

# ASSESSMENT OF CADMIUM ON WHEAT (*Triticum aestivum* L.) IN HYDROPONICS MEDIUM

## EVALUACIÓN DE CADMIO EN TRIGO (*Triticum aestivum* L.) EN UN MEDIO HIDROPÓNICO

Saiba Idrees, Sumera Shabir, Noshin Ilyas\*, Nazima Batool, Sidra Kanwal

Department of Botany, Pir Mehr Ali Shah Arid Agriculture University, Rawalpindi, Pakistan.  
(noshinilyas@yahoo.com) (noshinilyas@uaar.edu.pk).

### ABSTRACT

Cadmium is a non-essential heavy metal that adversely affects plant growth. Its growth retarding effect has been revealed in different crops. The present research was devised to evaluate the Cd effect on the wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars NARC-11 and Galaxy in the hydroponic system. The effect of three concentrations of CdCl<sub>2</sub>•5H<sub>2</sub>O (150 μM, 200 μM and 250 μM) were evaluated on seed germination and seedling growth. The study lasted 36 d and Cd concentrations were applied after the interval of 7 d. The experimental design was completely randomized. The results showed that Cd significantly reduced the seed germination (20 % and 30 %), seedling fresh (32 % and 28 %) and dry weight (31 % and 30 %), shoot length (13 % and 14 %), root length (12.5 % and 9.5 %), total chlorophyll content (10 % in both), relative water content (24 % and 36 %), and membrane stability (18.5 % and 27 %) in NARC-11 and Galaxy. A remarkable difference was observed in both wheat cultivars.

**Key words:** Wheat, CdCl<sub>2</sub>•5H<sub>2</sub>O, hydroponics, chlorophyll content.

### INTRODUCTION

Various biotic and abiotic stresses adversely affect the food productivity in the world, and reduction of these losses under changing climate is a major concern to optimize food security. Environmental abiotic stresses, such as extreme temperature, cold or high salinity, heavy metals and drought affect plant growth and productivity (Anjum *et al.*, 2011). Growth and yield

### RESUMEN

El cadmio es un metal pesado no esencial que afecta adversamente el crecimiento de las plantas. Se ha encontrado un efecto de demora en el crecimiento de distintos cultivos. Este estudio se diseñó para evaluar el efecto de Cd en los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) NARC-11 y Galaxy en el sistema hidropónico. El efecto de tres concentraciones de CdCl<sub>2</sub>•5H<sub>2</sub>O (150 μM, 200 μM y 250 μM) en la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas se evaluó. El estudio duró 36 d y las concentraciones de Cd se aplicaron después de un intervalo de 7 d. El diseño experimental fue aleatorio. Los resultados mostraron que el Cd redujo significativamente germinación de semillas (20 % y 30 %), peso fresco (32 % y 28 %) y seco (31 % y 30 %) de plántulas, longitud del tallo (13 % y 14 %) y de la raíz (12.5 % y 9.5 %), contenido total de clorofila (10 % en ambas), contenido relativo de agua (24 % y 36 %), y estabilidad de las membranas (18.5 % y 27 %) en NARC-11 y Galaxy. Una diferencia notable se observó en las dos variedades de trigo.

**Palabras clave:** Trigo, CdCl<sub>2</sub>•5H<sub>2</sub>O, hidroponia, contenido de clorofila.

### INTRODUCCIÓN

Diversos tipos de estrés bióticos y abióticos afectan adversamente la productividad de alimentos en el mundo, y la reducción de estas pérdidas bajo el cambio climático es una preocupación importante para optimizar la seguridad alimentaria. El estrés abiótico, como el que causa la temperatura extrema, frío o salinidad alta, metales pesados y sequía afecta el crecimiento y la productividad de la planta (Anjum *et al.*, 2011). El crecimiento y el rendimiento de los cultivos anuales es limitado hasta en 50 % a causa del estrés abiótico. Bajo condiciones de estrés, las características morfológicas y fisiológicas son afectadas (Rodríguez *et al.*, 2005).

\*Author for correspondence ❖ Autor responsable.

Received: June, 2015. Approved: September, 2015.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 49: 917-929. 2015.

of annual crops is limited up to 50 % due to abiotic stresses. Under stress conditions morphological and physiological characteristics are affected (Rodríguez *et al.*, 2005).

With increase in industrialization, the heavy metal contents are also increasing adversely in soil. The industrial waste has the mixture of various organic, inorganic, radioactive and heavy metals (Ahmad *et al.*, 2012). These heavy metals act as essential micronutrients and play an important role in plants, *e.g.* as cofactors of metabolic enzymes. When their amount increases beyond the limits in the soil, they become heavy metal stress in plants (Stobrawa and Lorence-Plucinska, 2007; Montenegro *et al.*, 2009; Bhatti *et al.*, 2013).

Cadmium being a mobile heavy metal can be taken up by roots actively and can be accumulated in different plant parts (Ahmad *et al.*, 2012). It is more toxic due to its high mobility into water (Pinto *et al.*, 2004). The main sources by which it may enter into the environment are mineral fertilizers, metal-working industries, and mining units (Schutzendubel *et al.*, 2001; Hirve and Bafna, 2013). Cadmium induces oxidative stress in plants either by increasing or decreasing antioxidative molecules (Malecka *et al.*, 2001), inhibits the plumule and radical growth in rice (Jun-yu *et al.*, 2008) and root growth is more affected than shoot growth in wheat (An *et al.*, 2004). Plant membrane is the first target of heavy metal toxicity, which may directly affect the nucleus or react with the hormones that are in aerial plant parts (Laspina *et al.*, 2005; Hirva and Bafna, 2013).

Wheat is the second most important crop after rice as it fulfills the protein and caloric requirement of the world's one third population (Skovmand and Reynolds, 2000). During 2011-2012, 696 million Mg wheat were produced, but its yield is stagnant during the last 50 years due to biotic and abiotic stresses. According to Sial *et al.* (2009), 40 % more wheat would be required up to 2025 to feed the rapidly growing population. In Pakistan, studies were conducted on Cd toxicity in wheat (Jiang *et al.*, 2001; Peralta-Videa *et al.*, 2002; Khan *et al.*, 2006), but still there is a need to check its effects under several conditions. The present study was aimed to evaluate the effects of cadmium toxicity on germination and growth of two wheat cultivars under hydroponics conditions.

Con mayor industrialización, los contenidos de metales pesados también aumentan adversamente en el suelo. El desecho industrial tiene una mezcla de varios metales orgánicos, inorgánicos, radioactivos y pesados (Ahmad *et al.*, 2012). Estos metales pesados actúan como micronutrientes esenciales y tienen una función importante en las plantas, *v.g.* como cofactores de las enzimas metabólicas. Cuando su cantidad aumenta más allá de los límites en el suelo, producen en estrés por metales pesados en las plantas (Stobrawa y Lorence-Plucinska, 2007; Montenegro *et al.*, 2009; Bhatti *et al.*, 2013).

El Cd es un metal pesado móvil que puede ser absorbido activamente por las raíces y se acumulen distintas partes de la planta (Ahmad *et al.*, 2012). Es más tóxico debido a su movilidad alta en el agua (Pinto *et al.*, 2004). Las fuentes principales por las que incorpora al ambiente son los fertilizantes minerales, las industrias que trabajan en metal, y las unidades de minería (Schutzendubel *et al.*, 2001; Hirve y Bafna, 2013). El Cd induce el estrés oxidativo en las plantas, al aumentar o reducir las moléculas antioxidativas (Malecka *et al.*, 2001), inhibe el crecimiento de la plántula y la raíz en arroz (Jun-yu *et al.*, 2008) y el crecimiento radicular es más afectado que el crecimiento del tallo en trigo (An *et al.*, 2004). La membrana de la planta es el sitio principal de la toxicidad por metales pesados y puede afectar directamente el núcleo o reaccionar con las hormonas en las partes aéreas de las plantas (Laspina *et al.*, 2005; Hirva y Bafna, 2013).

El trigo es el segundo cultivo en importancia después del arroz, y satisface los requerimientos de proteína y calorías de un tercio de la población mundial (Skovmand y Reynolds, 2000). Durante 2011-2012 se produjeron unas 696 millones Mg de trigo, pero su rendimiento se detuvo desde hace 50 años debido a estreses bióticos y abióticos. Según Sial *et al.* (2009), se requerirá 40 % más trigo hacia 2025 para alimentar a la población mundial en rápido aumento. En Pakistán se han realizado estudios sobre la toxicidad de Cd en trigo (Jiang *et al.*, 2001; Peralta-Videa *et al.*, 2002; Khan *et al.*, 2006), pero todavía se debe revisar sus efectos bajo varias condiciones. El objetivo del presente estudio fue evaluar los efectos de la toxicidad por cadmio en la germinación y el crecimiento de dos variedades de trigo bajo condiciones de hidroponia.

## MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out at the Plant Physiology laboratory, Department of Botany PMAS-Arid Agriculture University Rawalpindi, Pakistan. Two wheat cultivars, Galaxy and NARC-11 were selected to evaluate the effect of three  $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  concentrations on seed germination and seedling growth.

Seeds of Galaxy and NARC-11 cultivars were obtained from the National Agriculture Research Centre (NARC) Islamabad, Pakistan. Before germination, viable and healthy seeds were surface sterilized with 5 % sodium hypochloride for 3 min and then rinse with distilled water for three times.

Cadmium chloride ( $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) of high purity (98 % Sigma-Aldrich). Concentrations of 150  $\mu\text{M}$ , 200  $\mu\text{M}$  and 250  $\mu\text{M}$  were applied on wheat cultivars along with control (0 Cd). The germination evaluation was conducted in autoclaved Petri plates. Ten seeds of each wheat cultivar were utilized. Three mL of each Cd concentration solution was added 1 d after starting the experiment, and afterwards every 2 d for 7 d. The following variables were calculated:

Germination:

$$\text{Germination \%} = \frac{\text{Total seed germinated}}{\text{Total seed planted}} \times 100$$

Promptness index:

$$\text{P.I.} = \text{nd}_2 (1.00) + \text{nd}_4 (0.75) + \text{nd}_6 (0.5) + \text{nd}_8 (0.25)$$

In this equation,  $\text{nd}_2$ ,  $\text{nd}_4$ ,  $\text{nd}_6$  and  $\text{nd}_8$  are the number of seedlings emergence at 2, 4, 6 and 8 d.

Germination stress tolerance index:

$$\text{G.S.T.I.} = \frac{\text{P.I. of stressed seeds}}{\text{P.I. of controlled seeds}} \times 100$$

Seedling vigour (S.V.I.):

$$\text{S.V.I.} = \text{Seedling length (mm)} \times \text{germination percentage (\%)}$$

The experiment of hydroponics was arranged in complete randomized design (CRD) with three replicates. Firstly, 20 surface sterilized seeds of both cultivars were sown in a sand tray. Then at two leaf stage after 8 d of germination, the seedlings were shifted into the Hoagland's solution. The pH of solution was maintained between 5.5-6.5. 150  $\mu\text{M}$ , 200  $\mu\text{M}$  and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  solution, about 150 mL, were applied in each hydroponic container along with nutrients

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el laboratorio de Fisiología Vegetal, Departamento de Botánica PMAS-Agricultura Árida, Universidad de Rawalpindi, Pakistán. Dos variedades de trigo, Galaxy y NARC-11, se seleccionaron para evaluar el efecto de tres concentraciones de  $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  en la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas.

Las semillas de Galaxy y NARC-11 se obtuvieron del Centro Nacional de Investigación en Agricultura (National Agriculture Research Centre, NARC), Islamabad, Pakistán. Antes de la germinación, se esterilizaron las semillas viables y saludables con hipocloruro de sodio al 5 % por 3 min y se enjuagaron con agua destilada tres veces.

El  $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  fue de alta pureza (98 % Sigma-Aldrich). Concentraciones de 150  $\mu\text{M}$ , 200  $\mu\text{M}$  y 250  $\mu\text{M}$  se aplicaron a las variedades de trigo, y al testigo (0 Cd). La evaluación de la germinación se hizo en cajas petri esterilizadas en autoclave. Diez semillas de cada variedad de trigo fueron usadas. Tres mL de cada concentración de Cd se añadieron 1 d después de empezar el experimento y después cada 2 d por 7 d. Las siguientes variables fueron calculadas:

Germinación:

$$\text{Germinación \%} = \frac{\text{Total semillas germinadas}}{\text{Total semillas plantadas}} \times 100$$

Índice de prontitud:

$$\text{P.I.} = \text{nd}_2 (1.00) + \text{nd}_4 (0.75) + \text{nd}_6 (0.5) + \text{nd}_8 (0.25)$$

En esta ecuación,  $\text{nd}_2$ ,  $\text{nd}_4$ ,  $\text{nd}_6$  y  $\text{nd}_8$  son el número de emergencia de plántulas a los 2, 4, 6 y 8 d.

Índice de tolerancia al estrés en la germinación:

$$\text{G.S.T.I.} = \frac{\text{P.I. de semillas estresadas}}{\text{P.I. de semillas controladas}} \times 100$$

Vigor de las plántulas (S.V.I.):

$$\text{S.V.I.} = \text{Largo de plántula (mm)} \times \text{porcentaje de germinación (\%)}$$

El experimento de hidroponia se estableció con un diseño completamente al azar con tres réplicas. Primero se sembraron en una charola con arena 20 semillas de cada variedad, esterilizadas en su superficie. Después, en la etapa de dos hojas, 8 d después de la germinación, las plántulas se cambiaron a solución Hoagland. El pH de la solución se mantuvo entre 5.5-6.5. En

every 7 d. The plants were kept in growth room at room 25 °C. After 28 d plants were harvested and germination percentage, seed vigour index, tolerance index, root and shoot length, fresh and dry weight and turgid weight of the plant, chlorophyll and carotenoid contents, and membrane stability index, were measured. The shoot and root toxicity, and tolerance index were calculated by the following formula:

$$\text{Shoot toxicity (\%)} = \frac{\text{Shoot length of control} - \text{Shoot length of treatment}}{\text{Shoot length of control}} \times 100$$

$$\text{Root toxicity (\%)} = \frac{\text{Root length of control} - \text{Root length of treatment}}{\text{Root length of control}} \times 100$$

$$\text{Tolerance index (100 \%)} = \frac{\text{Mean root length in stress}}{\text{Mean root length in control}} \times 100$$

For relative water contents the leaves were weighed to get fresh weight and were soaked in water for 24 h (turgid weight). After that leaves were oven dried at 65 °C for 2 d to obtain dry weight (Weatherly, 1950).

$$\text{RWC} = \frac{[(\text{Fresh weight} - \text{Dry weight}) / (\text{Turgid weight} - \text{Dry weight})] \times 100}$$

To measure the membrane stability index (M.S.I) the leaf disc of the each plant sample was taken into 10 mL distilled water and heated in water bath at 40 °C for 30 min and its electrical conductivity (EC) was measured (C1). Then the same sample was heated at 100 °C for 10 min and its EC was registered (C2). The M.S.I was calculated by the following formula:

$$\text{M.S.I} = [1 - (C1/C2)] \times 100$$

Chlorophyll a, b, total and carotenoids were measured according to the following formulas:

$$\text{Chlorophyll a} = 12.7 (A633) - 2.7 (A645)$$

$$\text{Chlorophyll b} = 22.9 (A645) - 4.7 (A633)$$

$$\text{Total chlorophyll} = (A652 \times 1000/34.5)$$

$$\text{Carotenoids} = A480 + 0.114 \times A633 - (0.638) \times A645 \text{ mM}$$

Data analysis was carried out by using Statistics software 9.0 versions. The experimental data was expressed as means

cada contenedor hidropónico se aplicaron 150 μM, 200 μM y 250 μM de solución CdCl<sub>2</sub>•5H<sub>2</sub>O, alrededor de 150 mL, junto con nutrientes, cada 7 d. Las plantas se conservaron en una habitación de crecimiento a 25 °C. Después de 28 d las plantas se cosecharon y se midieron porcentaje de germinación, índice de vigor de la semilla, índice de tolerancia, largo de la raíz y el tallo, peso fresco y seco y peso turgente de la planta, contenido de clorofila y carotenoides, e índice de estabilidad de la membrana. La toxicidad del tallo y raíz, y el índice de tolerancia se calcularon con la siguiente fórmula:

$$\text{Toxicidad del tallo (\%)} = \frac{\text{Largo del tallo testigo} - \text{Largo de tallo tratamiento}}{\text{Largo del tallo testigo}} \times 100$$

$$\text{Toxicidad de la raíz (\%)} = \frac{\text{Largo de la raíz testigo} - \text{Largo de la raíz tratamiento}}{\text{Largo de la raíz testigo}} \times 100$$

$$\text{Índice de tolerancia (100 \%)} = \frac{\text{Largo de la raíz en estrés}}{\text{Largo de la raíz promedio en testigo}} \times 100$$

Para el contenido de agua relativo, las hojas se pesaron para obtener el peso fresco, y se remojaron en agua por 24 h (peso turgente). Después las hojas se secaron en estufa a 65 °C por 2 d para obtener el peso seco (Weatherly, 1950).

$$\text{CRA} = \frac{[(\text{Peso fresco} - \text{Peso seco}) / (\text{Peso turgente} - \text{Peso seco})] \times 100}$$

Para medir el índice de estabilidad de la membrana (MSI), el disco de muestra de hojas de cada planta se colocó en 10 mL de agua destilada y se calentó en baño María a 40 °C por 30 min y se midió la conductividad eléctrica (CE) (C1). La misma muestra se calentó a 100 °C por 10 min y se registró su CE (C2). El MSI se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{M.S.I} = [1 - (C1/C2)] \times 100$$

Las clorofilas a, b, total y carotenoides se midieron de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\text{Clorofila a} = 12.7 (A633) - 2.7 (A645)$$

$$\text{Clorofila b} = 22.9 (A645) - 4.7 (A633)$$

$$\text{Clorofila total} = (A652 \times 1000/34.5)$$

$$\text{Carotenoides} = A480 + 0.114 \times A633 - (0.638) \times A645 \text{ mM}$$

and standard errors (SE) with three replicates. Mean significant difference among treatment was detected by ANOVA.

## RESULTS AND DISCUSSION

Cadmium phytotoxicity had a pronounced effect on the germination and seedling growth of the *T. aestivum* L. cv. NARC-11 and Galaxy. There was a drastic effect on both cultivars as compared to the control and response also varied with concentrations in both cultivars. The inhibitory effect of Cd was observed on seed germination of NARC-11 and Galaxy which was dependent on the dose of heavy metal.

Seed germination was reduced as the concentration of Cd increased. The maximum germination inhibition (30 %) was observed in Galaxy at 250  $\mu\text{M}$  Cd treatment, in contrast with NARC-11 it was 20 %. The 150  $\mu\text{M}$  Cd treatment had similar effect in both cultivars. NARC-11 showed more tolerance than Galaxy in germination (Figure 1). The inhibition of germination with increased Cd concentration may be due to the hindrance of metal ions in water absorption. Similar results were also presented by Amirjani (2012) in wheat. The difference in seed germination might be due to the genetic variability in both cultivars. The same response was observed in Pb rice stressed (Zhang *et al.*, 2005). The stress tolerance at germination level was significantly decreased at 250  $\mu\text{M}$  Cd concentration (37 % and 41 % in NARC-11 and Galaxy). With 150  $\mu\text{M}$  there was maximum tolerance (83 % in NARC-11 and 82 % in Galaxy) (Figure 2). The same findings were shown by Aydinalp and Marinova (2009).

The tolerance index was 83 %, 70 % and 50 % in NARC-11, whereas in Galaxy it was 94 %, 84 % and 52 %, for 150  $\mu\text{M}$ , 200  $\mu\text{M}$  and 250  $\mu\text{M}$ . The response of wheat cultivars varied with Cd concentration (Figure 3). The reason of low tolerance with increased Cd concentration may be due to the physiological changes with growth stages (Khan *et al.*, 2006). The higher tolerance index was shown by Galaxy at 200  $\mu\text{M}$  (84 %), as compared to NARC-11 (70 %), but with 250  $\mu\text{M}$  there was no significant difference between cultivars. A same pattern of Cd effect on tolerance indices was observed by Ahmad *et al.* (2012) in wheat.

The results showed that the seed vigour of Galaxy was more affected than NARC-11 by Cd 150  $\mu\text{M}$ ;

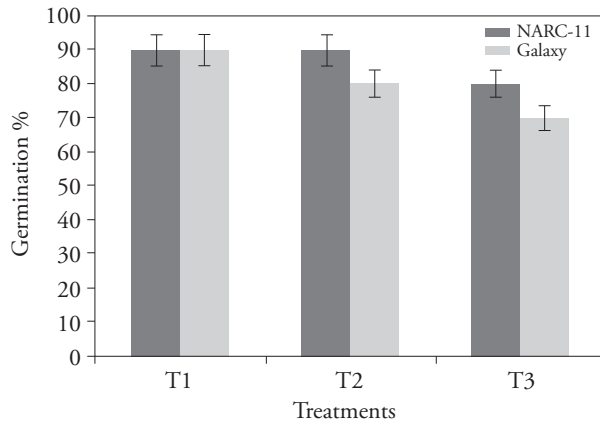
El análisis de datos se realizó con Statistics versión 9.0. Los datos experimentales se expresaron como medias y errores estándar (ES) con tres réplicas. La diferencia significativa promedio entre los tratamientos se detectó con ANOVA.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La toxicidad del cadmio tuvo efecto pronunciado en la germinación y el crecimiento de la plántula de *T. aestivum* L. cv. NARC-11 y Galaxy. El efecto fue drástico en ambos cultivares, comparados con el testigo, y la respuesta también varió con las concentraciones entre los cultivares. El efecto inhibitorio del Cd se observó en la germinación de las semillas de NARC-11 y Galaxy que dependió de la dosis del metal pesado.

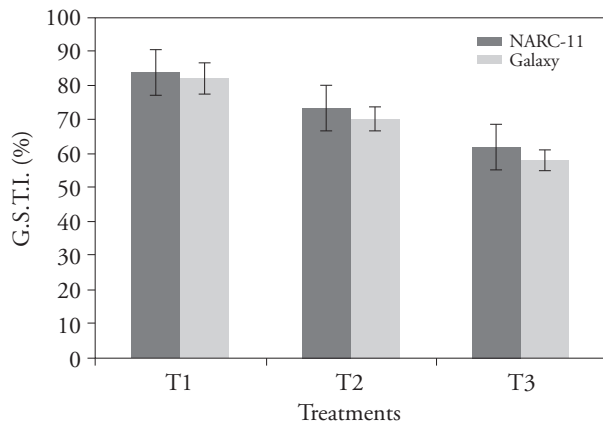
La germinación de las semillas se redujo al aumentar la concentración de Cd. La inhibición máxima de la germinación (30 %) se observó en Galaxy con 250  $\mu\text{M}$  Cd, en contraste con NARC-11 fue 20 %. El tratamiento de 150  $\mu\text{M}$  Cd tuvo un efecto similar en ambas variedades. NARC-11 mostró más tolerancia que Galaxy en la germinación (Figura 1). La inhibición de la germinación con mayor concentración de Cd puede deberse al impedimento causado por los iones de Cd en la absorción de agua. Amirjani (2012) encontró resultados similares en trigo. La diferencia en la germinación de semillas puede deberse a la variabilidad genética en ambas variedades. La misma respuesta se observó en arroz estresado con Pb (Zhang *et al.*, 2005). La tolerancia al estrés en la germinación disminuyó significativamente con 250  $\mu\text{M}$  Cd (37 % en NARC-11 y 41 % en Galaxy). Con 150  $\mu\text{M}$  hubo una tolerancia máxima (83 % en NARC-11 y 82 % en Galaxy) (Figura 2). Aydinalp y Marinova (2009) presentaron los mismos resultados.

El índice de tolerancia fue 83 %, 70 % y 50 % en NARC-11, mientras que en Galaxy fue 94 %, 84 % y 52 %, para 150  $\mu\text{M}$ , 200  $\mu\text{M}$  y 250  $\mu\text{M}$ . La respuesta de las variedades de trigo varió con la concentración de Cd (Figura 3). La tolerancia menor con mayor concentración de Cd puede deberse a los cambios fisiológicos con las etapas de crecimiento (Khan *et al.*, 2006). Galaxy mostró índice mayor de tolerancia a 200  $\mu\text{M}$  (84 %) respecto a NARC-11 (70 %), pero con 250  $\mu\text{M}$  no hubo diferencia significativa entre los cultivares. El mismo patrón del efecto de Cd sobre los índices de tolerancia fue observado por Ahmad *et al.* (2012) en trigo.



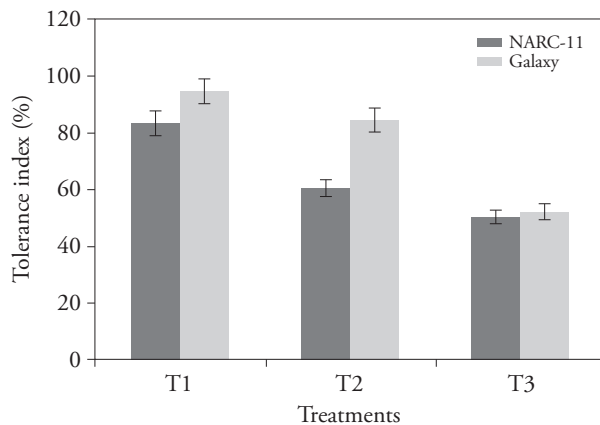
**Figure 1.** Effect of Cd concentrations on the seed germination of NARC-11 and Galaxy wheat cultivars (T1: 150, T2: 200, and T3:250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 1.** Efecto de las concentraciones de Cd en la germinación de semillas de cultivares de trigo NARC-11 y Galaxy (T1: 150, T2: 200, and T3:250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



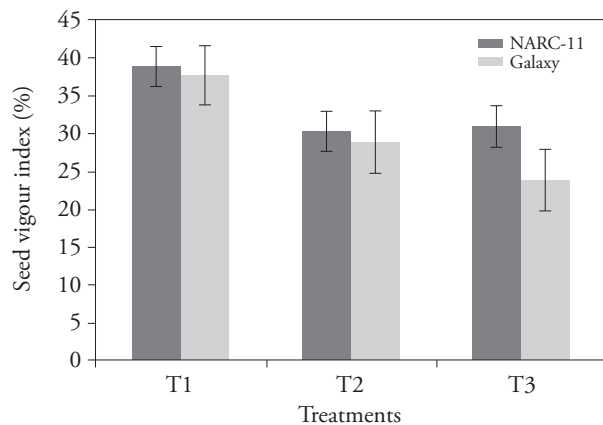
**Figure 2.** Effect of Cd concentrations on seed germination of two wheat cultivars (G.S.T.I: tolerance index; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 2.** Efecto de las concentraciones de Cd en la germinación de semillas de dos cultivares de trigo (G.S.T.I: índice de tolerancia, T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure 3.** Effect of Cd concentrations on the tolerance index of two wheat cultivars (T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 3.** Efecto de concentraciones de Cd en el índice de tolerancia de dos cultivares de trigo (T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure 4.** Effect of Cd concentrations on seed vigour of two wheat cultivars (T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 4.** Efecto de distintas concentraciones de Cd en el vigor de las semillas de dos cultivares de trigo (T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

but with Cd 250  $\mu\text{M}$  the maximum decrease was for Galaxy (30.15 %) than for NARC-11 (23.8 %) (Figure 4). Similar results of Cd effect were reported by Shaikh *et al.* (2013). The seed vigour and germination may decrease due to the increased breakdown of reserved food in embryo. These findings were reported by Titov *et al.* (1996), Jun-yu *et al.* (2008), and Raziuddin *et al.* (2011). The P.I. decreased as the Cd concentration increased. Maximum P.I. was shown at 150  $\mu\text{M}$  (14 and 13.25 in NARC-11 and Galaxy).

Los resultados mostraron que el vigor de la semilla de Galaxy fue más afectado que el de NARC-11, por el Cd 150  $\mu\text{M}$ ; pero con Cd 250  $\mu\text{M}$  la reducción máxima fue para Galaxy (30.15 %) y para NARC-11 (23.8 %) (Figura 4). Shaikh *et al.* (2013) reportan resultados similares del efecto del Cd. El vigor de la semilla y la germinación puede disminuir debido a la mayor digestión del alimento de reserva en el embrión. Estos hallazgos fueron reportados por Titov *et al.* (1996), Jun-yu *et al.* (2008) y Raziuddin *et al.*

At 250 mM the P.I. of Galaxy was more negatively affected (9.0) than NARC-11 (10.0) (Figure 5).

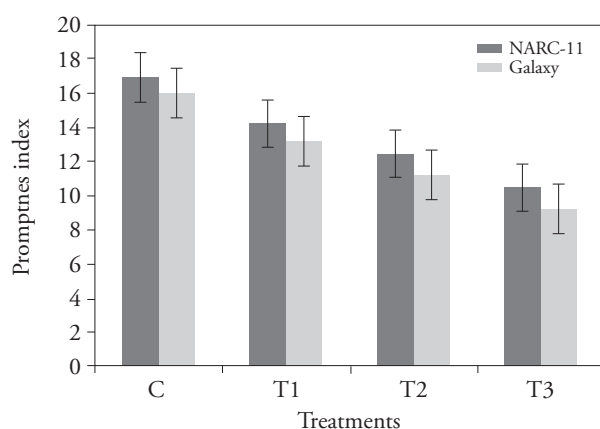
Shoot and root growth was adversely affected by the increased Cd concentrations in medium. Shoot toxicity was more pronounced in Galaxy (35 %, 19 % and 13.55 % at 250, 200 and 150  $\mu\text{M}$ ) than in NARC-11 (32 %, 15 % and 13 %) (Figure 6 and 7). The results show that the roots of NARC-11 show more resistance to Cd than Galaxy. These findings are similar with those obtained by Shaikh *et al.* (2013).

Gradual decrease in the plant root and shoot length with Cd concentration was observed. Galaxy seedling growth exhibited more susceptibility to Cd than NARC-11. The results showed that Cd (250  $\mu\text{M}$ ) significantly reduced the shoot length up to 13 % and 9 % in NARC-11 and Galaxy (Figure 8), whereas NARC-11 and Galaxy showed a decrease of 12.5 % and 9.5 %, respectively, in root length, as compared to control (Figure 9). According to the Rascio *et al.* (2008), root length was reduced under Cd stress because it changes the morphogenesis of root. Similar results were reported by Ahmad *et al.* (2012) and Amirjani (2012) in wheat. Root, shoot and seedling length are the most sensitive morphology of plants and are directly correlated to the effect of heavy metal (Correa *et al.*, 2006; Ahmad *et al.*, 2008; Jun-yu *et al.*, 2008). Roots are more affected by Cd; however Liu *et al.* (2005) reported that root and shoot are similarly affected but since Cd is absorbed first by roots,

(2011). El P.I. disminuyó conforme la concentración de Cd aumentó. El máximo P.I. se observó a 150  $\mu\text{M}$  (14 y 13.25 en NARC-11 y Galaxy). A 250  $\mu\text{M}$  el P.I. de Galaxy fue más afectado negativamente (9.0) que NARC-11 (10.0) (Figura 5).

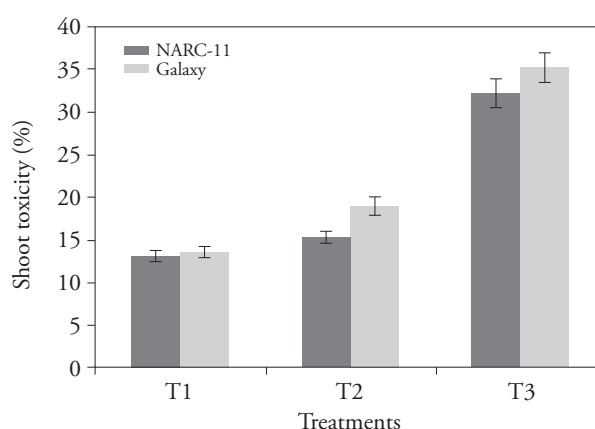
El crecimiento del tallo y la raíz fue afectado adversamente por mayores concentraciones de Cd en el medio. La toxicidad del tallo fue mayor en Galaxy (35 %, 19 % y 13.55 % a 250, 200 y 150  $\mu\text{M}$ ) que en NARC-11 (32 %, 15 % y 13 %) (Figura 6 y 7). Los resultados muestran que las raíces de NARC-11 tienen más resistencia al Cd que Galaxy. Estos hallazgos son similares a los obtenidos por Shaikh *et al.* (2013).

Hubo una disminución gradual en el largo de la raíz y el tallo de la planta con la concentración de Cd. El crecimiento de la plántula de Galaxy fue más susceptible al Cd que NARC-11. Los resultados mostraron que el Cd (250  $\mu\text{M}$ ) redujo significativamente el largo del tallo en hasta 13 % y 9 % en NARC-11 y Galaxy (Figura 8), mientras que NARC-11 y Galaxy disminuyeron 12.5 % y 9.5 %, respectivamente, en el largo de la raíz a 250  $\mu\text{M}$ , comparados con el testigo (Figura 9). Según Rascio *et al.* (2008), el largo de la raíz se retrasó bajo estrés por Cd porque cambia la morfogénesis de la raíz. Ahmad *et al.* (2012) y Amirjani (2012) reportaron resultados similares en trigo. La longitud de la raíz, el tallo y la plántula es lo más sensible de la morfología de las plantas y está directamente correlacionado con el efecto de los metales pesados (Correa *et al.*, 2006; Ahmad *et al.*, 2008;



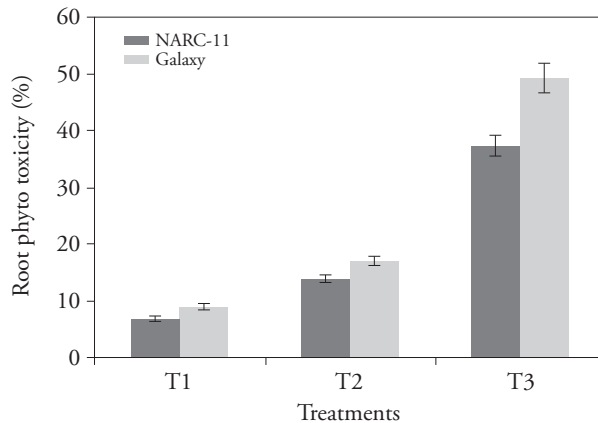
**Figure 5.** Effect of Cd concentrations on promptness index in wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 5.** Efecto de la concentración de Cd en el índice de prontitud en cultivares de trigo (C: testigo; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



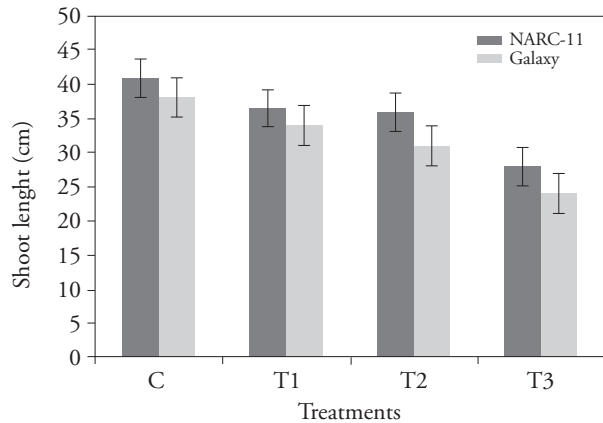
**Figure 6.** Effect of Cd concentrations on the shoot phytotoxicity of wheat cultivars (T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 6.** Efecto de la concentración de Cd en la fitotoxicidad del tallo de cultivares de trigo (T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



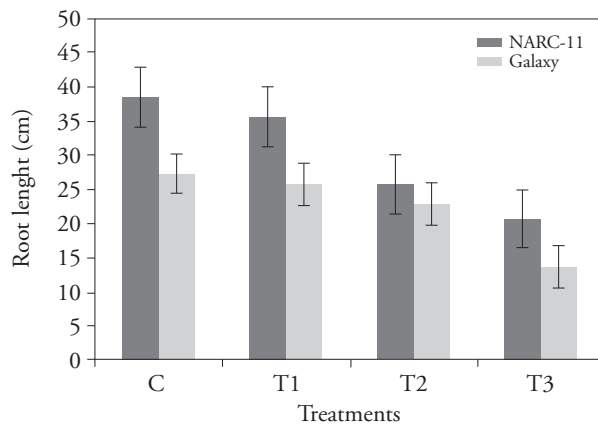
**Figure 7. Effect of Cd concentrations on the root toxicity in wheat cultivars (T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).**

**Figura 7. Efecto de las concentraciones de Cd en la toxicidad de la raíz en cultivares de trigo (T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).**



**Figure 8. Effect of Cd concentrations on the shoot length on the wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).**

**Figura 8. Efecto de las concentraciones de Cd en la longitud del tallo de en cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).**



**Figure 9. Effect of Cd concentrations on the root length of the wheat cultivars (T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).**

**Figura 9. Efecto de las concentraciones de Cd en la longitud de las raíces de las cultivares de trigo (T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).**

they showed more retardation. Similar results were reported by Krantev *et al.* (2008), Yadav (2010) and Rascio and Navari-Izzo (2011), who stated that the Cd stress inhibits the lateral root formation, decrease root and shoot length and also cause chlorosis.

The results showed that high Cd concentrations decreased seedling fresh and dry weights, as compared to the control (Figure 10). Similar findings were reported by Ashraf *et al.* (2011) and Ahmad *et al.* (2012). The decrease in the fresh and dry weight was due to the decreased metabolism because of the Cd interaction with enzymes and

Jun-yu *et al.*, 2008). Las raíces son más afectadas por el Cd; sin embargo Liu *et al.* (2005) reportaron que la raíz y el tallo, son afectados de manera similar pero dado que el Cd es absorbido primero por las raíces, las mismas mostraron mayor atraso. Krantev *et al.* (2008), Yadav (2010) y Rascio y Navari-Izzo (2011) reportaron resultados similares, señalando que el estrés por Cd inhibe la formación lateral de raíces, disminuye la longitud de la raíz y del tallo, y también causa clorosis.

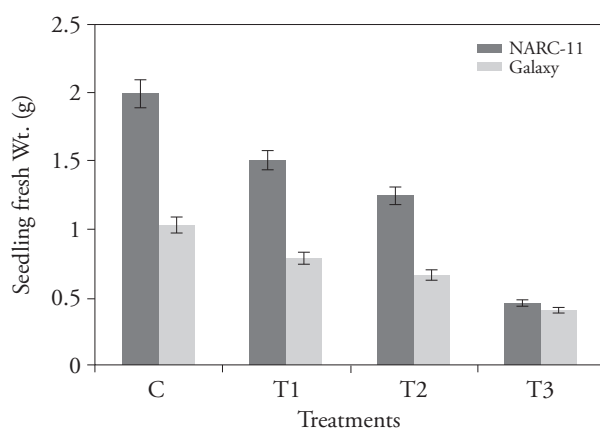
Los resultados mostraron que concentraciones altas de Cd disminuyeron los pesos fresco y seco de las plántulas, en comparación con el testigo (Figura 10). Ashraf *et al.* (2011) y Ahmad *et al.* (2012) reportaron hallazgos similares. La disminución en peso fresco y seco se explica por el metabolismo disminuido debido a la interacción del Cd con enzimas y reacciones bioquímicas. El crecimiento general de la planta se redujo con el Cd (Oncel *et al.*, 2000; Shafi *et al.*, 2010).

Los resultados del estrés por Cd en los contenidos de clorofila mostraron disminución significativa en ambos cultivares de trigo, comparada con el testigo. Los contenidos de clorofila disminuyeron al aumentar el nivel de Cd. Las clorofilas a, b y total disminuyeron drásticamente en Galaxy con mayor concentración de Cd, comparado con el testigo (Figuras 11-13). Con la concentración máxima de Cd, el contenido total de clorofila disminuyó al mismo nivel en ambos cultivares (10 %), comparado con



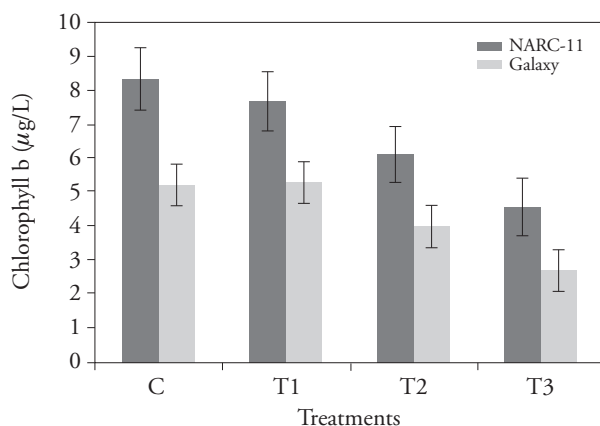
biochemical reactions. Overall plant growth was decreased with Cd (Oncel *et al.*, 2000; Shafi *et al.*, 2010).

Results of Cd stress on chlorophyll contents showed a significant decrease in both wheat varieties, as compared to the control. The chlorophyll contents decreased as the Cd level increased. The chlorophyll a, b and total chlorophyll drastically decreased in Galaxy with the higher Cd concentration, as compared to the control (Figure 11-13). At maximum Cd concentration,



**Figure 10.** Effect of Cd concentrations on the fresh weight of seedling of two wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

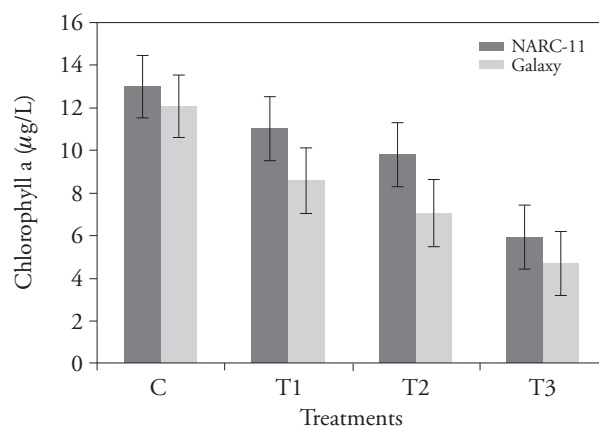
**Figura 10.** Efecto de las concentraciones de Cd en el peso fresco de plántulas de dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure 12.** Effect of Cd concentrations on the chlorophyll b ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) on two wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

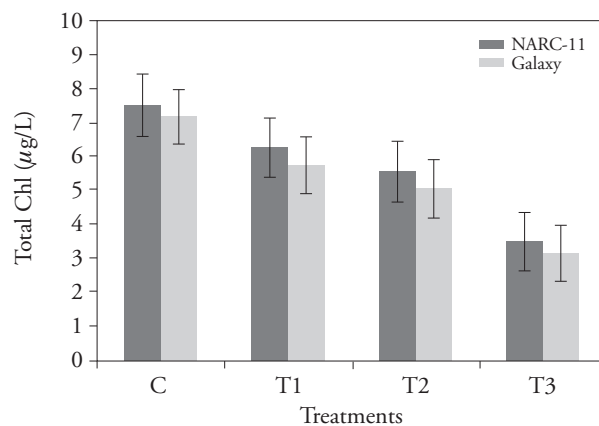
**Figura 12.** Efecto de las concentraciones de Cd en la clorofila b ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

el testigo. En trigo, la exposición de corto y largo plazo al Cd tiene efecto inhibitor en la fotosíntesis (Moussa y El-Gamal, 2010). El Cd a 200  $\mu\text{M}$  y 250  $\mu\text{M}$  causó clorosis de las hojas. Stiborova *et al.* (1986), Oncel *et al.* (2000), Muthuchelian *et al.* (2001), Wu *et al.* (2003), Amirjani (2012) y Bheemareddy (2013) reportaron hallazgos similares. Este efecto fue más pronunciado en Galaxy que en NARC-11. El tratamiento afectó más pigmentos en



**Figure 11.** Effect of Cd concentrations on the chlorophyll a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) on two wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 11.** Efecto de las concentraciones de Cd en la clorofila a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure 13.** The effect of Cd concentrations on the total chlorophyll ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) content in two wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 13.** Efecto de las concentraciones de Cd en la clorofila total ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

total chlorophyll content decreased at same level in both cultivars (10 %), as compared to control. In wheat, long and short term Cd exposure have inhibitory effect on the photosynthesis (Moussa and El-Gamal, 2010). The Cd at 200  $\mu\text{M}$  and 250  $\mu\text{M}$  caused leaf chlorosis. Similar findings were reported by Stiborova *et al.* (1986), Oncel *et al.* (2000), Muthuchelian *et al.* (2001), Wu *et al.* (2003), Amirjani (2012), and Bheemareddy (2013). This effect was more pronounced in Galaxy than NARC-11. The treatment affected more pigments on leaf surface than in the mesophyll. In leaves, Cd ions cause hindrance and division of chloroplast (Baryla *et al.*, 2001). The negative effect of Cd ions on the structure and functioning of chloroplast in *T. aestivum* L. was also reported by Atal *et al.* (1991). Besides, Cd have drastic effect on the PSII specially electron transport chain and on the oxygen evolving complex (OEC) because it replace the  $\text{Ca}^+/\text{Mn}$  bonding in OEC (Sigfridsson *et al.*, 2004).

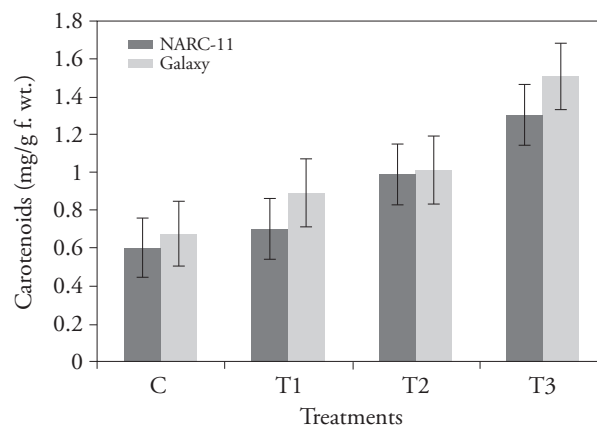
In our study, a gradual increase in carotenoids content was observed with rise of Cd concentrations. There was more appearance of carotenoid pigments in Galaxy cultivar than the NARC-11. The maximum carotene content was found at 250  $\mu\text{M}$  (Figure 14). These findings contrasted with results of Amirjani (2012). But these findings are similar to those of Bhatti *et al.* (2013) showing the increase in carotenoids as Pb concentration increased. The carotenoid pigment is a secondary metabolite and a light-harvesting pigment which prevents the cellular structures from damage and also protects the membranes destabilization due to reactive oxygen species (ROS) damage. So, as the Cd level increased, plants produce more carotenoids to cope up with the Cd stress (Singh *et al.*, 2006).

Our results showed that high Cd concentration significantly affects the membrane stability. The membrane stability drastically decreased as the Cd concentration increased in NARC-11 (35 % and 28 %) as compared to Galaxy (44 % and 41 %) at 200  $\mu\text{M}$  and 250  $\mu\text{M}$ . Besides, membrane stability index decreased 18.5 % and 27 % at 250  $\mu\text{M}$  as compared to control (Figure 15). Popova *et al.* (2008) also showed that the Cd stress significantly changes the membrane stability and it's functioning.

The relative water content decreased as the Cd level increased. No significant effect on relative

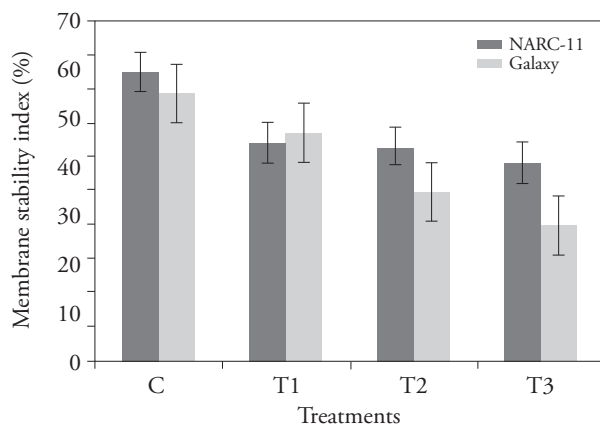
la superficie de la hoja que en el mesófilo. En hojas, los iones de Cd causan impedimentos y división del cloroplasto (Baryla *et al.*, 2001). El efecto negativo de los iones de Cd en la estructura y el funcionamiento del cloroplasto en *T. aestivum* L. también fue reportado por Atal *et al.* (1991). También, Cd tiene efecto drástico en el PSII, principalmente en la cadena de transporte de electrones y en el complejo de evolución de oxígeno (OEC) porque reemplaza el enlace  $\text{Ca}^+/\text{Mn}$  en el OEC (Sigfridsson *et al.*, 2004).

En nuestro estudio hubo un aumento gradual en el contenido de carotenoides con la concentración de Cd. La presencia de pigmentos de carotenoides fue mayor en el cultivar Galaxy que en NARC-11. El contenido máximo de carotenoides se encontró a 250  $\mu\text{M}$  (Figura 14). Estos hallazgos contrastaron con los resultados de Amirjani (2012), pero fueron similares a los de Bhatti *et al.* (2013) quienes mostraron el aumento en carotenoides al aumentar la concentración de Pb. El pigmento de carotenoide es un metabolito secundario y un pigmento que absorbe luz, lo cual evita que las estructuras celulares se dañen y también protege a las membranas de la desestabilización a causa del daño por especies de oxígeno reactivas (ROS). Así, conforme el nivel de Cd aumenta, las plantas producen más carotenoides para lidiar con el estrés por Cd (Singh *et al.*, 2006).



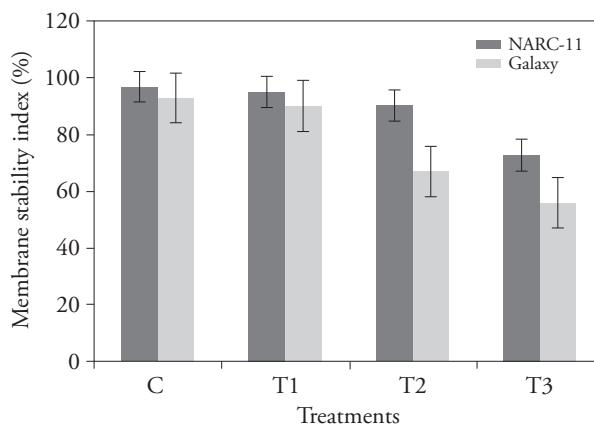
**Figure 14.** Effect of Cd concentrations on the carotenoid content in two wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 14.** Efecto de las concentraciones de Cd en el contenido de carotenoides en dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure 15.** Effect of Cd concentrations on membrane stability index of two wheat cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 15.** Efecto de las concentraciones de Cd en el índice de estabilidad de la membrana de dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).



**Figure 16.** Effect of Cd concentrations on the Relative Water Content (RWC) in leaves of two wheat Cultivars (C: control; T1, T2 and T3: 150, 200 and 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

**Figura 16.** Efecto de las concentraciones de Cd en el contenido relativo de agua (RWC) de las hojas de dos cultivares de trigo (C: control; T1, T2 y T3: 150, 200 y 250  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ).

water contents was observed with 150  $\mu\text{M}$ , as compared with controls (Figure 16). These results are contrary to those presented by Malar *et al.* (2014) with Pb on wheat. This might be due to the fact that there was less water absorption by roots due to the interference of Cd ions in root zone. Besides, roots also prevent the Cd ions movement into the leaves to protect the phytotoxicity.

## CONCLUSION

Results of this research showed cadmium dose dependent inhibition of seed germination and seedling growth. Gradual decrease in root length, shoot length and seedling growth was observed at different concentrations of Cd on cultivars NARC-11 and Galaxy under hydroponic conditions. Cadmium adversely affects morphological and physiological characters of wheat. Cultivar NARC-11 shows more tolerance than Galaxy.

## LITERATURE CITED

- Ahmad, I., M. J. Akhtar, Z. A. Zahir, and A. Jamil. 2012. Effect of cadmium on seedling growth of four wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Middle-East J. Sci. Res.14: 142-154.
- Ahmad, M. S. A., M. Hussain, S. Ijaz, and A. K. Alvi. 2008. Photosynthesis performance of two mung bean (*Vigna radiate* (L.) Wilczek) cultivars under lead and copper application. Int. J. Agric. Biol. 10: 167-176.

Nuestros resultados mostraron que la concentración alta de Cd afecta significativamente la estabilidad de la membrana. La estabilidad de la membrana disminuyó drásticamente al aumentar la concentración de Cd en NARC-11 (35 % y 28 %) comparada con Galaxy (44 % y 41 %) a 200  $\mu\text{M}$  y 250  $\mu\text{M}$ . Además, el índice de estabilidad de la membrana disminuyó 18.5 % y 27 % a 250  $\mu\text{M}$ , en comparación con el testigo (Figura 15). Popova *et al.* (2008) también mostraron que el estrés por Cd cambia significativamente la estabilidad de la membrana y su funcionamiento.

El contenido relativo de agua disminuyó al aumentar el nivel de Cd. No se observó un efecto significativo en los contenidos de agua relativos de los cultivares con 150  $\mu\text{M}$  comparados con el testigo (Figura 16). Estos resultados son contrarios a los presentados por Malar *et al.* (2014) con Pb en trigo. Esto puede deberse a que las raíces absorbieron menos agua a causa de la interferencia de los iones de Cd en la zona radicular. Además, las raíces también evitan el movimiento de iones de Cd hacia las hojas para proteger la fitotoxicidad.

## CONCLUSIÓN

Los resultados de esta investigación mostraron que la inhibición de la germinación de la semilla y el crecimiento de la plántula depende de la dosis de

- Amirjani, M. R. 2012. Effects of cadmium on wheat growth and some physiological factors. *Int. J. Forest. Soil Eros.* 2: 50-58.
- An, Y. J., Y. M. Kim, T. I. Kwon, and S.W. Jeong. 2004. Combined effect of copper, cadmium and lead upon *Cucumis sativus* growth and bioaccumulation. *Sci. Total Environ.* 326: 85-93.
- Anjum, S. A., X. Xie, L. Wang, and M. F. Saleem. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afri. J. Agri. Res.* 6: 2026-2032.
- Ashraf, M. Y., R. Sadiq, M. Hussain, M. Ashraf, and M. S. A. Ahmad. 2011. Toxic effect of nickel (Ni) on growth and metabolism in germinating seeds of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Biol. Trace Elem. Res.* 143: 1695-1703.
- Atal, N., P. P. Saradhi, and P. Mohanty. 1991. Inhibition of the chloroplast photochemical reactions by treatment of wheat seedlings with low concentrations of cadmium: analysis of electron transport activities and changes in fluorescence yield. *Plant Cell Physiol.* 32: 943-951.
- Aydinalp, C., and S. Marinova. 2009. The effect of Heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*). *Bulgarian J. Agric. Sci.* 15: 347-350.
- Baryla, A., P. Carrier, F. Franck, C. Coulomb, C. Sahut, and M. Havaux. 2001. Leaf chlorosis in oilseed rape plants (*Brassica napus*) grown on cadmium-polluted soil: causes and consequences for photosynthesis and growth. *Planta* 212: 696-709.
- Bhatti, K. H., S. Anwar, K. Nawaz, K. Hussain, K. H. Siddiqi, R. U. Sharif, A. Talat, and A. Khalid. 2013. Effect of heavy metal (Pb) stress of different concentration on wheat (*Triticum aestivum* L.). *Middle-East J. Sci. Res.* 4: 148-154.
- Bheemareddy, V. S. 2013. Impact of cadmium phytotoxicity on photosynthetic rate and chlorophyll content in *Triticum aestivum* L. DWR 225 variety. *Middle-East J. Sci. Res.* 17: 1209-1212.
- Correa, A. X. R., L. R. Rorig, M. A. Verdinelli, S. Cotellet, J. F. Ferard, and C. M. Radetski. 2006. Cadmium phytotoxicity: Quantitative sensitivity relationships between classical endpoints and antioxidative enzyme biomarkers. *Sci. Total Environ.* 357: 120-127.
- Hirve, M., and A. Bafna. 2013. Effect of Cadmium exposures on growth and biochemical parameters of *Vigna radiata* seedlings. *Int. J. Environ. Sci.* 4: 315-322.
- Jiang, W., D. Liu, and W. Hou. 2001. Hyperaccumulation of cadmium by roots, bulbs and shoots of garlic. *Biores. Technol.* 76: 9-13.
- Jun-yu, H., R. Yan-fang, Z. Cheng, and J. De-an. 2008. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*). *Rice Sci.* 15: 319-325.
- Khan, N. A., I. Ahmad, S. Singh, and R. Nazar. 2006. Variation in growth, photosynthesis and yield of five Wheat cultivars exposed to cadmium stress. *World J. Agri. Sci.* 2: 223-226.
- Krantev, A., R. Yordanova, T. Janda, G. Szalai, and L. Popova. 2008. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *J. Plant Physiol.* 165: 920-931.
- Laspina, N. V., M. D. Groppa, M. L. Tomaro, and M. P. Benavides. 2005. Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd-induced oxidative stress. *Plant Sci.* 169: 323-330.
- cadmio. Una disminución gradual en la longitud de la raíz, longitud del tallo y el crecimiento de la plántula se observó con distintas concentraciones de Cd en los cultivares NARC-11 y Galaxy en condiciones de hidroponía. El Cd afectó adversamente los caracteres morfológicos y fisiológicos del trigo. El cultivar NARC-11 muestra tolerancia mayor que Galaxy.

—Fin de la versión en Español—



- Liu, X., S. Zhang, X. Shan, and Y. G. Zhu. 2005. Toxicity of arsenate and arsenite on germination, seedling growth and amylolytic activity of wheat. *Chemosphere* 61: 293-301.
- Malar, S., S. S. Vikram, P. J. C. Favas, and V. C. Perumal. 2014. Lead heavy metal toxicity induced changes on growth and antioxidative enzymes level in water hyacinths *Eichhornia crassipes* (Mart.). *Bot. Studies.* 55: 54.
- Malecka, A., W. Jarmuszkiewicz, and B. Tomaszewska. 2001. Antioxidative defense to lead stress in subcellular compartments of pea root cells. *Acta Biochim. Polon.* 48: 687-698.
- Montenegro, G., C. Fredes, E. Mejías, C. Bonomelli, y L. Olivares. 2009. Content of heavy metals in soils near a Chilean copper mining tailing. *Agrociencia* 43: 427-435.
- Moussa, H., and S. El-Gamal. 2010. Effect of salicylic acid pretreatment on cadmium toxicity in wheat. *Biol. Planta.* 54: 315-320.
- Muthuchelian, N. K., M. Bertamini, and N. Nedunchezian. 2001. Triacantanol can protect *Erythrina variegata* from Cd toxicity. *J. Plant Physiol.* 158: 1487-1490.
- Oncel, I., S. Keles, and A. S. Ustun. 2000. Effect of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings. *Environ. Pollut.* 107: 315-320.
- Peralta-Videa, J. R., J. L. Gardea-Torresdey, E. Gomez, K. J. Tiermann, J. G. Parsons, and G. Carrillo. 2002. Effect of mixed cadmium, copper, nickel and zinc at different pHs upon alfalfa growth and heavy metal uptake. *Environ. Pollut.* 119: 291-301.
- Pinto. A. P., A. M. Mota, A. de Varennes, and F. C. Pinto. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Sci. Total Environ.* 326-329.
- Popova, L., L. Malenkov, R. Yordanova, A. Krantev, G. Szalai, and T. Janda. 2008. Salicylic acid protects photosynthesis against cadmium toxicity in pea plants. *Gen. Applied Plant Physiol.* 34: 133-144.
- Rascio, N., and F. Navari-Izzo. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Sci.* 180: 169-181.
- Rascio, N., F. V. Dalla, N. L. Rocca, R. Barbato, C. Pagliano, M. Raviolo, C. Gonnelli, and R. Gabbriellini. 2008. Metal accumulation and damage in rice (cv. Vialone nano) seedlings exposed to cadmium. *Environ. Exp. Bot.* 62: 267-278.

- Raziuddin, F., G. Hassan, M. Akmal, S. S. Shah, F. Mohammad, M. Shafi, J. Bakht, and W. Zhou. 2011. Effect of cadmium and salinity on growth and photosynthesis parameters of brassica species. *Pak. J. Bot.* 43: 333-340.
- Rodriguez, M. E., Canaless, and O. B. Hidalgo. 2005. Molecular aspects of abiotic stress in plants. *Biotechnologia Aplicada.* 22: 1-10.
- Schutzendubel, A. P. Schwanz, T. Teichmann, K. Gross, R. Langenfeld-Heyser, D. L. Godbold, and A. Polle. 2001. Cadmium-Induced Changes in Antioxidative Systems, Hydrogen Peroxide Content, and Differentiation in Scots Pine Roots. *Plant Physiol.* 127: 897-891.
- Shafi, M., G. P. Zhang, J. Bakht, M. A. Khan, E. Islam, M. K. Dawood, and Raziuddin. 2010. Effect of cadmium and salinity on root morphology of Wheat. *Pak. J. Bot.* 42: 2747-2754.
- Shaikh, I. R., S. R. Parveen, A. S. Rafique, and A. S. Alamgir. 2013. Phytotoxic effects of Heavy metals (Cr, Cd, Mn and Zn) on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and seedlings growth in black cotton soil of Nanded, India. *Res. J. Chem. Sci.* 3: 14-23.
- Sial, M. A., M. U. Dahot, M. A. Arain, G. S. Markhand, S. M. Mangrio, M. H. Naqvi, K. A. Laghari, and A. A. Mirbahar. 2009. Effect of water stress on yield and yield components of semi-dwarf bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pak. J. Bot.* 41: 1303-1310.
- Sigfridsson, K. G. V., G. Bernat, F. Mamedov, and S. Styring. 2004. Molecular interference of Cd<sup>2+</sup> with photosystem II. *Bioch. Biophys. Acta. (BBA)-Bioenergetics.* 1659: 19-31.
- Singh, S., S. F. Eapen, and Dsouza, 2006. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere* 62: 233-246.
- Skovmand, B., and M. P. Reynolds. 2000. Increasing yield potential for marginal areas by exploring genetic resources collection. The eleventh regional wheat workshop for, eastern, central and southern Africa, Addis Ababa, Ethiopia. 18-22 September: 67-77.
- Stiborova, M., M. Doubravova, A. Brezinova, and A. Fredrich. 1986. Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of Barley. *Photosynthetica* 20: 418-425.
- Stobrawa, K., and G. Lorence-Plucinska. 2007. Changes in carbohydrate metabolism in fine roots of the native European black poplar (*Populus nigra* L.) in heavy metal-polluted environment. *Sci. Total Environ.* 373: 157-165.
- Titov, A. F., V. V. Talanova, and N. P. Boeva. 1996. Growth responses of barley and wheat seedlings to lead and cadmium. *Biol. Plan.* 38: 431-436.
- Weatherly, P. E. 1950. Studies in water relations in cotton plants. The field measurement of water deficit in leaves. *New Phytol.* 49: 81-87.
- Wu, F., G. Zhang, and P. Dominy. 2003. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. *Environ. Exp. Bot.* 50: 67-78.
- Yadav, S. K. 2010. Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South Afri. J. Bot.* 76: 167-179.
- Zhang, S., J. Hu, Z. H. Chen, J. F. Chen, Y. Y. Zheng, and W. J. Song. 2005. Effects of Pb pollution on seed vigour of three rice varieties. *Rice Sci.* 12: 197-202.