

RESPUESTA DE PLÁNTULAS DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) AL ZINC APLICADO EN SEMILLAS

RESPONSE OF WHEAT (*Triticum aestivum* L.) SEEDLINGS TO SEED ZINC APPLICATION

Lilian Madruga de-Tunes¹, Marlove F. Brião Muniz², Jadiyi C. Torales-Salinas¹,
César I. Suárez-Castellanos¹, Elisa Souza-Lemes^{1*}

¹Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Campus Universitário.
Caixa Postal 354. CEP 96001-970. Pelotas, RS, Brasil. (lemes.elisa@yahoo.com.br).

²Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). RS, Brasil.

RESUMEN

El recubrimiento de semillas puede aumentar su potencial germinativo, contribuir a mejorar el desarrollo de las plántulas e incrementar la concentración de micronutrientes en las semillas. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del zinc sobre la nutrición y el crecimiento de plántulas de trigo (*Triticum aestivum* L.) provenientes de semillas con vigor alto y bajo, tratadas con 0, 1, 2, 3 y 4 mL de ZnSO₄ por kg de semillas (un fungicida, un polímero y agua) y almacenadas por seis meses en ambiente sin control de temperatura y humedad relativa. En plántulas de 20 d después de germinadas fue evaluada la materia seca del tallo, raíz, concentración y acumulación de zinc y el efecto de las dosis de ZnSO₄ sobre el crecimiento. La conclusión fue que el zinc aplicado a las semillas de trigo se acumula principalmente en las raíces de las plántulas. La aplicación de ZnSO₄ en semillas ocasionó acumulación mayor y menor eficiencia de transporte y de utilización de zinc a medida que aumentaron las dosis del nutriente.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., materia seca, tratamiento de semillas, nutrición mineral, micronutrientes.

INTRODUCCIÓN

La concentración de zinc (Zn) en las plantas varía entre 30 y 80 mg kg⁻¹ de materia seca (MS) (Haslett *et al.*, 2001) y hay deficiencias con 15 a 20 mg kg⁻¹ MS y toxicidades con 100 a 400 mg kg⁻¹ MS (Roselan y Franco, 2000). El Zn

ABSTRACT

Coating seeds can increase seed germination potential, to contribute to better plant development and increase the concentration of micronutrients in seeds. The aim of this study was to evaluate the effect of zinc on nutrition and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings from high and low vigor seeds treated with 0, 1, 2, 3, and 4 mL ZnSO₄ kg⁻¹ seed (plus a fungicide, a polymer, and water), and stored for six months in an environment with no temperature or relative humidity control. Stem and root dry matter, concentration and accumulation of zinc and the effect of the dosages of ZnSO₄ on growth of wheat seedlings were evaluated in seedlings 20 d after germination. It was concluded the zinc applied to wheat seeds accumulates mainly in the seedling roots. Application of ZnSO₄ to seeds caused higher accumulation and lower transport efficiency, and use of zinc in the measure that the dosage of the nutrient increased.

Key words: *Triticum aestivum* L., dry matter, seed treatment, mineral nutrition, micronutrients.

INTRODUCTION

The concentration of zinc (Zn) in plants varies between 30 and 80 mg kg⁻¹ dry matter (DM) (Haslett *et al.*, 2001), and deficiencies occur with 15 to 20 mg kg⁻¹ DM (Roselan and Franco, 2000). Zinc is translocated from the seed to the seedling during and after germination, as of 30 d after emergence. Of the initial Zn concentration, up to 55.5 % is transported in soybeans, 64 % in common bean and 69 % in wheat (Santos and Ribeiro, 1994). In maize seeds treated with ZnSO₄ and Zn-Biocrop (2.5 g Zn kg⁻¹ seed), the concentration of

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: junio, 2014. Aprobado: junio, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 623-636. 2015.

es translocado de la semilla a la plántula durante y después de la germinación. Después de 30 d de la emergencia, se transporta hasta 55.5 % de la concentración inicial de Zn en soya, 64 % en frijol y 69 % en trigo (Santos y Ribeiro, 1994). En semillas de maíz tratadas con ZnSO_4 y Zn-Biocrop (2.5 g Zn kg^{-1} de semillas), la concentración de Zn aumentó de 47 $\mu\text{g g}^{-1}$ a 900 $\mu\text{g g}^{-1}$ y 850 $\mu\text{g g}^{-1}$ manteniéndose la germinación y el vigor de las semillas (Ribeiro y Santos, 1996). Esas concentraciones no fueron tóxicas y posibilitaron un suministro mayor de Zn al iniciar el crecimiento de las plántulas.

La mejor forma para suministrar micronutrientes a las plántulas es mediante el tratamiento de semillas, debido a que las plantas exigen pequeñas cantidades de estos elementos. Además, la uniformidad y la distribución del elemento entre las plantas es mejor, se disminuye el costo de aplicación y se optimiza la nutrición de las plantas en la etapa inicial del crecimiento, donde el sistema radicular es poco desarrollado por lo cual la absorción de los nutrientes del suelo es afectada (Bonnecarrère *et al.*, 2004).

Así, el tratamiento de semillas con Zn tiene como objetivo la translocación del elemento desde la semilla hacia la plántula, se obtiene una reserva de Zn que se convertirá en una fuente importante para la nutrición de las plantas (Ribeiro y Santos, 1996). La técnica de aplicación de Zn desde la semillas es promisoría, pero debido a que hay pocos estudios en trigo, el presente estudio tuvo el objetivo de evaluar el efecto del Zn en la acumulación de materia seca y eficiencia nutricional en plántulas de trigo provenientes de semillas de vigor alto y bajo, almacenadas por seis meses en condiciones no controladas de temperatura y humedad relativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Laboratorio Didáctico de Análisis de Semillas del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Federal de Pelotas (UFPEL), ubicado en el municipio de Capão do Leão en el estado de Rio Grande del Sur, Brasil.

Dos lotes de semillas de trigo fueron analizados, uno de alto vigor (92 % de germinación) y otro de bajo vigor (84 % de germinación), tratados con una mezcla de 0, 1, 2, 3 y 4 mL de ZnSO_4 kg^{-1} de semillas, más 3 mL de fungicida (Carboxim+Thiram), 0.8 mL de polímero Poly Seed, y agua suficiente para obtener una solución de 15 mL kg^{-1} de semillas por cada tratamiento. Las semillas fueron tratadas y

Zn increased from 47 $\mu\text{g g}^{-1}$ to 900 $\mu\text{g g}^{-1}$ and 850 $\mu\text{g g}^{-1}$ seed, maintaining seed germination and vigor (Ribeiro and Santos, 1996). These concentrations were not toxic and allowed greater supply of Zn at initial seedling growth.

The best way to supply micronutrients to seedlings is by treating seeds because plants require small quantities of these elements. Moreover, the uniformity and distribution of the element among plants is better. Cost of application decreases and plant nutrition is optimized during the initial stage of growth when the root system is still undeveloped and absorption of nutrients from the soil is affected (Bonnecarrère *et al.*, 2004).

Thus, treating seeds with Zn has the objective of translocating the element from seed to seedling, while obtaining a reserve of this micronutrient, which will become an important source for plant nutrition (Ribeiro and Santos, 1996). The technique of applying Zn through seed treatment is promising. However, there are few studies in wheat; so, the present study was carried out to evaluate the effect of Zn on dry matter accumulation and nutritional efficiency in wheat seedlings from high and low vigor seeds, stored for six months under conditions with no temperature or relative humidity control.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in the Didactic Seed Laboratory of the Crop Science Department, Federal University of Pelotas (UFPEL), located in the city of Capão do Leão, state of Rio Grande do Sul, Brazil.

Two lots of wheat seeds were analyzed, one of high vigor (92 % germination), and the other of low vigor (84 % germination), treated with a mixture of 0, 1, 2, 3 and 4 mL ZnSO_4 kg^{-1} seed, plus 3 mL fungicide (Carboxim+Thiram), 0.8 mL of the polymer Poly Seed, and sufficient water for a total solution of 15 mL kg^{-1} seed per treatment. The seeds were treated and stored for six months without control of temperature (average 25 °C) or relative humidity (average 82.4 %) control.

Before beginning the essay, a soil analysis was carried out and the results were: clay 17 %, pH 5.4, OM (organic matter) 2.2 %, P 14.3 mg dm^{-3} , K 261.0 mg dm^{-3} , Zn 0.45 mg dm^{-3} . Soil was fertilized following the recommendations of the Comisión de Química y Fertilidad del Suelo – RS/SC (2004) and the Manual de Informaciones Técnicas para Trigo y Triticale – 2010 harvest, except for fertilization with zinc.

almacenadas por seis meses sin control de temperatura (25 °C promedio) ni de humedad relativa (82.4 % promedio).

Antes de iniciar el experimento se realizó el análisis del suelo y los resultados fueron: arcilla 17 %, pH 5.4, MO (materia orgánica) 2.2 %, P 14.3 mg dm⁻³, K 261.0 mg dm⁻³, Zn 0.45 mg dm⁻³. La fertilización del suelo se hizo de acuerdo con el resultado de este análisis, siguiendo las recomendaciones de la Comisión de Química y Fertilidad del Suelo – RS/SC (2004) y el Manual de Informaciones Técnicas para Trigo y Triticale – cosecha 2010, exceptuando la fertilización con zinc.

Respuesta de las plántulas de trigo a la aplicación de ZnSO₄

Para cada tratamiento fueron evaluadas ocho submuestras de 12 semillas sembradas a 2.0 cm de profundidad en vasos plásticos que contenían suelo fertilizado y mantenidas a 20 °C en ambiente controlado. Los riegos fueron periódicos, manteniendo el suelo siempre a capacidad de campo.

Las plántulas fueron retiradas de los vasos 20 d después de la siembra con una altura media de la parte aérea de 10 a 15 cm, fueron lavadas con agua destilada y sumergidas en solución EDTA (10 g L⁻¹) por 15 min para retirar iones adheridos a las plántulas; y finalmente fueron lavadas con agua destilada por 2 min. Las plántulas fueron seleccionadas y se separó la parte aérea del sistema radicular, el material fue colocado en bolsas de papel y secado en una estufa de circulación forzada de aire Icamo[®], regulada a 65 °C por 96 h (Nakagawa, 1994).

De las plántulas secas se obtuvieron extractos mediante digestión nitroperclórica. Para cada tratamiento se pesaron cuatro muestras de 0.2 g de MS de la parte aérea y de la raíz, se transfirieron a tubos de digestión, se adicionaron 5 mL de HNO₃ concentrado en cada tubo, se mezcló y se dejó 1 h en reposo. Los tubos fueron colocados en un bloque digestor a una temperatura constante de 100 °C por 4 h y 30 min; fueron retirados y enfriados por 30 min, se añadieron 2 mL de HClO₄ y se colocaron en el bloque digestor por 6 a 8 h hasta la evaporación completa de la MO.

La digestión finalizó cuando la solución se tornó incolora, resultando en un humo blanco y denso del HClO₄; las muestras fueron enfriadas y los tubos sellados. El material vegetal tuvo una alta cantidad de fibras por lo que las muestras se filtraron dos veces, usando colador con tamaño de malla de 1 mm, añadiendo 10 mL de agua destilada y agitando el tubo para lavar la pared interna. La determinación de los minerales se realizó con la metodología adaptada de Bataglia *et al.* (1983). Después se usó el extracto obtenido para determinar Zn mediante espectrometría de absorción atómica (Malavolta *et al.*, 1997).

Wheat seedling response to application of ZnSO₄

For each treatment, eight sub-samples of 12 seeds were evaluated. Seeds were planted at a depth of 2.0 cm in plastic cups containing fertilized soil and maintained at 20 °C in a controlled environment. Watering was periodic to maintain the soil at constant field capacity.

Seedlings were removed from the cups 20 d after planting when mean height of the shoot was 10 to 15 cm. It was washed with distilled water and submerged in an EDTA solution (10 g L⁻¹) for 15 min to remove ions adhered to seedlings. Finally, it was washed with distilled water for 2 min. Seedlings were selected and the shoot was separated from the root system, and the material was placed in paper bags and dried in a forced air oven Icamo[®], regulated to 65 °C for 96 h (Nakagawa, 1994).

Extracts were obtained from the dried seedlings by nitroperchloric acid digestion. For each treatment, four 0.2 g DM samples from shoot and root were weighed and transferred to digestion tubes. In each tube, 5 mL HNO₃ concentrate was added, mixed and left 1 h to repose. The tubes were placed in a block digester at a constant temperature of 100 °C for 4 h and 30 min. After this time, they were removed and cooled for 30 min; 2 mL HClO₄ was added and the tubes were placed in the block digester for 6 to 8 h until complete evaporation of the OM.

Digestion ended when color left the solution resulting in dense white smoke from the HClO₄. The samples were cooled and the tubes sealed. Because the plant material had a high proportion of fibers, the samples were filtered twice using a sieve with a 1 mm mesh; during filtering 10 mL distilled water was added and the tube was shaken to wash the internal surface. Minerals were determined with the methodology adapted from Bataglia *et al.* (1983). After digestion, the extract obtained was used to determine Zn by atomic absorption spectrometry (Malavolta *et al.*, 1997).

Effect of the dosages of ZnSO₄ on nutritional efficiency of zinc

With the data on DM and content of nutrients in plants, the following indexes were calculated: absorption efficiency=(total nutrient content in the plant/root DM), according to Swiader *et al.* 1994); transport efficiency=(content of the nutrient in the aerial part/total nutrient content in the plant)×100, according to Bataglia *et al.* (1983); and use efficiency=(total DM produced)/2/(total nutrient content in the plant) according to Siddiqi and Glass (1981).

For each seed lot, an experiment was carried out under a completely randomized design with four replications, where

Efecto de las dosis de ZnSO₄ sobre la eficiencia nutricional de zinc

Con los datos de MS y del contenido de nutrientes en las plantas fueron calculados los índices: eficiencia de absorción=(contenido total de los nutrientes en la planta/MS de raíz), según Swiader *et al.* (1994); eficiencia de transporte=(contenido del nutriente en la parte aérea/contenido total de los nutrientes en la planta)×100, de acuerdo con Bataglia *et al.* (1983); y eficiencia de utilización=(MS total producida)²/(contenido total de los nutrientes en la planta) según Siddiqi y Glass (1981).

Para cada lote de semillas se realizó un experimento con diseño completamente al azar con cuatro repeticiones, y los tratamientos fueron las cinco dosis de ZnSO₄. Con los datos se realizó un ANDEVA y un análisis de regresión (Ferreira, 2000) cuando se observó diferencia estadística entre los tratamientos según el resultado del ANDEVA. El análisis estadístico se realizó con el programa SISVAR (Ferreira, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las dosis de ZnSO₄ tuvieron efecto significativo sobre la MS de la parte aérea en los dos lotes de semillas (Figura 1). Cheng (1995) observó que el tratamiento de semillas con 0.25 g L⁻¹ de ZnSO₄ aumentó en 12 % la producción de MS de la parte aérea de plántulas de trigo. El tratamiento de semillas con Zn aumenta significativamente la producción de MS de la parte aérea (Fageria, 2000; Santos y Ribeiro, 1994), pero no hay diferencias en arroz (Bonnecarrère *et al.*, 2004) ni en trigo (Prado *et al.*, 2007).

La dosis de 3 mL de ZnSO₄, en el lote de semillas de vigor alto, aumentó la producción de MS en 61.8 % comparado con el testigo, mientras que la dosis de 4 mL redujo la producción de MS de la parte aérea en 6 % con relación a la dosis de 3 mL (Figura 1A).

La dosis de 1 mL de ZnSO₄, en el lote de semillas de vigor bajo, produjo una cantidad de MS de la parte aérea similar a la del testigo (Figura 1B), lo cual se puede deber a que el contenido inicial de Zn en la semilla fue 43.56 mg kg⁻¹. Estos resultados son semejantes a los encontrados por Yagi *et al.* (2006) en semillas de sorgo. La dosis de 4 mL de ZnSO₄ aumentó la MS de la parte aérea en 33.3 % en relación al testigo.

La dosis de 3 mL de ZnSO₄, en el lote de semillas de vigor alto, aumentó la producción de la MS

treatments were the five dosages of ZnSO₄. An ANOVA performed with these data. When statistical differences were observed among treatments with ANOVA, a regression analysis (Ferreira, 2000) was done. The statistical analysis was carried out in SISVAR statistical software (Ferreira, 2000).

RESULTS AND DISCUSSION

The dosages of ZnSO₄ had a significant effect on shoot DM in the two seed lots (Figure 1). Cheng (1995) observed that treating seeds with 0.25 g L⁻¹ ZnSO₄ increased DM production in wheat seedling shoots by 12 % (Fageria, 2000; Santos and Ribeiro, 1994). Treating seeds with Zn significantly increases shoot DM production, but there are no differences in rice (Bonnecarrère *et al.*, 2004), neither in wheat (Prado *et al.*, 2007).

The 3 mL dosage of ZnSO₄ in the high vigor seed lot increased DM production by 61.8 % relative to the control, while the dosage of 4 mL reduced shoot DM production by 6 %, relative to the 3 mL dosage (Figure 1A).

In the low vigor seed lot, 1 mL dosage of ZnSO₄ produced a similar amount of shoot DM as the control (Figure 1B). This may be because initial Zn content in the seed was 43.56 mg kg⁻¹. These results are similar to those found by Yagi *et al.* (2006) in sorghum seed. Dosage of 4 mL ZnSO₄ increased shoot DM by 33.3 % relative to the control.

Root DM production with the 3 mL dosage of ZnSO₄ in high vigor seed was 55.6 % more than the control (Figure 1C) and 13.9 % more than the 4 mL ZnSO₄ dosage, which caused the lowest production of root DM. This result may be attributed to toxicity, characterized by inhibition of root growth resulting in production of less root DM (Marschner, 1995).

The negative effects of Zn application to wheat seeds in this study counter those found with other species of Poaceae (gramineae). Stalon *et al.* (2001) found increases of 49.6, 59.8 and 79.2 % in root DM in rice plants with dosages of 1, 2.2, and 4.7 g Zn kg⁻¹ seed, respectively, while Yagi *et al.* (2006) showed similar results in sorghum. Ohse *et al.* (2012) studied root DM in wheat plants (cultivar Quartz) derived from seed treated with Zn showed a descending linear response to increasing dosages of Zn.

In low vigor seeds, root DM production increased linearly with increasing concentrations of zinc

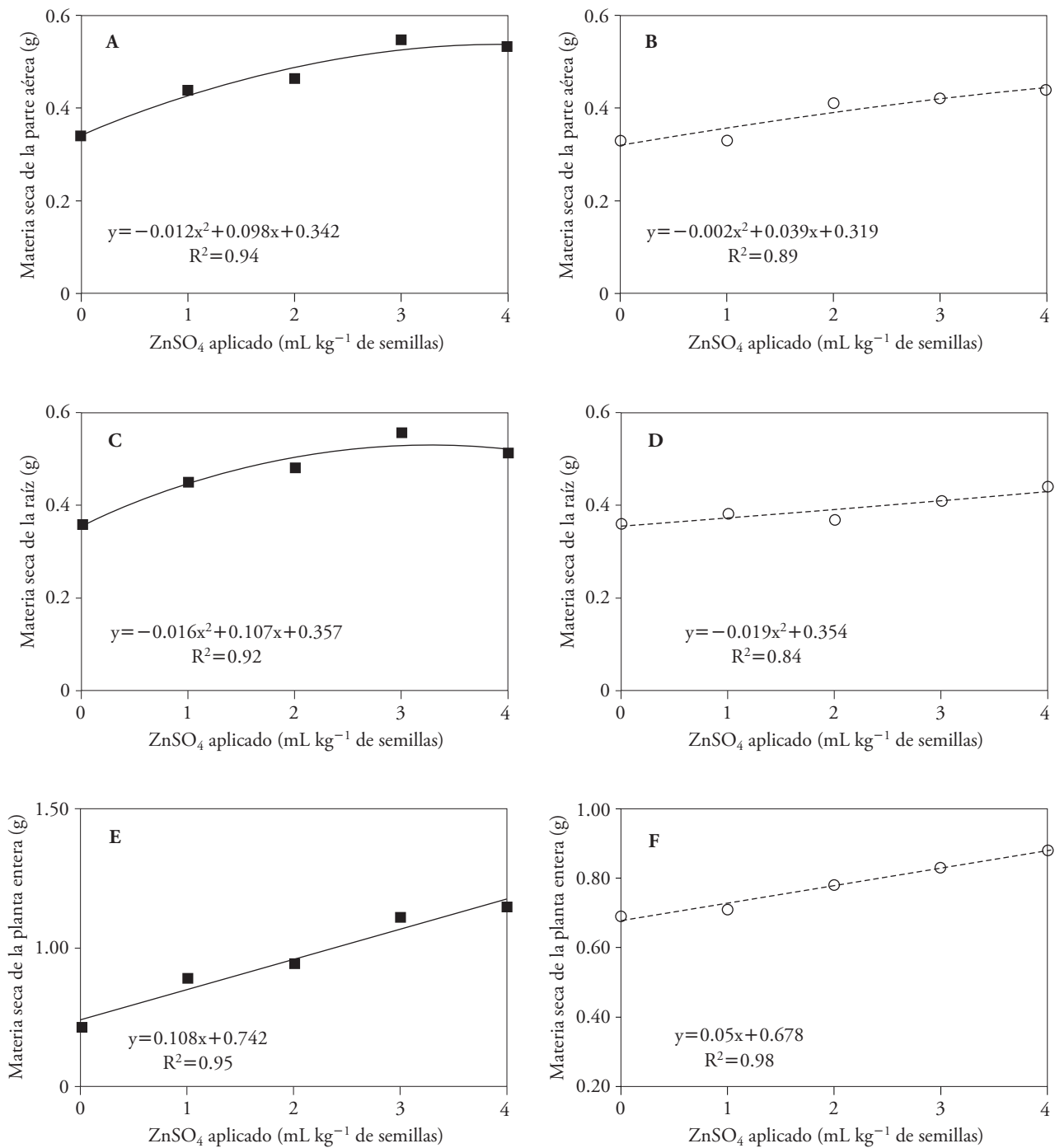


Figura 1. Efecto de cinco dosis de ZnSO₄, aplicadas en lotes de semillas de trigo de alto y bajo vigor y almacenadas por seis meses, sobre la producción de materia seca de la parte aérea, raíz y materia seca de la planta. UFPel, Pelotas RS 2011. *Revestimiento: ZnSO₄+fungicida+polímero+agua kg⁻¹ de semillas. A (p=0.006), C (p=0.014), E (p≤0.000) lote de alto vigor; B (p≤0.001), D (p=0.016), F (p=0.002) lote de vigor bajo.

Figure 1. Effect of five dosages of ZnSO₄ applied to lots of high and low vigor wheat seeds, stored for six months, on the production of dry matter of the aerial part, root and whole plant. UFPel, Pelotas RS 2011. *Coating: ZnSO₄+fungicide+polymer+water kg⁻¹ seed. A (p=0.006), C (p=0.014), E (p≤0.000) high vigor lot; B (p≤0.001), D (p=0.016), F (p=0.002) low vigor lot.

de la raíz 55.6 % más que el testigo (Figura 1C) y 13.9 % más que la dosis de 4 mL de ZnSO_4 que causó la menor producción de MS de la raíz. Este resultado se puede atribuir a toxicidad la cual inhibe el crecimiento radicular, y como consecuencia menor producción de MS de la raíz (Marschner, 1995).

Los efectos negativos de la aplicación de Zn en semillas de trigo, en este estudio, son opuestos a los de otras especies de Poaceae (gramíneas). Así, Stalon *et al.* (2001) encontraron aumentos de 49.6; 59.8 y 79.2 % de la MS de la raíz en plantas de arroz con dosis de 1; 2.2 y 4.7 g Zn kg^{-1} de semillas, respectivamente, mientras que Yagi *et al.* (2006) muestran resultados similares en sorgo. La MS de raíz en plantas de trigo (cultivar Quartzo) derivadas de semillas tratadas con Zn tuvo una respuesta lineal decreciente al aumentar las dosis de Zn (Ohse *et al.*, 2012).

En las semillas de vigor bajo, la producción de la MS de la raíz aumentó linealmente al incrementar la concentración de Zn (Figura 1D). Este resultado fue semejante al tratar semillas con ZnSO_4 a una concentración mayor a 0.25 g $\text{ZnSO}_4 \text{ L}^{-1}$, lo cual aumentó en 35 % la producción de la MS de raíces de plántulas de trigo con 6 d de desarrollo (Cheng, 1995).

La MS total de la plántula tuvo comportamiento similar a la producción de la MS en la raíz en los lotes de semillas de alto y bajo vigor (Figuras 1E y 1F). El aumento de la producción de la MS total en función de la absorción de Zn también fue observado en plantas de avena derivadas de semillas tratadas con diferentes dosis de Zn a los 30 d después de emergencia (Oliveira *et al.* 2014). El efecto del Zn sobre el crecimiento de plantas está en función de la participación del nutriente en la ruta metabólica del triptófano para ácido indolacético, que es la principal auxina de crecimiento (Fornasieri Filho y Fornasieri, 1993). Pero en arroz las dosis de Zn aplicadas en semillas no cambiaron la MS (Fungetto *et al.*, 2010).

La concentración de Zn en la parte aérea creció linealmente al aumentar la dosis de ZnSO_4 en los dos lotes de semillas. Las dosis de 3 y 4 mL de ZnSO_4 produjeron concentraciones máximas teóricas de Zn de 282.19 y 329.82 mg kg^{-1} de MS en el lote de alto vigor, respectivamente (Figura 2A). Según Fageria *et al.* (1997), el nivel de Zn adecuado en la parte aérea de plántulas en la fase inicial del crecimiento es 15 mg kg^{-1} en trigo, 47 mg kg^{-1} en arroz, 35 mg kg^{-1} en frijol, 20 mg kg^{-1} en maíz y de 21 mg kg^{-1} en soya.

(Figura 1D). This result was similar to treating seeds with concentrations above 0.25 g $\text{ZnSO}_4 \text{ L}^{-1}$, which increased root DM production by 35 % in 6-day-old wheat seedlings (Cheng, 1995).

Total seedling DM had behavior similar to that of root DM production in both high and low vigor seed lots (Figures 1E and 1F). The increase in total DM production in function of Zn absorption was also observed in oat plants derived from seeds treated with different dosages of zinc 30 d after emergence (Oliveira *et al.*, 2014). The effect of Zn on plant growth is in function of the participation of the nutrient in the metabolic route of tryptophan for indol-acetic acid, which is the main growth auxin (Fornasieri Filho and Fornasieri, 1993). But in rice, Zn dosages applied on seeds did not change DM (Fungetto *et al.*, 2010).

The concentration of Zn in the shoot increased linearly with increasing dosages of ZnSO_4 on both seed lots. Dosages of 3 and 4 mL ZnSO_4 produced maximum theoretical Zn concentrations of 282.19 and 329.82 mg kg^{-1} DM in the high vigor lot, respectively (Figure 2A). According to Fageria *et al.* (1997), the appropriate level of zinc in the seedling shoot during the initial growth phase is 15 mg kg^{-1} in wheat, 47 mg kg^{-1} in rice, 35 mg kg^{-1} in beans, 20 mg kg^{-1} in maize and 21 mg kg^{-1} in soybeans. These authors indicate that wheat is tolerant to low Zn concentrations and can be classified as insensitive to Zn deficiencies. For this reason, adding small amounts of Zn may be sufficient for requirements of this crop. This was not the case, however, in our study since the 3 mL dosage of ZnSO_4 caused a shoot Zn concentration of 282.19 mg kg^{-1} DM, which was not harmful for the high vigor seed lot.

Although shoot Zn concentration was high, there were no symptoms of toxicity, and the 3 mL dosage of ZnSO_4 increased shoot, root and whole plant DM. According to Camargo *et al.* (2000), development of rice plants cultivated in containers with soil is normal, showing that the Zn concentration in the aerial part varies from 180 mg kg^{-1} to 529 mg kg^{-1} (Oliveira *et al.*, 2005). Fageria (2000) reported that the concentration of Zn in rice plants was 673 mg kg^{-1} .

The 4 mL dosage of ZnSO_4 can be considered toxic for wheat since it caused Zn concentration of 329.82 mg kg^{-1} DM in the shoot. According

Estos autores indican que el trigo es tolerante a bajas concentraciones de Zn y puede ser clasificado como poco sensible a la deficiencia de este elemento. Así, cantidades pequeñas de Zn adicionadas pueden ser suficientes para la exigencia de ese cultivo, lo cual no ocurrió en nuestra investigación, porque la dosis de 3 mL de ZnSO_4 causó una concentración de Zn en la parte aérea de $282.19 \text{ mg kg}^{-1}$ de MS, la cual no fue perjudicial para el lote de alto vigor.

Aunque la concentración de Zn en la parte aérea fue elevada, no hubo síntomas de toxicidad; además, la dosis de 3 mL de ZnSO_4 aumentó la MS de la parte aérea, raíz y de la planta entera. Según Camargo *et al.*, (2000), el desarrollo es normal en plantas de arroz cultivadas en recipientes con suelo,

to Fageria (1992), toxic effects of Zn in the shoot of annual crops can be observed at levels above 400 mg kg^{-1} .

The 3 and 4 mL dosages of ZnSO_4 applied to low vigor seed produced concentrations of zinc of 200.94 , and $218.57 \text{ mg kg}^{-1}$ DM, respectively (Figure 2B).

Zinc concentrations in the root (Figures 2C and 2D) of seedlings from both lots rose linearly as ZnSO_4 dosages were increased. The high vigor seed lot had a Zn concentration of $448.68 \text{ mg kg}^{-1}$ with the 4 mL dosage of ZnSO_4 , showing an increase of 79 % relative to the control (Figure 2C). However, this concentration can be toxic for wheat seedlings since root DM decreased by 13.9 % relative to the 3 mL dosage (Figure 1C). Root DM was higher with

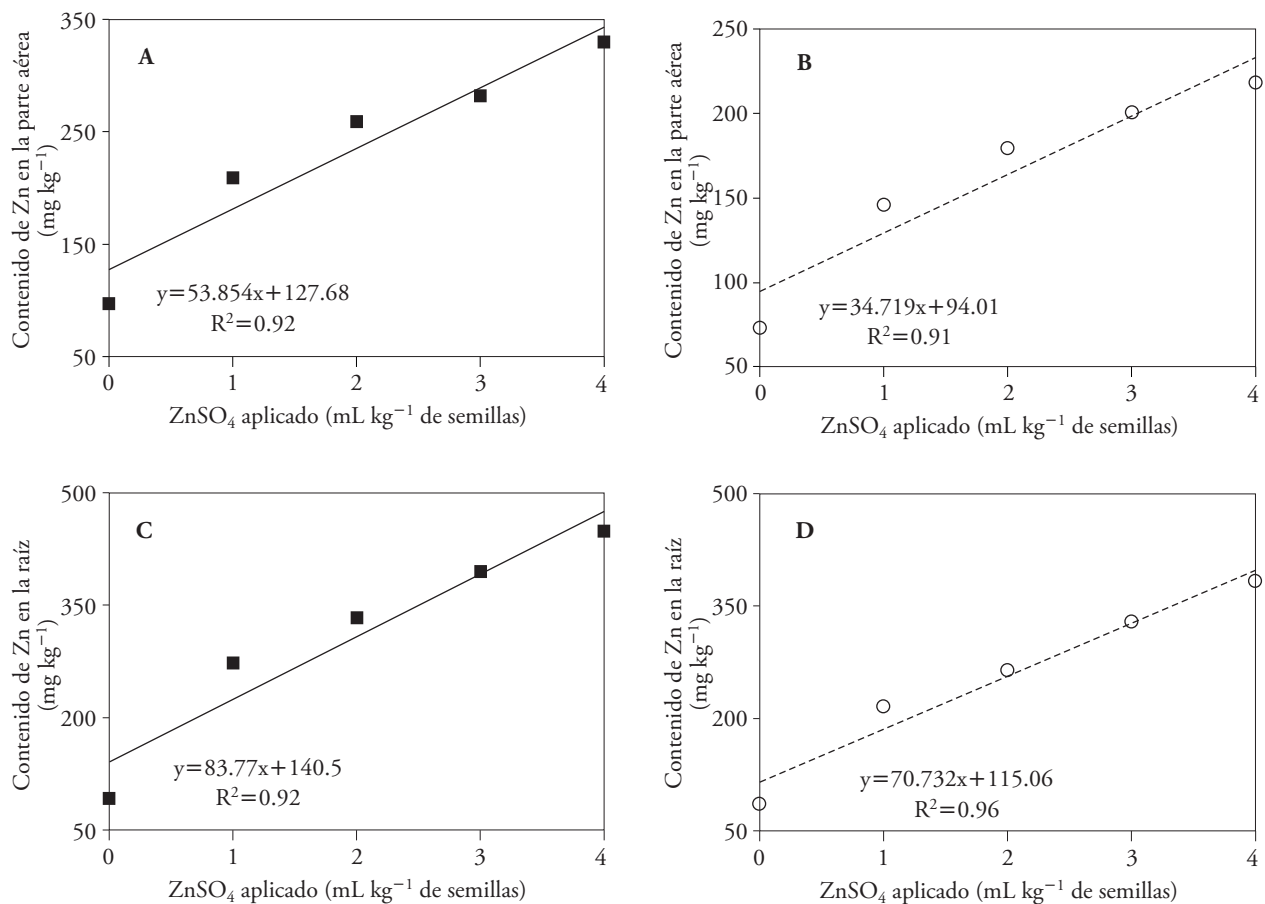


Figura 2. Efecto de cinco dosis de ZnSO_4 , aplicado en lotes de semillas de trigo de alto y bajo vigor y almacenadas por seis meses, sobre el contenido de zinc en la parte aérea y la raíz de la planta. UFPel, Pelotas RS 2011. *Revestimiento: ZnSO_4 + fungicida + polímero + agua kg^{-1} de semillas. A ($p \leq 0.000$), C ($p \leq 0.000$) lote de alto vigor; B ($p \leq 0.000$), D ($p \leq 0.000$) lote de bajo vigor.

Figure 2. Effect of five dosages of ZnSO_4 , applied on high and low vigor wheat seed stored for six months, on zinc content in the plant shoot and root. *Coating: ZnSO_4 + fungicide + polymer + water kg^{-1} seed. A ($p \leq 0.000$), C ($p \leq 0.000$) high vigor lot; B ($p \leq 0.000$), D ($p \leq 0.000$) low vigor lot.

mostrando que la concentración de Zn en la parte aérea varía de 180 mg kg⁻¹ hasta 529 mg kg⁻¹ (Oliveira *et al.*, 2005). Según Fageria (2000), la concentración de Zn en plantas de arroz fue 673 mg kg⁻¹.

La dosis de 4 mL de ZnSO₄ puede ser considerada tóxica para el trigo porque propició concentraciones de Zn en la parte aérea de 329.82 mg kg⁻¹ de MS. Según Fageria (1992), los efectos tóxicos del Zn en la parte aérea de los cultivos anuales pueden ser considerados en niveles mayores a 400 mg kg⁻¹.

Las dosis de 3 y 4 mL de ZnSO₄ aplicadas a las semillas de bajo vigor produjeron concentraciones de zinc de 200.94 y 218.57 mg kg⁻¹ de MS, respectivamente (Figura 2B).

El contenido de Zn en la raíz (Figuras 2C y 2D) creció linealmente al aumentar las dosis de ZnSO₄ en los dos lotes analizados. El lote de vigor alto tuvo una concentración de Zn de 448.68 mg kg⁻¹ con la dosis de 4 mL de ZnSO₄, un aumento de 79.7 % comparado con el testigo (Figura 2C). Sin embargo, esa concentración puede ser tóxica para las plántulas de trigo porque se redujo la MS de la raíz en 13.9 % comparada con la dosis de 3 mL (Figura 1C). La MS de la raíz fue mayor con la dosis de 3 mL de ZnSO₄ cuyo contenido de Zn fue 394.85 mg kg⁻¹ de MS.

En el lote de semillas de vigor bajo, el contenido de Zn en la raíz (Figura 2D) tuvo comportamiento similar a la MS de las raíces de las plántulas (Figura 1D). La aplicación de 4 mL de ZnSO₄ ocasionó una concentración de Zn en la raíz de 329.96 mg kg⁻¹, 73.8 % más que el testigo. Este resultado es similar al de Rozane *et al.* (2008), quienes observaron que las dosis más altas (6 y 8 g kg⁻¹ de semillas) de ZnSO₄ ocasionaron un contenido de Zn en las raíces de 336.33 mg kg⁻¹. Además, nuestro resultado es semejante al de Barbosa *et al.* (1992), quienes reportan una concentración de Zn en plantas de trigo de 390 mg kg⁻¹ de MS. Pero hay concentraciones menores de Zn: 15 a 47 mg kg⁻¹ en trigo (Orioli Junior *et al.*, 2008), 45 a 101 mg kg⁻¹ en arroz seco (Oliveira *et al.*, 2003), y 16 a 42 g kg⁻¹ (Morales *et al.*, 2004).

Las diferencias en las concentraciones de Zn en el tejido vegetal encontradas en nuestro estudio y en la literatura consultada se deben principalmente a las condiciones del cultivo, las diferencias entre sustratos (suelo y arena), la edad de la planta y a los cultivares utilizados. Borkert *et al.* (1998) muestran una amplia variación del nivel crítico de toxicidad entre cultivares de la misma especie. Además, la concentración

the 3 mL dosage of ZnSO₄ which showed a Zn content of 394.85 mg kg⁻¹ DM.

In the low vigor seed lot root Zn (Figure 2D) behaved in a manner similar to that of seedling root DM (Figure 1D). Application of 4 mL ZnSO₄ caused a root Zn concentration of 329.96 mg kg⁻¹, 73.8 % more than the control. This result is similar to that of Rozane *et al.* (2008), who observed that the highest dosages (6 and 8 g kg⁻¹ seed) of ZnSO₄ resulted in root zinc content of 336.33 mg kg⁻¹. Besides, our result is similar to the 390 mg Zn kg⁻¹ DM reported by Barbosa *et al.* (1992) in wheat plants. Nevertheless, lower Zn concentrations have been reported: 15 to 46 mg kg⁻¹ in wheat (Orioli Junior *et al.*, 2008), 45 to 101 mg kg⁻¹ in rainfed rice (Oliveira *et al.*, 2003), and 16 to 42 mg kg⁻¹ (Morales *et al.*, 2004).

Differences found in Zn concentrations in plant tissue between our study and the literature consulted are due mainly to crop growing conditions, differences in substrate (soil or sand), plant age, and cultivars used. Borkert *et al.* (1998) show a wide variation in critical level of toxicity among cultivars of the same species. Moreover, zinc concentration is higher in the root than in the shoot of the plant because the root absorbs this micronutrient to translocate it later to the shoot.

Plant tolerance to excessive Zn is related to exudation of chelating substances in the roots, to linking metal to the existing charges in the cell wall, or to the formation to Zn complexes in the cell cytoplasm by organic and inorganic acids, phytates and phytochelatins (Wang and Evangelou, 1994). These compounds are stored in the vacuoles in the least toxic form for the plant and are quantified when chemical analysis is performed on the plant tissue; this contributes to the high Zn content in the plant.

In the two seed lots analyzed, it was observed that Zn accumulated in the shoot and root of wheat seedlings (Figure 3) rose linearly as dosages of ZnSO₄ increased. Ribeiro and Santos (1996) also indicated that the application of Zn on seeds increased the concentration and accumulation of Zn in the shoot. However, Ohse *et al.* (1999) showed that application of Zn on rice seeds did not generate zinc accumulation in the shoot.

The highest accumulation of Zn in the shoot caused by administration of Zn sulfate was

de zinc es mayor en la raíz que en la parte aérea de la planta porque la raíz absorbe este micronutriente para después ser translocado hacia la parte aérea.

La tolerancia de las plantas al exceso de Zn está relacionada con la exudación de sustancias quelantes en las raíces, a la ligación del metal a las cargas en la pared celular o a la formación de complejos de Zn en el citoplasma de las células por ácidos orgánicos e inorgánicos, fitatos y fitoquelatinas (Wang y Evangelou, 1994). Estos compuestos son almacenados en las vacuolas en la forma menos tóxica para la planta y son cuantificados al realizar el análisis químico del tejido vegetal, e indica el contenido alto en la planta.

En los dos lotes de semillas analizadas la acumulación de Zn en la parte aérea y en la raíz de las plántulas de trigo (Figura 3) creció linealmente al aumentar las dosis de ZnSO_4 . Ribeiro y Santos (1996) también indican que la aplicación de Zn en las semillas aumentó la concentración y acumulación de Zn en la parte aérea. Sin embargo, Ohse *et al.* (1999) muestran que la aplicación de Zn en semillas de arroz no generó acumulación de Zn en la parte aérea.

El suministro de ZnSO_4 causó la máxima acumulación de Zn en la parte aérea de $174.80 \mu\text{g planta}^{-1}$ para el lote de alto vigor y $96.17 \mu\text{g planta}^{-1}$ para el de bajo vigor (Figuras 3A y 3B). Esta acumulación de Zn está relacionada con la alta solubilidad del ZnSO_4 en agua, y según Vale (2001) el Zn presente en el sulfato está más disponible para las plantas que el contenido en un óxido. La mayor acumulación de Zn en la parte aérea al aplicar dosis altas de ZnSO_4 , puede estar relacionada con el hecho de que esa parte de la planta es un drenaje para el nutriente. Franco *et al.* (2004) reportan resultados semejantes en plántulas de frijol y café; además, según Longnecker y Robson (1993), tejidos jóvenes (inicio del establecimiento del cultivo en el suelo) tienden a acumular preferencialmente más zinc en los tejidos maduros ya que representan regiones metabólicas más activas con gran demanda de nutrientes.

La acumulación de Zn en la raíz aumentó de forma lineal con el aumento de las dosis de ZnSO_4 en los dos lotes de semillas (Figuras 3C y 3D). En el lote de alto vigor, la dosis de 4 mL del sulfato proporcionó la mayor acumulación de Zn en la raíz (Figura 3C), y causó la acumulación del nutriente en la parte aérea, como ya se describió.

La acumulación de Zn en la raíz fue $228.83 \mu\text{g planta}^{-1}$ para el lote de alto vigor y $168.87 \mu\text{g}$

$174.80 \mu\text{g planta}^{-1}$ of the high vigor lot and $96.17 \mu\text{g planta}^{-1}$ of the low vigor seed lot (Figures 3A and 3B). This accumulation of zinc is related to the fact that zinc sulfate is highly soluble in water and, according to Vale (2001), the Zn present in the sulfate is more readily available for plants than that present in an oxide. The greater Zn accumulation in the shoot when high dosages of ZnSO_4 are applied may be related to the fact that this part of the plant is a drain for this nutrient. Franco *et al.* (2004) report similar results in bean and coffee seedlings. Moreover, according to Longnecker and Robson (1993), young tissues (at the start of crop establishment in the soil) tend to accumulate more Zn preferentially in mature tissues, which are more active metabolic regions with high nutrient demand.

Accumulation of Zn in the root increased linearly with the increase in ZnSO_4 dosage in both seed lots (Figures 3C and 3D). In the high vigor seed lot, the 4 mL dosage of sulfate provided for higher accumulation of Zn in the root (Figure 3C) and caused accumulation of the nutrient in the shoot as described above.

Accumulation of Zn in the root was $228.83 \mu\text{g planta}^{-1}$ in the high vigor seed lot and $168.87 \mu\text{g planta}^{-1}$ for the low vigor seed lot when the dosage of 4 mL ZnSO_4 was applied. Bingham *et al.* (1975) showed that in gramineae, zinc accumulates more in the roots than in the shoot. These results are in agreement with Calkmak *et al.* (1989), who found higher accumulation of zinc in the roots than in the shoot of bean plants.

The two wheat seed lots exhibited similar response to Zn supplied to the seeds: linear increase in zinc accumulation in the whole plant with higher dosages of ZnSO_4 (Figures 3E and 3F). For the high vigor seed lot, the highest accumulation of Zn in the whole plant was $403.63 \mu\text{g planta}^{-1}$ (Figure 3E), and for the low vigor lot, the highest accumulation was $265.04 \mu\text{g planta}^{-1}$ (Figure 3F).

ZnSO_4 reached the highest absorption efficiency (79 %) with the 4 mL dosage, while with the zero dosage, efficiency was lower than with any of the other dosages studied in the high vigor lot (Figure 4A). In the low vigor lot (Figure 4B), the highest absorption efficiency (60 %) was obtained with the 4 mL dosage of ZnSO_4 . According to Rozane *et*

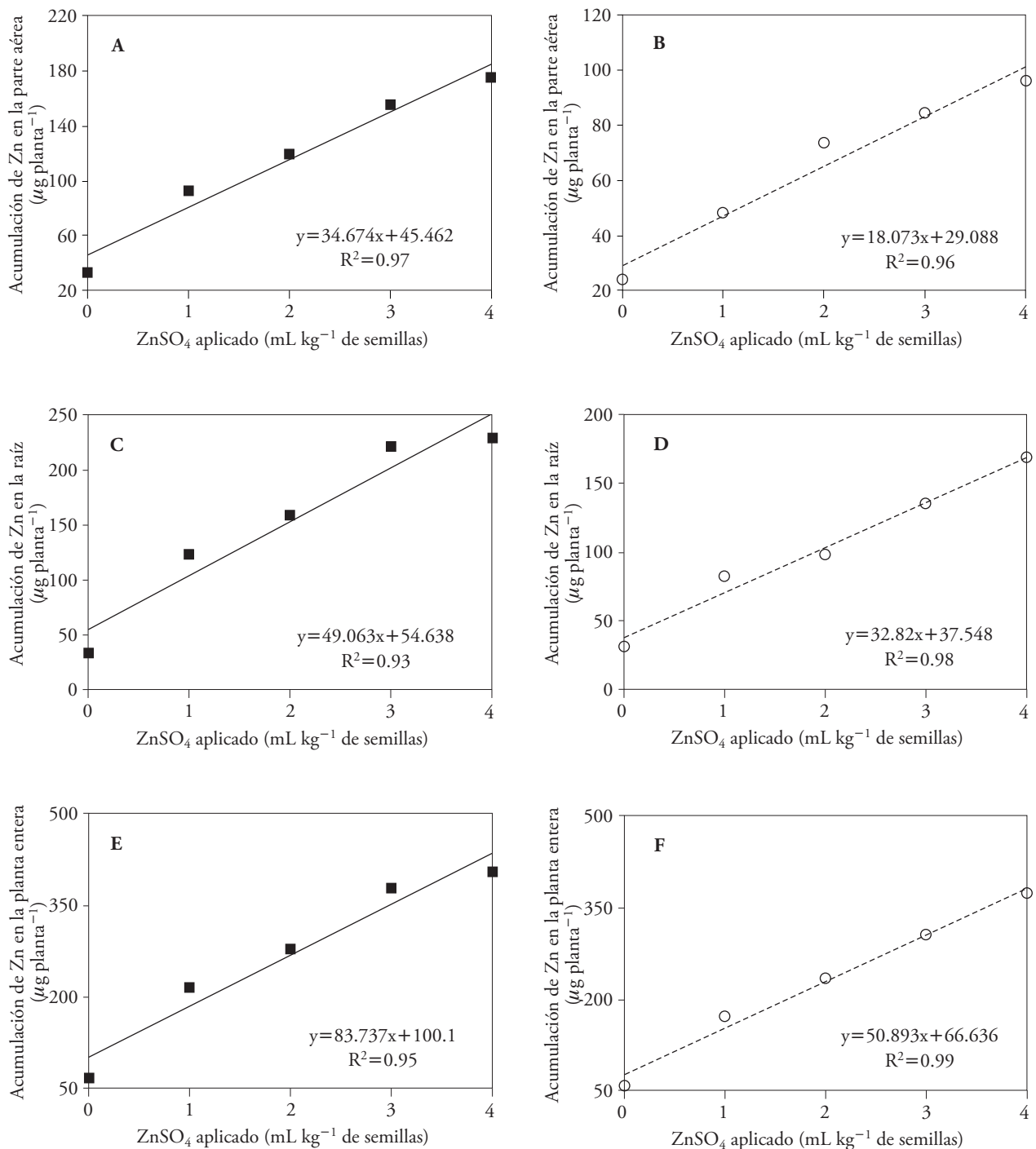


Figura 3. Efecto de ZnSO₄, aplicado en lotes de semillas de trigo de vigor alto y bajo y almacenadas por seis meses, en la acumulación de Zn en la parte aérea, en la raíz y en la planta entera. UFPel, Pelotas RS 2011. *Revestimiento: ZnSO₄+fungicida+polímero+agua kg⁻¹ de semillas. A (p≤0.000), C (p≤0.000), E (p≤0.000) lote de alto vigor; B (p≤0.000), D (p≤0.000), F (p≤0.000) lote de bajo vigor.

Figure 3. Effect of ZnSO₄, applied to high and low vigor wheat seed stored for six months, on zinc accumulation in the shoot, root and whole plant. UFPel, Pelotas RS 2011. *Coating: ZnSO₄+fungicide+polymer+water kg⁻¹ seed. A (p≤0.000), C (p≤0.000) high vigor lot; B (p≤0.000), D (p≤0.000) low vigor lot.

planta⁻¹ para el lote de bajo vigor cuando se aplicó 4 mL de ZnSO₄. Bingham *et al.* (1975) mostraron que en gramíneas, el zinc se acumula más en las raíces que en la parte aérea. Estos resultados están de acuerdo con Calkmak *et al.* (1989) quienes encontraron una acumulación mayor de Zn en las raíces que en la parte aérea de la planta de frijol.

Los dos lotes de semillas de trigo mostraron una respuesta semejante al suministro de Zn a través de semillas, aumentando linealmente la acumulación de Zn en la planta entera al aumentar las dosis de ZnSO₄ (Figuras 3E y 3F). Para el lote de vigor alto, la acumulación máxima de Zn en la planta entera fue 403.63 µg planta⁻¹ (Figura 3E) y para el lote de vigor bajo fue 265.04 µg planta⁻¹ (Figura 3F).

El ZnSO₄ alcanzó la máxima eficiencia de absorción (79 %) en la dosis de 4 mL, mientras que en la dosis cero la eficiencia fue inferior a todas las dosis estudiadas en el lote de vigor alto (Figura 4A). En el lote de vigor bajo (Figura 4B) la máxima eficiencia de absorción (60 %) también fue mayor en la dosis de 4 mL de ZnSO₄. Según Rozane *et al.* (2008) este hecho se puede explicar por la acumulación alta de materia seca radicular en las menores dosis, teniendo en cuenta la limitación nutricional.

La eficiencia de transporte de Zn mostró respuesta cuadrática a las dosis de ZnSO₄ y disminuyó significativamente al aumentar la dosis del sulfato. Además, en la dosis cero (testigo) la eficiencia fue superior a las otras dosis (Figuras 4C y 4D). Esto puede ser explicado por la baja concentración de Zn en el sustrato ya que todo el Zn contenido en las semillas fue transportado a la parte aérea para desempeñar su función fisiológica en la nutrición de las plantas. La cantidad de Zn presente en las semillas de vigor alto y bajo fue 45.63 mg kg⁻¹ y 43.56 mg kg⁻¹, respectivamente. Estas concentraciones pueden ser adecuadas para las necesidades nutricionales en la etapa inicial de crecimiento de las plántulas. Según Gao *et al.* (2005), la eficiencia del transporte de Zn es un factor importante y explica 53 % la producción de los cultivares de arroz.

La eficiencia de la utilización de Zn disminuyó al aumentar las dosis de ZnSO₄ en los dos lotes de semillas de trigo (Figuras 4E y 4F). Las eficiencias menores en los lotes de vigor alto y bajo fueron 2.68 y 2.92 g MS mg⁻¹ Zn acumulado, respectivamente. Estos valores fueron observados al aplicar la dosis mayor de ZnSO₄; así, las semillas del lote de vigor

al. (2008), this fact can be explained by the high accumulation of root dry matter that occurred with lower dosages, considering the nutritional limitation.

Zinc transport efficiency exhibited a quadratic response to the dosages of ZnSO₄. It decreased significantly as the dosage of sulfate increased. Moreover, at dosage zero (control), efficiency was higher than the other dosages studied (Figures 4C and 4D). This result can be explained by the low Zn concentration in the substrate since all of the Zn contained in the seed was transported to the shoot to carry out its physiological function in the plant nutrition. The amount of zinc in the high and low vigor seed was 45.63 mg kg⁻¹ ad 43.56 mg kg⁻¹, respectively. These concentrations may be adequate for the nutritional needs of the initial stage of seedling growth. According to Gao *et al.* (2005), the transport efficiency of Zn is an important factor, which explains 53 % of the production of rice cultivars.

Zinc use efficiency decreased with the increases in ZnSO₄ dosages in the two lots of wheat seeds (Figures 4E and 4F). The lowest efficiencies obtained in the high and low vigor lots were 2.68 and 2.92 g DM mg⁻¹ accumulated Zn, respectively. These values were observed when the highest dosage of ZnSO₄ was applied; thus, the seeds from the low vigor lot would be more efficient in using zinc. Oliveira *et al.* (2003) obtained similar results in the response of two rice cultivars (AC162 and IAC202) to applications of Zn. Use efficiency was 3.79 and 6.67 g MS mg⁻¹ supplemented Zn, respectively, indicating that IAC202 is more efficient in the use of Zn. Malavolta *et al.* (2002) also showed that the cultivar IAC202 was more efficient than IAC165 in the process of absorbed zinc conversion in the grains.

The results showed that application of ZnSO₄ to seeds causes greater accumulation of Zn (Figure 3) and lower Zn transport and use efficiency as the dosages of the nutrient increase (Figures 4C, 4D, 4E and 4F). It was in the dry matter of the whole plant (Figures 1E and 1F) where production increases were observed with the highest dosages of ZnSO₄. It is inferred that absorption efficiency explains this fact more clearly than the other studied efficiencies for the high and low vigor lots.

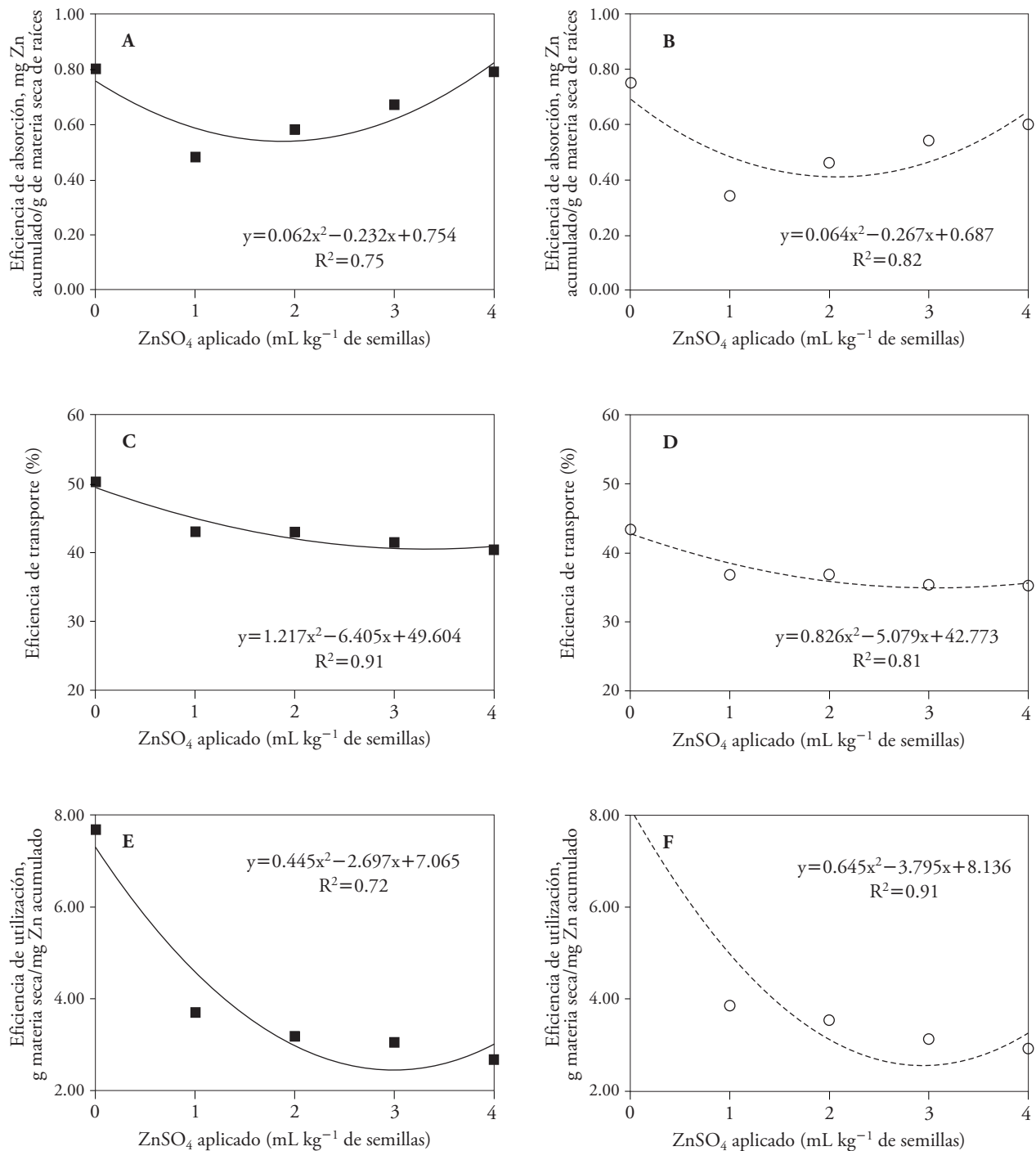


Figura 4. Efecto de ZnSO₄, aplicado en lotes de semillas de trigo de vigor alto y bajo y almacenadas por seis meses, en la eficiencia de absorción, transporte y utilización de zinc. UFPel, Pelotas RS 2011. *Revestimiento: ZnSO₄+fungicida+polímero+agua kg⁻¹ de semillas. A (p≤0.000), C (p=0.004), E (p≤0.000) lote de alto vigor; B (p≤0.000), D (p=0.016), F (p≤0.000) lote de bajo vigor.

Figure 4. Effect of ZnSO₄, applied on high and low vigor wheat seed stored for six months, on zinc absorption, transport and use efficiency. UFPel, Pelotas RS 2011. *Coating: ZnSO₄+fungicide+polymer+water kg⁻¹ seed. A (p≤0.000), C (p=0.004), E (p≤0.000) high vigor lot; B (p≤0.000), D (p=0.016), F (p≤0.000) low vigor lot.

bajo serían más eficientes para utilizar el Zn. Oliveira *et al.* (2003) obtuvieron resultados similares en la respuesta de dos cultivares de arroz a la aplicación de zinc, y la eficiencia de utilización fue 3.79 y 6.67 g MS mg⁻¹ Zn adicionado a los cultivares de arroz AC162 y IAC202, respectivamente, indicando que IAC202 es más eficiente para utilizar Zn. Malavolta *et al.* (2002) también mostraron la superioridad de la utilización del cultivar IAC202 en relación a IAC165 en el proceso de conversión del Zn absorbido en los granos.

Los resultados mostraron que la aplicación de ZnSO₄ en semillas causa acumulación mayor de Zn (Figura 3) y menor eficiencia de transporte y utilización de Zn al aumentar las dosis del nutriente (Figuras 4C, 4D, 4E y 4F). En la materia seca de la planta entera (Figuras 1E y 1F), se constató el aumento de la producción con las dosis más altas de ZnSO₄, y se infiere que la eficiencia de absorción explica ese hecho más claramente que las otras eficiencias estudiadas para los lotes de alto y bajo vigor.

CONCLUSIÓN

El Zn aplicado a semillas de trigo se acumula principalmente en las raíces. La aplicación de ZnSO₄ en semillas ocasionó acumulación mayor y eficiencia menor de transporte y de utilización de Zn a medida que aumentaron las dosis del nutriente.

LITERATURA CITADA

Barbosa, F. M. P., N. K. Fageria, y J. R. P. Carvalho. 1992. Interações entre calagem e zinco na absorção de nutrientes e produção de arroz de sequeiro em casa de vegetação. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 16: 355-360.

Bataglia, O. C., A. M. C. Furlani, J. P. F. Teixeira, y P. R. Furlani. 1983. Métodos de análise química de plantas. *Boletim técnico*, 78. Instituto Agronômico, Campinas, Brasil. 48 p.

Bingham, F. T., A. L. Page, R. J. Mahler, and T. J. Ganje. 1975. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with cadmium-enriched sewage sludge. *J. Environ. Quality* 4: 207-211.

Bonnecarrère, R. A. G., F. A. A. Londero, O. Santos, D. Schmidt, F. G. Pilau, P. A. Manfron, y D. Dourado Neto. 2004. Resposta de genótipos de arroz irrigado à aplicação de zinco. *Rev. FZVA* 10: 214-222.

Borkert, C.M., F.R. Cox, and M. R. Tucker. 1998. Zinc and copper toxicity in peanut, soybean, rice and corn in soil mixtures. *Comm. Soil Sci, Plant Analysis* 29: 2991-3005.

Calkmak, K., H. Marschner, and F. Bangerth. 1989. Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and

CONCLUSION

Zinc applied to wheat seed accumulates mainly in the roots. Application of ZnSO₄ to seed caused greater zinc accumulation and lower transport and use efficiency in the measure that the dosages of the nutrient increased.

—End of the English version—



levels of indole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Exper. Bot.* 40: 405-412.

Camargo, M. S., A. R. M. Anjos, y E. E. Malavolta. 2000. Adubação fosfatada e metais pesados em Latossolo cultivado com arroz. *Scien. Agr.* 57: 513-518.

Cheng, T. 1995. The effect of seed treatment with microelements upon the germination and early growth of wheat. *Scien. Sin.* 4: 129-135.

Clark, R. B. 1990. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use and efficiency. *In: Baligar, V. C., and R. R. Duncan (eds). Crops as Enhancers of Nutrient Use.* Ed. Academic Press. San Diego, USA. pp: 131-209.

Comissão de química e fertilidade do solo - RS/SC. 2004. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10a ed. Porto Alegre, SBSC - Núcleo Regional Sul/UFRGS. 400 p.

Fageria, N. K. 1992. Maximizing Crop Yields. New York, Marcel Dekker. 274 p.

Fageria, N. K. 2000. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. *Rev. Bras. Eng. Agr. Amb.* 4: 390-395.

Fageria, N. K. 2001. Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. *Comm. Soil Sci. Plant Analysis* 32: 2603-2629.

Fageria, N. K., V.C. Baligar and C.A. Jones. 1997. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. 2ed. rev.aum. New York: Marcel Dekker, 656 p.

Ferreira, D. F. 2000. Análises estatísticas por meio do SISVAR para windows versão 4.0. Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 45. São Carlos. Anais. São Carlos: UFSCAR. pp: 225-258.

Fornasieri Filho, D., y J. L. Fornasieri. 1993. Manual da Cultura do Arroz. Jaboticabal: FUNEP. 221 p.

Franco, I. A. L., H. E. P. Martinez, A. V. Zabini, y P. C. R. Fontes. 2004. Translocação e compartimentalização de Zn aplicado via ZnSO₄ e Zn EDTA nas folhas de cafeeiro e feijoeiro. *Ciênc. Rural.* 35: 332-339.

Funguetto, C. I., J. F. Pinto, L. Baudet, y S. T. Peske. 2010. Desempenho de sementes de arroz irrigado recobertas com zinco. *Rev. Brasil. Sem.* 32: 117-123.

Gao, X., C. Zou, F. Zhang, E. A. T. M. Sjoerd, and E. Hoffand. 2005. Tolerance to zinc deficiency in rice correlates with zinc uptake and translocation. *Plant and Soil* 278: 253-261.

- Haslett, B. S., R. J. Reid, and Z. Rengel. 2001. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or root. *Ann. Bot.* 87: 379-386.
- Longnecker, N. E., and A. D. Robson. 1993. Distribution and transport of Zn in plants. *In*: Robson, A. D. (ed). *Zinc in Soil and Plants*. Ed. S.L. Kluwer Academic. pp: 79-91.
- Machado, M. O., E. A. Pauletto, y A. S. Gomes. 1983. Influência do calcário na resposta do arroz irrigado a aplicação de zinco. *In*: Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 12. Porto Alegre, RS. Anais. Porto Alegre: IRGA. pp: 143-148.
- Malavolta, E. 2006. Manual de Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: UFV. 631 p.
- Malavolta, E., G. C. Vitti, y S. A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS. 319 p.
- Malavolta, E., R. Heinrichs, C. P. Cabral, S. C. Oliveira, G. Szakacs, J. F. Andrade Neto, R. S. Almeida, W. J. O. Souza, y M. Malavolta. 2002. Resposta de dois cultivares de arroz ao zinco em solução nutritiva. *Rev. Agr.* 77: 195-208.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2a ed. Ed. Academic Press. London, New York. 889 p.
- Moraes, M. F., M. G. Santos, O. D. Bermudez-Zambrano, M. Malavolta, R. W. C. Raposo, C. P. Cabral, y E. Malavolta. 2004. Resposta do arroz em casa de vegetação a fontes de micronutrientes de diferentes granulometria e solubilidade. *PAB.* 39: 611-614.
- Nakagawa, J. 1994. Testes de vigor baseados na avaliação das plântulas. *In*: Vieira, R. D., e N. M. Carvalho (eds). *Testes de Vigor em Sementes*. Jaboticabal, FUNEP. pp: 49-85.
- Ohse, S., J. G. Cubis, B. L. A. Rezende, M. G. Cortez, y R. F. Otto. 2012. Vigor e viabilidade de sementes de trigo tratadas com zinco. *Biotemas* 25: 49-58.
- Ohse, S., O. S. Santos, V. Morodim y P.A. Manfron. 1999. Efeito do tratamento de sementes de arroz irrigado com zinco em relação a aplicação no substrato. *Rev. FVZA.* 5: 35-41.
- Ohse, S., V. Marodim, O. S. Santos, S. J. Lopes, y P. A. Manfron. 2000. Germinação e vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com zinco, boro e cobre. *Rev. FZVA.* 7: 73-79.
- Oliveira, C., S. Amaral, V. S. Marques, y N. Mazur. 2005. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecido com cádmio e zinco na cultura do arroz. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 29: 109-116.
- Oliveira, S. C., M. C. Costa, R. C. S. Chagas, T. A. B. Fenilli, R. Heinrichs, C. P. Cabral, y E. Malavolta. 2003. Resposta de duas cultivares de arroz a doses de zinco aplicado como oxissulfato. *PAB* 38: 387-396.
- Oliveira, S., L. C. Tavares, E. S. Lemes, A. P. Brunes, I. L. Dias, y G. E. Meneghello. 2014. Tratamento de sementes de *Avena sativa* L. com zinco: qualidade fisiológica e desempenho inicial de plantas. *Semina: Cienc. Agr.* 35: 1131-1142.
- Orioli Junior, V., R. M. Prado, C. L. Leonel, D. A. Cazetta, J. C. H. A. G. Bastos, R. J. B. Queiroz, y C. M. Silveira. 2008. Modos de aplicação de zinco na nutrição e na produção de massa seca de plantas de trigo. *Rev. Ciênc. Suelo Nutric. Veg.* 8: 28-36.
- Prado, R. M., E. F. Frade Junior, E. R. Mouta, A. C. G. São João, y R. S. S. Costa. 2007. Crescimento inicial e estado nutricional do trigo submetido à aplicação de zinco via semente. *Rev. Ciênc. Suelo Nutric. Veg.* 7: 22-31.
- Ribeiro, N. D., y O. S. Santos 1996. Aproveitamento do zinco aplicado na semente na nutrição da planta. *Ciência Rural.* 26: 159-165.
- Roselan, C. A., y G. R. Franco. 2000. Translocação de zinco e crescimento radicular em milho. *Rev. Bras. Ciência Solo.* 24: 807-814.
- Rozane, D. E., R. M. Prado, L. M. Romualdo, y R. R. Simões. 2008. Resposta de plântulas de arroz cv. BRS Soberana à aplicação de zinco via semente. *Ciênc. Agrotec.* 32: 847-854.
- Santos, O. S., y N. D. Ribeiro. 1994. Fontes de zinco aplicadas em sementes de milho, em solução nutritiva. *Ciênc. Rural.* 24: 59-62.
- Siddiqi, M. Y., and A. D. M. Glass. 1981. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient efficiency in plants. *J. Plant Nutr.* 4: 289-302.
- Stalon, N. A., C. E. Wilson, S. Ntamatungiro, R. J. Norman, and D. L. Boothe. 2001. Evaluation of zinc seed treatments for rice. *J. Agron.* 93: 152-157.
- Swiader, J. M., S. K. Sipp, and R. E. Brown. 1994. Pumpkin growth, flowering and fruiting response to nitrogen and potassium sprinkler fertigation in sandy soil. *J. Am. Hort. Scien.* 119: 414-419.
- Wang, J., and V. P. Evangelou. 1994. Metal Tolerance Aspects of Plant Cell Wall and Vacuole: Handbook of Plant and Crop Physiology. University of Arizona. Tucson, USA. 325 p.
- Yagi, R., F. F. Smili, J. C. Araújo, R. M. Prado, S. V. Sanchez, C. E. R. R. Ribeiro, y V. C. M. Barretto. 2006. Aplicação de zinco via sementes e seu efeito na germinação, nutrição e desenvolvimento inicial do sorgo. *PAB.* 41: 665-660.