considerado como “bajo” (Tabla 1), es decir, que a nivel de la región oriental del Paraguay solo en el 9% de las muestras analizadas hay alta probabilidad de respuesta a la fertilización con Zn, principalmente en los cultivos más exigentes, gramíneas como el trigo y el maíz. Estos dos cultivos son muy importantes en la agricultura paraguaya, en el 2020, el maíz fue sembrado en una superficie de 885.000 ha, en tanto, el trigo, cereal con mayor superficie de siembra en el invierno, alcanzó 430.000 ha (CAPECO, 2020), ambos cereales son exigentes en Zn y necesitan cantidades adecuadas para alcanzar altos rendimientos.

A nivel departamental se observa que los valores de Zn se encuentran en general en niveles altos (Tabla 2), sin embargo, al analizar la tabla se observan que existen departamentos con mayor cantidad de muestras con niveles “medios” o “bajos”. Por ejemplo los departamentos de Caazapá y Misiones solo poseen el 53 y 55% de las muestras de suelo con valores considerados “altos”, respectivamente, ya en los departamentos de Alto Paraná, Paraguari, Itapúa posee el porcentaje de muestra con niveles “alto” es superior al 88, 87 y 85%, respectivamente.

Tabla 1. Estadística descriptiva de resultados de análisis de Zn disponible en suelos, a nivel departamental en la región Oriental del Paraguay, basado en 11.395 resultados procesados entre 2006 y 2017.

Departamento	Muestra analizadas	Zn disponible						CV
		media	mediana	desviación estándar	Quartil Inferior	Quartil superior	Inter-cuartil	
	mg kg ⁻¹						%
Concepción	81	3,0	1,9	3,7	0,9	3,4	2,5	121,9
San Pedro	853	5,2	3,8	6,1	1,4	6,7	5,3	116,8
Cordillera	452	3,7	2,0	5,7	0,9	4,8	3,9	154,3
Guairá	131	2,7	2,2	3,1	0,8	3,0	2,2	113,6
Caaguazú	1.340	4,0	2,5	6,3	0,8	4,7	3,9	157,9
Caazapá	189	4,2	1,6	6,4	0,4	4,9	4,5	150,4
Itapúa	4.518	9,4	6,5	9,5	2,0	14,0	12,0	101,5
Misiones	235	5,1	1,4	7,7	0,7	8,0	7,3	149,4
Paraguari	567	2,7	2,2	2,3	1,7	3,0	1,3	86,1
Alto Paraná	1.318	6,3	3,9	6,2	2,0	8,8	6,8	98,3
Central	151	5,0	2,9	5,8	1,4	5,9	4,5	114,9
Ñeembucú	28	4,0	2,1	4,6	1,0	4,8	3,8	115,5
Amambay	69	5,6	1,6	8,0	1,3	6,7	5,4	144,2
Canindeyú	1.463	4,5	3,2	5,5	1,2	5,3	4,1	122,4
Total	11.395	6,5	3,5	7,8	1,5	8,4	6,9	120,7

Tabla 2. Clasificación de los niveles de Zn disponible en suelos por departamentos de la región Oriental del Paraguay, basado en 11.395 resultados de análisis de suelos procesados entre 2006 y 2017.

Departamento	Muestras analizadas	Niveles de Zn disponible				promedio
		alto	medio	bajo	nivel	
.....%.....						mg kg ⁻¹
Concepción	81	60	25	15	alto	3,0
San Pedro	853	79	8	13	alto	5,2
Cordillera	452	70	20	10	alto	3,7
Guiará	131	66	18	16	alto	2,7
Caaguazú	1.340	68	16	16	alto	4,0
Caazapá	189	53	17	30	alto	4,2
Itapúa	4.518	85	8	7	alto	9,4
Misiones	235	55	26	19	alto	5,1
Paraguarí	567	87	8	5	alto	2,7
Alto Paraná	1.318	88	7	5	alto	6,3
Central	151	81	9	10	alto	5,0
Ñeembucú	28	75	7	18	alto	4,0
Amambay	69	77	19	4	alto	5,6
Canindeyú	1.463	74	19	7	alto	4,5
Total muestras	11.395	9.038	1.316	1.041	alto	6,5
% de las muestras	100	79	12	9	--	--

Los niveles de Zn en "alto" (>1,2 mg kg⁻¹); "medio" (0,5 - 1,2 mg kg⁻¹) y "bajo" (<0,5 mg kg⁻¹), (Van Raij, 2011).

En el caso del departamento de Concepción, clasificado por el promedio general como nivel "alto", en tres municipios (Belén, San Alfredo y San Carlos los niveles de Zn son clasificados como "bajo" y un municipio (San Lázaro) posee nivel "medio" de Zn (Figura 1). Es de esperarse esos niveles clasificados como "bajo" a "medio" en esos municipios, considerando que el material de origen que formaron los suelos de los mismos son rocas calizas y el pH de esos suelos es muy próximo a la neutralidad, y a medida que es mayor el pH del suelo disminuye la disponibilidad de Zn en el suelo.

Era de esperarse mayor cantidad con muestras de suelo con niveles de Zn clasificado como "alto" en el departamento de Itapúa y Alto Paraná, considerando que esos suelos son de origen arcilloso cuyo material de origen es el basalto, roca ígnea que naturalmente posee mayor cantidad de Zn que las rocas sedimentarias y metamórficas (Campos, Pierangeli, Guilherme, Marques y Curi, 2003), no obstante, en aquellos distritos de estos dos departamentos con suelos más arenosos, se observan mayores porcentajes de muestras con valores clasificados como "medio" y "bajo" de Zn. Para ejemplificar en estos dos departamentos, en el caso de Itapúa, los distritos de Leandro Oviedo, General Artigas, San Pedro del Paraná y Jesús presentan el 40%, 38%, 29% y 22%, respectivamente, de las muestras de suelo clasificado como con nivel "bajo" de Zn, estos distritos en general poseen suelos derivados de areniscas. En el Alto Paraná, la mayoría de los distritos presentaron más del 60% de sus muestras dentro del nivel "alto", a excepción del distrito de Tavapy que presentó el 50% de sus muestras entre los niveles "medio" y "bajo". Además los suelos de Alto Paraná e Itapúa sembrados en siembra directa tienen mayor probabilidad de poseer mayor materia

orgánica y eso facilita el aumento de la disponibilidad de Zn. Eso puede ser demostrado en Prieto (2018), quien observó que en un suelo arcilloso del distrito de Minga Guazú, que el mayor nivel de Zn disponible se encontraba en pasturas y en la siembra directa y menores niveles de Zn disponible en el sistema convencional o tradicional de labranza y en bosque, así como mayor contenido de Zn en la superficie que en camadas más profundas.

En el caso del departamento de Paraguarí, aunque presenta suelos predominantemente arenosos posee altos niveles de Zn, estos niveles posiblemente estén relacionados a la alta acidez de los suelos de ese departamento, como demostrado por Bataglia (2011) quien observó que el 62% de las muestras de suelo provenientes de ese departamento poseen pH_{agua} inferior a 5,5, es decir, son suelos ácidos a fuertemente ácidos, favoreciendo a que los suelos posean niveles del Zn.

CONCLUSIÓN

Basado en los resultados a partir de la evaluación y clasificación de la disponibilidad de Zn de las muestras de suelo se concluye que en 74% de los distritos de la región Oriental y en el 79% de las muestras hay niveles adecuados de Zn en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), enmarcada en el proyecto 14-INV-130 "Manejo sostenible de la fertilidad del suelo para la producción de alimentos". A los laboratorios del Centro de Investigación Hernando Bertoni - CIHB dependiente del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA), de la Fundación Universitaria

Ciencias Agrarias de Itapúa (FUCAI) y de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA) por ceder los resultados de análisis de suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AgroEstat. (2021). Programa estadístico. Disponible en: <https://www.agroestat.com.br/>
- Bataglia, V. D. (2011). *Clasificación de los niveles de acidez activa (pH) y necesidad de cal agrícola de los suelos de la Región Oriental del Paraguay*. (Tesis de Grado en Ingeniería Agronómica). San Lorenzo : Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, 76 p.
- Campos, M. L., Pierangeli M., A. P., Guilherme L., R. G., Marques, J. J. y Curi, N. (2003). Baseline concentration of heavy metals in brasilian latosols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 547-557. doi: 10.1081/CSS-120017838
- Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas (CAPECO). (2020). *Área y de siembra, producción y rendimiento*. Disponible en: <http://capeco.org.py>
- Cediel, G., Olivares, M., Brito, A., Cori, H. & López de R. D. (2015). Zinc Deficiency in Latin America and the Caribbean. *Food and Nutrition Bulletin*, 36 (2 suppl), S129-38. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0379572115585781>
- Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH). (2015). *Mapas normales de la precipitación mensual y anual*. Disponible en: http://www.meteorologia.gov.py/adm/uploads/Normales_preci_7100.pdf
- Dirección General de Estadística, Encuesta y Censos (DGEEC). (2018). *Compendio estadístico 2018 : Secretaría Técnica de Planificación (STP)*. Fernando de la Mora. Disponible en: <https://www.dgeec.gov.py/Publicaciones/Biblioteca/documento/6a53-Compendio%20Estadistico%202018.pdf>
- Encina-Rojas, A., Ríos-Velazquez, D., Sevilla-Linares , V., Villarreal, S., Ken M.,M. A., Olivera, C., Vargas, R., Olmedo, F., Barreras, A. & Guevara, M (2023). First soil organic carbon report of Paraguay. *Geoderma Regional*, 32 (2023) e00611. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235200942300007X>
- Evanko, C. R. & Dzombak, D. A. (1997). Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater. *Technology Evaluation Report*, 61 p. Disponible en: <https://hwbdocuments.env.nm.gov/Los%20Alamos%20National%20Labs/General/31171.pdf>
- Fadigas, F. S., Sobrinho, N. M. B. A., Mazur, N., Anjos, L. H. C. & Freixo, A.A. (2006). Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10, 699–705. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9dmfb9Z5RXtXqYRTkLr97hQ/abstract/?format=html&lang=en>
- Fretes, E., Rasche, J. W., Fatecha, D. A., Karajallo, J. C. & Aguayo, S. (2017). Épocas e fontes de aplicação de zinco, e seu efeito na cultura do trigo. *Revista Cultivando o Saber*, 10(1), 58-68. Disponible en: https://www.fag.edu.br/upload/revista/cultivando_o_saber/5924224b4a2fd.pdf
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz G., C., Encina, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça S. B., M. L., Montanarella, L., Muniz ,U. O., Schad, P., Vara R., M. I. & Vargas, R. (eds). (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. 176 p. Disponible en: <https://euroclimaplus.org/idiomas/atlas-de-suelos-de-america-latina-y-el-caribe>
- Giroto, E., Ceretta, C. A., Brunetto, G., Santos, D. R., Silva L. S., Lourenzi C. R., Lorensini, F., Vieira R., C. B. é Schmatz, R. (2010). Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquido de suínos. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 34, 955-965. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sjSBZkNggmdtmc9kt6zfR6g/abstract/?lang=pt>
- González, A., Szostak, J. y Morel, J. (2017). Fertilización del cultivo de trigo con micronutrientes boro, cobre, zinc y cloro en un suelo arcilloso rojo bajo siembra directa en Capitán Miranda-Paraguay. *Tecnología Agraria*, 2(1), 24-28.
- González P., R. E. (2017). *Análisis de la variabilidad del clima en la región Oriental del Paraguay en el período 1960-2012*. (Tesis Grado en Ingeniería Ambiental). San Lorenzo: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. 107 p.
- Hugen, C., Miquelluti, D. J., Campos, M. L., Almeida, J. A., Ferreira E. R., N. C. é Pozzan, M. (2013). Teores de Cu e Zn em perfis de solos de diferentes litologias em Santa Catarina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 622-628. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600008>
- Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*. 3 ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 413 p. Disponible en: <https://hwbdocuments.env.nm.gov/Los%20Alamos%20National%20Labs/References/9372.PDF>
- Linhares, L. A., Egreja F., F. B., de Bellis, V. M., dos Santos, E. A. é Ianhez, R. (2010). Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros. *Acta Agronômica*, 59(3), 303-315. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122010000300006&lng=en&lng=pt
- López, O., González, E., Llamas, P., Molinas, A., Franco, E., García, S. y Ríos, E. (1995). *Estudio de reconocimiento de suelo, capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la Región Oriental del Paraguay*. Asunción: MAG, BIRF, 246 p.
- López, C., Vera, A. y González, A. (2019). Efecto de tres formas de aplicación de zinc y boro en el cultivo de maíz. *Tecnología Agraria*, 2(2), 29-39.
- Misi, A. (2016). Zinco no Brasil: tipos de depósito, reservas e produção. In: Melfi, AJ, Misi, A, Campos D.A, Cordani, U.G (Orgs). *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*, pp. 156-164. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciência. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Aroldo-Misi/publication/317168723_Zinco_no_Brasil_tipos_de_depositos_reservas_e_producao/links/59283dd8a6fdcc4443551376/Zinco-no-Brasil-tipos-de-depositos-reservas-e-producao.pdf
- Osorio V., L. R., Rasche A., J. M., González B., A. N., Leguizamón R., C. A. y Fatecha F., D. A. (2021). Fertilización con zinc en trigo, maíz y sésamo en suelos de diferentes texturas. *Investigación Agraria*, 23(2), 53-62. Disponible en: <http://scielo.iics.una.py/pdf/ia/v23n2/2305-0683-ia-23-02-53.pdf>
- Pastén, M., González, V. y Espínola, C. (2011). *Clasificación Climática del Paraguay Utilizado los Métodos de Köppen y Thornthwaite*. Asunción: Universidad Nacional de Asunción. 17 p. Disponible en: <http://sdi.cnc.una.py/catbib/documentos/525.pdf>
- Pelozato, M., Hugen, C., Campos, M. L., Almeida, J. A. de,

- Silveira, C. B. da, Miquelluti, D. J. é Souza, M. C. de. (2011). Comparação entre métodos de extração de cádmio, cobre e zinco de solos catarinenses derivados de basalto e granito magmático. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 10, 54-61. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/234149833.pdf>
- Prieto A., M. (2018). *Relación de algunos micronutrientes con el pH y materia orgánica en suelos bajo diferentes usos*. (Tesis Maestría en Nutrición de Planta y Producción Agrícola). Minga Guazú: Universidad Nacional del Este. Facultad de Ingeniería Agronómica, 49 p.
- Rolón G., M.P. (2011). *Disponibilidad de micronutrientes en suelos de la región Oriental del Paraguay*. (Tesis Grado en Ingeniería Agronómica). San Lorenzo: Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias, 94 p.
- Sadeghzadeh, B. (2013). A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 905-927. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>
- Servicio Nacional de Calidad y Salud Animal (SENACSA). (2020). *Avances estadísticos 2020*. Disponible en: https://www.senacsa.gov.py/application/files/3716/0009/0661/Avances_Estadistica_2020-12.pdf
- Taiz, L. y E. Zeiger. (2013). *Fisiología vegetal*. 5ª ed. Asociados Sinauer, Sunderland, MA.
- Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H. e Volkweiss, S. J. (1995). Análises de solo, plantas e outros materiais Porto Alegre: UFRGS , 174 p.
- Torri, S., Urricarriet, S., Ferraris, G. N. y Lavado. R. S. (2010). Micronutrientes en agrosistemas. En Alvarez, R., G. Rubio, C.R. Alvarez, y R.S. Lavado (Eds.). *Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la región pampeana*, pp. 395-423. Buenos Aires: Facultad de Agronomía-
- Van Raij, B. (2011). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba, Brasil, International Plant Nutrition Institute, 420 p.