

Fertilización con zinc en trigo, maíz y sésamo en suelos de diferentes texturas

Zinc fertilization in wheat, corn and sesame in soils of different textures

Leticia Raquel Osorio Vera¹ , Jimmy Walter Rasche Alvarez^{2*} , Alicia Noemi González Blanco¹ 
Carlos Andrés Leguizamón Rojas² , Diego Augusto Fatecha Fois² 

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

² Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias, Área Suelos y Ordenamiento Territorial. San Lorenzo, Paraguay

*Autor para correspondencia:
jwrasche@yahoo.com.ar

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

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

Contribución de autoría:
Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales en la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de datos, a la revisión del manuscrito y la aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Historial:
Recibido: 14/10/2020
Aceptado: 30/07/2021

Periodo de Publicación:
Junio-Diciembre de 2021

RESUMEN

El zinc (Zn) es un nutriente esencial para las plantas, sin embargo, aún existen escasos estudios de fertilización relacionados a este nutriente en Paraguay. El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de la aplicación de Zn sobre los cultivos de trigo, maíz y sésamo en dos suelos de diferentes texturas. La investigación fue realizada en ambiente controlado, en macetas con 5 kg de suelo, entre febrero de 2017 a enero de 2018. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con arreglo bifactorial, con 5 repeticiones. Los factores evaluados fueron: Factor 1, texturas de suelo (franco arenosa y arcillosa) y dosis de Zn (0, 10, 20, 40 y 80 mg kg⁻¹ de Zn) aplicados antes de la siembra del trigo y maíz, evaluando el efecto residual del Zn en el sésamo. Se determinó el nivel de Zn en el suelo y en el tejido, la altura de planta y el peso de materia seca. La textura del suelo no influyó en el contenido de Zn en el suelo y en el tejido foliar de las plantas. El contenido de zinc en el suelo y la concentración de Zn en el tejido aumentaron en forma lineal a mayor dosis de Zn aplicada. La altura de planta fue afectada por la textura del suelo en los tres cultivos y la producción de materia seca en las gramíneas. El Zn aumentó la altura de planta de trigo y maíz, no así la del sésamo. La materia seca y la altura de planta del trigo y maíz aumentaron en el suelo arenoso, no así en el sésamo. El maíz y el trigo presentaron efecto significativo en parámetros de crecimiento en función a las dosis de Zn aplicadas en el suelo arenoso. La producción de materia seca sufrió interacción entre suelo y dosis de Zn en el trigo y maíz. La aplicación de Zn permite el aumento de los niveles de este en el suelo y en el tejido de las plantas, pero no siempre en la producción de materia seca.

Palabras claves: Zinc en el tejido, zinc en el suelo, sulfato de zinc, dosis de zinc.

ABSTRACT

Zinc (Zn) is an essential nutrient for plants, however, there are still few studies related to this nutrient in Paraguay. The aim of this experiment was to evaluate the effect of the application of Zn on wheat, corn and sesame crops in two soils of different textures. The experiment was carried out in a greenhouse, in pots with 5 kg of soil, between February 2017 and January 2018. The experimental design used was completely randomized with a bifactorial arrangement, with 5 repetitions. The factors evaluated were: Factor 1, soil textures (sandy and clay loam) and Zn doses (0, 10, 20, 40 and 80 mg kg⁻¹ of Zn) applied before sowing wheat and corn, evaluating the residual effect of Zn in sesame. The Zn level in the soil and in the tissue, the plant height and the dry matter weight were determined. The soil texture did not influence the Zn content in the soil and in the leaf tissue of the plants. The zinc content in the soil and the Zn concentration in the tissue increased linearly with the higher dose of Zn applied. Plant height was affected by soil texture in the three crops and dry matter production in grasses. Zn increased the plant height of wheat and corn, but not that of sesame. Dry matter and plant height of wheat and corn increased in sandy soil, not so in sesame. Corn and wheat showed a significant effect on growth parameters depending on the Zn doses applied to the sandy soil. Dry matter production suffered interaction between soil and Zn doses in wheat and corn. The application of Zn allows the increase of its levels in the soil and plant tissue, but not always in the production of dry matter.

Key words: Zinc in tissue, zinc in soil, zinc sulfate, zinc dose.

INTRODUCCIÓN

El Zinc (Zn) es uno de los micronutrientes que presenta mayor deficiencia en los suelos a nivel mundial, agravándose por el avance e intensificación de la agricultura, sobre todo, en aquellos suelos de

menor fertilidad natural y más arenosos (Pelozato et al., 2011; Hugen et al., 2013). Este elemento no solo es importante para las plantas sino también para la salud humana (Sadeghzadeh, 2013).

El Zn cumple un rol importante en varios procesos bioquímicos en los vegetales; participa en la síntesis de proteínas, activación de enzimas, integridad de membrana plasmática, división celular, fotosíntesis y resistencia al estrés biológico (Sadeghzadeh, 2013). Por tanto, una deficiencia del mismo origina alteraciones en el crecimiento y desarrollo de plantas, traduciéndose en reducción de rendimiento de los cultivos (Escudero et al. 2012; Rehman, Farooq, Ozturk, Asif y Siddique, 2018).

Inicialmente, el Zn puede encontrarse formando parte de un gran número de minerales; particularmente, en los ferromagnesianos como la augita, la hornblenda y la biotita, unidos al magnesio (Mg) y al hierro (Fe), formando parte de la estructura mineral donde se encuentra sustituido isomórficamente por los mismos, por contar con el mismo radio iónico. Además, puede ser parte de sales de alta solubilidad y de corta permanencia en los suelos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Uribe, 2005).

Comúnmente la concentración de Zn en el suelo varía entre 10 a 300 mg kg⁻¹, con un valor promedio de 50 mg kg⁻¹ (Pelozato et al., 2011; Huguen et al., 2013), sin embargo, su contenido y disponibilidad es muy variable y puede ser deficiente por razones varias, atribuidas al material de origen, la textura del suelo, a efectos antagonistas con otros nutrientes como el fósforo (P), a valores de pH alcalino en el suelo (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). El Zn disponible o lábil es directamente proporcional al contenido de materia orgánica del suelo, refiriéndose a que más del 50% de este ion forma complejos con la materia orgánica soluble (Wo et al., 2021).

La disponibilidad de Zn en el suelo también es influenciada por algunas prácticas agrícolas. En este sentido, la excesiva aplicación de cal agrícola, sumada a la alta aplicación de P, pueden resultar en disminución de la absorción de este elemento por las plantas (Fageria, 2000), prácticas habituales sistemas mecanizados de producción de granos. Todos estos factores relacionados a las condiciones intrínsecas del suelo, como la textura, y las actividades de manejo del suelo, generan variabilidad en la disponibilidad del Zn y complejizan la decisión de las dosis de aplicación de este nutriente. Además, en el país se suma, la limitada investigación en relación

a este elemento, y en ellos generalmente no son evaluados la concentración del Zn en el suelo y en la planta (Cristaldo y Paredes, 2013; Fretes, Rasche, Fatecha, Karaillo y Aguayo, 2017; González, Szostak y Morel, 2017). Rolón (2021) constató que a nivel de la región oriental del Paraguay el 74% de los distritos se presentaron nivel "alto" de Zn.

Los cultivos de trigo y maíz son dos cereales muy importantes en la agricultura paraguaya mecanizada, el maíz es el segundo cultivo de granos más sembrado en superficie durante la zafra de verano (después de la soja) con casi 885.000 ha, en tanto, el trigo es el cereal con mayor superficie de siembra en la zafra de invierno, alcanzando 430.000 ha (CAPECO, 2020). Ambos cereales presentan alta exigencia en Zn para alcanzar altos rendimientos. Por su parte, el cultivo de sésamo es sembrado en Paraguay principalmente en pequeñas fincas, constituyendo el principal rubro de renta en la agricultura familiar.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de dosis de Zn sobre los cultivos de trigo, maíz y sésamo en suelos de diferentes texturas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en ambiente controlado (invernadero, tipo cenital) con un diseño completamente al azar, en esquema bifactorial, donde el factor 1 consistió en dos texturas de suelo (franco arenoso y arcilloso) y el factor 2 en cinco dosis de Zn (0, 10, 20, 40 y 80 mg kg⁻¹ de Zn), con cinco repeticiones, totalizando 50 unidades experimentales.

Los suelos fueron colectados en la camada 0-20 cm, el suelo de textura franco arenosa pertenece al distrito de San Lorenzo, departamento Central, clasificado como Rhodic Paleudult y el suelo de textura arcillosa fue colectado del distrito de Katueté, departamento de Canindeyú clasificado como Rhodic Kandiodox, (López et al., 1995). Ambos suelos son representativos del área de la investigación, cuyos resultados de análisis químicos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características químicas y contenido de arcilla de los suelos utilizados en el experimento.

Suelo	pH	MO	Zn	P	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	CIC	Arcilla
	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		.....cmol _c kg ⁻¹						g kg ⁻¹
Franco arenosa	5,2	4	1,8	6,3	0,43	0,18	0,09	0,01	0,87	3,67	170
Arcillosa	4,5	27	1,7	0,2	0,38	0,45	0,04	0,00	1,25	8,81	560

Extractores: pH= Agua; MO= Walkley y Black; P, K⁺ y Zn⁺² = Mehlich 1; Ca⁺², Mg⁺², Na⁺ y Al⁺³ = KCl 1mol L⁻¹; Textura por Bouyoucus

Las muestras de suelo colectadas fueron secadas al aire, pasadas por tamiz con malla de 4 mm. Los niveles de acidez fueron corregidos con aplicación de CaCO_3 e MgCO_3 (proporción molar 3:1 de Ca:Mg) para elevar el valor de pH entre 5,5 a 6,0. También fue adicionada la dosis equivalente a 150 kg ha^{-1} de P_2O_5 en la forma de superfosfato simple (0-22-0) y 200 kg ha^{-1} de K_2O en la forma de cloruro de potasio (0-0-60), en tanto que, el N fue adicionado semanalmente conjuntamente con el agua de riego, utilizando la urea (45-0-0) como fuente nitrogenada. Estas correcciones se realizaron a fin que estos nutrientes y la acidez inicialmente detectada no limiten el crecimiento en los tres cultivos conducidos en la investigación.

El suelo previamente tratado y seco al aire, fue pesado (5 kg) y acondicionado en cada maceta con volumen de 5.000 cm^3 , posteriormente irrigado a 70% de capacidad de campo y mantenido a esta humedad por 15 días, a fin que los correctivos aplicados reaccionen con el suelo. Posteriormente fueron adicionadas las dosis de Zn en la forma de sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) P.A., antes de la siembra del trigo (variedad Canindé 31) y del maíz (variedad Guarani V313), evaluando el efecto inmediato en estos cultivos y el efecto residual en el sésamo (variedad Escoba blanca).

Los cultivos de trigo, maíz y sésamo, se sembraron en junio, setiembre y noviembre de 2018, respectivamente, se colocaron diez semillas por maceta, y posteriormente fue realizado un raleo a los diez días de la emergencia de las mismas, dejando cinco plantas por maceta, para maximizar la extracción de Zn y promediar los resultados. Durante el experimento la humedad del suelo fue mantenido próxima a 70% de la capacidad de campo, a través de riego manual aplicando mismo volumen a todas las macetas, con frecuencia de una a tres veces al día durante el ciclo de cada cultivo, a fin de reponer el agua perdida por evapotranspiración, que fue estimado considerando el peso promedio de las macetas en capacidad de campo.

Las plantas de trigo, maíz y sésamo fueron evaluadas a los 70, 60 y 60 días después de la siembra, respectivamente, determinándose altura de planta y producción de materia seca de parte aérea. A su vez

fueron determinadas las concentraciones de Zn en el suelo y en el tejido foliar.

La determinación de la altura de planta, fue realizada a partir de las cinco plantas de cada maceta, utilizando una regla graduada en centímetros, tomando como referencia la distancia del suelo hasta el ápice de la planta y para la producción de materia seca de la parte aérea, todas las plantas fueron cortadas al ras del suelo y posteriormente secadas en estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta mantener peso constante, luego fue cuantificada la materia seca en una balanza de precisión de dos decimales.

El contenido de Zn en el suelo fue determinado de acuerdo al método de Mehlich 1, descrita por Tedesco, Gianello, Bissani, Bohnen y Volkweiss (1995); para el efecto fueron colectadas las muestras de suelo posterior a la cosecha de cada cultivo en la camada de 0-10 cm. La determinación de la concentración de Zn en la parte aérea de la planta se realizó en las mismas muestras de la materia seca aérea, que luego de ser pesadas, fueron trituradas en un molino y pasadas al laboratorio para la digestión ácida y determinación en espectrofotómetro de absorción atómica (Tedesco et al., 1995). Ambas determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de Suelos y Ordenamiento Territorial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA), San Lorenzo.

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de variancia (ANAVA) y las medias fueron comparadas por el test de Tukey al nivel de significancia de 5% de probabilidad de error y análisis de regresión, utilizando la herramienta estadística ASSISTAT 7.7 (Silva y Azevedo, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La textura del suelo presentó efecto sobre la altura de planta y la producción de materia seca aérea del trigo, no así sobre la concentración del Zn en el suelo y en la planta. Por otra parte, se observó interacción entre el factor textura del suelo y las dosis de Zn aplicadas en la variable producción materia seca aérea del cultivo (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de Zn en el suelo, contenido de Zn en el tejido, altura, materia seca aérea (MS aérea) del trigo por efecto de la aplicación de dosis de Zn en suelos franco arenoso y arcilloso. San Lorenzo, 2018.

Textura del suelo	Zn en el suelo	Zn en el trigo	Altura	MS aérea*
	..... mg kg^{-1} .....	.....	cm	g maceta ⁻¹
Franco arenosa	8,6 ^{ns}	31,3 ^{ns}	68,9 a	9,0 b*
Arcillosa	8,6	29,2	64,4 b	10,6 a
DMS	1,8	4,4	2,0	0,6
CV (%)	36,1	25,7	5,2	10,7

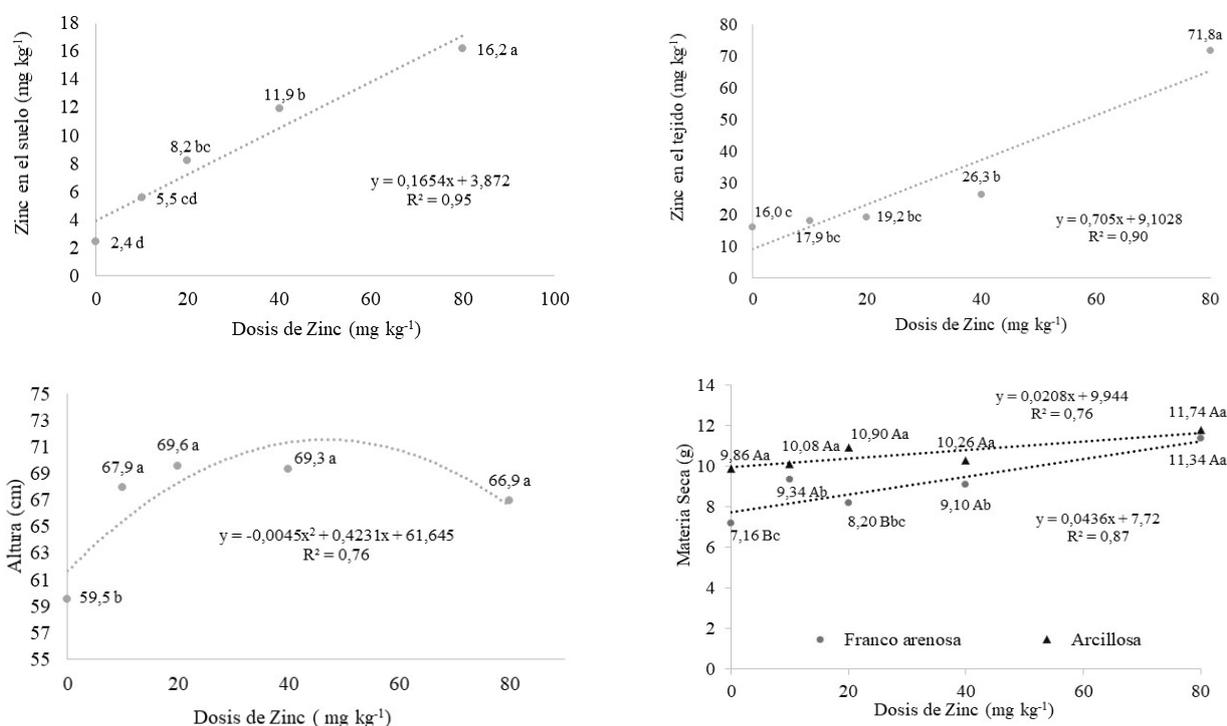
Medias seguidas por letras diferentes en las columnas difieren estadísticamente por el test de Tukey al 5% de probabilidad de error. ns: diferencia no significativa entre medias en la columna. DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación. * Presenta interacción entre factores.

El contenido de Zn en el suelo y su concentración en la planta no se vieron influenciados por la textura del suelo, probablemente, porque ambos suelos son originalmente ácidos e intemperizados, por lo tanto, se puede afirmar que la disponibilidad de Zn no es afectada por la textura del suelo a diferencia de lo que ocurre con otros elementos, como el P (Cubilla, Wendling, Eltz, Amado y Mielniczuk, 2012). En tanto que, la altura de planta de trigo fue superior en el suelo de textura franco arenosa; dicho resultado posiblemente sea debido a que, cuando los experimentos son manejados en condiciones controladas permiten una mayor disponibilidad de agua y nutrientes, traducidos en un mayor crecimiento del cultivo, ya que los mismos dejan de ser factores limitantes como ocurre en condiciones de campo.

Las dosis de Zn influenciaron en todas las variables analizadas. En relación al contenido de Zn en el suelo, se observó incremento lineal al aumentar la dosis, ajustándose a la ecuación: (Contenido de zinc en el suelo = $0,1654x + 3,872$; $R^2 = 0,95$), indicando un incremento de $0,1654 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn por cada mg kg^{-1} de Zn adicionado al suelo (Figura 1a). Constatase que al aplicar mayores dosis de Zn este es acumulado en el suelo, por lo que puede ser utilizado como estrategia de fertilización de Zn a mediano y largo plazo en el sistema, e inclusive puede alcanzar concentraciones muy altas que podrían ser tóxicas para los cultivos (Cunha, Nascimento, Pimentel, Accioly y Silva (2008), fenómeno que aparentemente no ocurrió en el presente experimento.

Los valores de Zn en el suelo fueron superiores a los establecidos por Fageria (2000), quien menciona valores de $0,5$ a 5 mg kg^{-1} extraídos por Mehlich-1, como niveles adecuados de Zn en el suelo, pero igualmente el cultivo presentó respuesta en el suelo de textura franco arenosa. Hernandez et al. (2009), también observaron aumento significativo en la concentración del Zn en el suelo, aplicando dosis hasta 240 mg kg^{-1} observaron aumento hasta 120 mg kg^{-1} de zinc en el suelo. Resulta muy importante que el Zn se encuentre disponible en el suelo, principalmente la fase inicial de crecimiento del cultivo, para estimular el desarrollo radicular y la translocación vía xilema de minerales para otras partes de la planta (Tavares et al., 2015).

La concentración de Zn en la parte aérea del trigo, aumentó linealmente con la aplicación de Zn en el suelo, ajustándose a la ecuación (Concentración de zinc en el tejido del trigo = $0,705x + 9,1028$, $R^2 = 0,90$), con concentración máxima de $71,8 \text{ mg kg}^{-1}$ en el tejido cuando fueron aplicados 80 mg kg^{-1} de Zn (Figura 1b), muy superior a la concentración crítica de Zn en el trigo establecida por Brennan & Bolland (2006) que es de 14 mg kg^{-1} . A partir de la ecuación se verifica una tasa de incremento de $0,705 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn en el tejido del trigo por cada mg kg^{-1} de Zn adicionado al suelo.



Medias seguidas por letras minúsculas diferentes difieren estadísticamente entre dosis de Zn y letras mayúsculas entre textura para cada dosis (en caso de materia seca) por el test de Tukey al 5% de probabilidad de error.

Figura 1. Contenido de Zn en el suelo (a) y contenido de Zn en el trigo (b), altura de trigo (c), producción de materia seca aérea (d), por efecto de la aplicación de dosis de zinc en dos suelos de texturas diferentes. San Lorenzo, 2018.

Los resultados obtenidos en el experimento concuerdan con los de Madruga, Brião, Torales, Suarez y Souza (2015) quienes también observaron que el Zn de la parte aérea se incrementó al aumentar las dosis de $ZnSO_4$, en el suelo. La adición de Zn al suelo aumenta la concentración de este elemento en la planta, aspecto muy importante para el mejoramiento de la calidad de los alimentos destinados al consumo humano, mismo que no siempre produzca aumento de la producción de los cultivos (Sadeghzadeh, 2013; Rehman et al., 2018). Según Haslett, Reid y Rengel (2001) en general, la concentración del Zn en las plantas varía entre 30 y 80 $mg\ kg^{-1}$.

La altura de planta se incrementó en todos los tratamientos con aplicación de Zn con relación al testigo, ajustándose a una ecuación cuadrática ($altura\ de\ planta = 0,0045x^2 + 0,4231x + 61,645$, $R^2 = 0,76$), obteniéndose una altura máxima de 71,6 cm, con aplicación de 47,0 $mg\ kg^{-1}$ de Zn (Figura 1a). Cabe destacar que el incremento significativo de la altura se obtuvo al comparar el testigo con algunos de los tratamientos con adición de Zn, no verificándose diferencias significativas en esta variable, entre los tratamientos con aplicación de dosis de Zn. Con la aplicación de 10 $mg\ kg^{-1}$ de Zn se aumentó la altura de planta en 14,1% en relación al testigo (8,4 cm).

Estos resultados no coinciden con los obtenidos por Georjin, Lazzari, Lamego y Camponogara (2014) que aplicando Zn al cultivo de trigo obtuvieron mayor longitud total de plántulas, pero no una mayor altura final. Por su parte Fretes et al. (2017) en un experimento a campo, tampoco observaron respuesta en la altura del cultivo de trigo por la aplicación de Zn.

Con relación a la materia seca de la parte aérea presentó interacción entre la textura del suelo y la dosis de Zn aplicada. En el suelo de textura arcillosa no hubo aumento de materia seca por efecto de la aplicación de Zn, sin embargo, en el suelo de textura franco arenosa hubo aumento lineal de la misma en función al aumento de la dosis de Zn, ajustándose a la ecuación: ($Materia\ seca\ aérea = 0,0436x + 7,72$; $R^2 = 0,87$), observándose que con la mayor dosis (80 $mg\ kg^{-1}$ de Zn) se obtuvo un incremento del 58,4% en la producción de materia seca, cuando comparado con el testigo (Figura 1c).

Es común observar respuesta significativa del trigo a la aplicación de Zn. Madruga et al. (2015) obtuvieron mayor producción de materia seca aérea de trigo, con las dosis de 3 mL de $ZnSO_4$ aplicados a las semillas, lo que se tradujo en un aumento de la producción de 61,8% comparado con el testigo. Así mismo Fageria (2000) verificó que la producción de materia seca aérea del trigo fue influenciada por las dosis de Zn, obteniendo 2,05 $g\ maceta^{-1}$ con la aplicación de 5 $mg\ kg^{-1}$ de Zn, en comparación al testigo que obtuvo 1,90 $g\ maceta^{-1}$.

Entre las funciones del Zn en la planta, se destaca que el mismo actúa como activador de varias enzimas, pieza fundamental en el metabolismo de la hormona auxina, asociada a la asimilación de N dentro de la planta, permitiendo que esta pueda desarrollarse adecuadamente cuando la cantidad de N no es limitante, asimismo, plantas con abundante Zn presentan mayor división y elongación de células, permitiendo mayor crecimiento radicular y por lo tanto tienen mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes (Sadeghzadeh, 2013).

En el experimento con maíz, hubo interacción entre la textura del suelo y la dosis de Zn aplicada sobre la producción materia seca aérea, no así en la altura de planta, Zn en el tejido y Zn en el suelo; variables que fueron influenciados solamente por las dosis de Zn, no observándose efecto de la textura del suelo sobre los mismos (Tabla 3).

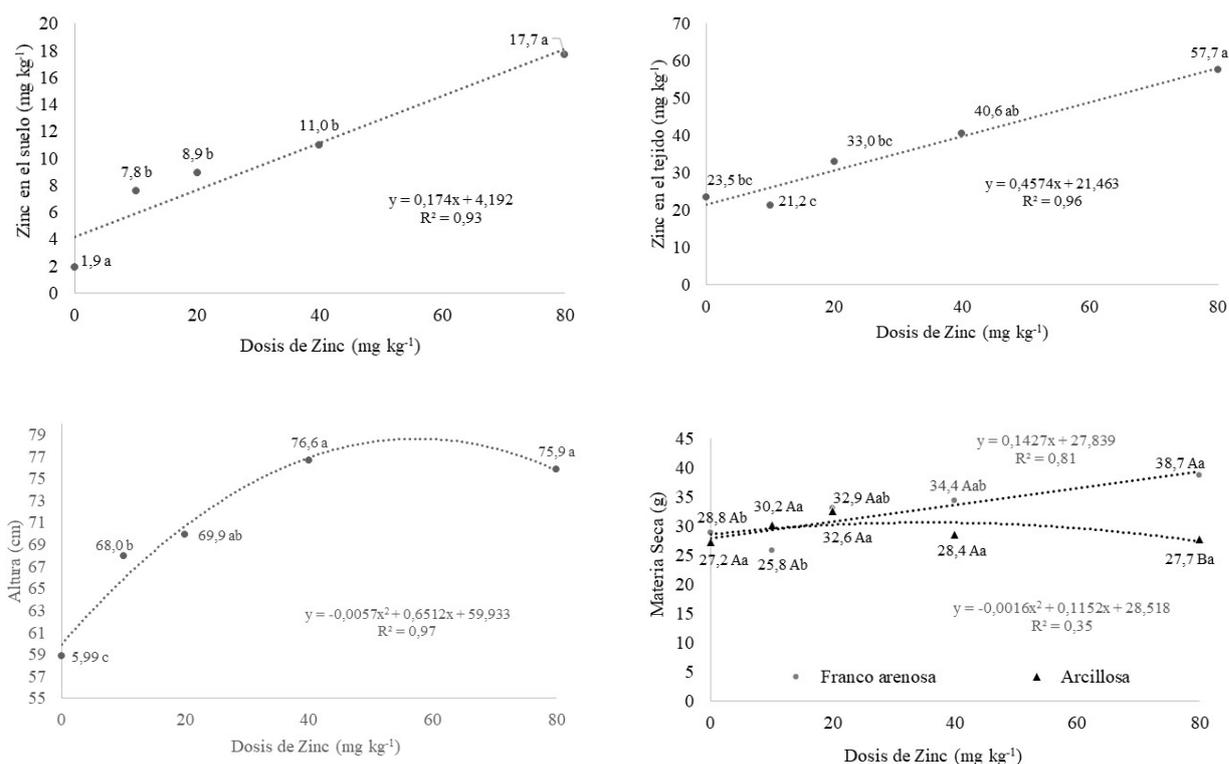
La altura de planta del maíz no fue influenciada por la textura del suelo. Como mencionado anteriormente, es muy probable que en condiciones controladas las plantas reciben abundante cantidad de agua y nutrientes, entonces estas no influyen negativamente en la altura de planta, así como también se observa que la textura del suelo no afecta la disponibilidad de Zn al cultivo cuando este es aplicado como fertilizante, como ocurre en el presente experimento. La concentración de Zn en el tejido foliar tampoco se vio influenciada por la textura del suelo (Tabla 3).

El contenido de Zn en el suelo aumentó linealmente con la aplicación de Zn (Figura 2a), ajustándose a una ecuación lineal: ($Contenido\ de\ zinc\ en\ el\ suelo = 0,174x + 4,192$; $R^2 = 0,93$), inicialmente con valor de Zn de 1,90 $mg\ kg^{-1}$, con niveles de hasta 17,7 $mg\ kg^{-1}$ de Zn en el suelo.

Tabla 3. Contenido de Zn en el suelo, contenido de Zn en el tejido, altura y materia seca aérea (MS aérea) del maíz por efecto de la aplicación de dosis de Zn en suelos franco arenoso y arcilloso. San Lorenzo, 2018.

Textura del suelo	Zinc en el suelo	Zinc en la planta	Altura	MS aérea del maíz
	..... $mg\ kg^{-1}$ .....	.....	
Franco arenosa	9,0 ^{ns}	36,9 ^{ns}	70,4 ^{ns}	32,1 a*
Arcillosa	9,9	33,4	69,3	29,2 b
DMS	1,8	7,6	3,2	2,8
CV (%)	30,6	37,6	8,0	16,1

Medias seguidas por letras diferentes en las columnas difieren estadísticamente entre sí por el test de Tukey al 5% de probabilidad de error. ns: diferencia no significativa entre medias en la columna. DMS: Diferencia mínima significativa. CV: Coeficiente de variación. * Presenta interacción entre factores.



Medias seguidas por letras minúsculas diferentes difieren estadísticamente entre dosis de Zn y letras mayúsculas entre textura para cada dosis (en caso de materia seca) por el test de Tukey al 5% de probabilidad de error.

Figura 2. a) Contenido de Zn en el suelo, b) contenido de Zn en el maíz, c) Altura del maíz y d) producción de materia seca aérea, por efecto de la aplicación de dosis de zinc en dos suelos de texturas diferentes. San Lorenzo, 2018.

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). El Zn se mueve en el suelo por proceso de difusión, por lo que su acumulación es factible en el suelo a largo plazo (Giroto et al., 2010), a consecuencia de la fertilización frecuente, reduciéndose la posibilidad de deficiencia de Zn en los cultivos.

De la misma manera, Hernandez et al. (2009) encontraron que, con la aplicación de dosis de 15, 30, 60, 120 y 240 mg kg⁻¹ de Zn, aumentó la concentración del nutriente en el suelo, alcanzando un valor máximo de 120 mg de Zn kg⁻¹, nivel considerado como alto. También, Ritchey, Frederick, Galrao y Russells (1986) quienes estudiando la disponibilidad de Zn para el cultivo de maíz, afirmaron que a medida que las aplicaciones de Zn aumentaron, la concentración del elemento en el suelo también aumentó, registrándose un valor máximo de 4,2 mg kg⁻¹ de Zn en el suelo con dosis de 27 kg ha⁻¹ de Zn.

La concentración de Zn en la parte aérea del cultivo de maíz tuvo un aumento lineal en función al incremento de la dosis de Zn aplicadas, ajustándose a la ecuación: (Concentración de zinc en el tejido = $0,4574x + 21,463$; $R^2 = 0,96$) (Figura 2b). La máxima dosis aplicada al suelo (80 mg kg⁻¹ de Zn) acumularon 57,7 mg kg⁻¹ de Zn en el tejido, siendo el doble de la concentración de Zn en el tejido comparado con el tratamiento testigo.

La concentración de Zn en el testigo podría considerarse adecuado, sin embargo, el nivel de suficiencia varía mucho de acuerdo a la literatura (Galrao, 1995; Fageria, 2000; Galrao, 2004). Fageria (2000) determinó que los niveles adecuados de Zn en el tejido de la planta varían de acuerdo a cada cultivo que van de 18 a 67 mg kg⁻¹ y los tóxicos de 100 y 673 mg kg⁻¹. Los resultados obtenidos en el presente experimento son similares a los obtenidos por Steiner et al (2011), quienes observaron aumento lineal de la concentración de Zn en el tejido de maíz cuando fueron aplicados dosis sucesivas del nutriente. Del mismo modo, Ernani, Bittencourt, Valmorbidia y Cristani (2001) en el cultivo de maíz y Reis et al. (2018) en el cultivo de trigo observaron comportamientos similares, en donde a medida que aumenta la concentración de Zn en el suelo, aumenta la acumulación de zinc en las plantas.

Las dosis de Zn, influenciaron sobre la altura de planta de maíz, ajustándose a la ecuación: (Altura de la planta = $0,0057x^2 + 0,6512x + 59,933$; $R^2 = 0,97$), con aumento de altura de hasta 78,5 cm, con la aplicación de Zn de 57,1 mg kg⁻¹ (Figura 2c).

Contrariamente a lo observado en este experimento, Alvarado (2002) y Garcia (2018) no encontraron diferencia estadística por la aplicación de dosis de Zn en la altura de planta del maíz.

La producción de materia seca de la parte aérea

del maíz, presentó interacción entre el factor textura del suelo y el factor dosis de Zn (Figura 2d), observándose aumento de la producción de materia seca de maíz al aumentar las dosis de Zn en el suelo franco arenoso, en tanto que, en el suelo arcilloso no se presentó tal efecto.

Considerando que no existe diferencia en el nivel de Zn entre ambos suelos, el aumento de la materia seca en un solo suelo puede tener relación a otros factores del mismo, que influyan en la planta, aparte del nivel de Zn, como el nivel de la materia orgánica, nivel de P en el suelo, etc., cuya dinámica es diferente en suelos de textura arenosa y arcillosa, y estos finalmente afectar la disponibilidad y absorción de Zn por la planta.

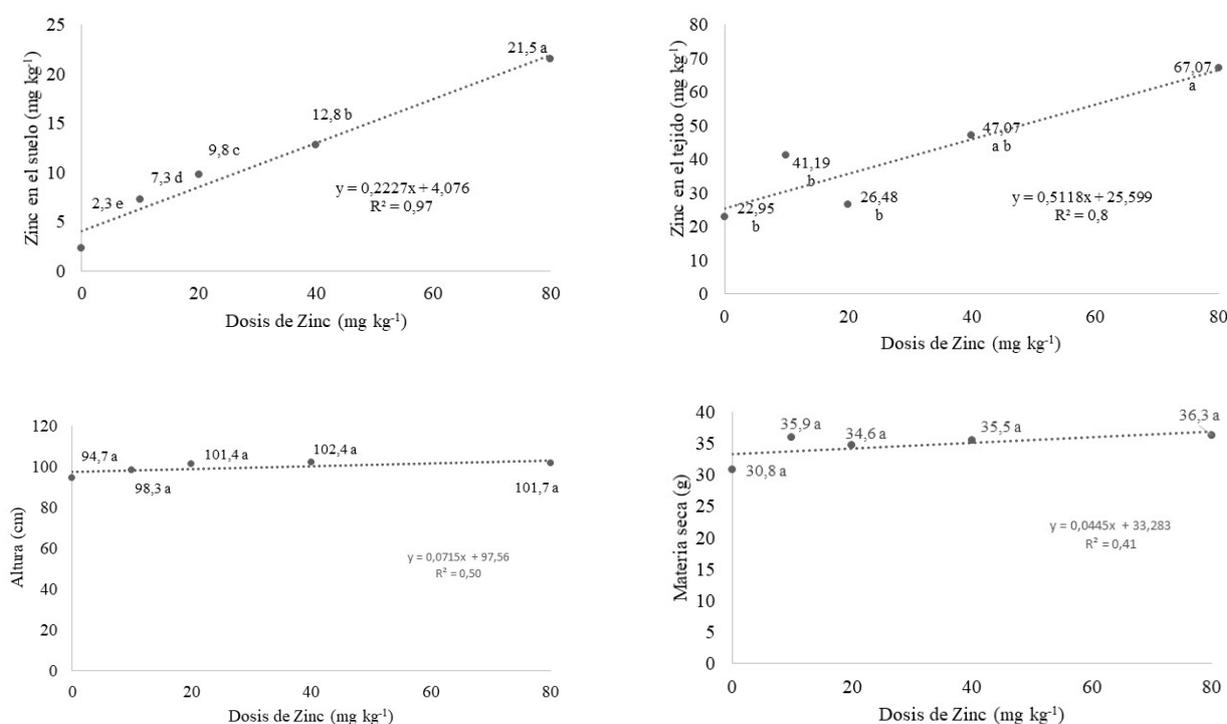
En ese contexto, la absorción adecuada de Zn por la planta ayuda a evitar estrés fisiológico durante su desarrollo, cuya presencia es importante en la síntesis de proteínas y de varios procesos metabólicos (Sadeghzadeh, 2013).

Resultados similares a lo encontrado en el suelo arenoso, fueron obtenidos por Steiner et al. (2011) quienes observaron respuesta del maíz a mayor dosis de Zn de los aplicados en este trabajo (10 kg ha^{-1}). Asimismo, Fageria (2000) resalta que la producción de materia seca del maíz aumentó en 14% con la aplicación de 20 mg kg^{-1} de Zn al suelo en comparación al testigo. Coutinho, Da Silva y Da Silva (2007), observaron que el rendimiento de materia seca de la parte aérea del maíz se incrementó con la aplicación de Zn en el suelo.

Tabla 4. Contenido de Zn en el suelo, contenido de Zn en el tejido, altura, materia seca aérea (MS aérea) del sésamo por efecto residual de la aplicación de dosis de Zn en suelos franco arenoso y arcilloso. San Lorenzo, 2018.

Textura del suelo	Zinc en el suelo	Zinc en el tejido	Altura	MS Aérea
	..... \text{mg kg^{-1}		cm	g
Franco arenosa	10,6 ^{ns}	39,3 ^{ns}	94,7 ^b	30,2 ^b
Arcillosa	10,5	42,6	104,7 ^a	39,0 ^a
DMS	1,1	11,0	3,8	2,7
CV (%)	18,0	47,0	6,6	13,6

Medias seguidas por letras minúsculas diferentes difieren estadísticamente entre dosis de Zn y letras mayúsculas entre textura para cada dosis (en caso de materia seca) por el test de Tukey al 5% de probabilidad de error.



Medias seguidas por letras minúsculas diferentes difieren estadísticamente entre dosis de Zn por el test de Tukey al 5% de probabilidad de error.

Figura 3. Altura de sésamo (a), producción de materia seca aérea (b), contenido de Zn en el suelo (c) y contenido de Zn en el sésamo (d), por efecto residual de la aplicación de dosis de zinc en dos suelos de texturas diferentes. San Lorenzo, 2018.

En relación al cultivo de sésamo, no fueron observadas interacciones entre el factor textura del suelo y dosis de Zn en ninguna de las variables analizadas. La altura de planta y la producción de materia seca fueron influenciadas por la textura del suelo, no así el nivel de Zn en el suelo, ni el nivel de Zn en el tejido de la parte aérea de la planta (Tabla 4).

La altura de planta y la producción de materia seca de la parte aérea del cultivo de sésamo fueron superiores en el suelo de textura arcillosa, en un 10,5% y 29,1%, respectivamente. A partir de estos resultados se verifica que el sésamo requiere de ciertas condiciones que obtiene en el suelo arcilloso, en el trigo y el maíz no fue observado este efecto, evaluando estas dos variables. En relación al nivel de Zn en los dos suelos no se verificaron diferencias, así como, la concentración de este nutriente en el tejido del sésamo. Según Movahhedi, Misagh, Yadavi y Merajipoor (2017) el Zn proporciona resistencia de la planta de sésamo ante condiciones de estrés por deficiencia hídrica.

La concentración de Zn en el suelo (Figura 3a) y en el tejido de la planta (Figura 3b) aumentaron linealmente por efecto residual de la aplicación de Zn adicionadas al suelo. Salwa, Abass y Behary (2010) observaron aumento de la concentración de Zn en los granos del sésamo al aplicar el Zn, siendo mayor la dosis de Zn en el grano mientras mayor era la dosis de Zn aplicada.

Aunque el aumento de Zn en la planta no signifique aumento de la producción de granos se debería aplicar para mejorar la materia prima de los cereales y oleaginosas destinados al consumo humano, tales como el trigo, sésamo y el maíz, ya que se estima que el 37,8% de la población paraguaya consume niveles inferiores a la ingesta recomendada de zinc y el 18% de la población puede tener como consecuencia prevalencia de retraso en el crecimiento que puede ser entre otras causas por la deficiencia de Zn (Cediel, Olivares, Brito, Cori y López, 2015).

En relación a la dosis de Zn, al contrario de los cultivos anteriores, no se observó efecto de la aplicación de Zn sobre la altura de planta (Figura 3c), ni sobre la producción de materia seca del sésamo (Figura 3d) recordándose que en este cultivo se evaluó el efecto residual de las dosis de Zn aplicadas en los cultivos anteriores.

En la literatura se encuentran resultados que mencionan la misma producción en el cultivo de sésamo en suelos con bajo contenido de nutrientes cuando comparado a suelos donde la presencia de elementos es alta, o mismo la falta de respuesta a la fertilización (Rheinheimer, Rasche, Osorio Filho y Silva, 2007; González y Causarano, 2014; González et al., 2017). Sin embargo, Salwa et al. (2010) observaron que la aplicación de una mezcla de micronutrientes (Fe, Zn, Mn) proporcionó aumento de la altura de planta, la producción de materia seca y el rendimiento de granos del sésamo. También Mekdad (2015) aplicando una mezcla de seis micronutrientes vía foliar observó aumento en la altura de planta y en la producción de granos del sésamo.

El aumento del rendimiento de granos del sésamo a la aplicación de Zn puede deberse a que, este activa enzimas que permiten mejorar la eficiencia

de la absorción de otros nutrientes. En este sentido Yadav, Tripathi y Yadav (2009) observaron que cuando aplicaron Zn mezclado con enmienda orgánica, el sésamo mejoró algunas características como altura de planta, producción de materia seca, número de cápsulas y de semillas por planta. Por otro lado, Movahhedi et al. (2017) indican que el Zn proporciona resistencia de la planta de sésamo ante condiciones de estrés por deficiencia hídrica, acción que sería de suma importancia en las parcelas de producción.

CONCLUSIONES

La dosis de Zn proporciona aumento de altura de planta y materia seca en el cultivo de trigo y maíz en el suelo franco arenoso, no así en el suelo arcilloso.

No se observa efecto residual de la aplicación de dosis de Zn en suelos de textura franco arenoso y arcilloso utilizando el sésamo como cultivo indicador. Las dosis de Zn no presentan influencia sobre el cultivo de sésamo.

La concentración de Zn en el suelo y en el tejido de la planta, aumentan linealmente con el incremento de las dosis de Zn aplicadas al suelo, sin ser afectados por la textura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Silva, F. D. & Azevedo, C. A. (2016). The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research*, 11, 3733-3740.
- Alvarado, L. C. (2002). *Respuesta del maíz (Zea mays L.) a la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y zinc en suelos del norte de Tamaulipas*. (Tesis Maestría). Marín Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, Subdirección de estudios de postgrado, Facultad de Agronomía, 103 p.
- Brennan, R. F. & Bolland, M. D. A. (2006). Residual values of soil-applied zinc fertiliser for early vegetative growth of six crop species. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46 (10), 1341. Recuperado de: <https://doi.org/10.1071/EA05154>
- CAPECO. (2020). Área y de siembra, producción y rendimiento. Asunción: Cámara Paraguaya de Cereales y Oleaginosas. Recuperado de: <http://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>
- 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. Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0379572115585781>
- Coutinho, E. L., Da Silva, E. J. & Da Silva, A. R. (2007). Crescimento diferencial e eficiência de uso em zinco de cultivares de milho submetidos a doses de zinco em um latossolo vermelho. *Acta Scientiarum Agronomy* 29 (2), 227-234. Recuperado de: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i2.256>
- Cristaldo A., M. & Paredes F., J. (2013). Producción de *Sesamum indicum* L. influenciada por dosis de diferentes fertilizantes en suelo franco arcilloso. *Investigación Agraria*, 5 (2), 25-

29. Recuperado de: <http://www2.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/163>
- Cubilla A., M. M., Wendling, A., Eltz F. L. F., Amado, T. J. C. & Mielniczuk, J. (2012). *Recomendaciones de fertilización para soja, trigo, maíz y girasol bajo el sistema de siembra directa en el Paraguay*. Asunción: CAPECO, 86 p.
- Cunha, K. P. V. da, Nascimento, C. W. A. do, Pimentel, R. M. de M., Accioly, A. M. A. de & Silva, A. J. da. (2008). Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(3), 1319-1328. Recuperado de: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300039>
- Ernani, P. R., Bittencourt, J., Valmorbidia, J. & Cristani, J. (2001). Influência de adições sucessivas de zinco, na forma de esterco suíno ou de óxido, no rendimento de matéria seca de milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25 (4), 905-911. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000400013>
- Escudero, D. J., Ojeda, D. L., Hernandez, A. O., Sanchez, E., Ruiz, T. & Sida, J. P. (2012). Carbonic Anhydrase and Zinc in Plant Physiology. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72 (1), 1-14. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000100022>
- Fageria, N. K. (2000). Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4 (1), 390-395. Recuperado de: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300014>
- Fretes, E., Rasche, J. W., Fatecha, D. A., Karaillo, 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. Recuperado de: https://www.fag.edu.br/upload/revista/cultivando_o_saber/5924224b4a2fd.pdf
- Galvão, E. Z. (1995). Níveis críticos de zinco para o milho cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo, fase cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 19, 255-259.
- Galvão, E. Z. (2004). *Micronutrientes*. In: D.M.G. de Sousa & E. Lobato (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 185-226 p.
- García, A. R. (2018). *Evaluación de sulfato de zinc sobre el rendimiento de grano de maíz*. (Tesis Ing Agr.) Escuintla, GT: Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, 53 p.
- Georgin, J., Lazzari L., Lamego F. P. & Camponogara, A. (2014). Desenvolvimento inicial de trigo (*Triticum aestivum*) com uso de fitohormônios, zinco e inoculante no tratamento de sementes. *Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas*, 18 (4), 1318-1325. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.5902/2236117014615>
- Giroto, E., Ceretta, C. A., Brunetto, G., Rheinheimer, D. S., Silva, L. S., Lourensini, F., Lourenzi, C.R., Vieira, R. C. B. & Schmatz, R. (2010). Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34 (3), 955-965. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300037>
- González, A. & Causarano M, H. (2014). Destino del nitrógeno aplicado a un cultivo de sésamo en un suelo degradado de Paraguay. *Acta Agronómica*, 63(3), 253 - 261. Recuperado de: <https://doi.org/10.15446/acag.v63n3.42259>
- González, A., Szostak, J. & 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.
- Haslett, B. S., Reid, R. J. & Rengel, Z. (2001). Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany*, 87, 379-386. Recuperado de: <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1349>
- Hernandes, A., Prado, R., Pereira, F., Moda, L. R., Ichinose, J. G. & Guimarães, R. (2009). Desenvolvimento e nutrição do capim-tanzânia em função da aplicação de zinco. *Scientia Agraria*, 10 (5), 383-389. Recuperado de: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/15195>
- Hugen, C., Miquelluti, D. J., Campos, M. L., Almeida, J. A., Ferreira, E. R. N. C. & 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, 622-8. Recuperado de: <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.
- López, O., Gonzalez, E., Llamas, P., Molinas, A., Franco, E., García, S. & Rios, 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, PY: MAG, BIRF, 246 p.
- Madruza, L., Brião, M. F., Torales, J. C., Suarez, C. & Souza, E. (2015). Respuesta de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.) al zinc aplicado en semillas. *Agrociencia* 49(6), 636-623. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n6/v49n6a3.pdf>
- Mekdad, A. A. A. (2015). Effects of planting dates, foliar microelement mixture rates and weeding regimes on performance of sesame crop (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Plant Production*, 6 (12), 2103- 2121. Recuperado de: 10.21608 / JPP.2015.52448
- Movahhedi, D. M., Misagh, M., Yadavi, A. & Merajipoor, M. (2017). Physiological responses of sesame (*Sesamum indicum* L.) to foliar application of boron and zinc under drought stress conditions. *Journal of Plant Process and Function*, 6 (20), 27-36. Recuperado de: <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-578-en.html>
- Pelozato, M., Hugen, C., Campos, M. L., Almeida, J. A. de, Silveira, C. B. da, Miquelluti, D. J. & Souza, M. C. de. (2011). Comparação entre métodos de extração de cádmio, cobre e zinco de solos catarinenses derivados de basalto e granitomigmatito. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 10, 54-61.
- Rehman, A., Farooq, M., Ozturk, L., Asif, M. & Siddique, K. H. M. (2018). Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. *Plant Soil*,

- 422, 283-315. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3507-3>
- Reis G., F.A, Oliveira X, F., Rocha S., R., Angelo de A., L., Mundstock X.C.A. & Ferreira N. R. (2018). Influência da saturação por bases do solo sobre a disponibilidade e absorção de zinco. *Revista Cultura Agrônômica*, 27(2), 262-272.
- Rheinheimer, D. S., Rasche, J. W. A., Osorio Filho, B. D. & Silva, L.S. da. (2007). Resposta à aplicação e recuperação de enxofre em cultivos de casa de vegetação em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica. *Ciência Rural*, 37(2), 363-371. Recuperado de: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200011>
- Ritchey, K. D., Frederick, A., Galrao, E. & Russells, Y. (1986). Disponibilidade de zinco para as culturas do milho, sorgo e soja em latossolo vermelho-escuro argiloso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 21(3),215-225. Recuperado de: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/14705/8393>
- Rolón G., M. P. (2021). *Disponibilidad de micronutrientes en suelos de la región oriental del Paraguay*. (Tesis Grado). San Lorenzo : Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, 95 p.
- Sadeghzadeh, B. (2013). A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13, 905-927. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>
- Salwa A. I. E., Abass, M. M. & Behary, S. S. (2010). Amelioration productivity of sandy soil by using amino acids, sulphur and micronutrients for sesame production. *Journal of American Science*, 6 (11), 250-257. Recuperado de: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/d?doi=10.1.1.1049.8107&rep=rep1&type=pdf>
- Steiner, F., Zoz, T., Junior, A. S. P., Frandoloso, J. F., Ruppenthal, V. & Janegitz, M. C. (2011). Zinco e nitrogênio no desempenho agrônômico do milho safrinha. *Global Science and Technology*, 4 (2), 9-17. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/279977686_ZINCO_E_NITROGENIO_NO_DESEMPENHO_AGRONOMICO_DO_MILHO_SAFRINHA
- Tavares, L. C., Brunes, A. P., Araujo, C., Robe, D. A., Gadotti, G. I. & Amaral, F. (2015). Tratamento de sementes de cevada com zinco: potencial fisiológico e produtividade de sementes. *Ciências Agrárias* 36(2), 585-594. Recuperado de: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/12369>
- Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H. & Volkweiss, S. J. (1995). Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174 p. (*Boletim Técnico de solos*, 5).
- Uribe, M. L. (2005). *Cobre, cinc y boro en la biomasa aérea de Eucalyptus nitens (Dean et Maiden) Maiden bajo diferentes tratamientos de fertilización en la décima región*. (Tesis Ingeniería Forestal). Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, CL, 46 p.
- Wu, P., Cui, P., Du, H., Alves, M. E., Zhou, D. & Wang, Y. (2021). Long-term dissolution and transformation of ZnO in soils: The roles of soil pH and ZnO particle size. *Journal of Hazardous Materials*, 415, Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125604>.
- Yadav, R. A., Tripathi A. K. & Yadav, A. K. (2009). Effect of micronutrients in combinations with organic manures on production and net returns of sesame (*Sesamum indicum*) in bundelkhand tract of uttar pradesh. *Annals of Agricultural Research*, 30 (1-2), 53-58.