

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO HORTICULTURA



Aplicación de Selenio y su Efecto en el Estado Antioxidante y la Composición Mineral de la Lechuga (*Lactuca sativa*)

Por:

CARLOS RONEY ROMÁN JIMÉNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO HORTICULTURA

Aplicación de Selenio y su Efecto en el Estado Antioxidante y la Composición Mineral de la Lechuga (*Lactuca sativa*)

Por:

CARLOS RONEY ROMÁN JIMÉNEZ


TESIS

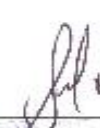
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:

Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor Principal


Dr. Antonio Juárez Maldonado
Coasesor


Dra. Susana González Morales
Coasesor


Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía


División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2017

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por la vida por permitirme terminar mi carrera profesional, por sus bendiciones, y por los momentos maravillosos que en toda mi vida me ha regalado, mil gracias.

A MI FAMILIA

Gracias por su apoyo y sus consejos.

MI ALMA MATER: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARÍA ANTONIO NARRO.

Por darme la oportunidad de cumplir una de mis metas más anheladas, porque en ella adquirí los conocimientos que me hacen ser un buen profesionista.

AL DR. ADALBERTO BENAVIDES MENDOZA

Por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

A LOS PROFESORES DE LA UNIVERSIDAD

En especial a los del departamento de horticultura que con sus enseñanzas contribuyeron a mi formación profesional.

A MIS ASESORES

Por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A MI NOVIA LULU

Porque juntos logramos la culminación de mi carrera, porque aun con todas barreras que encontramos en el camino pudimos salir a delante siempre, gracias por su amor, comprensión y confianza porque en todo momento estuvo a mi lado cuando más lo necesitaba lo largo de mi carrera

CON RESPETO A MIS PADRES:

MANUEL ROMAN CHAVARRIA E ISIDRA JIMENEZ PEREZ:

Gracias por la vida, a mi madre por sus consejos, sus bendiciones, su cariño y preocupación por mí a mi padre gracias por su apoyo.

A MIS HERMANOS:

Ramiro, Manuel, Osmar y Vero:

Gracias por su apoyo por sus consejos porque siempre me decían que yo tendría que ser el ejemplo de la familia que a pesar de todo iba que salir a delante que jamás pensara en cosas negativas.

A MI CUÑADO:

Diego

Por sus consejos porque siempre me daba ánimos de seguir a delante por tantos recuerdos que se quedaran en nuestra mente gracias.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA.....	iv
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos.....	8
Hipótesis.....	8
REVISION DE LITERATURA	9
Selenio	9
Selenio en suelos.....	9
Selenio en agua.....	10
Mecanismos de absorción, asimilación y acumulación del selenio	11
Selenio en plantas	12
Especies reactivas de oxígeno (ROS)	12
Selenio como inductor de antioxidantes.....	14
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
CONCLUSIONES.....	24
LITERATURA CITADA.....	25

RESUMEN

El selenio es un elemento que no aparece en los listados de elementos esenciales para las plantas y no se considera en los análisis de suelos, aguas y tejidos vegetales. Diferentes reportes indican que el Se parece asociarse con cambios en el estado redox celular. El objetivo de este estudio fue realizar aplicaciones de selenio en plantas de lechuga y verificar el efecto sobre el crecimiento, composición y metabolismo antioxidante de las plántulas. El experimento consistió en la aplicación de selenio en forma foliar en concentraciones de 0, 5 y 10 mg L⁻¹ a los 15, 30 y 45 días después del trasplante. En las plantas se determinó el potencial de óxido-reducción, la biomasa, la concentración de minerales y la actividad catalasa foliar. La aplicación de selenio fue efectiva para modificar el potencial de óxido-reducción y elevar la actividad catalasa sin causar modificaciones en el contenido de minerales y la biomasa.

Palabras clave: *catalasa, lechuga, minerales, selenito de sodio.*

INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) es un elemento esencial para los humanos pero calificado como no esencial para las plantas. Sin embargo, en presencia de Se en el sustrato o aplicado por aspersión foliar las plantas lo acumulan en sus tejidos, sirviendo como fuente primaria de este elemento en la alimentación (Broadley *et al.*, 2006). En la mayoría de los suelos del mundo la concentración de Se es baja, de 0.01 a 2.0 mg kg⁻¹ con una media de 0.4 mg kg⁻¹, aunque pueden encontrarse en suelos denominados seleníferos concentraciones de hasta 1200 mg kg⁻¹ de Se (Fordyce, 2005). Se considera que el Se es esencial en los humanos por su papel como cofactor de enzimas relacionadas con el metabolismo antioxidante (Rayman, 2008). En las plantas, el Se también ejerce un efecto positivo en la capacidad antioxidante, actuando más efectivamente este elemento en forma de selenito que en forma de selenato (Cartes *et al.*, 2005). En México los estudios acerca de la relación entre el Se y la calidad nutricional de los alimentos en términos de su capacidad antioxidante son pocos y por ello el objetivo de este trabajo fue documentar el efecto de las aplicaciones de selenio en plantas de lechuga, verificando el crecimiento de las plantas, la composición mineral de las hojas y la capacidad antioxidante de los extractos celulares foliares. Lo anterior bajo la hipótesis de que la aplicación de este elemento modificará el balance redox celular, aumentando la capacidad antioxidante de los tejidos de la planta.

OBJETIVOS

- **Objetivo General**

Documentar el efecto del Se sobre el crecimiento, composición y metabolismo antioxidante de la lechuga.

- **Objetivos Específicos**

-Verificar la magnitud del enriquecimiento aplicando selenito de sodio (Na_2SeO_3) por aspersión foliar.

-Estudiar las respuestas de las plantas a las variables de crecimiento, acumulación de biomasa, potencial redox del extracto celular del pecíolo (ECP) y actividad enzimática antioxidante (catalasa).

Hipótesis

La aplicación de Se modificará el balance redox celular, aumentando la capacidad antioxidante de los tejidos de lechuga.

REVISION DE LITERATURA

Selenio

Actualmente al Se se le considera un elemento traza esencial para los animales tanto por su valor nutricional como clínico, ya que actúa como un potente antioxidante, es eficaz en la inhibición de la expresión de virus, es decir el virus está presente pero no se expresa, juega un papel importante en el sistema inmunológico. El Se se encuentra en la naturaleza y en sistemas biológicos como selenato (Se^{6+}), selenito (Se^{4+}), selenio elemental (Se^0) y seleniuro (Se^{2-}) (Broadley *et al.*, 2006). Debido a las formas presentes de selenio en la naturaleza y las diferencias bioquímicas entre ellas, se pueden ocasionar modificaciones en la isomería al interactuar con la flora microbiana y causar oxidación o reducción, o bien formación de compuestos orgánicos (Valdiviezo, 2012). El Se existe de manera natural en la corteza terrestre.

El Se de estas fuentes naturales: Se orgánico y Se elemental es altamente disponible y móvil en zonas áridas con suelos alcalinos, pero por las actividades antropogénicas el Se es movilizado y llega a ser disponible para plantas y animales, el cual se bioacumula y es incorporado a la cadena alimenticia (Valdiviezo, 2012).

Selenio en suelos

La concentración total de Se en la mayoría de los suelos se estima alrededor de 0.4 ppm, y los suelos con cantidades mayores son clasificados como

suelos seleníferos y generalmente tienden a presentar una textura pesada o arcillosa (Rosenfeld y Beath, 1964).

La cantidad de Se en el suelo puede ser clasificada con base en los niveles del mismo encontrados en plantas que no lo acumulan, pero que crecen en dicho suelo, o bien de acuerdo al nivel de selenio en el propio suelo (Davis *et al.*, 2002).

Selenio en agua

El agua es generalmente de poca importancia en el suministro del mismo. Entre los diferentes alimentos, los pescados y mariscos así como los huevos son buenas fuentes de selenio, aunque muchos alimentos vegetales provenientes de zonas seleníferas tienen cantidades considerables de este elemento (Werner, 1992).

Sugimura *et al.*, (1976) determinaron la concentración de Se en diferentes partes del Océano Pacífico norte occidental, encontrando que el selenio total en las aguas superficiales varió de 0.06 a 0.12 $\mu\text{g L}^{-1}$, mientras que en aguas más profundas el contenido es mayor a 0.20 $\mu\text{g L}^{-1}$. Sobre la abundancia de las formas químicas en el agua de mar se encontró hasta un 60% del selenio en forma de Se^{4+} , mientras que el Se^{6+} contabilizó el restante 40%.

En el agua el selenio proviene de fuentes antropogénicas, en forma de gases y partículas liberadas por erupciones volcánicas. Su concentración es similar al encontrado en el suelo teniendo cantidades de $<1\text{mg de Se L}^{-1}$, siendo

que las formas más comunes encontradas en el agua son selenito (Se^{4+}) y selenato (Se^{6+}) (Cruz *et al.*, 2011).

Mecanismos de absorción, asimilación y acumulación del selenio

El Se es metabolizado en las plantas por la vía de asimilación del azufre y su distribución y acumulación dependerá de la especie química y la concentración del elemento suministrado a las raíces y por vía foliar, así como de la naturaleza y la concentración de otras sustancias en la solución (Terry *et al.*, 2000). Respecto a su forma química, en el corto plazo la mayor parte de Se tomado como selenato se mantiene en forma inorgánica, mientras que cuando se aplica como selenito se acumula en su forma orgánica (Cartes *et al.*, 2006).

Las plantas absorben e incorporan Se en su biomasa, aunque existen diferencias sustanciales en la concentración de Se de los tejidos vegetales según las distintas especies y también en cuanto a su tolerancia (Brown y Shrift, 1982). Las plantas acumuladoras de Se (*e.g. Astragalus, Machaeranthera, Haplopappus, y Stanleya*) pueden llegar a tener concentraciones de varios miles de mg kg^{-1} en sus tejidos, mientras que las no acumuladoras, entre ellas la mayoría de plantas de cultivo, raramente alcanzan valores superiores a 50 mg kg^{-1} de Se, aun creciendo en suelos con elevados contenidos en Se (Wu, 1994).

El Se puede ser absorbido como selenato (Se^{6+}), selenito (Se^{4+}) y selenio orgánico. Tanto el selenato (Se^{6+}), el selenito (Se^{4+}) y el selenio orgánico se encuentran activos metabólicamente; las formas orgánicas del Se son más disponibles para las plantas que las formas inorgánicas (Cruz *et al.*, 2011).

Selenio en plantas

En plantas acumuladoras el Se es incorporado por la vía del sulfato debido a que es similar químicamente y actúa análogamente en muchas reacciones bioquímicas (Bañuelos y Mayland, 2000).

El flujo de Se de las hojas y tallos a los frutos ocurre por el floema, posteriormente a la asimilación del selenio en compuestos orgánicos (Arvy, 1982), situación que se suma a la compleja distribución no diferencial que se presenta entre la raíz, los tallos y hojas (Arvy, 1982, 1993; Grattan, *et al.*, 1987; Zayed *et al.*, 1998; Pezzarossa *et al.*, 1999; Simijoki *et al.*, 2003).

Morris y Levander (1970) encontraron que la mayor parte de los frutos y vegetales creciendo en suelos no seleníferos mostraron concentraciones de selenio menores a $0.01 \mu\text{g g}^{-1}$. El contenido bajo de selenio en frutos y vegetales parece ser la situación normal en muchos lugares (Eurola *et al.*, 1989; Combs, 2001; Fordyce *et al.*, 2005; Broadley *et al.*, 2006; Rayman, 2002, 2008).

Especies reactivas de oxígeno (ROS)

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) tienen en las plantas papeles importantes en el crecimiento, desarrollo e interacciones con el medio ambiente, y por tanto, se producen en cantidades significativas durante la fotosíntesis y la respiración. Sin embargo, se mantiene la homeostasis redox mediante mecanismos que controlan su síntesis y depuración. El desbalance entre la producción y la eliminación de las especies reactivas en los organismos conducen a lo que se conoce como estrés oxidativo (Miranda y Castro, 2019).

Se define estrés oxidativo como aquel tipo especial de estado bioquímico de una célula o tejido, que puede ocurrir en plazos cortos o largos, en donde la generación de especies químicas oxidantes rebasa la capacidad de producción o la actividad de especies antioxidantes. Dependiendo del nivel de estrés oxidativo alcanzado las plantas ven modificadas sus actividades metabólicas en mayor o menor medida. Esto ocurre porque el balance oxidación-reducción, además de cambiar la eficiencia de funcionamiento de muchas enzimas, también es capaz de modificar el perfil de genes expresados por la planta, generando entonces fenotipos que pudiéramos llamar “orientados a la condición de estrés” (Benavides, 2002).

Las células poseen antioxidantes para protegerse de las ROS (especies reactivas de oxígeno y de otros radicales. Los antioxidantes son agentes reductores que pueden reaccionar fácilmente con las sustancias oxidantes y por eso protegen de la oxidación a las moléculas más importantes. Entre los antioxidantes biológicos figuran la vitamina C y E, la coenzima Q y algunos carotenoides. La bilirrubina formada por la degradación del hemo, también protege contra la degradación. De especial importancia es el glutatión, un tripéptido que existe en altas concentraciones en casi todas las células, el glutatión tiene un enlace peptídico atípico entre Glu y Cis. El grupo tiolico del residuo de cisteína tiene actividad redox y cuando se oxidan dos moléculas de la forma reducida (GSH) se enlazan y forman el disulfuro (GSSG) (Koolman y Rohn, 2004).

Los radicales libres se forman cuando una molécula con un par de electrones no apareados en la órbita externa recibe o pierde un electrón. El radical libre más común en la atmósfera es la molécula de oxígeno, la cual tiene dos

electrones no apareados en la última órbita, por lo que forma una molécula birradical. El radical superóxido también reacciona reduciendo quinonas y complejos de metales de transición Fe-Cu, afectando la actividad de las enzimas que contienen estos metales (Camarena, 2005).

Selenio como inductor de antioxidantes

Los antioxidantes son compuestos que permiten la vida celular en un ambiente oxidante, y son los responsables de la eliminación de los radicales libres los cuales se producen de manera natural, en los sitios de actividad energética celular. La función química de los antioxidantes es ceder potencial reductor a los compuestos oxidantes capaces de dañar a los componentes celulares (Benavides *et al.*, 2009).

Los organismos poseen numerosos sistemas de defensa antioxidantes regulables, enzimáticos (superóxido dismutasa, la catalasa, la GSH-peroxidasa, las quinonas reductasas y hemoxigenasa) y no enzimáticos (Se, Zn, vitaminas C y E, y carotenoides) que son los encargados de evitar estos factores (Murillo, 2007). Estas defensas de respuestas se desencadenan por factores bióticos tales como patógenos, plagas y simbiosis, o por factores abióticos como alta o baja temperatura, radiación, salinidad, entre otros, y no necesariamente en condiciones que originan estrés (Benavides *et al.*, 2009).

La inducción de antioxidantes ocurre por el efecto prooxidante del selenio que, cuando se encuentra en baja concentración, induce la expresión del metabolismo redox que regula la eliminación de los radicales libres celulares (Hasanuzzaman *et al.*, 2010), sobre todo en el ámbito de la peroxidación de

membranas y proteínas integrales (Xue y Hartikainen, 2000; Djanaguiraman *et al.*, 2005; Cartes *et al.*, 2005).

El papel de Se como un antioxidante en pastos sugiere que la adición al suelo puede mejorar la calidad del forraje, por la disminución de la senescencia y persistencia de la pastura (Cartes *et al.*, 2005). A bajas concentraciones, actúa como un antioxidante y puede estimular el crecimiento de las plantas, mientras que a mayores concentraciones, actúa como un pro-oxidante lo que contribuye a la reducción del rendimiento.

Numerosos estudios han demostrado que a bajas concentraciones el Se puede ejercer funciones benéficas en las plantas, tales como la mejora de crecimiento, el retraso de la senescencia y la mejora del sistema antioxidante bajo irradiación UV, alta temperatura y desecación de semillas (Cartes *et al.*, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México, en condiciones de invernadero, en los meses de agosto-diciembre del 2014, teniendo una temperatura y humedad relativa promedio de 17.8 °C y 68 % respectivamente. Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) de la variedad Great Lakes, estas se colocaron en charolas germinadoras de 200 cavidades utilizando como sustrato peatmoss y perlita para germinación proporción 70:30 v:v. Transcurridos 40 días después de la siembra las plántulas se trasplantaron a macetas de polietileno de 20 L usando como sustrato una mezcla de peatmoss y perlita con una proporción de 70:30 (v:v). Los tratamientos consistieron en aplicaciones foliares de Se en concentración de 0, 5 y 10 mg L⁻¹ a los 15, 30 y 45 días después del trasplante. Como fuente de selenio se utilizó selenito de sodio (Na₂SeO₃, Sigma Aldrich, USA) sin mezclarlo con coadyuvantes.

Se colectaron las hojas con madurez fisiológica de tres plantas por cada tratamiento a los 20 y 35 días después del trasplante (ddt), estas fueron molidas y se obtuvo el extracto fresco foliar en donde se determinó el potencial de óxido-reducción (ORP, mV), usando un potenciómetro HI98185-01 (HANNA, Inc., USA), usando la técnica descrita por Benavides-Mendoza *et al.*, (2002).

La actividad catalasa (EC 1.11.1.6) se cuantificó igualmente en las hojas con madurez fisiológica a los 35 días después del trasplante (ddt) siguiendo la técnica de Ramos *et al.* (2010). Se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis Biomate 5

(ThermoElectron, USA) en 590 nm y los resultados se expresaron en mM de consumo de $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ proteínas totales}^{-1} (\text{mg g}^{-1})$.

Para la determinación de sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$) se colectaron las hojas con madurez fisiológica de tres plantas por cada tratamiento a los 20 y 35 días después del trasplante (ddt), estas fueron molidas y se obtuvo el extracto fresco foliar en donde se determinó esta variable mediante un refractómetro Marca J&G Scientific.

El peso fresco de las partes aéreas y de la raíz se determinó a los 50 días ddt tomando tres plantas completas por cada tratamiento. Estas se lavaron cuidadosamente y se separó la raíz del tallo y hojas a la altura de la corona. Los pesos fueron medidos con una balanza Adventurer Pro (OHAUS, Inc., USA). Posteriormente las mismas muestras fueron colocadas en una estufa deshidratadora marca Robertshaw a 60°C durante 72 h para luego ser pesadas en una balanza analítica Pioneer (OHAUS, Inc., USA) y obtener la biomasa seca. Sobre las muestras secas se determinó la concentración de minerales en las hojas. Para el nitrógeno total se usó la técnica de micro Kjeldhal (AOAC, 1980a), mientras que para el fósforo se utilizó un método espectrofotométrico (AOAC, 1980b), el K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu y Zn fueron medidos por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica de la marca Varían AA-1275 siguiendo la técnica de Fick *et al.* (1976). Para la determinación del Se se hizo primero la digestión de 0.5 g de muestra seca en ácido nítrico concentrado hasta que se eliminó toda la parte orgánica usando un espectrofotómetro de emisión atómica por plasma IRIS ADVANTAGE (THERMO JARRELL, USA).

El diseño estadístico fue bloques completos al azar, considerando tres repeticiones por tratamiento. El análisis de los datos consistió en análisis de varianza y pruebas de medias de Tukey ($\alpha=0.05$) y se llevó a cabo con el programa SAS versión 6.0 (SAS Institute, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de Se foliar presentó un efecto sustancial sobre el potencial de óxido-reducción (Figura 1). Los valores de ORP indican la capacidad antioxidante, es decir, la capacidad del sistema bajo análisis de ceder electrones en comparación con un electrodo de hidrógeno (Benavides *et al.*, 2002). Mientras más bajo sea el valor de ORP mayor capacidad de ceder electrones y funcionar como antioxidante.

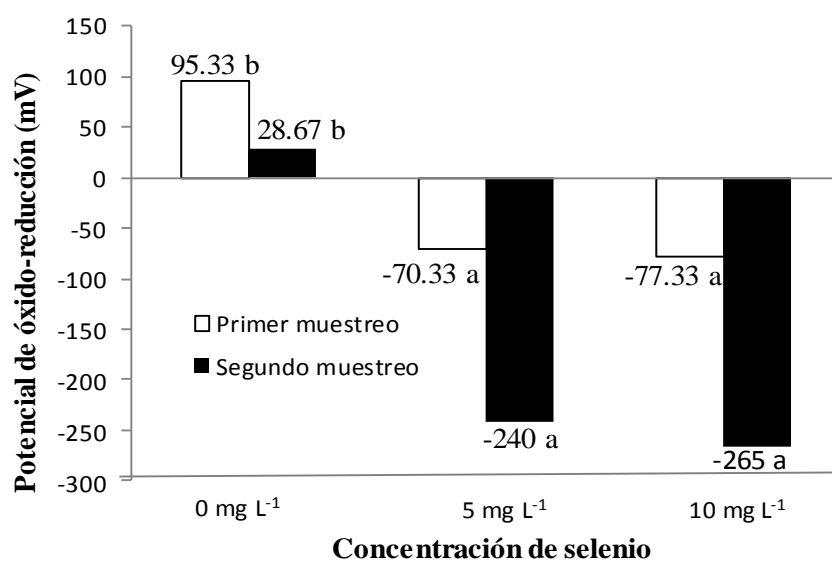


Figura 1. Promedio del potencial de óxido reducción (ORP en mV) en el extracto fresco de plántulas de lechuga a las cuales se les aplico selenio en forma de selenito de sodio. Las barras con la misma literal indican ausencia de diferencia según Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

Este resultado se relaciona posiblemente con una mayor actividad enzimática antioxidante, la cual se sabe aumenta en presencia de ciertas

concentraciones de Se (Freeman *et al.*, 2010). Lo anterior parece confirmarse por los resultados obtenidos con la actividad catalasa foliar (Figura 2) que mostró una tendencia positiva y significativa al aplicarse Se a las plantas. Estos resultados son similares a los obtenidos por Lingan *et al.*, (2005) que también reportaron un efecto positivo del Se sobre la actividad catalasa.

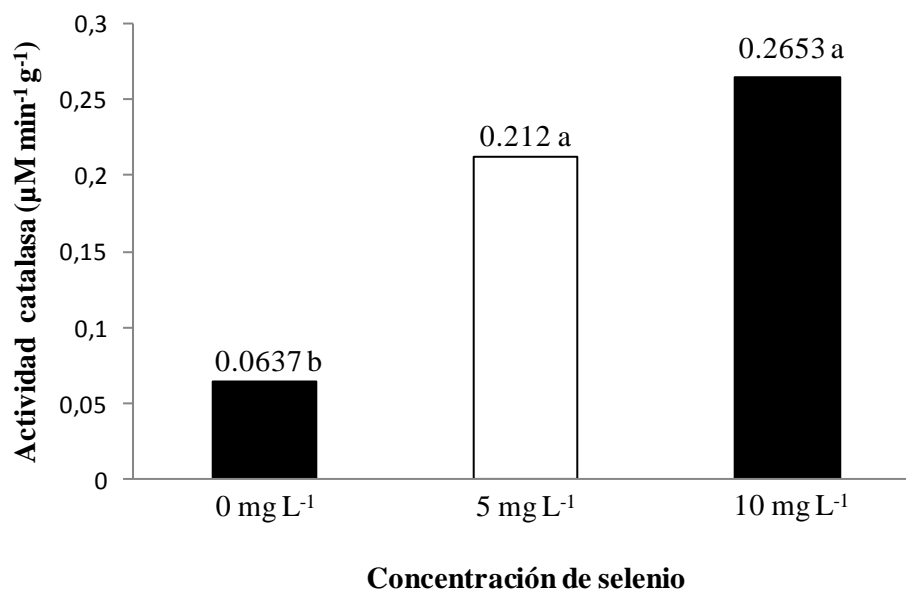


Figura 2. Promedio de la actividad catalasa en plántulas de lechuga a las cuales se les aplicó selenio en forma de selenito de sodio. Las barras con la misma literal indican ausencia de diferencia según Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

En los resultados obtenidos de la concentración de sólidos solubles totales no se encontraron diferencias al aplicar Se.

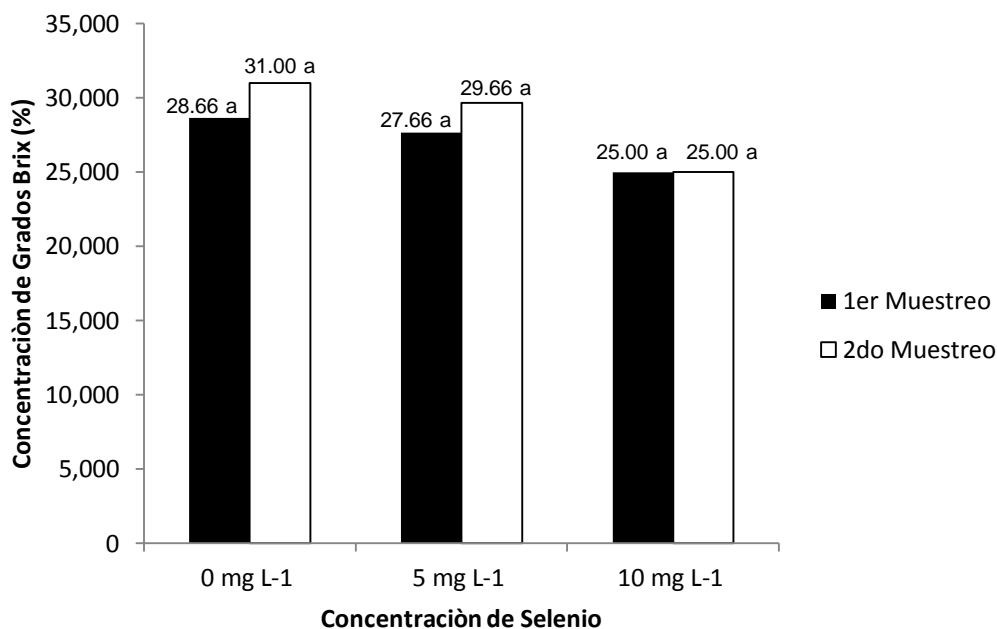


Figura 2. Promedio de la concentración de Sólidos Solubles Totales en plántulas de lechuga a las cuales se les aplicó selenio en forma de selenito de sodio. Las barras con la misma literal indican ausencia de diferencia según Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

Es probable que el efecto del Se sobre el potencial antioxidante no se asocie con una mayor actividad fotosintética y tal vez ello explique la ausencia de diferencias en el peso fresco y seco de la raíz y las hojas de las plantas de lechuga en este estudio (Cuadro 1). Bectivort *et al.*, (2012) obtuvieron resultados análogos aplicando Se en tomate, obteniendo un aumento significativo en el estado antioxidante pero sin observar diferencias en los pesos frescos y secos de frutos y raíz entre los distintos tratamientos.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación foliar de selenio sobre los pesos frescos y secos de plantas de lechuga.

Tratamiento	Peso Fresco Hojas	Peso Freso Raíz	Peso Seco Hojas	Peso Seco Raíz
mg L ⁻¹	g	g	g	g
0	865.0 a [‡]	62.700 a	24.690 a	6.257 a
5	737.3 a	52.770 a	23.780 a	5.453 a
10	686.7 a	45.110 a	26.270 a	6.620 a

[‡]Promedios seguidos de la misma literal son estadísticamente iguales según Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

En cuanto al contenido de minerales en las plantas de lechuga (Cuadro 2) únicamente se encontraron diferencias en el contenido de nitrógeno y fósforo al aplicar Se. Nowak *et al.*, (2002) también encontraron un incremento en el contenido de nitrógeno con la aplicación de selenito a plantas de trigo, por lo que hay un efecto sinérgico entre Se y N-P. Los datos obtenidos en cuanto al P coinciden con Wu y Huang (2004), quienes encontraron un incremento de este elemento en plantas de trébol cuando se aplicaron cantidades bajas de selenito aplicando al sustrato 0, 10, 20 y 30 mg kg⁻¹.

Respecto a la concentración del Se, se encontró en mayor cantidad en el tratamiento de 10 mg kg⁻¹, Kápolna *et al.*, (2009) incrementaron la concentración radical de Se de 0.045 a 2.0 µg g⁻¹ en peso seco al aplicar 100 mg L⁻¹ de Se por aspersión foliar. Estos datos coinciden con los de Smrkolj *et al.*, (2006) quienes indican la necesidad de llevar a cabo aspersiones repetidas si el objetivo es la acumulación de Se.

Cuadro 2. Efecto de la aplicación foliar de selenio sobre la concentración de minerales en hojas de lechuga.

TRT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	Se
mg L ⁻¹	%	%	%	%	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
0	3.03 b	0.48 b	1.30 a	0.96 a	0.28a	0.73 a	196.7 a	3.30 a	64.3 a	3.0 a	0.0b
5	3.62 a	0.53 ab	1.27 a	1.10 a	0.27 a	0.72 a	188.7 a	7.00 a	21.0 a	2.0 a	1.8 b
10	3.64 a	0.58 a	1.08 a	0.67 a	0.25 a	0.84 a	163.7 a	3.33 a	12.6 a	1.3 a	32.6 a

TRT=Tratamiento. Promedios seguidos de la misma literal son estadísticamente iguales según Tukey ($P \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

La aplicación de Se en forma foliar indujo un mayor estatus antioxidante en las plantas de lechuga.

La aplicación de Se aumentó la concentración de N y P foliar pero sin modificar la concentración de otros elementos ni la biomasa.

La aplicación foliar de Se puede usarse como una herramienta para elevar la calidad nutricional de la lechuga en términos de antioxidantes.

LITERATURA CITADA

- Arvi, M.P. 1982. Traslocation of selenium in the bean plant (*Phaseolus vulgaris*) and the field bean (**Vicia faba**). *Phydiolo. Plant.* 56:299-302.
- Arvi, M.P. 1993. Selenate and selenite uptake and traslocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). *J. Exp. Bot.* 44: 1083-1087.
- Association of official analytical chemiste (AOAC).1980 a. Official Methods of Analysis 13th edition.Association of Official Analytical Chemists.Washington, DC., USA.pp 547 -562.
- Association of official analytical chemiste (AOAC).1980 b. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 30th edition. Association of Official Analytical Chemist. Washington, D.C. USA.pp 39.
- Bañuelos G. S. and Mayland H. f. 2000. Absorption and Distribution of Selenium in Animals Consuming Canola Grown for Selenium Phytoremediation. *Ecotox. Env. Saf.* 46:322-8.
- Becvort-Azcurra, A., L. O. Fuentes-Lara, A. Benavides-Mendoza, H. Ramírez, V. Robledo-Torres y M. N. Rodríguez-Mendoza. 2012. Aplicación de selenio en tomate: crecimiento, productividad y estado antioxidante del fruto.*Terra Latinoamericana* 30:291-301.
- Benavides-Mendoza, A., H. Ramírez, V. Robledo-Torres, E. Cornejo-Oviedo and R.K. Maiti. 2002. Productivity, CO₂ assimilation, and mineral tissue concentrations in onion plants under colored plastic films. *Crop Research* 24:26-39.

- Benavides-Mendoza., H. Ramírez, Fuentes L. L. O. 2009. Antioxidantes en las Plantas: Algunos Factores Edáficos y Ambientales que los Modifican. Fecha de consulta 20 de Diciembre de 2016. Disponible en <http://www.abenmen.com/a/antioxidantes.pdf>.
- Broadley M. R., P. J. White M., R. J. Bryson, M. C. Meacham, H. C. Bowen, S. E. Johnson, M. J. Hawkesford, S. P. McGrath, F. J. Zhao, N. Breward, M. Harriman and M. Tucker. 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. *Proceedings of the Nutrition Society* 65:169-181.
- Brown, T.A. and A. Shrift. 1982. Selenium: Toxicity and tolerance in higher plants. *Biol. Rev.* 57: 59-84.
- Camarena, G. 2005. Las especies reactivas de oxígeno en defensa de las plantas contra patógenos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12 (1): 25-30.
- Cartes, P., L. Gianfrera, and M. L. Mora. 2005. Uptake of selenium and its antioxidative activity in ryegrass when applied a selenate and selenite forms. *PlantSoil* 276: 359-367.
- Cruz J. G., Yáñez B. E., Gutiérrez V. G., Bernal A. J., Durán C. E., Figueroa G. S., Gardea T. J., y De la Rosa A. M. 2011. Investigación de la biotransformación de Se en Tejidos de *Phaseolus Vulgaris*, Mediante Espectroscopia de Absorción de Rayos X. *Acta Universitaria. Universidad de Guanajuato.* 21 (4). 48-54.
- Davis, J.G., T. J. Steffens, T. E. Engle, K.L. Mallow and S.E. Cotton. 2002. Diagnosing Selenium Toxicity. Colorado State University. Cooperative Extensión. No. 6. 109.

- Djanaguiraman, M., D. D. Devi, A. K. Shanker, A., Sheeba and U. Bangarusamy. 2005. Selenium-an antioxidative protectant in soubean durin senescence. *Plant Soil*. 272_77-86
- Terry, N., A. M. Zayed, P. de Zousa, Aand S. Tarun. 2000. Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Bio.* 51: 401-432.
- Eurola, M., P. Ekholm, M. Ylinen, P. Koivistoinen and P. Varo. 1989. Effects of selenium fertilization on the selenium content of selected Finnish fruits and vegetables. *Acta Agric. Scand.* 39:345-350.
- Fick K. R., S. M. Miller., J. D. Funk., L. R. McDowell and R. H. Houser. 1976. *Methods of mineral analysis for plant and animal tissues.* University of Florida institute of food and agriculture. Sciences, Departament of Animal Sciences, Gainesville, F L. USA. 81 p.
- Fordyce, F. 2005. Selenium deficiency and toxicity in the environment. pp. 373-415. In: O. Selinus, B. Alloway, J. Centeno, R. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, and P Smedley (Eds.). *Essentials of Medical Geology.* Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Freeman J.L., M. Tamaoki, C. Stushnoff, F. Colin, J. Cappa, D., F. Sirine, M. Matthew, S. McGrath, H. Doug Van and E. A.H. Pilon-Smits. 2010. Molecular mechanisms of selenium tolerance and hyperaccumulation in *Stanleyapinnata*. *Plant Physiology* 153:1630-1652.
- Grattan, S.R., C. Shennan, D.M. May, J. P. Mitchell and R. G. Burau. 1987. Use of drainage water for irrigation of melons and tomatoes. *California Agric.* September- October: 27-28.

- Kápolna, E., P. R. Hillestrom, K. H. Laursen, S. Husted, and E. H. Larsen. 2009. Effect of foliar application of selenium on its uptake and speciation in carrot. *Food Chem.* 115: 1357-1363.
- Koolman, Jan. Rohm, Klaus-Heinrich. *Bioquímica: Texto y atlas 3ª ed.* Medica Panamericana, 2004. 492 p.
- Lingan, Mao W., B. Dongling. 2005. Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the grown of sorrel seedling under salt stress. *Plant Growth Regulation.* 45: 155-163.
- Miranda, H. M y Castro, C. L. 2009. El estrés Oxidativo en Plantas. Unidad de Bioquímica y Biología Molecular.
- Morris, V. C. and O. A. Levander 1970. Selenio content of foods. *J. Nutr.* 100:1383-1388.
- Murillo E., Lombo O., Tique M. y Méndez j. j. 2007. Potencial Antioxidante de *Bauhinia KalbreyeriHarms* (FABACEAE). *Información Tecnológica.* 18 (6): 65-74 p.
- Nowak, J., K. Kaklewski, and M. Ligocki. 2004. Influence of selenium on oxidoreductive enzymes activity in soil and in plants. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1553-1558.
- Pezzarosa, B., D. Piccotino, C. Shennan and F. Malorgio. 1999. Uptake and distribución of selenium in tomato plants as affected by genotype and sulphate supply. *J. Plant Nutr.* 22: 1613-1635.
- Ramos S. J., V. Faquin, L. R. G. Guilherme, E. M Castro, F. W. Ávila, G. S. Carvalho, C.E.A. Bastos, C. Oliveira. 2010. Selenium biofortification and

- antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant soil environ.*, 12: 584–588.
- Rayman, M. P. 2008. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake. *British Journal of Nutrition* 100: 254-268.
- Rosenfeld, I. and Beath, O. A. 1964. *Selenium Geobotany, Biochemistry, Toxicity and Nutrition*. New York, Academic Press. 411p.
- SAS Institute. 2001. PROC user's manual. 6th ed. SAS Institute. Cary, NC, USA. 252 pp.
- Simijoki, A. 2003. Allocation of added selenium in lettuce and its impact on root. *Agric. Food Sci. Finland* 12:155-164.
- Smrkolj, P., M. Germ, I. Kreft, and V. Stibilj. 2006. Respiratory potential and Se compounds in pea (*Pisum sativum* L.) plants grown from Se-enriched seeds. *J. Exp. Bot.* 57: 3595-3600.
- Sugimura, Y., Y. Suzuki, and Y. Miyake. 1976. The content of selenium and its chemical form in sea water. *J. Ocean. Soc. Japan.* 32:235-241.
- Valdiviezo M. L. 2012. *Diseño y Caracterización de Microcapsulas de Seleniometionina*. Tesis Maestría Recursos Genéticos y Productividad en Ganadería. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, México D. F. 70 p.
- Werner Jaffé. 1992. Selenio, un Elemento Esencial y Tóxico. Datos de Latinoamérica. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición. 42 (90-93).
- Wu, L. 1994. Selenium accumulation and colonization of plants in soils with elevated selenium and salinity. In *Selenium in the Environment*, W.T.

- Frankenberger, Jr. y S. Benson (eds.) Marcel Dekker, Inc. New York, NY, 279-342.
- Wu L. and Huang Z. 2004. Chloride and sulfate salinity effects on selenium accumulation by tall fescue. *Crop Sci.* 31: 114-118.
- Xue, T. and H Hartikainen. 2000. Association of antioxidative enzymes with synergistic effect of selenium and UV irradiation in enhancing plant growth. *Agric. Food Sci. Finland*, 9: 177-186.
- Zayed, A. C.M. Lytle and N. Terry. 1998. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium in senescing lettuce. *Planta* 206:284-292.