



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

EL ZINC EN LA NUTRICIÓN DE FRESA
(*Fragaria x ananassa* Duch.) CV. ALBIÓN

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA

AMELIA LÓPEZ HERRERA

FEBRERO DE 2016

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO



Instituto de Horticultura

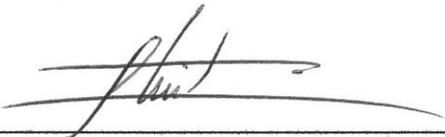
EL ZINC EN LA NUTRICIÓN DE FRESA
(*Fragaria x ananassa* Duch.) CV. ALBIÓN

Tesis realizada por **Amelia López Herrera** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:  _____

DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ

ASESOR:  _____

DR. EDILBERTO AVITIA GARCÍA

ASESOR:  _____

DRA. LIBIA IRIS TREJO TÉLLEZ

CHAPINGO, MÉXICO, FEBRERO DE 2016

DEDICATORIAS

A mis padres:

Agustín López Rodríguez[†] y Dalila Herrera Estrada

¡Por entregarme lo mejor de sí... porque son mi fuerza, mi valor y mi orgullo!

A mis hermanos:

Yazmín, Lizbeth, Agustín, Edalid y Bernardo

¡Por sus abrazos, sabios consejos y apoyo incondicional!

A mis sobrinos:

Yaretzi, Veleria, Uriel, Leonardo y Orlando

¡Por sus sonrisas que alegran mi alma, los amo pequeñines!

A mi gran amigo:

Aris

Por iluminar mi vida, por tus acertados consejos y por todos esos bellos momentos a tu lado, por aceptarme como soy, por reír y llorar conmigo, por cuidarme y mimarme, por tu apoyo incondicional, por todo lo compartido incluyendo la presente experiencia...porque donde estés hoy y siempre, le pido a mi Dios que te cuide y te colme de bendiciones y felicidad,

¡¡¡INFINITAS GRACIAS!!!

A mi querido y futuro esposo:

Alejandro

¡Por todos esos maravillosos momentos que alegran mi corazón, por ser mi cielo en la tierra, por tomar mi mano y desear compartir por siempre la ilusión, el café y la poesía, ¡¡¡TE AMO!!!

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para la realización del presente trabajo.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el apoyo económico ofrecido para la obtención de grado académico con la presente tesis.

Al Departamento de Fitotecnia del Instituto de Horticultura y al laboratorio de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados por facilitar sus instalaciones y equipo necesario para la realización de éste proyecto.

A la Interamerican Society for Tropical Horticulture (ISTH) y la Universidad Federal de Amazonas (UFAM) por haberme permitido presentar el presente trabajo durante la 61ª Reunión Anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical realizado en el estado de Amazonas, Manaus, Brasil, del 23 al 27 de noviembre del 2015.

A la Dra. Ana María Castillo González por su amistad y dirigir el presente trabajo, por sus valiosas sugerencias y apoyo brindado.

Al Dr. Edilberto Avitia García, Dra. Libia Iris Trejo Téllez, y Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por su amistad y acertados comentarios durante la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A la Q.F.B. Ángela Barrera Cortez por su amistad y asesoría técnica durante la fase experimental en el laboratorio de anatomía de frutales.

Al maestro Wenses por su amistad y asesoría técnica en el laboratorio de Nutrición Vegetal.

Al M.C. Jorge M. Valdez Carrasco, del Instituto de Fitosanidad del Colegio de Postgraduados por el apoyo brindado en la toma de fotografías.

Al Dr. Joel Pineda Pineda por el apoyo brindado durante la fase experimental en el laboratorio de nutrición del departamento de Suelos.

A los maestros de posgrado, por compartir sus conocimientos y enriquecer mi formación profesional.

A mis compañeros de la maestría y doctorado por compartir sus experiencias y conocimientos.

A Johana, Tere, Silvia, Carolina, Laura, Linda, Yolanda, Efrén, Aldo, Cristhyan Moncayo, Cristian López, Jorge Mendoza e Hilario, por su gran apoyo y amistad.

A mi querida Bertha, gracias por el apoyo brindado en la parte experimental y por tu gran amistad, por todos esos agradables momentos que hicieron aún más disfrutable ésta etapa.

DATOS BIOGRÁFICOS

La autora de la presente tesis, Bióloga Amelia López Herrera, nació el 15 de abril de 1986 en Netzahualcóyotl, Estado de México. En el 2005 ingresó a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, egresando en noviembre del 2009. Obtuvo la mención honorífica en el certamen de tesis del XVIII Congreso Mexicano de Botánica y reconocimiento a la mejor presentación oral en el XXXII Congreso Nacional de Histología.

Laboró en el Área de Difusión y Educación del Jardín Botánico del Instituto de Biología de la UNAM del 2010 al 2013. Para continuar con su formación académica en sus estudios de posgrado, en el 2014 ingreso a la Maestría en Ciencias en Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	iii
RESUMEN/ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN -----	1
II. OBJETIVOS -----	3
III. HIPÓTESIS -----	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA -----	4
1. Descripción botánica de la fresa -----	4
2. Morfología de la planta -----	4
3. Fruto -----	5
3.1. Desarrollo -----	5
3.2. Morfología -----	6
4. Cultivar Albión -----	8
5. Producción de fresa -----	9
6. Nutrición -----	10
6.1. Curvas de abastecimiento nutrimental -----	11
6.2. Nutrición en fresa -----	13
7. Calidad en fresa -----	14
7.1. Acidez titulable y pH -----	15
7.2. Sólidos solubles totales (SST) -----	17
7.3. Azúcares solubles totales (AST) -----	17
7.4. Color -----	19
7.5. Firmeza -----	21
8. El Zn y sus funciones en las plantas -----	22
8.1. Enzimas que contienen Zn -----	23
8.2. Metabolismo de los carbohidratos -----	25

CONTENIDO

8.3. Triptófano y síntesis del ácido indolacético (AIA)	25
8.4. Integridad de la membrana	26
8.5. Interacciones del Zn con otros elementos	27
8.6. Movimiento en el suelo y absorción radical	27
8.7. Síntomas de deficiencia	28
8.8. Síntomas de toxicidad	29
9. Fuentes usadas como fertilizantes	30
10. El Zn en los suelos mexicanos	30
11. Deficiencia de Zn en las personas	31
V. MATERIALES Y MÉTODOS	33
1. Ubicación experimental	33
2. Temperatura y humedad relativa	33
3. Material biológico	35
4. Sistema de producción	35
5. Solución nutritiva	35
6. Diseño experimental y tratamientos	37
7. Variables evaluadas	38
7.1. Planta	38
7.2. Fruto	40
8. Análisis de datos	43
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
1. Planta	45
1.1. Biomasa acumulada	45
1.2. Área foliar, longitud y diámetro de peciolo	48
1.3. Azúcares solubles totales (AST)	51
1.4. Concentración y acumulación nutrimental	54

CONTENIDO

1.4.1. Zinc	54
1.4.2. Nitrógeno	58
1.4.3. Fósforo	63
1.4.4. Potasio	66
1.4.5. Hierro	69
1.4.6. Acumulación de macro y micronutrientes	73
1.5. Grosor de las hojas	75
1.6. Rendimiento	78
2. Fruto	79
2.1. Peso fresco	79
2.2. Longitud, diámetro ecuatorial e índice de redondez	80
2.3. Sólidos solubles totales (SST)	83
2.4. pH	83
2.5. Acidez titulable (AT)	84
2.6. Relación SST/AT (sabor)	84
2.7. Azúcares solubles totales (AST)	85
2.8. Firmeza	87
2.9. Color	87
2.10. Acumulación nutrimental en fruto	89
2.10.1. Zinc	89
2.10.2. Nitrógeno	90
2.10.3. Fósforo	91
2.10.4. Potasio	92
2.10.5. Hierro	93
2.10.6. Acumulación de macro y micronutrientes en fruto	94
3. Curvas de abastecimiento nutrimental	96
VII. CONCLUSIONES	102
VIII. LITERATURA CITADA	103

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Rangos de suficiencia foliar para los nutrimentos en fresa a mediados del verano (Hancock, 1999)	14
Cuadro 2. Temperatura y humedad relativa promedio, máxima y mínima registrada mensualmente durante el cultivo de fresa cv. Albión	34
Cuadro 3. Temperatura y humedad relativa registrada mensualmente en el día y la noche durante el cultivo de fresa cv. Albión	34
Cuadro 4. Análisis de agua de invernadero	36
Cuadro 5. Tratamientos aplicados en el cultivo hidropónico de fresa cv. Albión	36
Cuadro 6. Solución nutritiva en el cultivo hidropónico de fresa cv. Albión ..	37
Cuadro 7. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de K en órganos de fresa cv. Albión	67
Cuadro 8. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de K en órganos de fresa cv. Albión	68
Cuadro 9. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de Fe en órganos de fresa cv. Albión	71
Cuadro 10. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Fe en órganos de fresa cv. Albión	72
Cuadro 11. Grosor de las hojas de fresa cv. Albión sin aplicación, dosis intermedia y alta de Zn en la solución nutritiva	76

LISTA DE CUADROS

Cuadro 12. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en las variables de calidad del fruto en fresa cv. Albión	82
Cuadro 13. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en las variables de calidad del fruto en fresa cv. Albión	86
Cuadro 14. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en variables de calidad del fruto en fresa cv. Albión	88
Cuadro 15. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Fe en frutos de fresa cv. Albión	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la biomasa acumulada en fresa cv. Albión	46
Figura 2. Biomasa acumulada por órgano en fresa cv. Albión cultivada con diferentes dosis de Zn	47
Figura 3. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el área foliar en fresa cv. Albión	48
Figura 4. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la longitud de peciolo en fresa cv. Albión	49
Figura 5. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el diámetro de peciolo en fresa cv. Albión	50
Figura 6. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el contenido de azúcares solubles totales en órganos de fresa cv. Albión	52
Figura 7. Azúcares solubles totales acumulados por órgano en fresa cv. Albión	53
Figura 8. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de Zn en órganos de fresa cv. Albión	56
Figura 9. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Zn en órganos de fresa cv. Albión	57
Figura 10. Acumulación de Zn en órganos de fresa cv. Albión	58
Figura 11. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de N en órganos de fresa cv. Albión	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 12. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de N en órganos de fresa cv. Albión	60
Figura 13. Acumulación de N en órganos de fresa cv. Albión	61
Figura 14. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de P en órganos de fresa cv. Albión	64
Figura 15. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de P en órganos de fresa cv. Albión	65
Figura 16. Acumulación de P en órganos de fresa cv. Albión	65
Figura 17. Acumulación de K en órganos de fresa cv. Albión	69
Figura 18. Acumulación de Fe en órganos de fresa cv. Albión	73
Figura 19. Acumulación de macronutrientes en órganos de fresa cv. Albión	74
Figura 20. Acumulación de micronutrientes en órganos de fresa cv. Albión	75
Figura 21. Cortes longitudinales de hojas de fresa cv. Albión	77
Figura 22. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el rendimiento del fruto en fresa cv. Albión	79
Figura 23. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Zn en frutos de fresa cv. Albión	90
Figura 24. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de N en frutos de fresa cv. Albión	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 25. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de P en frutos de fresa cv. Albión	92
Figura 26. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de K en frutos de fresa cv. Albión	93
Figura 27. Acumulación de macronutrientes en frutos de fresa cv. Albión ..	95
Figura 28. Acumulación de micronutrientes en frutos de fresa cv. Albión ..	95
Figura 29. Relación de la concentración de Zn en la planta con el rendimiento en fresa cv. Albión	96
Figura 30. Relación de la concentración de Zn en la planta con la biomasa acumulada en fresa cv. Albión	97
Figura 31. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de Zn en fresa cv. Albión	98
Figura 32. Concentración crítica de Zn asociado con el 95 % de biomasa acumulada y rendimiento en fresa cv. Albión	100

EL ZINC EN LA NUTRICIÓN DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.) CV. ALBIÓN
ZINC IN NUTRITION OF STRAWBERRY (*Fragaria x ananassa* Duch.) CV. ALBIÓN

Amelia López Herrera¹ y Ana María Castillo González²

RESUMEN

El Zn es requerido en el crecimiento vegetativo, calidad y rendimiento de los cultivos; de ahí la necesidad de realizar investigación para conocer y cubrir los requerimientos de este elemento en los cultivares de fresa de reciente introducción, con el fin de generar programas de fertilización adecuados que permitan mejorar su competitividad y rentabilidad. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de diferentes dosis de Zn en la solución nutritiva en el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto en fresa cv. Albión; así como modelar la curva de abastecimiento nutrimental para este elemento. Se establecieron plantas de fresa en macetas de 2.5 L con tezontle, en un sistema hidropónico abierto. Los tratamientos fueron: testigo (sin aplicación de Zn), 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 y 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en la solución nutritiva. Con las dosis entre 5 y 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ se obtuvieron los mayores crecimientos, acumulaciones de biomasa, concentraciones nutrimentales, rendimientos y la mejor calidad del fruto. Sin embargo, al modelar la curva de abastecimiento el valor de suficiencia fue de 16 mg kg^{-1} de Zn en la planta que se alcanzó con 4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn en la solución nutritiva.

Palabras clave: tezontle, solución nutritiva, valor crítico, suficiencia.

¹ Tesista

² Director

ABSTRACT

Zinc is required for the vegetative growth, quality and yield of crops, hence the need to perform research to know and meet the requirements of this element in recently-introduced strawberry cultivars for this element in order to generate appropriate fertilization programs that increase the profitability and marketability of this species. The objective of the present study was to assess the effect of different Zn rates in the nutrient solution on growth, yield and quality of strawberry fruits cv. Albión as well as modeling the curve of nutrient supply for this element. Strawberry plants were established in 2.5 L containers filled with volcanic sand in an open hydroponic system. The treatments were: control (with no Zn), 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30 and 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) in the nutrient solution. Plants fed with 5 to 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ exhibited the highest growth, biomass accumulation, nutrient concentrations, yields and the best quality of fruits. Nonetheless, the model for the curve of nutrient supply estimates that the sufficiency level was attained with 16 mg kg^{-1} of Zn in plant tissues, which is predicted to be obtained when plants are fed with a nutrient solution containing 4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Zn.

Keywords: volcanic sand, nutrient solution, critical level, sufficiency.

I. INTRODUCCIÓN

La fresa cultivada es una frutilla que se caracteriza por su delicado sabor y alto contenido en vitaminas y antioxidantes, por lo que es incluida en la dieta de millones de personas. Es cultivada en regiones agrícolas que se localizan desde el Ártico hasta los trópicos (Hancock, 1999).

A nivel nacional, la fresa se produce en 12 entidades del país, de las cuales Baja California, Michoacán y Guanajuato son las principales productoras, con el 95 % de la producción nacional (SIAP, 2014). A nivel mundial, México ocupó el segundo lugar en la producción de ésta fruta con 360,426 t (FAO, 2014). Aunque la fresa ocupa solamente el 1 % de la superficie dedicada a la agricultura, es muy importante a nivel nacional desde el punto de vista socioeconómico, principalmente porque genera oportunidades de empleo y divisas por ser un producto de exportación para su consumo en fresco y congelado (SIAP, 2014).

Es preciso realizar investigaciones para conocer y manejar aspectos de la nutrición, en donde se requiere saber cuáles son las proporciones adecuadas de los nutrimentos que requieren las plantas para su óptimo crecimiento y desarrollo, especialmente en micronutrimentos.

El zinc (Zn) es un micronutriente que las plantas necesitan para tener crecimiento y reproducción normales. Aun cuando los cultivos lo requieren en muy pequeñas cantidades, se ha reportado que es un micronutriente deficiente en un 40 % de los suelos cultivados en todo el mundo, y aproximadamente en el 50 % de los suelos agrícolas del mundo con producción de cereales presentan carencia de este elemento. El Zn juega un papel muy importante en funciones como la estructura de la membrana celular, fotosíntesis, síntesis de proteínas y defensa frente a sequías y enfermedades (Cakmak, 2014). Es un componente catalítico para más de 300 enzimas (Fox y Guerinot, 1998).

El papel que juega el Zn en el rendimiento y calidad del fruto en cultivos económicamente importantes para México, como lo es la fresa, reviste gran importancia en cultivares comerciales de reciente introducción como el cv. Albión, al permitir mejorar su competitividad y rentabilidad. Es por ello que en el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

II. OBJETIVOS

1. Evaluar el efecto de diferentes dosis de Zn en el crecimiento, rendimiento, calidad del fruto y el grosor de la hoja en plantas de fresa cv. Albión.
2. Determinar la dosis óptima de Zn en la solución nutritiva que se relacione con el mejor rendimiento y calidad del fruto.
3. Elaborar la curva de abastecimiento nutrimental de Zn en fresa cv. Albión.

III. HIPÓTESIS

1. Las diferentes dosis de Zn causan alteraciones en el crecimiento, rendimiento, calidad del fruto y grosor de la hoja en plantas de fresa cv. Albión, sobre todo al pasar de una ausencia a una mayor concentración de Zn en la solución nutritiva.
2. La dosis óptima de Zn en la solución nutritiva que se relacione con el mejor rendimiento y calidad del fruto se encontrará entre 5 y 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$.
3. En la curva de abastecimiento nutrimental de Zn en fresa cv. Albión se definirá el rango de suficiencia para éste micronutriente.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

1. Descripción botánica de la fresa

La fresa pertenece a la familia Rosaceae y al género *Fragaria*. La especie de fresa más importante a nivel mundial es *Fragaria x ananassa* Duch. y es un híbrido de *F. chiloensis* y *F. virginiana* que apareció de manera accidental en los jardines europeos a mediados de la década de 1700. Duchesne nombró a esta especie *Fragaria x ananassa* para hacer referencia al aroma del fruto de la fresa, el cual es similar al de las piñas (*Ananas*) (Hancock, 1999).

2. Morfología de la planta

Esta planta tiene un tallo central o corona de la cual emergen las hojas, raíces, estolones e inflorescencias. La corona está formada de una médula central rodeada por una capa delgada de cambium. Las hojas se disponen en forma espiralada a lo largo de la corona. Son pinnadas y están constituidas por tres folíolos redondeados con el borde dentado y un peciolo largo y pubescente, provisto en la base de dos estípulas. Tienen la epidermis, parénquima empalizada y el resto de las capas del mesófilo típicas de las dicotiledóneas. Los estomas únicamente se encuentran en el envés de la hoja. Las raíces emergen de la base de la corona y su anatomía es

típica de las dicotiledóneas, son fasciculadas y muy superficiales. Los estolones son ramas flexibles y largas que reptan por el suelo y en la mayoría de las especies tienen dos nudos, en los cuales se puede producir una planta hija (segundo nudo) o bien permanecer latente o desarrollar otro estolón (primer nudo). Cada planta hija tiene la capacidad de producir sus propios estolones (Hancock, 1999). Las flores se agrupan en inflorescencias, en cuyos receptáculos se insertan los verticilos florales: el gineceo formado por varios carpelos (apocárpico) y el androceo constituido por estambres cortos, el cáliz organizado en dos series y la corola formada por cinco pétalos blancos (Bianchi, 1999). Las fresas son polinizadas por insectos, y usualmente las abejas son empleadas como agentes polinizantes (Hancock, 1999).

3. Fruto

3.1. Desarrollo

Tras la fecundación el ovario inicia su desarrollo hasta convertirse en un fruto maduro. Esta transición tiene lugar en fases sucesivas, con características bien definidas y variables en duración que dependen de las condiciones ambientales, especies y variedades. El crecimiento acumulado del fruto de fresa sigue una curva simple sigmoide, en la cual se distinguen tres fases: un periodo inicial caracterizado por la proliferación celular (fase I), seguido de un periodo de aumento en el tamaño de las células (fase II), y un periodo final en el que el fruto cesa, prácticamente, en su crecimiento y madura (fase III). Los

carpelos, la nucela y el embrión adquieren su tamaño casi definitivo durante la fase I del desarrollo del fruto. La pulpa, o desarrollo de los tejidos comestibles, se determina mayoritariamente en las fases I y II del desarrollo (Hancock, 1999; Agustí, 2011).

La transición del ovario de la flor a fruto en desarrollo se denomina cuajado o amarre de fruto. Comprende un crecimiento rápido de los tejidos del ovario. Para que el cuajado se produzca son necesarios tres requisitos:

1. Yemas florales maduras, bien formadas y nutridas.
2. Régimen de temperaturas durante la antesis, que asegure una buena polinización, el desarrollo del tubo polínico y la fecundación.
3. Aporte adecuado de fotosintatos cuando el ovario inicie el desarrollo. Si estos requisitos se cumplen, se inicia la fase I del crecimiento del fruto. La mitosis es un proceso muy exigente en energía. Durante la fase de crecimiento exponencial de los frutos, son todos sus tejidos los que aumentan su número de células, y la acción conjunta de todos ellos es la que hace exigente al fruto en energía. El aporte de carbohidratos al fruto en desarrollo resulta, por tanto, crucial (Agustí, 2011).

3.2. Morfología

La fresa es un fruto agregado que se origina de una sola flor con gineceo apocárpico, que produce un conjunto de frutos pequeños (aquenios o eterios)

los cuales se desarrollan sobre un receptáculo común y al madurar forman una sola unidad de muchos aquenios (poliaquenio) (González *et al.*, 2013). La parte comestible de la fresa es el receptáculo carnoso y desarrollado, en cuya superficie se encuentran los aquenios, acompañada del cáliz que persiste en la base del fruto (González *et al.*, 2013).

La fecundación de los carpelos es imprescindible para que se produzca el engrosamiento del receptáculo que le corresponde; de no ser así, los frutos son deformes y de pequeñas dimensiones (Bianchi, 1999). El desarrollo de la fresa es regulado por un conjunto complejo de señales ambientales y fisiológicas. La aparición y crecimiento de las hojas, raíces, estolones, inflorescencias y frutos están marcadamente influenciados por el genotipo y por varios factores ambientales entre los que se encuentran la temperatura, intensidad luminosa y el fotoperiodo (Hancock, 1999).

Las condiciones ideales para las fresas ocurren cuando las temperaturas se encuentran entre los 20 y 26 °C, temperaturas menores a 20 °C retrasan el crecimiento y desarrollo de la planta y el fruto, mientras que temperaturas mayores a 35 °C provocan que la planta deje de crecer (Rowley *et al.*, 2011).

En las plantas de día corto, su floración se ve acelerada por los días cortos (menos de 14 h de duración del día) o cuando las temperaturas son menores a 15 °C. En tanto, las plantas de día largo, florecen sólo en los días largos,

cuando la duración del día es mayor a 12 h y las temperaturas son moderadas. Las raíces son producidas de manera abundante en la primavera y el otoño cuando las temperaturas son frescas. Se produce un fuerte crecimiento de las raíces a temperaturas de 7 a 32 °C. El sistema radical es el único tejido que exhibe reducción en biomasa durante la fructificación (Hancock, 1999).

4. Cultivar Albión

El cultivar de fresa Albión fue desarrollado en Estados Unidos, a partir de una cruce realizada en 1997 entre el cultivar Diamante y una selección avanzada denominada Cal 94,16-1, posteriormente fue nombrada Albión para su introducción en muchos países, incluyendo México, donde es comercialmente cultivada bajo varias condiciones climáticas y modos de cultivo (Ornelas-Paz *et al.*, 2013).

Este cultivar es de día neutro; es decir, son plantas que florecen en cualquier condición fotoperiódica y por tanto son insensibles a la duración del día (Taiz y Zeiger, 2006). Es muy similar al cultivar Diamante pero su fruto cónico es de mayor calidad, firme y de buen sabor, presenta una mejor resistencia a *Phytophthora cactorum*. Sus hojas son ligeramente cóncavas y pubescentes, en tanto que los peciolo son densamente pubescentes y tienen una longitud promedio de 105 mm y un diámetro de 4.1 mm (Shaw y Larson, 2006).

Los rendimientos experimentales reportados en la patente publicada por Shaw y Larson (2006) fueron de 2,417 g planta⁻¹ con una densidad de 17,300 plantas ha⁻¹, en un período de cosecha de siete meses. El peso promedio de fruto registrado fue de 33 gramos. La longitud promedio del fruto fue de 60.6 mm y 49.7 mm de ancho, el índice de redondez de 1.2 define un fruto de forma alargada y simétricamente cónico, los sólidos solubles totales (°Brix) promedio fueron de 8.5 y su acidez de 0.74 %, resultados que comparados con los frutos del cultivar Diamante son más dulces durante toda la temporada. El color promedio del fruto fue: luminosidad (L°)= 40, croma (C*)= 28.4 y ángulo hue (h°)= 41.2. Con respecto a su apariencia comercial es mejor que los cultivares Diamante y Aromas. Cabe mencionar que el fenotipo de éste cultivar varía de acuerdo a las condiciones ambientales y de cultivo en las cuales se encuentre.

De acuerdo con Ornelas-Paz *et al.* (2013) el mayor diámetro de fruto alcanzado para este mismo cultivar fue de 26.2 a 29.5 mm y la longitud de 36.9 a 38.8 mm, crecidas en condiciones orgánicas bajo invernaderos de plástico ubicados en Chihuahua, México.

5. Producción de fresa

La mayor parte de la producción se localiza en el hemisferio norte (98 %), pero no existen barreras genéticas o climáticas que impidan una mayor expansión en el hemisferio sur.

Estados Unidos de Norteamérica es la nación líder en la producción de fresa, en el 2012 alcanzó una producción de 1,366,850 t, en tanto que México ocupó el segundo lugar con 360,426 t, seguido por Turquía con 353,173 t, España con 289,900 t y Egipto 242,247 t. A nivel nacional en el 2014, Michoacán tuvo una producción de 259,190 t, Baja California 145,768.62 t y Guanajuato 28,568.20 t (FAO, 2014).

6. Nutrición

Los problemas relacionados con el contenido relativo de nutrimentos en un cultivo están estrechamente relacionados con problemas debidos a las técnicas de fertilización como son: la relación entre las cantidades aplicadas y absorbidas de un nutrimento en particular, la relación entre la cantidad absorbida del nutrimento y la producción de materia seca, y la relación entre la cantidad aplicada del nutrimento y el rendimiento de la cosecha. Estas relaciones son de suma importancia cuando se requieren resolver problemas asociados con la nutrición de los cultivos (Alcántar *et al.*, 2012). Para diagnosticar el estado nutrimental de los cultivos, el análisis foliar constituye una gran herramienta, con la cual se pueden definir los grados de abastecimiento nutrimental con base en la concentración que se presente en sus tejidos, generalmente las hojas.

6.1. Curvas de abastecimiento nutrimental

La velocidad de absorción y acumulación de un nutrimento en particular en la planta se incrementa en forma de una curva de saturación conforme su disponibilidad aumente en el medio nutritivo.

De acuerdo con Alcántar *et al.* (2012), la curva de abastecimiento nutrimental puede ser dividida en varios segmentos, los cuales se describen a continuación:

Deficiencia severa. Es la concentración que se asocia con el estado fisiológico de la planta, donde se observan claramente síntomas de deficiencia y una severa reducción del crecimiento y producción.

Deficiencia moderada o latente. Es el intervalo asociado con una disminución del crecimiento o producción, pero la planta no muestra síntomas visibles de deficiencia.

Valor o nivel crítico. Es la concentración de un nutrimento determinado, en condiciones experimentales, donde otros factores de crecimiento se encuentran en un nivel óptimo, que se asocia con un valor predeterminado del rendimiento (o calidad) máxima. Este valor predeterminado corresponde con el 90 o 95 % del rendimiento máximo.

Óptimo o buen abastecimiento. Es el intervalo de concentración en donde los cambios que ocurran no provocan aumento o disminución del crecimiento o producción. Si los valores del análisis vegetal se encuentran en este intervalo no es necesario realizar ningún cambio en las prácticas de fertilización.

Exceso o consumo de lujo. Se ubica entre los niveles óptimo y tóxico (excesivo) y puede definirse por su asociación con una tendencia hacia la disminución en la producción de calidad o vigor.

Tóxico. La presencia de concentraciones extremadamente altas de un nutrimento que se asocian, generalmente, con síntomas de toxicidad y frecuentemente con reducción del crecimiento y producción y casi siempre con disminución de calidad y vigor.

Concentración crítica de toxicidad. Aquel asociado con una reducción específica del rendimiento máximo, generalmente el 10 % de éste. Se observan síntomas visuales de toxicidad causados por la excesiva absorción. El crecimiento es pobre y raquítico, la calidad de los productos deficiente y es claro que no debe fertilizarse con el nutrimento en exceso. Las curvas de abastecimiento nutrimental son necesarias para generar planes de fertilización adecuados; sin embargo, generalmente son específicas para cada nutrimento y para una especie y genotipo, lo cual indica, que no se pueden hacer extrapolaciones de un cultivo a otro, aunque en algunos casos pueden existir

similitudes. De igual manera, no es posible generalizar o utilizar la información obtenida en un lugar determinado para otros diferentes (Alcántar *et al.*, 2012).

6.2. Nutrición en fresa

Las fresas crecen y se producen satisfactoriamente en un amplio intervalo de tipos de suelo desde arenas hasta margas pesadas. También son tolerantes a un amplio rango de valores de pH de suelo, pero crecen y se producen mejor en el intervalo de 6.0 a 6.5. Como el resto de las plantas, las fresas tienen requerimientos críticos de nutrimentos (Hancock, 1999).

Niveles apropiados de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son esenciales para el crecimiento y desarrollo adecuado. Un exceso en los niveles de nitrógeno puede conducir a frutos blandos, retraso en la maduración, bajos rendimientos y una mayor susceptibilidad al ataque por ácaros (Hancock, 1999; Tagliavini *et al.*, 2000). Los niveles de calcio (Ca) son determinantes en la firmeza del fruto. La deficiencia de boro (B) afecta en la reducción de la producción de polen viable, la germinación del grano de polen y en la expansión del receptáculo, lo cual puede traer como consecuencia la formación de frutos pequeños y deformes, así como una reducción en el crecimiento de las raíces primarias y laterales (Hancock, 1999; Abdollahi *et al.*, 2010).

Las plantas de fresa deficientes de zinc (Zn) presentan hojas y frutos pequeños y reducen su rendimiento. Las deficiencias de hierro (Fe) conducen a una reducción en el vigor y hojas cloróticas (Jones, 1998). En el Cuadro 1 se muestran los rangos de suficiencia foliar para los nutrimentos en plantas de fresa.

Cuadro 1. Rangos de suficiencia foliar para los nutrimentos en fresa a mediados del verano (Hancock, 1999).

Nutrimentos	Deficiencia	Suficiencia	Exceso
N (%)	1.90	2.00-2.80	4.00
P (%)	0.20	0.25-0.40	0.50
K (%)	1.30	1.50-2.50	3.50
Ca (%)	0.50	0.70-1.70	2.00
Mg (%)	0.25	0.30-0.50	0.80
S (%)	0.35	0.40-0.60	0.80
B (ppm)	23.0	30.0-70.0	90.0
Fe (ppm)	40.0	60.0-250.0	350.0
Mn (ppm)	35.0	50.0-200.0	350.0
Cu (ppm)	3.00	6.0-20.0	30.0
Zn (ppm)	10.0	20.0-50.0	80.0

7. Calidad en fresa

La calidad de la fresa depende principalmente de su color, firmeza, olor y sabor, muchos de estos cambios físico-químicos ocurren durante la maduración de los frutos y están íntimamente relacionados con la respiración (Herrero y Guardia, 1992; Gunness *et al.*, 2009). Como fruto no climatérico, las fresas deben ser cosechadas en la etapa de maduración total, ya que no se

desarrollan los atributos de calidad aptos para el consumo en fresco tras su desprendimiento de la planta (Nunes *et al.*, 2006).

La maduración se define como el conjunto de cambios externos, de sabor y de textura que un fruto experimenta cuando completa su crecimiento. Esta fase de su desarrollo incluye procesos como la coloración del pericarpio, el descenso en el contenido en almidón, incremento de la concentración de azúcares, reducción de la concentración de ácidos, pérdida de la firmeza, entre otros cambios físicos y químicos (Agustí, 2011; Hancock, 1999; Montero *et al.*, 1996).

Hay una correlación entre maduración y síntesis de proteínas, el incremento neto de proteínas observado durante la madurez es debido a la síntesis de una gran cantidad de enzimas (Herrero y Guardia, 1992).

7.1. Acidez titulable y pH

El sabor es una de las propiedades más importantes que proporciona el valor comercial a los frutos en general, y en las fresas está condicionado en parte por el balance entre los azúcares y los ácidos expresados en el fruto maduro.

Es por ello que los componentes químicos más usuales que se determinan en los frutos son los sólidos solubles totales (°Brix) y la acidez titulable, a la que se asocia la medición del pH. Estos parámetros también son precisos para la

determinación del estado de madurez adecuado para la cosecha y poscosecha de algunos frutos (Bosquez, 1992).

En su mayoría, los frutos son ricos en ácidos orgánicos que se encuentran disueltos en la vacuola de la célula, en forma libre o combinada. La acidez libre, o titulable, se mide neutralizando los jugos o extractos de los frutos con una base fuerte, el pH aumenta durante la neutralización y la acidez titulable se calcula a partir de la cantidad de base necesaria para alcanzar el pH del punto final de la prueba, en la práctica, se toma como punto final $\text{pH} = 8.5$ usando fenolftaleína como indicador, bajo estas condiciones, los ácidos orgánicos y solo una parte del ácido fosfórico y fenoles están involucrados en el resultado final. Para reportar la acidez se considera el ácido orgánico que se encuentra en mayor cantidad en el fruto, que varía dependiendo de la especie, así el resultado se expresa en términos de la cantidad del ácido orgánico dominante (Bosquez, 1992).

Los principales ácidos en la fresa son el cítrico y el málico, siendo el ácido cítrico, el que se utiliza como base para la determinación de la acidez titulable, el glicólico y shikímico están presentes pero en menores cantidades. Estos frutos también son una excelente fuente de ácido ascórbico (vitamina C), el cual ejerce efectos de protección para la salud y nutrición humana.

7.2. Sólidos solubles totales (SST)

Los grados brix (°Brix) equivalen al porcentaje de azúcar que existe en el jugo de los frutos. Los frutos contienen como sólidos solubles sacarosa y ácidos orgánicos. La acidez y el contenido de sólidos solubles no se estudian por separado, sino conjuntamente en forma de una relación entre los dos, ya que ambos aspectos están muy ligados y de la mayor o menor presencia de ellos depende en alto grado la calidad de la fruta. Así, de la acidez y los sólidos solubles totales se obtiene un índice llamado relación sólidos solubles totales/acidez total con el cual se puede entrar a tablas de normalización, las cuales ofrecen la información de si es aceptable o no la composición de un fruto (Calderón, 1977).

7.3. Azúcares solubles totales (AST)

Los azúcares y ácidos orgánicos tienen una gran importancia entre los componentes químicos de la fresa. Los azúcares están implicados en el sabor del fruto y determinan su valor calórico, en tanto que los ácidos orgánicos están involucrados no sólo en el sabor, sino también en la textura, pH y color del fruto (Montero *et al.*, 1996).

En la fresa, los azúcares solubles que representan más del 99 % de los azúcares totales presentes en el fruto maduro son la sacarosa, glucosa y fructuosa, en tanto que el sorbitol, xilitol y la xilosa conforman el resto.

Generalmente durante la maduración del fruto disminuye el contenido de polisacáridos de reserva, aumentado el de azúcares, a la vez que la acidez titulable disminuye. El almidón acumulado durante el crecimiento cuando llega la maduración y senescencia se degrada a azúcares solubles, principalmente glucosa, sacarosa y fructuosa (Herrero y Guardia, 1992).

Existen enzimas dependientes de Zn que actúan en el metabolismo de los carbohidratos, principalmente en las hojas (Kirkby y Römheld, 2007). Cuando las hojas son maduras, tienen la capacidad de producir fotoasimilados en exceso respecto a sus necesidades y por tanto son consideradas como órganos fuentes o de exportación. Así mismo, otro tipo de fuente son los órganos como la raíz, principalmente cuando los azúcares son removilizados y empleados para producir un nuevo brote, que finalmente, se convierte en reproductivo. En tanto que las áreas en donde se almacenan los fotoasimilados son los órganos demanda, como los frutos en desarrollo, ya que necesitan importar carbohidratos para su desarrollo normal (Taiz y Zeiger, 2006).

7.4. Color

El color de los frutos afecta la aceptación del consumidor, la percepción de dulzor y el sabor, e incluso puede evocar sentimientos emocionales en los seres humanos (Ornelas-Paz *et al.*, 2008).

Los colores rojo, rosa, morado y azul que se encuentran en las flores y frutos de las plantas son producidos por las antocianinas (Silva *et al.*, 2007), glicósidos que tienen un azúcar en posición 3 o en alguna otra posición (Taiz y Zeiger, 2006), son pigmentos importantes para indicar la madurez de los frutos (Montero *et al.*, 1996) y junto con otros compuestos fenólicos, protegen a los humanos de varias enfermedades (Silva *et al.*, 2007).

A lo largo de la maduración, la clorofila se degrada por medio de sistemas enzimáticos o por la acción de los ácidos que normalmente están presentes en los tejidos vegetales así, los pigmentos carotenoides (naranja y amarillo) y las antocianinas (rojos y azules) aparecen, contribuyendo progresivamente al color final del fruto (Herrero y Guardia, 1992). La intensidad luminosa es un factor del clima que influye notablemente en la coloración de los frutos, sobre todo en la formación de los colores secundarios, ya que la síntesis de los pigmentos respectivos representa una reacción fotoquímica, en la que es indispensable la presencia de luz. En la fresa la cosecha debe realizarse cuando las tres cuartas partes de la superficie del fruto tienen ya un color rosado o ligeramente rojizo

(Calderón, 1977). El color de los frutos se puede determinar mediante espectrofotómetros los cuales son aparatos electrónicos que miden la intensidad del color. Normalmente poseen una ventanilla por donde se apoya el fruto y una escala graduada que reproduce la intensidad del color (Herrero y Guardia, 1992).

De acuerdo con McGuire (1992), la intensidad de color que proporcionan los espectrofotómetros está basada en el sistema de color CIELAB (L^* , a^* , b^* , C^* y h°). En este sistema L° , a^* y b^* describen un espacio tridimensional, donde L^* (luminosidad o brillo) es el eje vertical y sus valores varían de cien (100), para el blanco, a cero (0), para el negro. Valores de a^* y b^* especifican los ejes verde-rojo y azul-amarillo, respectivamente. Van de -60 a +60 o de $-a$ (verde) a $+a$ (rojo) y de $-b$ (azul) a $+b$ (amarillo).

Una medida apropiada para determinar el color se obtiene de calcular el ángulo hue (h°) y croma (C^*) a partir de los valores de a^* y b^* , aunque algunos espectrofotómetros los proporcionan directamente. El croma o índice de saturación (C^*) es calculado como $C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$, que representa la hipotenusa de un triángulo rectángulo. El ángulo hue o ángulo de tono (h°) se define como el ángulo entre la hipotenusa y los cero grados (0°) ubicados sobre el eje de las a^* , y es calculado a partir de la arco tangente de b^*/a^* , es decir, $h^\circ = 180 \pi \tan^{-1} (b^*/a^*)$. El C^* describe la longitud del color vector en el plano

formado por los valores de a^* y b^* , mientras que h° determina la posición de tal vector (McGuire, 1992, Ornelas-Paz *et al.*, 2008).

7.5. Firmeza

La firmeza determina las propiedades mecánicas de las fresas y también está involucrada en su calidad sensorial (Gunnness *et al.*, 2009). La textura es regida por polisacáridos estructurales (sustancias pépticas). La pérdida de firmeza durante la maduración es un factor importante que determina la calidad y la vida postcosecha de la fresa (Montero *et al.*, 1996). Un fruto verde es rico en protopectinas insolubles en agua. La transformación de estas protopectinas en pectinas solubles contribuye a que el fruto se ablande. Los compuestos de las paredes celulares que se modifican son las celulosas, las hemicelulosas y las pectinas (Herrero y Guardia, 1992).

La consistencia de la pulpa, es decir, su resistencia a la presión y a la penetración se puede medir mediante el uso de aparatos llamados penetrómetros, que consisten esencialmente en un pistón de metal, unido a un muelle de acero que actúa como dinamómetro. El pistón se desliza a lo largo de un tubo y en su extremidad termina en una superficie convexa que se pone en contacto con la pulpa del fruto, a la cual llega a penetrar al aplicarse más presión, misma que queda registrada y puede medirse en una escala (Calderón, 1977).

8. El Zn y sus funciones en las plantas

El Zn es uno de los ocho micronutrientes que son requeridos por las plantas en relativamente bajas concentraciones en comparación con los macronutrientes (Jones, 1998). Existe en la solución del suelo como catión divalente (Zn^{2+}), siendo esta forma asimilable por las plantas, también se puede encontrar en el suelo como Zn intercambiable y como complejo orgánico, su disponibilidad es afectada por el pH del suelo, disminuyendo su disponibilidad cuando el pH aumenta.

En su mecanismo de acción el Zn presenta ciertos paralelismos con el Mn y el Mg, de tal manera que el Zn favorece la unión y alineamiento enzima-sustrato. A diferencia de otros micronutrientes el Zn no participa en reacciones de óxido-reducción, más bien su función metabólica se basa en su tendencia a formar complejos tetraédricos con el N, O y S, por lo que su papel en las reacciones enzimáticas es tanto funcional (catalítico), como estructural (Fox y Guerinot, 1998).

En general, el rango de suficiencia en la hoja para el Zn se encuentra entre 15 y 50 ppm en la materia seca de hojas maduras, pero para algunas especies, los síntomas visuales de deficiencia pueden no ser visibles hasta que la concentración de Zn es tan baja como 12 ppm. Para la mayoría de los cultivos, 15 ppm de Zn en las hojas es considerado como el *valor crítico*. Sin embargo,

una variación pequeña en el contenido de Zn, como de 1 a 2 ppm, en el nivel crítico, puede ser suficiente para establecer una suficiencia o deficiencia en el cultivo. Algunas plantas pueden acumular cantidades considerables de Zn sin dañar a la planta.

8.1. **Enzimas que contienen Zn**

Existe un gran número de enzimas en las cuales el Zn es un componente integral de su estructura o bien, un componente catalítico esencial para más de 300 enzimas (Fox y Guerinot, 1998). En estas enzimas hay tres funciones: catalítica, co-catalítica (coactiva) y estructural.

Enzimas con funciones catalíticas son la anhidrasa carbónica y la carboxipeptidasa, las cuales se caracterizan por presentar un átomo de Zn coordinado con cuatro ligandos, tres de los cuales son aminoácidos: histidina (His), glutamina (Glu) y asparagina (Asp) y como cuarto ligando, una molécula de agua.

En aquellas enzimas con funciones estructurales como la alcohol deshidrogenasa y en las proteínas y enzimas involucradas en la replicación del DNA, su transcripción (RNA polimerasa) y traducción a proteínas, los átomos de Zn están coordinados con los grupos azufre (S) de cuatro residuos de cisteína (Cys). Muchas de las enzimas que contienen Zn, tienen únicamente un

átomo de Zn por molécula, siendo una excepción la alcohol deshidrogenasa (Marschner, 2002). La alcohol deshidrogenasa es una enzima que contiene dos átomos de Zn por molécula, una con funciones catalíticas y otra con funciones estructurales. Cataliza la reducción de acetaldehído a etanol. En plantas superiores bajo condiciones aeróbicas, la formación de etanol toma lugar principalmente en los tejidos meristemáticos, tales como los ápices de las raíces. En plantas deficientes de Zn, la alcohol deshidrogenasa decrece, pero las consecuencias en el metabolismo de las plantas aún no son conocidos.

La anhidrasa carbónica contiene un solo átomo de Zn. Se localiza en el cloroplasto y en el citoplasma y de acuerdo a los requerimientos metabólicos puede proveer bicarbonatos (HCO_3^-) al catalizar la hidratación del dióxido de carbono (CO_2) o bien puede proveer de CO_2 , para la fijación fotosintética de CO_2 . La anhidrasa carbónica es particularmente importante para especies C-4 en las cuales la fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPcase) directamente usa anión bicarbonato (HCO_3^-) como sustrato mientras que las especies C-3 tienen un bajo requerimiento de la anhidrasa carbónica (Mengel y Kirkby, 2001). Cuando ocurre la deficiencia de Zn, la actividad de la anhidrasa carbónica disminuye acentuadamente (Kirkby y Römheld, 2007).

La superóxido dismutasa CuZn es una isoenzima que está asociada con el Cu, donde el Cu representa el componente metálico catalítico y el zinc el componente estructural. Cuando existen deficiencias de Zn la actividad de esta

enzima puede decrecer y simultáneamente puede incrementarse la generación de radicales O_2^- , los cuales están relacionados con los principales factores responsables de la per-oxidación de los lípidos de la membrana y un incremento en su permeabilidad.

8.2. **Metabolismo de los carbohidratos**

En el metabolismo de carbohidratos hay varias enzimas que requieren de forma indispensable al Zn, como la aldosa que regula la transferencia de fotosintatos de tres carbonos (C_3) del cloroplasto al citoplasma y la fructosa 1,6 bifosfatasa, enzima clave en la participación de azúcares de seis carbonos (C_6) en el cloroplasto y citoplasma (Mengel y Kirkby, 2001; Marschner, 2002). La actividad de estas enzimas también se ve deprimida como efecto de la deficiencia de Zn, pero a pesar de esta reducción la tasa de fotosíntesis no es afectada considerablemente y los almidones y azúcares frecuentemente se acumulan en plantas deficientes de Zn (Kirkby y Römheld. 2007).

8.3. **Triptófano y síntesis del ácido indolacético (AIA)**

Un abastecimiento adecuado de Zn favorece la síntesis de triptófano y dado que el triptófano es considerado como un compuesto precursor del ácido indolacético (AIA), podría adjudicarse al Zn también una influencia en la

formación de auxinas principalmente AIA. El mecanismo de la acción de Zn en el metabolismo de las auxinas no es todavía claro (Marschner, 2002).

8.4. Integridad de la membrana

El Zn es requerido para mantener la integridad de las membranas. Puede unirse a fosfolípidos y a grupos sulfhidrilo constituyentes de la membrana o formar complejos tetraédricos con residuos de cisteína de cadenas polipeptídicas y por tanto proteger a los lípidos de la membrana y a las proteínas contra daños oxidativos. Al sufrir una deficiencia de Zn, la generación de O_2^- incrementa y se produce un aumento en la permeabilidad de la membrana plasmática a medida que los radicales tóxicos de O_2^- libres rompen los dobles enlaces de los ácidos grasos poli-insaturados y los fosfolípidos de las membranas. Esto lleva a una pérdida de azúcares, aminoácidos y potasio (K). El aumento de la oxidación de lípidos en las hojas lleva a la destrucción de la clorofila, necrosis y crecimiento atrofiado producto de la oxidación del AIA, particularmente bajo una alta intensidad luminosa (Cakmak, 2000).

De acuerdo con Kirkby y Römheld (2007), el Zn también protege a la planta contra varios agentes patógenos, pues en plantas con deficiencia de este micronutriente, las membranas pierden sus características de permeabilidad de tal forma que los carbohidratos y los aminoácidos son liberados, atrayendo agentes patógenos e insectos tanto hacia las raíces como a los nuevos brotes.

8.5. Interacciones del Zn con otros elementos

Las relaciones entre el P y el Zn sugieren que altas concentraciones de P pueden interferir con el metabolismo del Zn, así como afectar la absorción de este a través de la raíz, mientras que altas concentraciones de Zn pueden inducir una deficiencia de Fe, particularmente en aquellas plantas sensibles al Fe (Mengel y Kirkby, 2001).

El Cu y otros cationes, tales como el NH_4^+ pueden inhibir la absorción de Zn por las raíces, en tanto que la eficiencia de absorción del Zn parece ser mejorada por la reducción en el pH de la rizósfera, así aquellas especies vegetales que pueden reducir fácilmente el pH son menos afectadas por bajas concentraciones de Zn en el suelo en comparación con aquellas plantas que no pueden hacerlo. La disponibilidad del Zn también puede ser reducida cuando hay CaCO_3 debido a la adsorción específica de Zn y a la oclusión por los carbonatos, una de las principales causas de la pobre disponibilidad de Zn en los suelos calcáreos (Jones, 1998; Mengel y Kirkby, 2001).

8.6. Movimiento en el suelo y absorción radical

El Zn es puesto en contacto con las raíces de las plantas por flujo de masas y difusión (Jones, 1998). Actualmente no es claro si la absorción ocurre por difusión facilitada a través de canales de membrana específicos para el Zn o si

es mediado por transportadores específicos; sin embargo, es posible que ambos sistemas funcionen para el transporte de Zn a través de la membrana plasmática (Fox y Guerinot, 1998).

8.7. Síntomas de deficiencia

Cuando hay deficiencias de este micronutriente en las plantas, las hojas jóvenes (ubicadas en la parte superior) pueden mostrar clorosis intervenal. Estas áreas son verde pálidas, amarillas o incluso blancas. En las monocotiledóneas se forman bandas cloróticas en ambos lados de la nervadura central de la hoja, donde eventualmente se convertirán en áreas necróticas (Mengel y Kirkby, 2001). Cuando se incrementa la severidad de la deficiencia, las hojas y el crecimiento de la planta se ven afectados, las hojas pueden ser pequeñas con entrenudos cortos, que originan su arrosetamiento y provoca que las hojas mueran y se caigan (Jones, 1998; Sánchez *et al.*, 2012).

La deficiencia de Zn está íntimamente relacionada con el metabolismo del N. Cuando se suprime el Zn, la concentración de proteínas disminuye y aumenta la de los aminoácidos. Al volver a proveer el Zn, rápidamente se induce la síntesis de proteínas. Este efecto de la deficiencia de Zn que inhibe la síntesis de proteínas, es principalmente el resultado de la disminución del ácido ribonucleico (ARN), esto último es atribuido a la actividad más baja de la ARN polimerasa, a una menor integridad estructural de los ribosomas y a una mayor

degradación del ARN. La fuerte disminución del crecimiento como consecuencia de la inhibición en la formación de proteínas, resulta a la vez en una generación y consumo más bajo de carbohidratos, disminución de la fotosíntesis y mayor producción de radicales de oxígeno, los cuales al no ser removidos promueven síntomas más fuertes de la deficiencia de Zn, particularmente bajo alta intensidad luminosa (Kirkby y Römheld, 2007). El Zn también es requerido para el crecimiento generativo y la viabilidad del polen es altamente dependiente de un adecuado suplemento de este nutrimento (Sharma *et al.*, 1990).

8.8. **Síntomas de toxicidad**

El Zn provoca un efecto tóxico indirecto en la planta al reducir la disponibilidad de otros elementos e interferir en los procesos fisiológicos normales. Por ejemplo, el Zn puede interferir con el metabolismo normal del Fe, resultando en el desarrollo de síntomas típicos por deficiencia de Fe en la planta. Plantas particularmente sensibles al Fe pueden llegar a ser cloróticas cuando los niveles de Zn son muy altos, mayores a 100 ppm. Niveles por encima de 200 ppm de Zn en tejido vegetal causan una reducción en el crecimiento radical y en la expansión foliar, seguidos de clorosis. Contenidos elevados de Zn en suelos pueden inducir deficiencias de Fe, Mn o P (Sánchez *et al.*, 2012). Sin embargo, hay algunas especies de plantas que pueden tolerar relativamente

altas concentraciones de Zn, de 100 a 250 ppm, sin un efecto significativo en el crecimiento y rendimiento de la planta.

Los síntomas de toxicidad por Zn incluyen clorosis y crecimiento reducido de la planta, actúan inhibiendo la fijación de CO₂, el transporte de los hidratos de carbono en el floema y altera la permeabilidad de la membrana celular (Casierra-Posada y Poveda, 2005).

9. Fuentes usadas como fertilizantes

De acuerdo con investigaciones de la FAO en una escala global más del 30 % de los suelos agrícolas son deficientes en Zn (Sillanpää, 1982), lo que demuestra que la aplicación de fertilizantes con Zn merece atención (Mengel y Kirkby, 2001). El Zn puede ser suministrado a la planta a través de aplicaciones al suelo o vía foliar, entre los fertilizantes que se pueden usar se encuentra el ZnSO₄ 7H₂O, el cual es altamente soluble y contiene 35 % de este micronutriente (Jones, 1998).

10. El Zn en los suelos mexicanos

Actualmente se habla de deficiencia de Zn en un 40 % de los suelos cultivados en todo el mundo. En México más del 50 % de los suelos se encuentran con niveles bajos de Zn, mientras que solo un bajo porcentaje se encuentra con

niveles altos o suficientes para una adecuada nutrición de los cultivos. El estatus del Zn en muchos de los suelos de México se encuentra en un nivel apenas medio, hacia niveles más bajos, donde prácticamente se asegura que muchos de los cultivos producidos manifiestan o pueden manifestar deficiencias de Zn. Es importante mencionar que aún sin manifestar síntomas visuales de deficiencia de Zn, los cultivos pueden reducir sus rendimientos hasta en un 20 %. Baja California, uno de los tres estados principales productores de fresa, presenta suelos deficientes de Zn convirtiéndolo en un sitio potencial que respondería a la aplicación de Zn (Castellanos *et al.*, 2014).

Los factores del suelo que afectan la disponibilidad de Zn en la raíces son: alto nivel de carbonato (CaCO_3), pH elevado, suelos arcillosos, bajo contenido de materia orgánica, baja humedad del suelo y altos niveles de óxidos de Fe y Al. Los altos contenidos de P y bajos contenidos de Zn, provocan una severa deficiencia de este último (Cakmak, 2014).

11. Deficiencia de Zn en las personas

El Zn tiene funciones bioquímicas, inmunológicas y clínicas en el desarrollo humano. Los principales efectos en la salud provocados por la deficiencia de Zn son: disminución del crecimiento, afectación al sistema inmunológico y el desarrollo neurológico, aumento de riesgo en partos prematuros y diarrea, enfermedades respiratorias y mortalidad, especialmente en la población infantil.

Las causas de la deficiencia de Zn en las personas se deben principalmente a su baja ingesta en la dieta, por lo que algunas de las soluciones para erradicar estas deficiencias de Zn son: suplementos en pastillas, fortificación de los alimentos, diversificación de la dieta y biofortificación de los cultivos agrícolas a través de la aplicación de fertilizantes con Zn y el fitomejoramiento (Gibson, 2012). Cabe destacar que la población infantil requiere de 10 a 15 mg de Zn diariamente y que el cuerpo humano no puede sintetizar este elemento, por lo que se requiere ingerirlo mediante los alimentos (Cakmak, 2014).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Ubicación del experimento

El presente estudio se realizó en un invernadero de cristal del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado geográficamente entre los 19° 20' latitud norte y 98° 53' longitud oeste a 2240 m de altitud.

2. Temperatura y humedad relativa

Se registraron la temperatura y humedad relativa cada tres horas durante el ciclo del cultivo (de abril a octubre de 2014) empleando un datalogger RHT10 Extech Instruments®. De los datos obtenidos se calculó la temperatura y humedad relativa promedio, máxima y mínima (Cuadro 2), y la temperatura y humedad relativa del día y la noche (Cuadro 3).

Cuadro 2. Temperatura y humedad relativa promedio, máxima y mínima registrada mensualmente durante el cultivo de fresa cv. Albión.

Mes	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)		
	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima
Abril	24 ± 0.4 ^z	41 ± 0.4 ^z	13 ± 0.2 ^z	44 ± 0.8 ^z	68 ± 1.1 ^z	17 ± 0.6 ^z
Mayo	23 ± 0.3	39 ± 0.4	14 ± 0.2	55 ± 0.7	80 ± 0.7	23 ± 0.8
Junio	23 ± 0.3	37 ± 0.5	15 ± 0.1	63 ± 0.7	85 ± 0.3	31 ± 1.0
Julio	23 ± 0.3	39 ± 0.5	14 ± 0.1	62 ± 0.7	84 ± 0.3	28 ± 0.8
Agosto	23 ± 0.3	40 ± 0.4	14 ± 0.1	60 ± 0.7	83 ± 0.3	25 ± 0.6
Septiembre	23 ± 0.3	38 ± 0.4	14 ± 0.1	62 ± 0.7	84 ± 0.3	28 ± 0.6
Octubre	21 ± 0.3	38 ± 0.5	12 ± 0.2	62 ± 0.7	83 ± 0.4	28 ± 1.0

^z Los datos son el promedio de 1668 lecturas ± error estándar.

Cuadro 3. Temperatura y humedad relativa registrada mensualmente en el día y la noche durante el cultivo de fresa cv. Albión.

Mes	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)	
	Día	Noche	Día	Noche
Abril	31 ± 0.5 ^z	17 ± 0.2 ^z	30 ± 0.9 ^z	59 ± 0.7 ^z
Mayo	30 ± 0.4	17 ± 0.2	40 ± 0.9	71 ± 0.6
Junio	29 ± 0.4	18 ± 0.2	49 ± 0.9	78 ± 0.5
Julio	29 ± 0.4	17 ± 0.2	47 ± 0.9	77 ± 0.5
Agosto	30 ± 0.4	17 ± 0.2	45 ± 1.0	75 ± 0.5
Septiembre	28 ± 0.4	17 ± 0.2	48 ± 0.9	76 ± 0.5
Octubre	28 ± 0.4	15 ± 0.2	47 ± 1.0	76 ± 0.5

^z Los datos son el promedio de 1668 lecturas ± error estándar.

3. Material biológico

Se utilizaron plantas de fresa cv. Albión, procedentes de Michoacán. Una vez recibido el material, se colocó en refrigeración y previo al trasplante se realizó un despunte en las raíces, para posteriormente desinfectar las plantas en Promyl® (1 g L⁻¹) con la finalidad de eliminar posibles hongos fitopatógenos que pudieran afectar el establecimiento del cultivo.

4. Sistema de producción

El cultivo se estableció en un sistema hidropónico abierto, usando arenilla de tezontle rojo (2 mm de diámetro), colocando una planta por maceta (2.5 L de capacidad). Se establecieron 10 macetas por tratamiento (10 repeticiones).

5. Solución nutritiva

Para elaborar las soluciones nutritivas a aplicar, se tomó en cuenta el análisis previo del agua de riego a utilizar (Cuadro 4), así como el balance de aniones y cationes considerados en las relaciones iónicas de Steiner (1984). De acuerdo con el tratamiento, se emplearon dosis crecientes de Zn (Cuadro 5) y se mantuvieron constantes el resto de los nutrimentos (Cuadro 6). Se registró el pH y la CE de cada una de las soluciones nutritivas aplicadas en cada tratamiento (Cuadro 6). Para el aporte de Zn se utilizó ZnSO₄ 7H₂O. El

volumen de riego de solución nutritiva aplicado diariamente fue de 200 mL, con un drenaje del 30 % aproximadamente.

Cuadro 4. Análisis de agua de invernadero.

pH	CE (dS m ⁻¹)	meq L ⁻¹								mg L ⁻¹
		Ca	Mg	Na	K	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl	B
7.10	0.42	1.39	1.23	1.58	0.20	ND	2.00	2.05	0.50	0.05

ND= No detectado por el método empleado

Cuadro 5. Tratamientos aplicados en el cultivo hidropónico de fresa cv. Albión.

Tratamientos	μmol L ⁻¹ Zn	mg 20 L ⁻¹ ZnSO ₄ 7H ₂ O
1	0.0	0.00
2	1.0	5.80
3	2.5	14.2
4	5.0	28.6
5	7.5	42.8
6	10.0	57.2
7	15.0	85.6
8	20.0	114.8
9	30.0	171.6
10	40.0	229.6

Cuadro 6. Solución nutritiva en el cultivo hidropónico de fresa cv. Albión.

MACRONUTRIMENTOS		g/ 20 L
H ₃ PO ₄		1.30 mL
Ca (NO ₃) ₂ 4H ₂ O		18.0
MgSO ₄ 7H ₂ O		1.00
KNO ₃		14.2
Mg(NO ₃) ₂ 6H ₂ O		1.00

MICRONUTRIMENTOS		mL/20 L
Fe EDTA		39.0
CuSO ₄ 5H ₂ O		16.0
H ₃ BO ₃		11.0
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O		13.0
MnCl ₂ 4H ₂ O		36.0

Tratamientos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	6.5	6.5	6.5	6.4	6.5	6.4	6.4	6.4	6.4	6.5

Tratamientos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CE (dS m ⁻¹)	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.4

6. Diseño experimental y tratamientos

El diseño experimental fue completamente al azar formado por 10 tratamientos con 10 repeticiones por tratamiento. Como unidad experimental se consideró una maceta con una planta.

7. Variables evaluadas

Las variables en planta se evaluaron al final del experimento, después de siete meses de realizado el trasplante y fueron las siguientes:

7.1. Planta

Área foliar: Se evaluó el área foliar de cinco plantas por tratamiento con un integrador de área foliar LICOR® modelo 3100.

Longitud y diámetro de peciolo: Estas variables se determinaron en las hojas de cinco plantas por tratamiento. Para el diámetro del peciolo, la medición se realizó en la parte media del órgano empleando un vernier digital GENERAL® No. 143 y para medir la longitud se utilizó una regla graduada de 30 cm.

Biomasa acumulada: Se determinó el peso seco del total de plantas de cada tratamiento, se separaron en los órganos: hoja, corona y raíz. Para determinar el peso seco, individualmente se colocaron en una bolsa de papel en una estufa de aire forzado BINDER® a una temperatura de 70 °C por 72 h o hasta peso constante. Una vez seca cada muestra, se procedió a pesar con una balanza digital OHAUS® modelo Scout Pro.

Rendimiento por planta: Se cosechó y pesó el total de frutos en cada tratamiento y se dividió entre el número de plantas en cada tratamiento.

Azúcares solubles totales (AST): Se determinó la concentración de los azúcares solubles totales en cinco muestras de hoja, corona, raíz y fruto de cada tratamiento, aplicando el método de antrona descrito por Witham *et al.* (1971). Las lecturas se realizaron a 600 nm en un espectrofotómetro Thermo Spectronic® modelo GENESYS 10 uv. La concentración de azúcares se estimó a partir de una curva patrón que contenía de 0 a 250 µg de glucosa mL⁻¹.

Concentración y acumulación nutrimental: La hoja, corona y raíz del total de plantas fueron lavadas tres veces con agua destilada, secadas y molidas en un GENERAL ELECTRIC® con la finalidad de facilitar el manejo de la muestra y lograr una mayor homogeneidad en su composición.

Se formó una muestra compuesta, integrada por dos plantas para cada órgano y tratamiento, posteriormente se hizo la determinación nutrimental en las cinco muestras resultantes por órgano y por tratamiento. Se determinó la concentración de N, P, K, Fe y Zn. Se usaron 0.25 g de materia seca, que se sometieron a una digestión húmeda con una mezcla de solución diácida: ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido perclórico (HClO₄) en relación 2:1 y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30 %. La determinación de N se realizó por el método de microkjeldahl y la del resto de elementos por espectrometría de emisión

atómica de inducción con plasma acoplado ICP modelo 725-ES de Agilent®, en todos los casos se siguió la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999).

Grosor de las hojas: Se cortaron segmentos cuadrados de 0.5 x 0.5 cm por lado del foliolo central de la hoja madura de tres plantas de los tratamientos: 0, 7.5 y 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn y se procesaron para hacer preparaciones permanentes, para lo cual las muestras se fijaron en FAA (50 % etanol al 96 % + 5 % ácido acético glacial + 10 % formaldehído al 37 % + 35 % agua); se procesaron para la deshidratación y transparentación en un Histokinette LEICA JUNG® modelo 2000 incluyéndose en parafina Paraplast McCormick Scientific®. El grosor de los cortes fue de 10 μm , los cuales se obtuvieron con un micrótopo rotatorio Leica® modelo 820, posteriormente se realizó la tinción y montaje de las preparaciones siguiendo la metodología descrita por Avitia (1996). Las preparaciones se observaron en un microscopio de luz transmitida con escala Carl Zeiss® para determinar el grosor de las hojas y número de capas del mesófilo.

7.2. Fruto

Peso fresco: Se registró el peso fresco del total de frutos por tratamiento, de forma individual, usando una balanza digital OHAUS® modelo Scout Pro.

Índice de redondez: Para determinar esta variable se registraron los datos de longitud y diámetro ecuatorial de 15 frutos por tratamiento en el mismo estado de maduración (rojo brillante), empleando un vernier digital GENERAL® No. 143. Los resultados de la relación, que se obtienen de dividir la longitud/diámetro, fueron empleados para determinar la forma de los frutos, donde valores menores a uno fueron considerados como frutos ovalados, mayores a uno como frutos alargados y valores de cero como frutos redondos (Martínez-Bolaños *et al.*, 2008).

Color: Los frutos fueron cosechados en un estado de maduración rojo brillante. Se midió el color de 15 frutos por tratamiento empleando un espectrofotómetro de esfera X-Rite® modelo SP62. El color de la epidermis fue determinado en dos puntos en el diámetro ecuatorial del fruto arrojando un promedio final de las dos lecturas. De cada lectura se obtuvieron valores de L^* (luminosidad), C^* (croma) y h° (ángulo hue).

Firmeza: Para determinar la fuerza requerida para penetrar el fruto, se empleó un penetrómetro Qa SUPPLIES® modelo FT O2 equipado con una punta cónica de 2.3 mm de grosor. La determinación se realizó en el diámetro ecuatorial de 15 frutos por tratamiento. Se realizó la transformación de unidades y los resultados fueron expresados en Newtons (N).

Sólidos solubles totales (SST): La concentración expresada en °Brix se registró en 15 frutos por tratamiento en el mismo estado de maduración (rojo brillante), empleando un refractómetro digital ATAGO® modelo PAL-1. Para esta determinación el refractómetro se calibró con agua destilada y posteriormente se procedió a realizar las lecturas con una gota del jugo de los frutos.

Acidez titulable (AT): Se usó la técnica descrita por la AOAC (1980), para lo cual 10 g de fruto fresco (rojo brillante) se licuaron con 50 mL de agua destilada, se registró el volumen total resultante en una probeta y posteriormente se procedió a colar. De este jugo, se tomaron 10 mL a los cuales se les agregaron 2 gotas de fenoltaleína como indicador. Finalmente se procedió a realizar la titulación con NaOH 0.1 N. El porcentaje de acidez se calculó con base al ácido cítrico (meq=0.064), el cual se encuentra en mayor proporción en los frutos de fresa. La fórmula empleada fue:

$$\% \text{ ácido} = \frac{\text{mL NaOH} \times N_{\text{NaOH}} \times \text{meq. ác.} \times V \times 100}{\text{peso de muestra} \times \text{alícuota}}$$

Dónde:

mL NaOH = mililitros del NaOH gastado

N_{NaOH} = normalidad del NaOH

meq. ác. = miliequivalentes del ácido que se encuentra en mayor proporción (ácido cítrico)

V = Volumen total (mL del jugo después de licuar)

peso de muestra = 10 g

alícuota = 10 mL

pH: Se midió en el mismo extracto usado para la determinación de acidez titulable con un potenciómetro CONDUCTRONIC® modelo PC45.

Azúcares solubles totales (AST): Se determinaron con la misma metodología descrita antes para la planta. Se realizó en cinco repeticiones por cada tratamiento, escogiendo frutos en el mismo estado de maduración (rojo brillante).

Concentración y acumulación nutrimental: Se realizó en cinco muestras por tratamiento, siguiendo la misma metodología que para la determinación nutrimental en el resto de la planta.

Peso seco: Los frutos se secaron y procesaron siguiendo la misma metodología descrita en la determinación de biomasa acumulada en la planta.

8. Análisis de datos

El análisis de la información consistió en un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico

SAS System versión 9 (SAS Institute Inc., 2006). Con esta información estadística se generaron cuadros y gráficas empleando Microsoft Excel 2010 versión 14 y SigmaPlot versión 11.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Planta

1.1. Biomasa acumulada

La biomasa total acumulada en la planta de fresa cv. Albión, después de siete meses del trasplante, mostró diferencias estadísticamente significativas. Se observó que al comparar el tratamiento testigo (sin Zn), con respecto a las aplicaciones de Zn, hubo un incremento en la acumulación de biomasa del 40 % con las aplicaciones de 1 y 2.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$, entre 50 y 60 % con las aplicaciones de 5 a 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ y de un 30 % con la aplicación de 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 1). Estos resultados son similares a los reportados por Lieten (2003) para plantas de fresa cv. Elsanta crecidas en una mezcla de turba y perlita, reportando que las plantas no mostraron síntomas de deficiencia o toxicidad aparente en el crecimiento con aplicaciones de Zn en un rango de 5 a 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ en la solución nutritiva, a pesar de que la materia orgánica, particularmente las turbas, pueden restringir la disponibilidad de Zn, en tanto que con una aplicación continua de 0.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ observó que provocaron un crecimiento reducido en las plantas; aplicaciones por arriba de 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$, específicamente 60 y 120 $\mu\text{mol L}^{-1}$, indujeron toxicidad y síntomas de deficiencia de Fe generando bajos rendimientos.

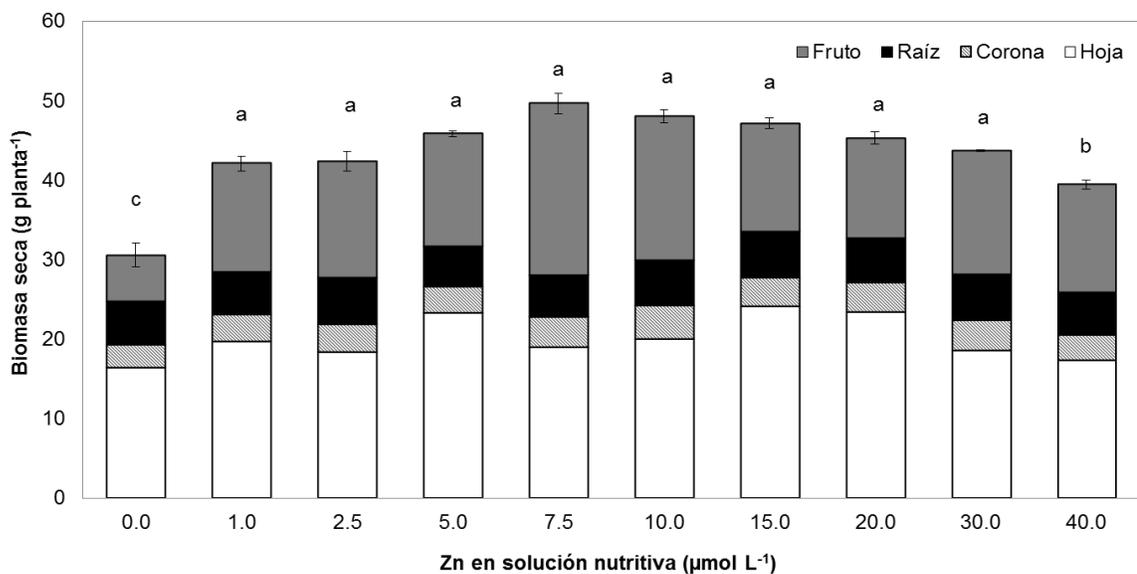


Figura 1. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la biomasa acumulada en fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Con respecto a la biomasa acumulada por órgano, la hoja tuvo una mayor acumulación, seguida del fruto, raíz y corona (Figura 1). En la figura 2 se muestran los promedios de los tratamientos evaluados obtenidos por órgano.

Las hojas son los órganos que acumularon mayor biomasa seca con respecto a la raíz y corona debido a su tamaño y morfología en la planta, superando también a la biomasa seca del fruto, pues prácticamente el 90 % de éste se encuentra constituido por agua. Esta tendencia de acumulación de biomasa seca en la parte aérea conforme se suplementa el Zn en la solución nutritiva

coincide con los resultados encontrados por Erenoglu *et al.* (2011) para plantas de trigo.

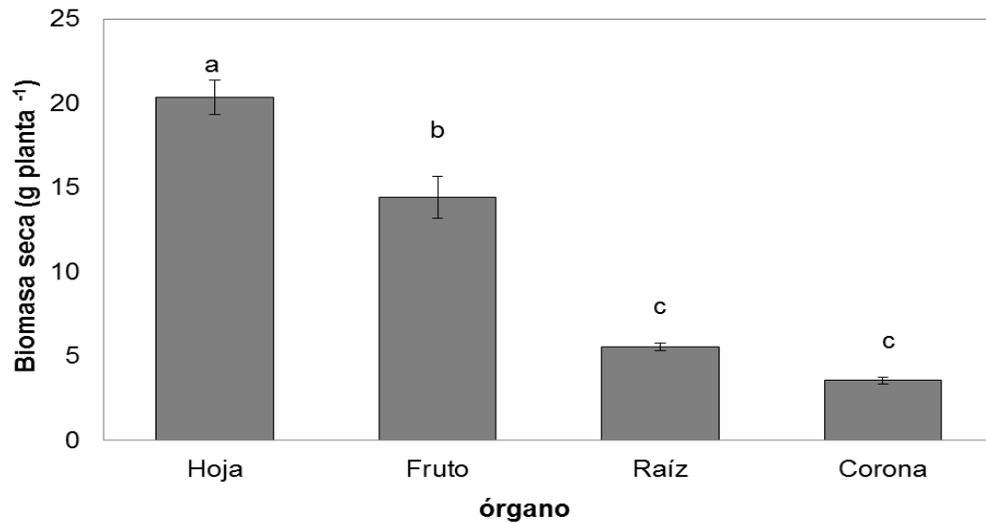


Figura 2. Biomasa acumulada por órgano en fresa cv. Albión cultivada con diferentes dosis de Zn. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Cuando hay una escasez de Zn, la actividad de la anhidrasa carbónica disminuye, causando una baja tasa fotosintética que aunado a la inhibición en la síntesis de proteínas, debido a la baja actividad de la ARN polimerasa, causan un decremento en el crecimiento (Kirkby y Römheld, 2007; Broadley *et al.*, 2012). Muy probablemente la ausencia de Zn y suministros bajos de éste (1 y $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$) desencadenaron estos procesos, ocasionando la baja acumulación de biomasa seca observada. En tanto que con la aplicación de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ se podrían estar manifestando síntomas de un exceso.

1.2. Área foliar, longitud y diámetro de peciolo

La ausencia de Zn en la solución nutritiva resultó en una significativa disminución en el área foliar, registrándose solo 487 cm², mientras que con las aplicaciones de 1 a 30 μmol L⁻¹ fue mayor, con un valor máximo de 1,156 cm² con la aplicación de 5 μmol L⁻¹, y uno mínimo de 742 cm² con la aplicación de 40 μmol L⁻¹, disminuyendo en poco más de un 30 % con respecto al máximo alcanzado (Figura 3).

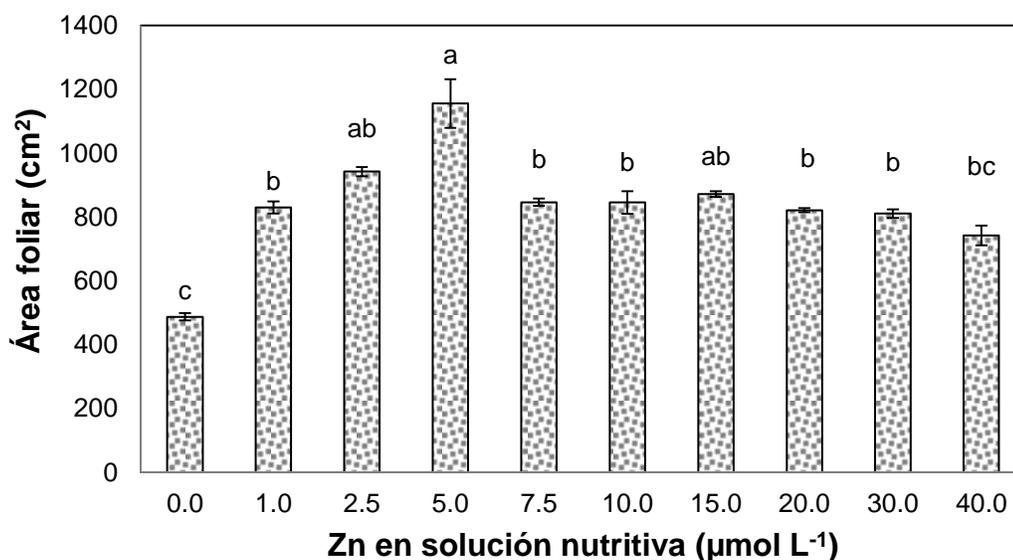


Figura 3. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el área foliar en fresa cv. Albión. Medias ± error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

La longitud de los peciolo fue menor en ausencia de Zn (testigo) con respecto a la longitud alcanzada en el resto de las dosis evaluadas, registrándose una longitud máxima de 11 cm con aplicaciones entre 2.5 y 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$; mismas que son estadísticamente superiores al tratamiento testigo (Figura 4). Por otro lado con dosis de Zn entre 2.5 y 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ se registraron los mayores diámetros de los peciolo, alcanzando un diámetro máximo de 3 mm con la dosis de 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 5).

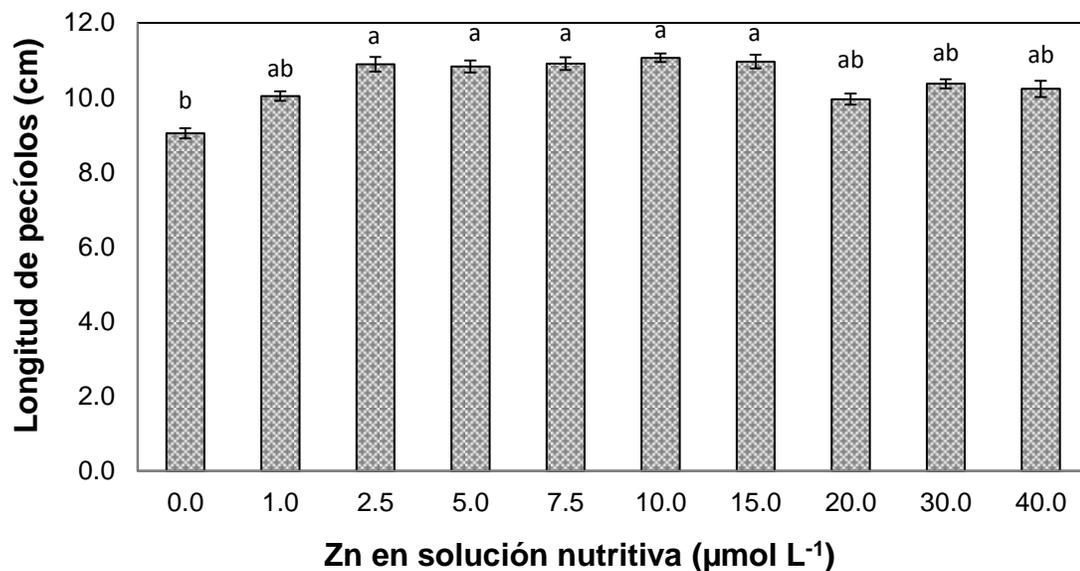


Figura 4. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la longitud de peciolo en fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

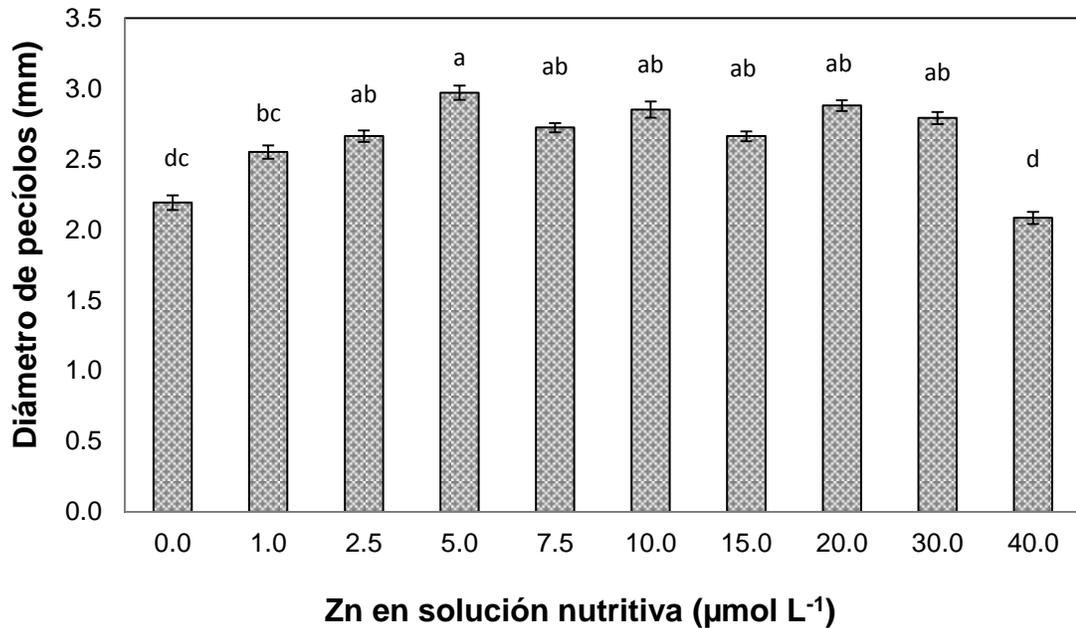


Figura 5. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el diámetro de peciolo en fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Esta tendencia observada en el área foliar y la longitud y diámetro de los peciolo coinciden con lo reportado por Lieten (2003), quien observó en fresa cv. Elsanta que con la aplicación continua en la solución nutritiva de $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, el área foliar disminuía casi en un 60 % (953 cm^2) con respecto a la aplicación de $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($2,313 \text{ cm}^2$), además de que las plantas fueron más pequeñas y con peciolo cortos.

Aun cuando los cambios provocados por la deficiencia de Zn en el crecimiento y desarrollo de las plantas son bastante complejos (Kirkby y Römheld, 2007), estos resultados indican que el Zn es importante para el crecimiento vegetativo, pues este micronutriente interviene en reacciones o en procesos específicos de las funciones metabólicas. Kirkby y Römheld (2007), mencionan que la alteración del metabolismo de la auxina ácido indolacético (AIA) está estrechamente relacionada con los síntomas de deficiencia de Zn como son el retraso en el crecimiento y producción de hojas pequeñas por la reducción en la expansión celular y de los entrenudos, pues se considera que el aminoácido triptófano, que es el precursor en la biosíntesis del AIA, se ve afectado por la deficiencia de Zn, al ser requerido para la síntesis de niveles óptimos de triptófano (Mengel y Kirkby, 2001). Aunado al hecho de que cuando existe una deficiencia de Zn, no solo existe menos AIA sintetizado, sino que también éste se ve sujeto a una mayor degradación oxidativa. Una adecuada nutrición de Zn también incrementa las concentraciones endógenas de las giberelinas. Entonces las bajas concentraciones de AIA y giberelinas pueden ser la causa principal para el retraso en el crecimiento y la formación de hojas pequeñas bajo deficiencias de este elemento (Broadley *et al.*, 2012).

1.3. Azúcares solubles totales (AST)

El contenido de azúcares solubles totales se vio afectado significativamente por la concentración de Zn en la solución nutritiva. Con las aplicaciones de 30 y 40

$\mu\text{mol L}^{-1}$, el contenido de azúcares solubles totales en raíces disminuyó en comparación al resto de los tratamientos. En hojas las concentraciones de 5 a $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ dan resultados pertenecientes a la clase estadística superior y en corona de 2.5 a $30 \mu\text{mol L}^{-1}$ se tienen las medias significativamente más altas (Figura 6).

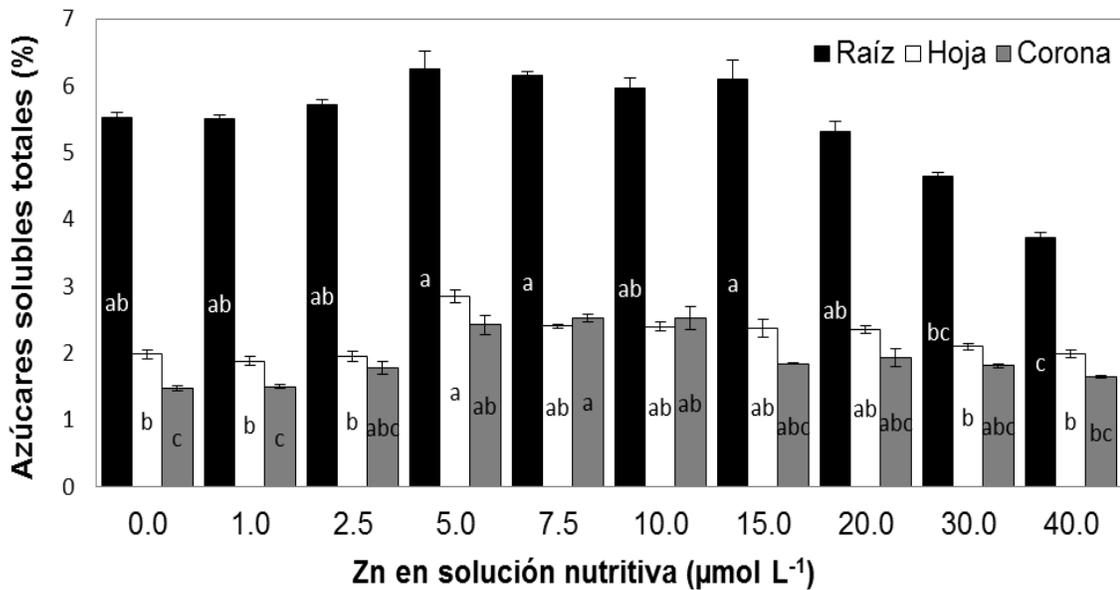


Figura 6. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el contenido de azúcares solubles totales en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

El órgano vegetativo que acumuló más azúcares solubles totales fue la raíz, seguido de la hoja y la corona (Figura 7).

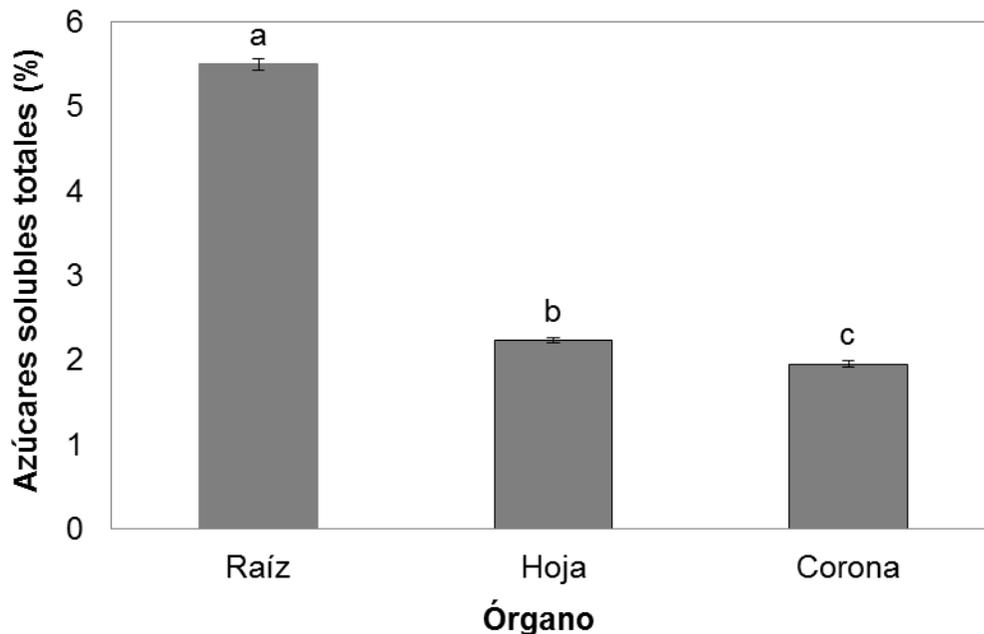


Figura 7. Azúcares solubles totales acumulados por órgano en fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

De acuerdo con Kirkby y Römheld (2007), cuando existen deficiencias de Zn, la actividad de enzimas como la anhidrasa carbónica, la fructuosa 1-6 difosfato y la aldosa se ve disminuida, desencadenando una reducción de la tasa fotosintética y por tanto de la producción de fotoasimilados, así como una afectación en su transporte. Probablemente estos hechos pudieron afectar la concentración de AST observados en condiciones de deficiencia de Zn en la solución nutritiva, aunque también es importante mencionar que la tasa

fotosintética en estas condiciones no es afectada considerablemente y por tanto el almidón y los azúcares frecuentemente se pueden acumular en plantas deficientes en Zn. Cuando se aplicaron dosis mayores de Zn en la solución nutritiva, probablemente la disminución de los AST fue debida a un exceso de dicho micronutriente. El hecho de encontrar una mayor acumulación de AST en las raíces posiblemente sea debido a que es un órgano importante de almacenamiento, esta tendencia es similar a la observada por Menzel y Smith (2012) para plantas de fresa cv. Festival, en las cuales encontraron que la concentración de carbohidratos no estructurales fue mayor en las raíces, seguido de las hojas y finalmente la corona.

1.4. Concentración y acumulación nutrimental

1.4.1. Zinc

La concentración de Zn en las hojas, corona y raíz aumentó conforme se incrementó el Zn en la solución nutritiva. En las hojas se observó que sin el suministro de Zn, su concentración en las hojas fue de 10 ppm, y con dosis de 1, 2.5 y 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$, fue de 12 ppm (1 $\mu\text{mol L}^{-1}$) y con 2.5 y 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ fue de 13 ppm. De acuerdo con Hancock (1999) y Mengel y Kirkby (2001), las plantas con dichas aplicaciones de Zn en la solución nutritiva se encontrarían en condiciones de deficiencia de dicho elemento, debido a que las concentraciones de Zn se aproximan al valor correspondiente a un estado de deficiencia en la hoja, el cual es de 10 a 15 ppm de Zn. De acuerdo con Jones

(1998), concentraciones por debajo de 12 ppm son las que estarían relacionadas con síntomas de deficiencia de éste micronutriente, correspondiendo en éste estudio a la dosis de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ en solución nutritiva (Figura 8). Así una pequeña variación en la concentración de Zn de 1 a 2 ppm en el nivel crítico, puede ser suficiente para establecer una deficiencia o suficiencia de éste en las plantas (Jones, 1998). Para el resto de las dosis de Zn en la solución nutritiva, la concentración de Zn en la hoja fue de 15 a 22 ppm, encontrándose en el rango de suficiencia, el cual se sitúa entre 12 y 15 a 50 ppm (Jones, 1998).

Para la corona, sin aplicación de Zn y con la dosis de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$, el valor obtenido fue de 10 y 12 ppm respectivamente, en tanto que con las dosis de Zn 2.5 a $40 \mu\text{mol L}^{-1}$, el valor osciló de 13 a 26 ppm. Para la raíz, sin aplicación de Zn en la solución nutritiva el valor obtenido fue de 14 ppm y para el resto de las dosis (1 a $40 \mu\text{mol L}^{-1}$) el valor se encontró entre 20 y 116 ppm de Zn.

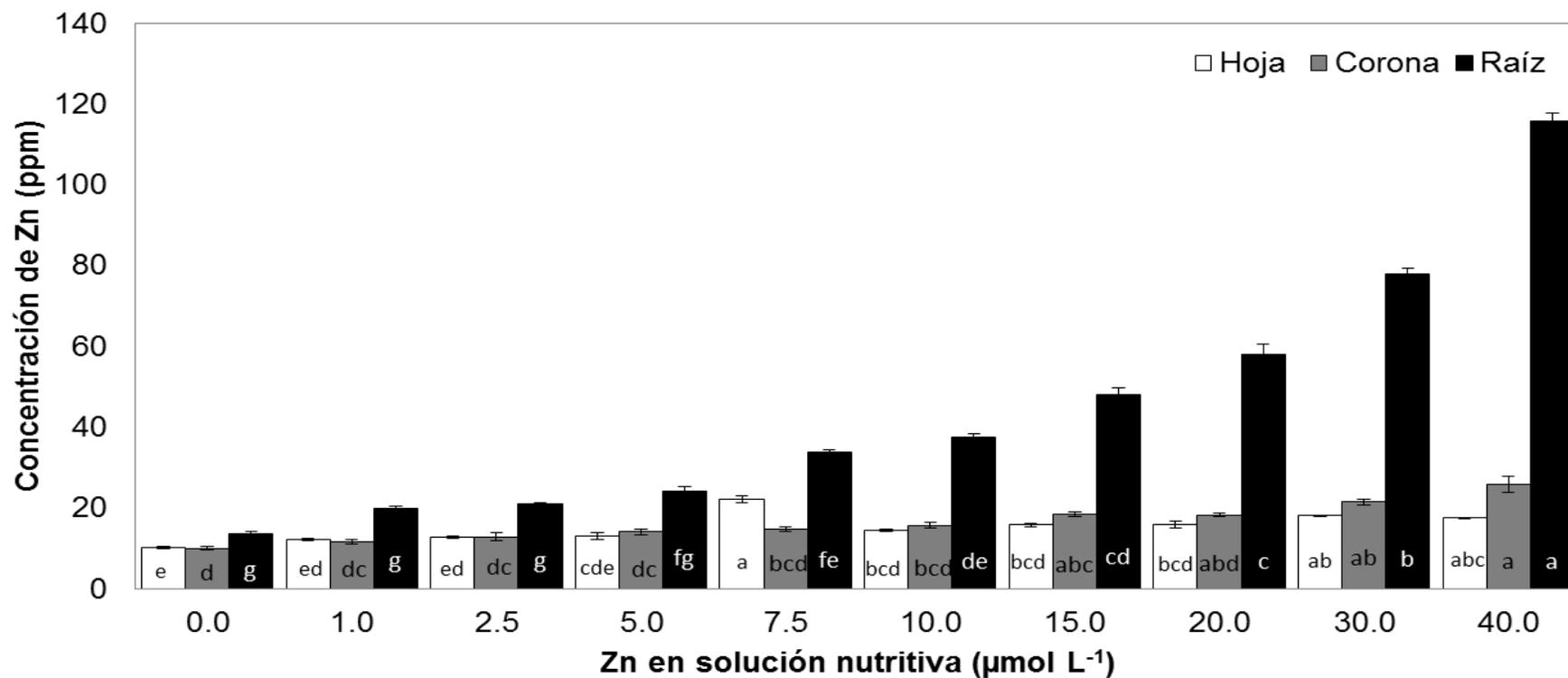


Figura 8. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de Zn en órganos de fresa cv. Albión.

Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Las hojas y las raíces fueron los órganos en los cuales se acumuló más Zn (Figuras 9 y 10). El Zn puede ser encontrado en la savia del xilema como Zn^{2+} y como tal es traslocado de las raíces a los brotes y de acuerdo con Mengel y Kirkby (2001), presumiblemente el Zn es móvil en el floema, lo cual permitiría que éste micronutriente se acumule en las hojas. Por otra parte la acumulación de Zn en las raíces conforme se va incrementando la concentración de Zn en la solución nutritiva, especialmente en la dosis de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ puede ser producto de un mecanismo de la planta para protegerse de un posible daño por la acumulación de este micronutriente, compartimentándolo eficazmente en las raíces (Casierra-Posada y Poveda, 2005).

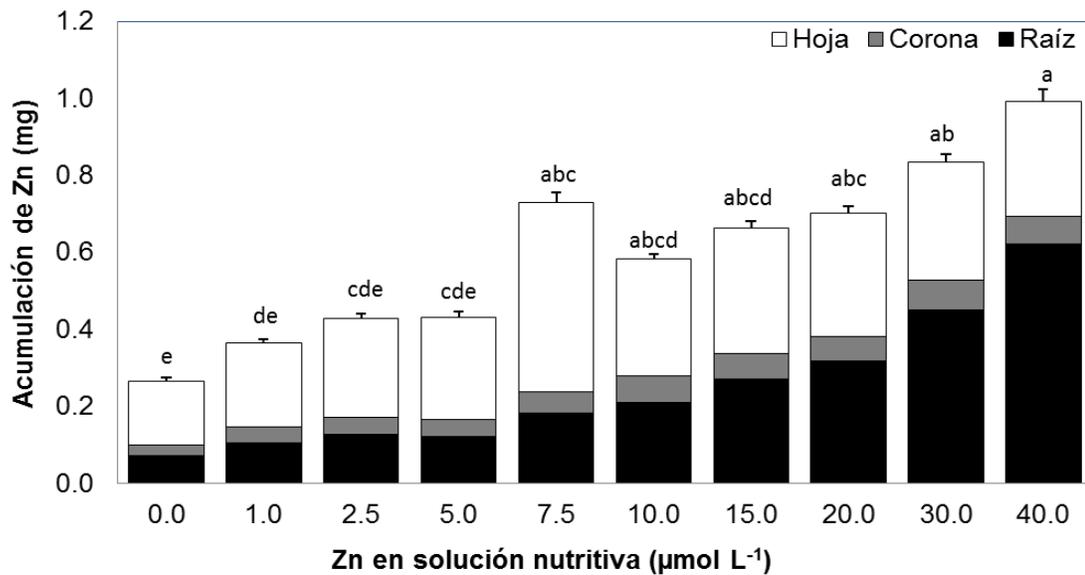


Figura 9. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Zn en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

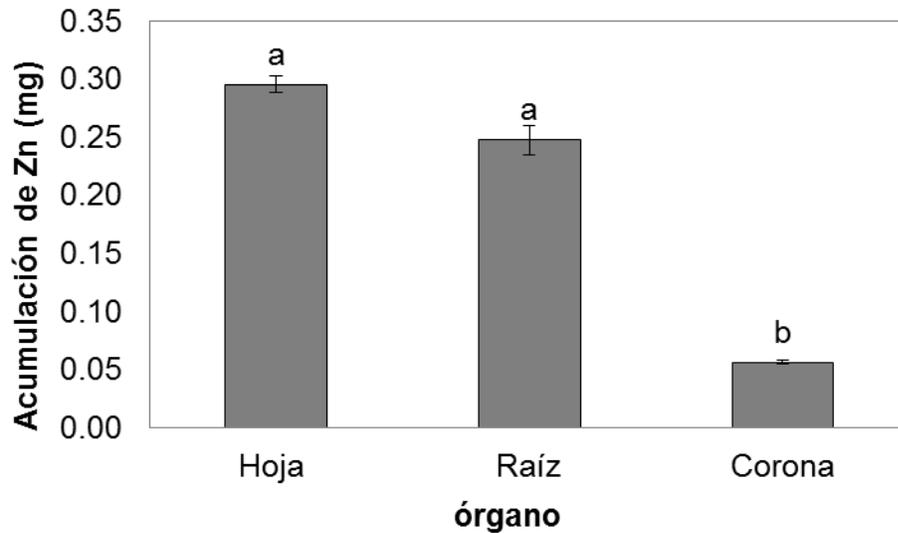


Figura 10. Acumulación de Zn en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.4.2. Nitrógeno

La concentración de N en hojas, sin aplicación y con aplicaciones de 1, 2.5, 20, 30 y 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, osciló entre 1.6 y 1.9 %. De acuerdo con Hancock (1999) estas concentraciones de N en hoja, corresponderían a una deficiencia del macronutriente, en tanto que para las aplicaciones de 5 a 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$, la concentración de N en las hojas se encontró dentro del rango de suficiencia (2-2.8 %) (Figura 11). El órgano que acumuló más N fue la hoja, seguido de la raíz y la corona (Figuras 12 y 13).

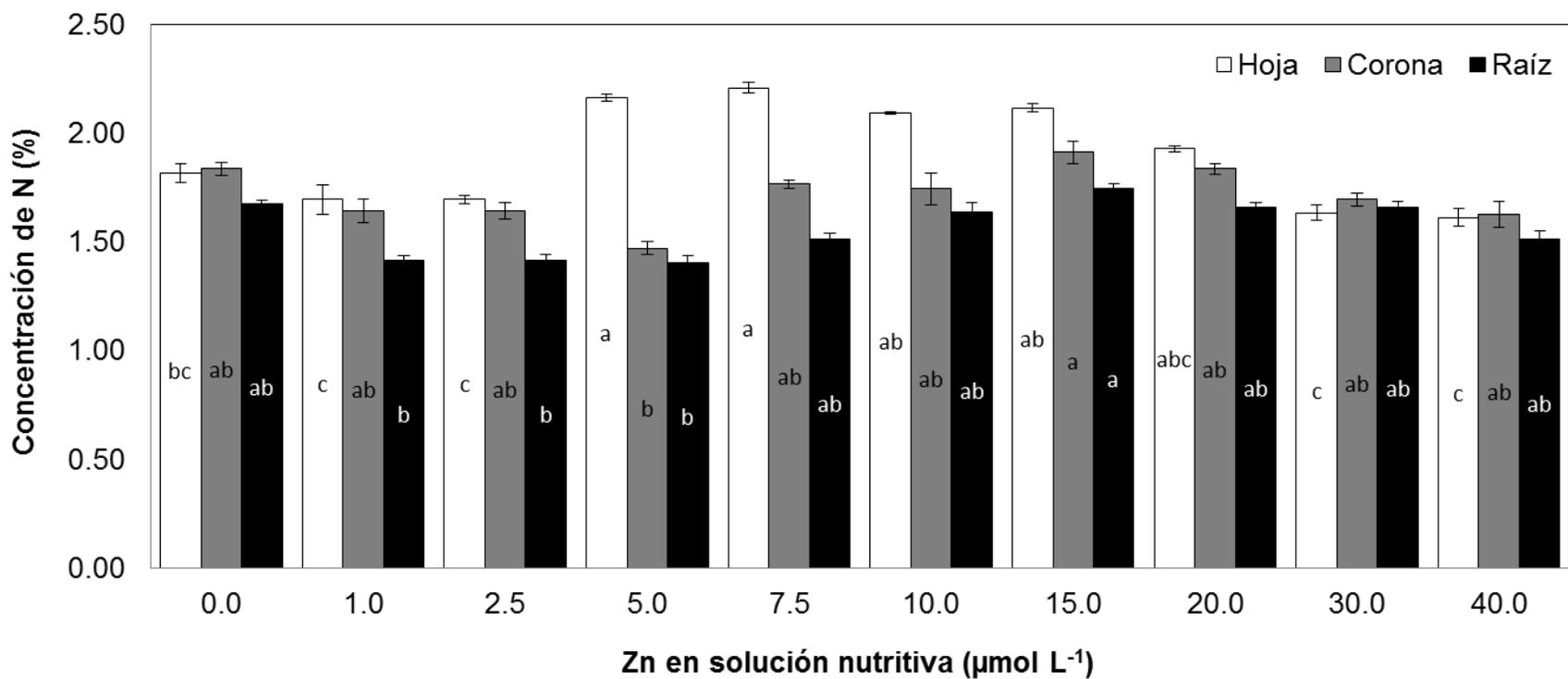


Figura 11. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de N en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

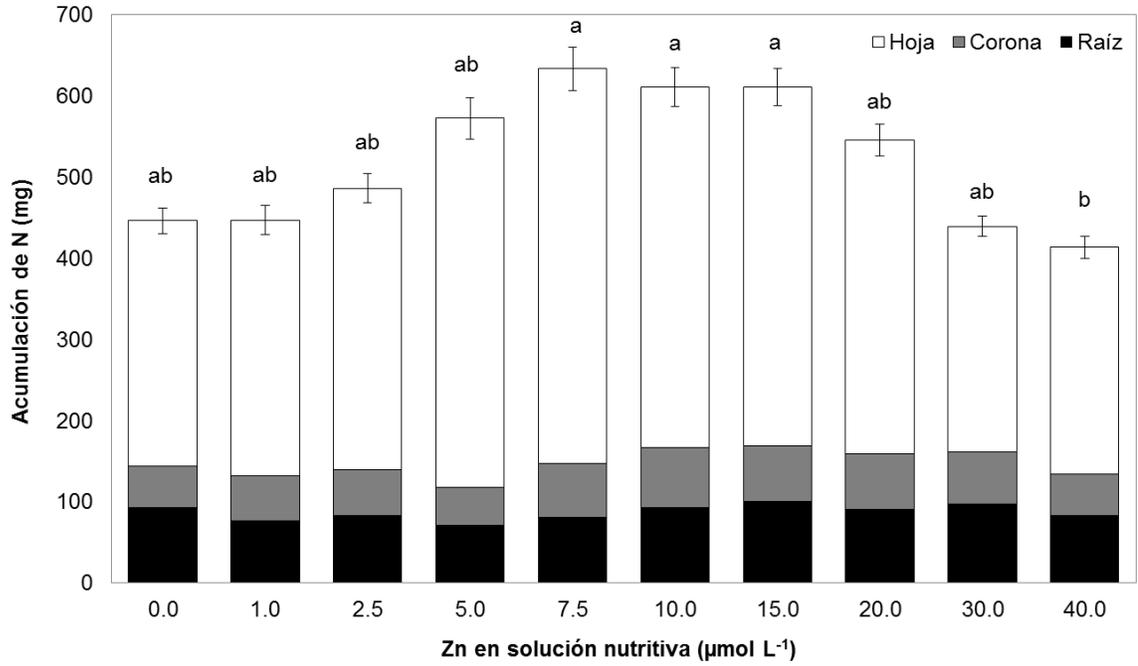


Figura 12. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de N en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

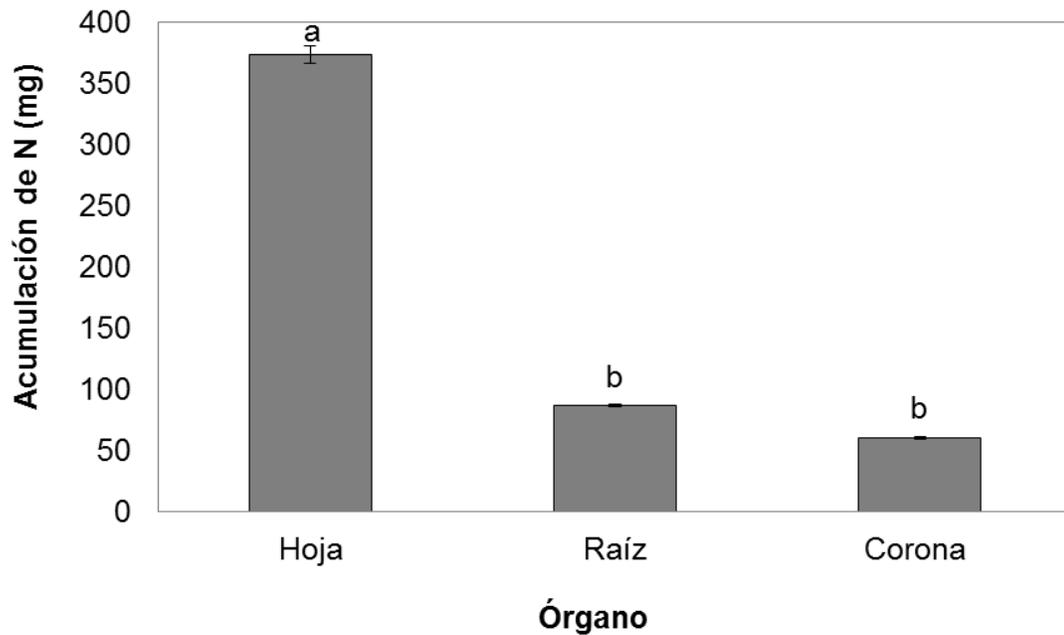


Figura 13. Acumulación de N en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

En ausencia de Zn y con una cantidad deficiente del mismo (1 y $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$) en la solución nutritiva, pudo limitar la absorción, reducción y asimilación del N, pues es sabido que la asimilación del N requiere de una serie compleja de reacciones bioquímicas para su asimilación desde NO_3^- hasta glutamina, implicando un alto costo energético (Pereyra, 2001), así al no haber una cantidad suficiente de Zn, y debido a su implicación en el metabolismo del DNA y RNA, (replicación, transcripción y expresión génica), fotosíntesis, producción de moléculas energéticas, síntesis de proteínas entre otra funciones, pudo limitar el ingreso y asimilación del N en la planta. Este último hecho es

corroborado por Cooper y Clarkson (1989) quienes mencionan que hay una regulación de la absorción del nitrógeno (NO_3^-) por los aminoácidos, los cuales son abundantes cuando el Zn se suprime (Kirkby y Römheld, 2007). También es sabido que el Zn afecta la integridad de la membrana celular en plantas, tanto deficientes como en aquellas que presentan síntomas de toxicidad por Zn (Casierra-Posada y Poveda, 2005). Este hecho se ha reportado en las membranas de las raíces, en donde se afecta su permeabilidad producto de grandes acumulaciones de radicales O_2^- , que propician un estrés oxidativo. Probablemente también este hecho pudo influir en la absorción de N por las raíces de las plantas, tanto en deficiencia como en dosis mayores de Zn.

Investigaciones recientes (Erenoglu *et al.*, 2011) indican que al incrementar el N, la absorción del Zn por las raíces se incrementa hasta tres veces, mientras que la translocación de Zn de las raíces a los brotes incrementa hasta ocho veces, mejorando el estatus nutricional de los granos de trigo. Probablemente en los tratamientos con 5 a 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, en los cuales se encontró un rango de suficiencia para el N, éste macronutriente contribuyó a la absorción y translocación de Zn, al encontrarse este micronutriente también en condiciones de suficiencia en la hoja, de 13 a 22 ppm.

1.4.3. Fósforo

La concentración de P en hojas, con las diferentes aplicaciones de Zn en la solución nutritiva, osciló entre 0.35 y 0.43 %. De acuerdo con Hancock (1999), el P se encontró en el rango de suficiencia para éste elemento, el cual se sitúa entre 0.25 y 0.4 % (Figura 14). No se observó el sinergismo entre el N y el P; sin embargo, se percibió una tendencia de mayor acumulación de P cuando no se aplicó Zn y con las aplicaciones de 1 y 2.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$, sin llegar a síntomas de toxicidad (Figura 15). El órgano que acumuló más P fue la hoja, seguido de la raíz y la corona (Figura 16).

Probablemente la tendencia de una mayor acumulación de P en ausencia de Zn o en bajas concentraciones, sea debida a que la deficiencia de Zn incrementa la absorción de P por las raíces y su translocación a los brotes. Marschner (2012) observó en plantas de algodón que sin la aplicación de Zn o en deficiencias de este micronutriente, se incrementa la permeabilidad pasiva del P por la membrana plasmática de las células de la raíz.

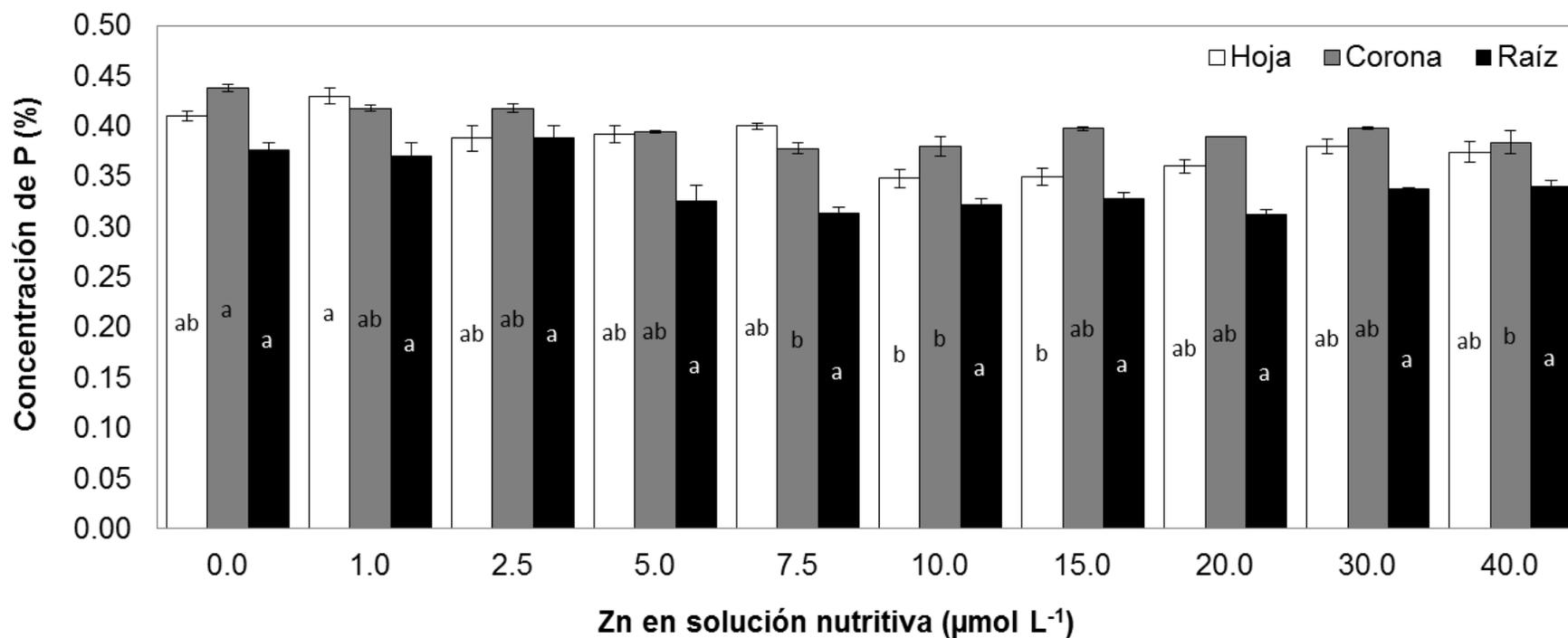


Figura 14. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de P en órganos de fresa cv. Albión.

Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

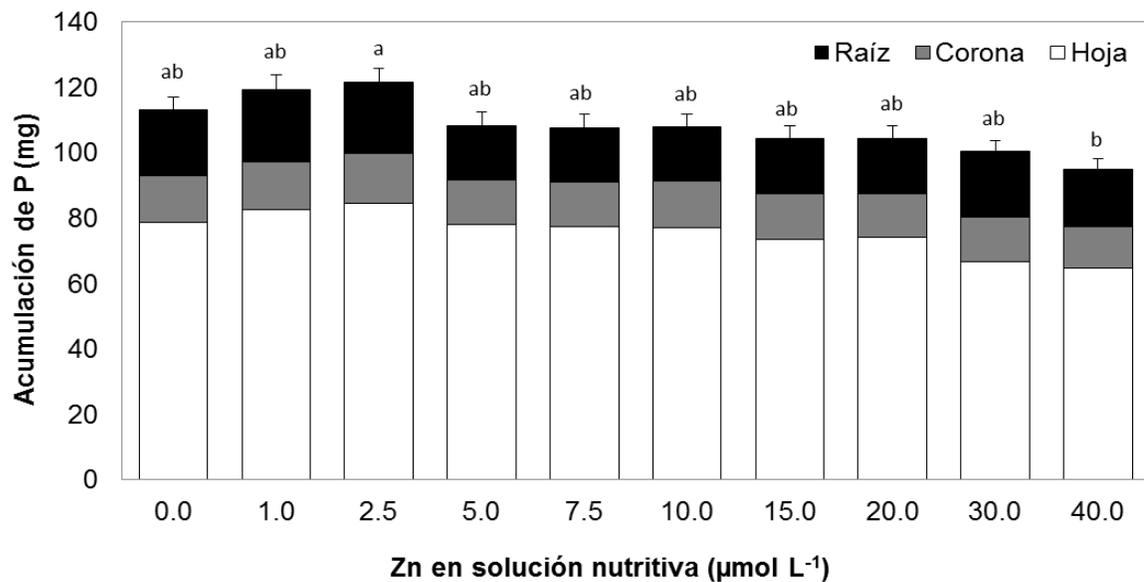


Figura 15. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de P en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

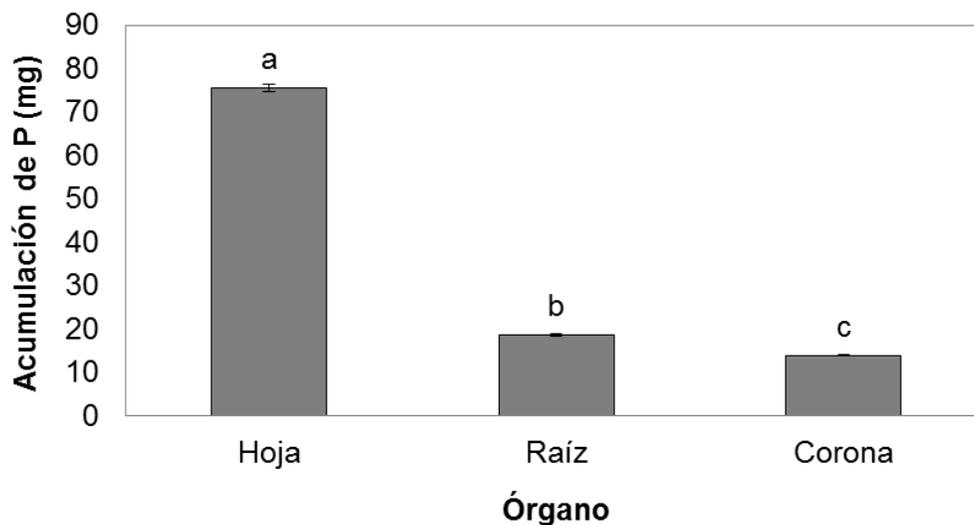


Figura 16. Acumulación de P en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.4.4. Potasio

La concentración de K en hojas se halló entre 1.6 y 2.1 %, encontrándose en el rango de suficiencia para dicho macronutriente (1.5 a 2.5 %) (Hancock, 1999). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la concentración y acumulación de éste elemento en los diferentes órganos de la planta, exceptuando su acumulación en la raíz. A pesar de ello, en el estado total de la planta, se observó una tendencia de mayor concentración y acumulación conforme se incrementó el Zn en la solución nutritiva y una disminución cuando se aplicaron dosis más altas de Zn (Cuadros 7 y 8). El órgano que acumuló más K fue la hoja, seguida de la corona y la raíz (Figura 17).

De acuerdo con Malvi (2011), niveles óptimos de Zn mejoran la absorción de K, relación sinérgica que probablemente sea la responsable de una disminución en la absorción de K cuando existen bajas o altas dosis de Zn en la solución nutritiva. Mills y Jones (1996) encontraron que una mayor acumulación de K se registra en las hojas, peciolo y tallos, posiblemente en el presente estudio, esta tendencia se ve reflejada al existir una mayor acumulación del K en las hojas y corona con respecto a la raíz.

Cuadro 7. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de K en órganos de fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Concentración de K (%)											
	Hoja			Corona			Raíz					
0.0	1.70	±	0.02	^z NS	1.28	±	0.002	^z NS	0.35	±	0.007	^z NS
1.0	1.69	±	0.03		1.35	±	0.004		0.37	±	0.009	
2.5	1.68	±	0.01		1.35	±	0.002		0.39	±	0.009	
5.0	1.75	±	0.04		1.36	±	0.005		0.38	±	0.018	
7.5	2.06	±	0.18		1.38	±	0.002		0.38	±	0.018	
10.0	1.74	±	0.01		1.36	±	0.026		0.39	±	0.005	
15.0	1.76	±	0.05		1.35	±	0.019		0.38	±	0.007	
20.0	1.72	±	0.04		1.35	±	0.017		0.41	±	0.003	
30.0	1.68	±	0.04		1.30	±	0.008		0.40	±	0.003	
40.0	1.64	±	0.03		1.27	±	0.019		0.36	±	0.001	
CV (%)	17.07				4.46				11.60			
DMS	0.63				0.13				0.09			

^zMedias ± error estándar (Tukey, $P \leq 0.05$). NS: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

Cuadro 8. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de K en órganos de fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Acumulación de K (mg)											
	Hoja			Corona			Raíz					
0.0	286.29	±	16.81	^z NS	34.98	±	2.56	^z NS	20.17	±	0.30	^z ab
1.0	300.96	±	17.48		43.51	±	0.72		21.01	±	1.29	ab
2.5	336.83	±	15.08		44.08	±	2.27		23.67	±	1.13	ab
5.0	372.92	±	23.13		43.92	±	3.97		25.87	±	0.33	a
7.5	459.44	±	28.12		45.91	±	2.03		18.92	±	0.22	b
10.0	370.81	±	15.46		52.12	±	1.68		19.94	±	0.44	ab
15.0	368.92	±	15.81		48.89	±	2.51		19.74	±	0.36	ab
20.0	381.32	±	13.01		51.41	±	2.27		21.18	±	0.37	ab
30.0	286.08	±	7.02		46.62	±	2.13		23.47	±	0.48	ab
40.0	285.14	±	9.20		43.23	±	3.68		20.50	±	1.06	ab
CV (%)	27.38				24.96				14.77			
DMS	199.93				24.03				6.71			

^zMedias ± error estándar (Tukey, $P \leq 0.05$). NS: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

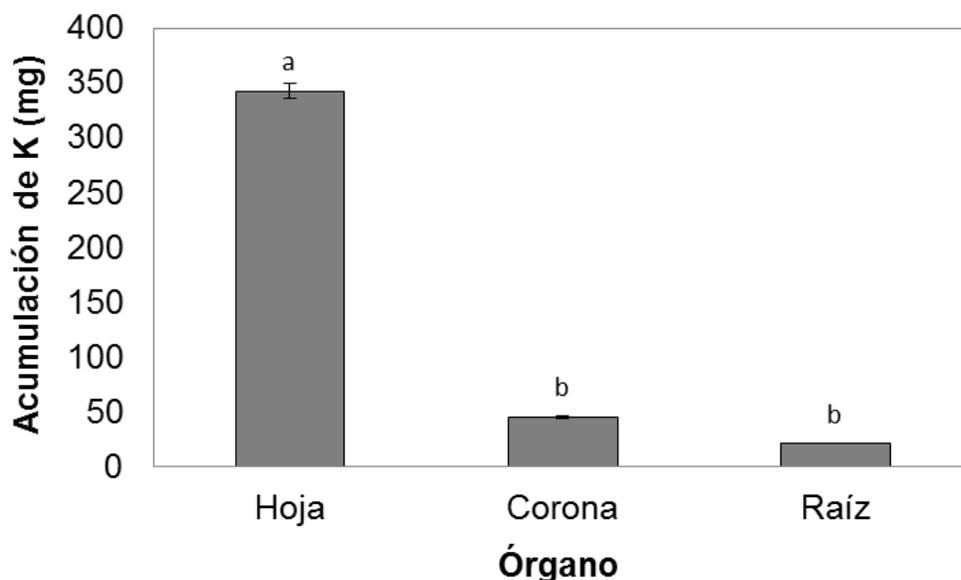


Figura 17. Acumulación de K en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.4.5. Hierro

La concentración de Fe en las hojas con las diferentes aplicaciones de Zn, osciló entre 167 y 217 ppm. De acuerdo con Hancock (1999), las plantas se encontraron en el rango de suficiencia para dicho micronutriente (60 y 250 ppm). No existieron diferencias estadísticamente significativas en la concentración y acumulación (Cuadros 9 y 10); sin embargo, es posible observar una tendencia de mayor acumulación en los tejidos cuando existen bajas concentraciones de Zn en la solución nutritiva (Cuadro 10). El órgano que acumuló más Fe fue la raíz, seguido de la hoja y corona (Figura 18).

Estas tendencias concuerdan con lo reportado por Imtiaz *et al.* (2003) y Eyal (2008), quienes mencionan que la aplicación de Zn tiene un efecto adverso sobre la concentración de Fe en la planta, pues plantas como el trigo bajo deficiencias de Zn presentan altas concentraciones de Fe en brotes, mostrando una mayor acumulación en las raíces.

Es sabido que el Fe presenta efectos competitivos en la absorción del Zn, probablemente en las dosis en donde no hubo un suficiente abastecimiento de Zn en la solución nutritiva, la planta tendió a acumular más Fe (Mengel y Kirkby, 2001).

Cuadro 9. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de Fe en órganos de fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Concentración de Fe (ppm)								
	Hoja			Corona			Raíz		
0.0	216.81	±	1.47 ^{z NS}	121.71	±	6.29 ^{z NS}	2879.64	±	133.11 ^{z NS}
1.0	213.37	±	1.26	120.80	±	6.24	3086.42	±	91.03
2.5	197.65	±	1.59	124.49	±	8.88	3222.05	±	135.86
5.0	180.40	±	1.70	121.26	±	4.55	3333.90	±	109.80
7.5	185.21	±	1.43	109.70	±	1.03	3203.98	±	208.71
10.0	183.89	±	1.89	108.36	±	4.19	3138.15	±	52.12
15.0	174.93	±	1.83	116.28	±	5.90	2994.76	±	57.55
20.0	174.76	±	1.27	107.60	±	1.75	3288.42	±	106.27
30.0	167.45	±	1.79	123.15	±	1.93	3025.91	±	206.17
40.0	169.93	±	1.41	122.43	±	5.41	3151.33	±	59.76
CV (%)	30.53			25.39			18.10		
DMS	120.51			63.22			1200.60		

^zMedias ± error estándar (Tukey, $P \leq 0.05$). NS: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

Cuadro 10. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Fe en órganos de fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Acumulación de Fe (mg)											
	Hoja			Corona			Raíz					
0.0	3.99	±	0.07	^z NS	0.34	±	0.01	^z NS	15.91	±	1.06	^z NS
1.0	3.44	±	0.17		0.32	±	0.01		18.04	±	1.01	
2.5	3.16	±	0.46		0.29	±	0.02		17.80	±	0.10	
5.0	3.17	±	0.17		0.28	±	0.01		16.81	±	0.51	
7.5	3.14	±	0.20		0.28	±	0.01		17.17	±	1.35	
10.0	2.58	±	0.20		0.28	±	0.01		16.88	±	0.42	
15.0	2.68	±	0.11		0.28	±	0.01		16.40	±	0.25	
20.0	2.65	±	0.12		0.25	±	0.02		16.04	±	1.07	
30.0	2.40	±	0.11		0.26	±	0.01		15.82	±	0.69	
40.0	2.40	±	0.07		0.28	±	0.01		15.79	±	1.05	
CV (%)	30.13				18.83				22.75			
DMS	1.89				0.11				8.03			

^zMedias ± error estándar (Tukey, $P \leq 0.05$). NS: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

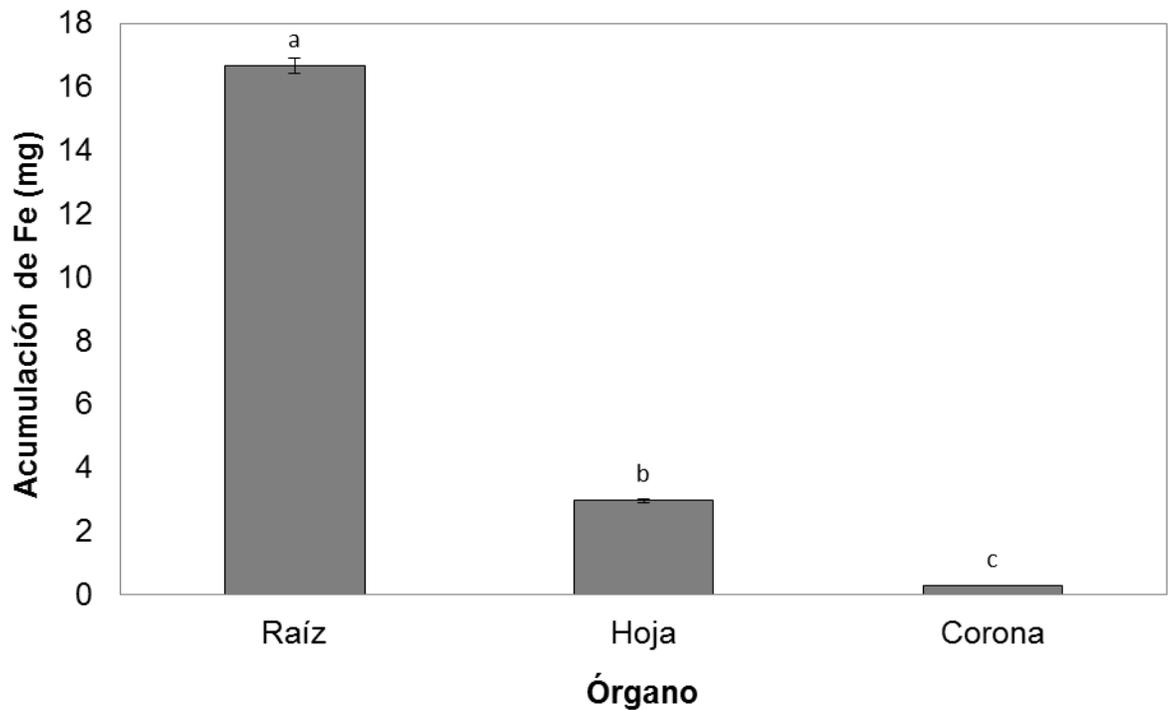


Figura 18. Acumulación de Fe en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.4.6. Acumulación de macro y micronutrientes

El N y el K fueron los macronutrientes que se acumularon en mayor cantidad y en concentraciones similares en las hojas con respecto al P, tal como lo declaran Mills y Jones (1996). En la corona se acumuló más N, seguido de K y P, en tanto que para la raíz, se acumuló más N y en cantidad similar K y P (Figura 19).

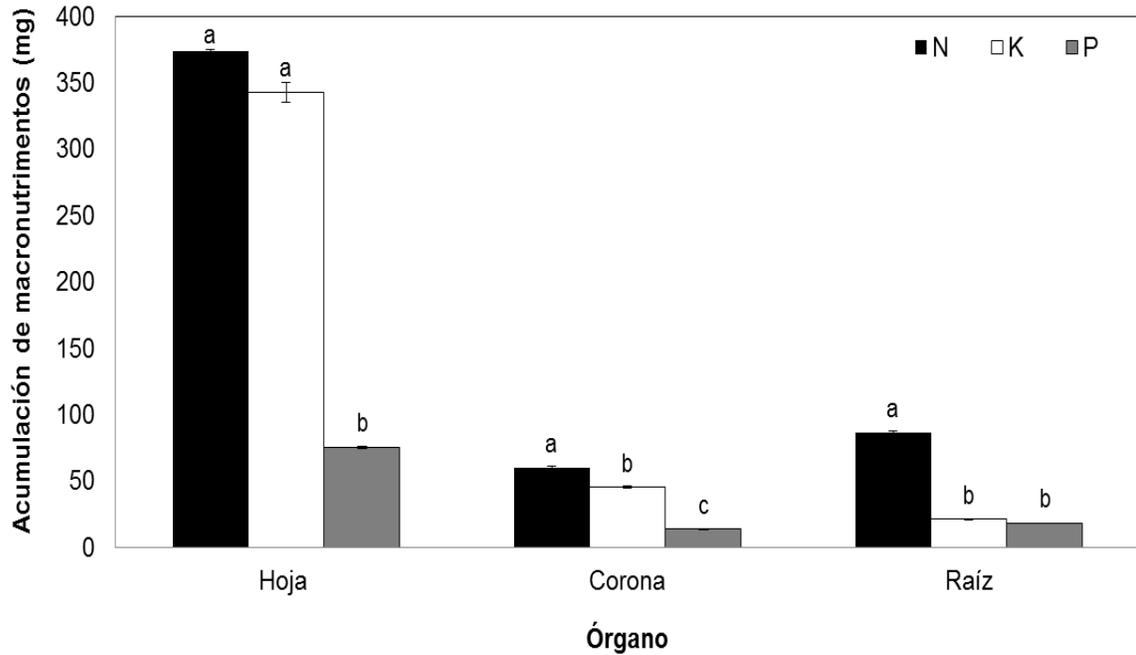


Figura 19. Acumulación de macronutrientes en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

Para los micronutrientes el Fe se acumuló más que el Zn en los tres órganos: hoja, corona y raíz (Figura 20), tal como lo sugiere Nestby *et al.* (2005) para plantas de fresa.

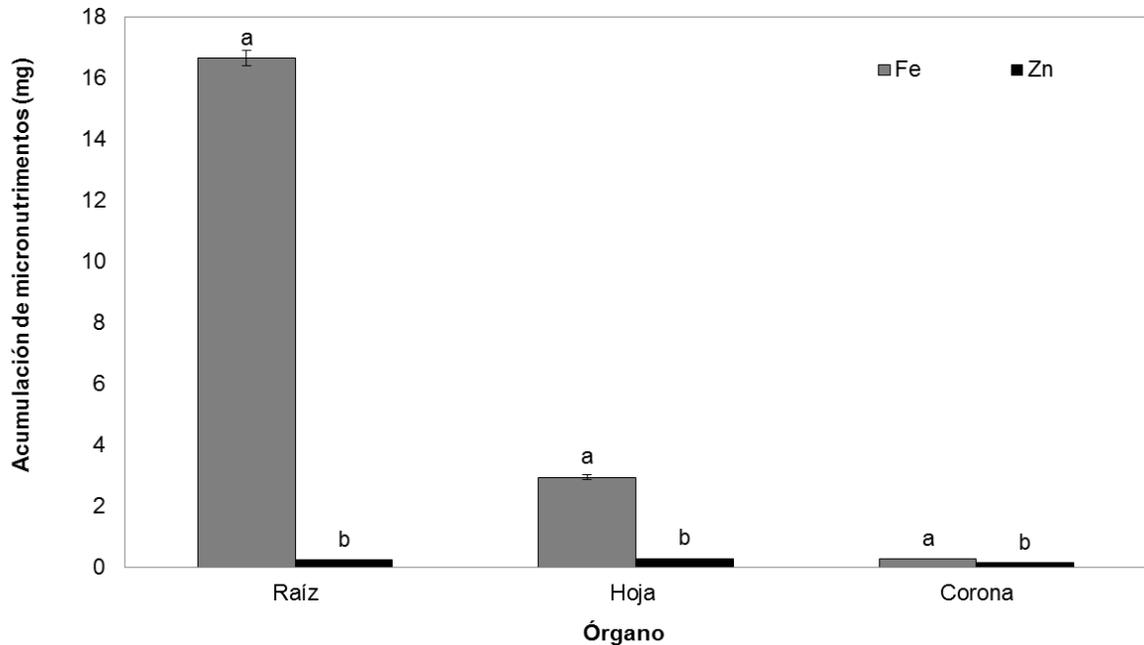


Figura 20. Acumulación de micronutrientos en órganos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

1.5. Grosor de las hojas

El grosor de las hojas, sin aplicación y con dosis intermedia ($7.5 \mu\text{mol L}^{-1}$) y alta ($40 \mu\text{mol L}^{-1}$) de Zn en la solución nutritiva no fue afectado. Sin embargo, se observó un aumento en el grosor del parénquima en empalizada, el cual fue diferente con respecto al grosor del parénquima en empalizada de las hojas que recibieron las aplicaciones de 7.5 y $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn (Cuadro 11). Estos resultados coinciden con los reportados por Ghoneim y Bussler (2007) para plantas de algodón, quienes encontraron que las hojas con deficiencia de Zn

eran más gruesas debido a que las células en empalizada eran más grandes. En los cortes anatómicos (Figura 21) fue posible distinguir un número de 2 a 3 capas de parénquima en empalizada, en tanto que para el parénquima esponjoso no se define claramente el número de capas y su grosor no fue afectado por las dosis de Zn en las soluciones nutritivas analizadas (Cuadro 11).

Cuadro 11. Grosor de las hojas de fresa cv. Albión sin aplicación, dosis intermedia y alta de Zn en la solución nutritiva.

Zn en solución nutritiva $\mu\text{mol L}^{-1}$	Grosor (μm)		
	Hoja	Parénquima en empalizada	Parénquima esponjoso
0.0	262 \pm 1.87 ^z a	116 \pm 1.22 ^z a	86 \pm 2.55 ^z a
7.5	252 \pm 3.32 a	106 \pm 1.22 b	78 \pm 4.85 a
40.0	250 \pm 1.81 a	104 \pm 1.22 b	80 \pm 2.55 a
CV (%)	3.86	5.04	17.39
DMS	16.59	9.24	23.86

^zMedias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

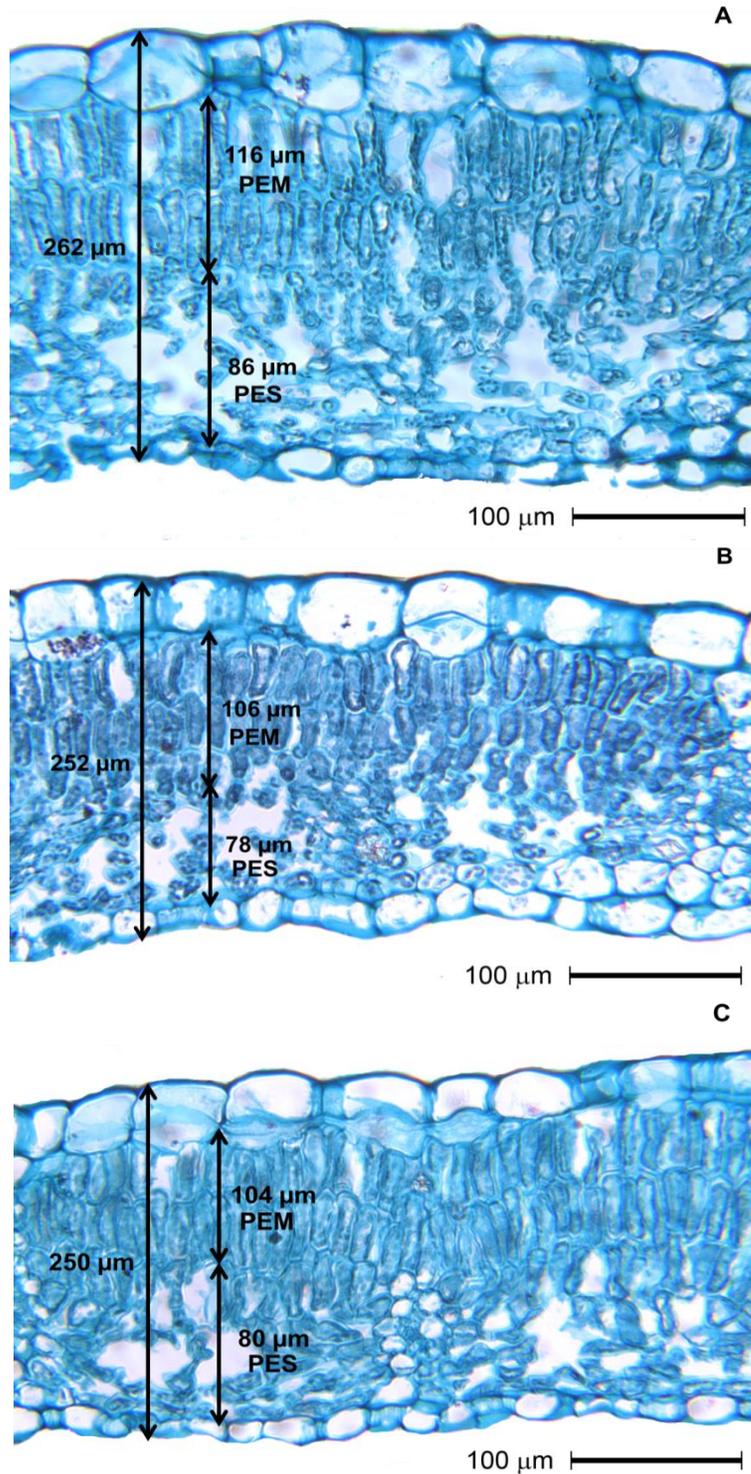


Figura 21. Cortes longitudinales de hojas de fresa cv. Albión. A: Sin aplicación de Zn, B: $7.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, C: $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn. PEM: parénquima empalizada; PES: parénquima esponjoso.

1.6. Rendimiento

Con las dosis de 5 a 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn se obtuvieron los mayores rendimientos promedio, alcanzando un máximo de 86 g planta⁻¹ con la aplicación de 7.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, superando al testigo en 61.73 % (Figura 22).

La aplicación de Zn en la solución nutritiva incrementó el rendimiento, tal como fue observado por Lieten (2003) para plantas de fresa cv. Elsanta, quien obtuvo los mejores rendimientos, entre 700 y 900 g planta⁻¹, con dosis de 5 a 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, en tanto que con 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ el rendimiento significativamente se redujo. Esta misma tendencia concuerda con Abdollahi *et al.* (2010) para fresas cv. Selva, quienes observaron que con la dosis de 100 mg L⁻¹ de Zn, el rendimiento fue de 54.17 g planta⁻¹, superando al testigo en un 4 %.

Probablemente estos resultados fueron debidos a que el Zn es uno de los micronutrientes más importante para obtener un mejor desarrollo de las flores y frutos de la planta de fresa (Lieten, 2003) y las deficiencias pueden reducir el desarrollo de las anteras y el crecimiento del tubo polínico (Lieten, 1997; Abdollahi *et al.*, 2010), lo cual puede afectar el amarre de fruto y por consiguiente el rendimiento (Lieten, 2003).

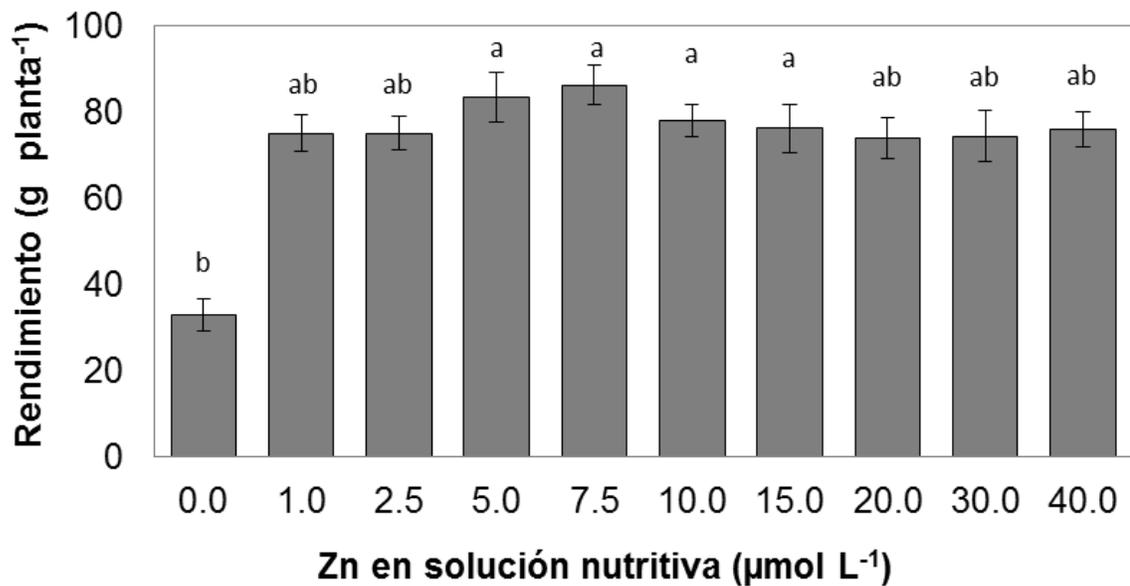


Figura 22. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en el rendimiento del fruto en fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2. Fruto

2.1. Peso fresco

Sin aplicación de Zn en la solución nutritiva y con una dosis deficiente ($1 \mu\text{mol L}^{-1}$), el peso del fruto se redujo casi 50 % comparado con el mayor peso registrado (Cuadro 12). Estos resultados coinciden con Lieten (2003) quien menciona que las plantas de fresa cv. Elsanta que recibieron $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn en la solución nutritiva produjeron frutos de menor peso y tamaño.

2.2. Longitud, diámetro ecuatorial e índice de redondez

Los valores mayores registrados en la longitud del fruto se observaron con las dosis de 2.5 a 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, en tanto que para el diámetro ecuatorial, no existieron diferencias entre las dosis de Zn estudiadas, pero sí con respecto al testigo. El índice de redondez con estas concentraciones de Zn se encontró entre 1 y 1.22, resultando en un fruto de forma alargada (Cuadro 12).

La longitud del fruto se vio afectada por las diferentes dosis de Zn en la solución nutritiva, muy probablemente debido a que el crecimiento del receptáculo es controlado por las auxinas, las cuales son sintetizadas por los aquenios, a partir de la presencia de Zn (Abdollahi *et al.*, 2010).

De acuerdo con la patente publicada por Shaw y Larson (2006) y trabajos realizados por Ornelas-Paz *et al.* (2013) para éste cultivar, la longitud y diámetro ecuatorial reportados en el presente estudio son menores, muy probablemente debido a que el fenotipo de éste cultivar puede variar de acuerdo a las condiciones ambientales y de cultivo en las cuales se encontró. Algunos factores ambientales que pueden afectar el crecimiento del fruto son la temperatura, intensidad luminosa y el fotoperiodo (Hancock, 1999).

Aunque las temperaturas promedio registradas durante el presente estudio se encontraron en el intervalo ideal para el desarrollo de la planta y el fruto de

fresa, es decir, entre 20 y 26 °C, es sabido que temperaturas mayores a 35 °C provocan que el fruto deje de crecer (Rowley *et al.*, 2011).

Wang y Camp (2000), reportan que las temperaturas del día/noche ideales para el óptimo crecimiento de los frutos de fresa cvs. Earliglow y Kent, se encuentran en 18/12 °C. En el presente experimento se registraron temperaturas máximas por arriba de los 37 °C y temperaturas durante el día/noche de hasta 31/17 °C, respectivamente. Probablemente, las altas temperaturas registradas pudieron afectar la obtención de un mayor crecimiento de los frutos.

Cuadro 12. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en las variables de calidad del fruto en fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Peso fresco (g)			Longitud (mm)			Diámetro ecuatorial (mm)			Índice de redondez (Forma)		
0.0	4.86	± 0.26	b	20.5	± 0.42	d	20.50	± 0.30	b	1.00	± 0.009	d
1.0	7.07	± 0.35	ab	25.1	± 0.40	c	23.10	± 0.26	a	1.07	± 0.009	dc
2.5	7.51	± 0.14	a	26.2	± 0.39	bc	24.10	± 0.30	a	1.09	± 0.008	bc
5.0	8.37	± 0.31	a	26.7	± 0.37	bc	23.30	± 0.25	a	1.14	± 0.010	a
7.5	9.36	± 0.36	a	29.6	± 0.33	ab	24.80	± 0.25	a	1.20	± 0.009	a
10.0	8.45	± 0.17	a	27.4	± 0.33	abc	23.20	± 0.24	a	1.19	± 0.009	a
15.0	8.99	± 0.25	a	30.8	± 0.43	a	25.20	± 0.27	a	1.22	± 0.010	a
20.0	7.58	± 0.37	a	26.8	± 0.39	bc	23.10	± 0.28	a	1.17	± 0.010	ab
30.0	7.71	± 0.19	a	28.3	± 0.37	abc	23.50	± 0.24	a	1.20	± 0.010	a
40.0	8.00	± 0.26	a	28.3	± 0.41	abc	23.90	± 0.28	a	1.18	± 0.009	a
CV (%)	21.97			26.65			21.46			15.85		
DMS	2.55			3.45			2.42			0.08		

²Medias ± error estándar. Letras distintas en columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

2.3. Sólidos solubles totales (SST)

El valor mayor de SST resultó con la aplicación de $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ y el menor en el testigo (Cuadro 13), tendencia también observada por Abdollahi *et al.* (2010) en plantas de fresa cv. Selva, donde con dosis de 100 mg L^{-1} de Zn los SST se incrementaron de 5 a 5.7 % con respecto al testigo, probablemente debido a que el Zn juega un papel muy importante en la fotosíntesis y en las enzimas responsables del metabolismo de la planta, en especial en el de los carbohidratos (Abdollahi *et al.*, 2010).

Los valores de SST en los frutos con los diferentes tratamientos se encontraron dentro del intervalo de valores óptimos reportados por Hancock (1999), mismo que se encuentra entre 6 y 9 % para frutos rojos.

2.4. pH

Los valores de pH encontrados en el fruto con las dosis de 5 a $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn oscilaron entre 3.03 y 3.45 (Cuadro 13), valores muy cercanos al pH reportado por Hancock (1999) como valor promedio, el cual es de 3.5.

2.5. Acidez titulable (AT)

En las aplicaciones de Zn de 7.5 a 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ la AT osciló entre 0.8 y 0.95 %, en tanto que en el resto de las aplicaciones fue de 1 a 1.2 % (Cuadro 13), datos que concuerdan con el intervalo adecuado de AT en los frutos de fresa propuesto por Dale y Luby (1991), el cual se encuentra entre 0.42 y 1.24 %. De acuerdo con Martínez-Bolaños *et al.* (2008) frutos de fresa menos ácidos, como los encontrados en las dosis de 7.5 a 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, podrían ser preferidos para el consumo en fresco, tanto en el mercado nacional como para exportación.

2.6. Relación SST/AT (sabor)

Con dosis mayores a 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn los frutos fueron más dulces, mientras que con bajas dosis los frutos fueron más ácidos (Cuadro 13). Keutgen y Pawelzik (2007), mencionan que una relación entre 8.5 y 14 es considerada un balance apropiado para el sabor de la fresa, y aunque en el presente estudio, algunos tratamientos se encontraron fuera de este intervalo, es posible observar que el Zn en la solución nutritiva, tuvo un efecto significativo en el aumento de dicha relación, pues el Zn también ha mostrado tener un papel importante en el incremento de azúcares y disminución de la acidez en los frutos (Abdollahi *et al.*, 2010).

De acuerdo con Martínez-Bolaños *et al.* (2008), debido a que el cociente de la relación es usado para determinar la aceptabilidad del consumidor, una mayor relación de SST/AT les confiere mayor calidad para su consumo en fresco.

2.7. Azúcares solubles totales (AST)

Los mayores valores de AST se registraron con las dosis de 5 a 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, correspondiendo en parte con los tratamientos en los cuales se encontró la mayor concentración de SST. Para el testigo y a mayores dosis de Zn, los AST disminuyeron (Cuadro 13).

Los valores de AST en frutos de fresa se encontraron en el rango propuesto por Dale y Luby (1991), el cual debe encontrarse entre 4.1 y 6.6 %.

Cuadro 13. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en las variables de calidad del fruto en fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	SST ($^{\circ}\text{Brix}$)	AT (%)	pH	SST/AT (Sabor)	AST (%)
0.0	5.94 \pm 0.23 ^z b	1.04 \pm 0.03 ^z ab	2.76 \pm 0.01 ^z f	5.84 \pm 0.34 ^z c	4.19 \pm 0.15 ^z d
1.0	6.88 \pm 0.11 ab	1.00 \pm 0.01 b	2.91 \pm 0.01 ef	6.86 \pm 0.11 bc	5.65 \pm 0.12 abc
2.5	6.92 \pm 0.15 ab	1.20 \pm 0.01 a	2.93 \pm 0.01 def	5.78 \pm 0.12 c	5.98 \pm 0.20 abc
5.0	7.40 \pm 0.19 ab	1.06 \pm 0.03 ab	3.03 \pm 0.01 de	7.05 \pm 0.22 bc	6.48 \pm 0.07 ab
7.5	7.66 \pm 0.14 ab	0.93 \pm 0.01 bc	3.05 \pm 0.00 cde	8.25 \pm 0.12 abc	6.59 \pm 0.02 a
10.0	8.30 \pm 0.23 a	0.95 \pm 0.01 bc	3.11 \pm 0.02 bcd	8.76 \pm 0.24 ab	6.50 \pm 0.04 ab
15.0	7.72 \pm 0.15 ab	0.80 \pm 0.01 c	3.25 \pm 0.03 b	9.65 \pm 0.25 a	6.29 \pm 0.01 abc
20.0	7.60 \pm 0.18 ab	0.94 \pm 0.02 bc	3.27 \pm 0.04 b	8.18 \pm 0.34 abc	5.63 \pm 0.15 abc
30.0	7.58 \pm 0.36 ab	0.94 \pm 0.00 bc	3.21 \pm 0.01 bc	8.05 \pm 0.37 abc	5.34 \pm 0.21 bcd
40.0	7.84 \pm 0.29 ab	0.93 \pm 0.01 bc	3.45 \pm 0.01 a	8.51 \pm 0.39 ab	5.26 \pm 0.12 cd
CV (%)	13.20	7.83	2.75	15.63	9.83
DMS	2.06	0.16	0.18	2.55	12.05

^zMedias \pm error estándar. Letras distintas en cada columna son diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). SST: sólidos solubles totales; AT: acidez titulable; SST/AT: relación sólidos solubles totales y acidez titulable; AST: azúcares solubles totales; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

2.8. Firmeza

Los frutos de mayor firmeza se obtuvieron con la dosis de $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, en tanto que sin aplicación de Zn y con la dosis de $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, resultaron en frutos más blandos (Cuadro 14), característica que de acuerdo a Mitchell *et al.* (1996), los hace más susceptibles a daños durante la selección, empaque, transporte y distribución, así como mayor susceptibilidad al ataque de patógenos. Los resultados de firmeza aquí obtenidos son muy similares a los reportados para otros cultivares de fresa como Camarosa y Festival (Martínez-Bolaños *et al.*, 2008).

2.9. Color

No se observaron diferencias estadísticas en el color de los frutos (Cuadro 14). Los resultados obtenidos se encontraron en el intervalo que reporta Ornelas-Paz *et al.* (2013) para el mismo cultivar para frutos rojo brillantes.

Cuadro 14. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en variables de calidad del fruto en fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Firmeza (N)			Color						
				L*		C*		h°		
0.0	1.35	\pm 0.05 ^z	b	41.68	\pm 1.15 ^{z NS}	48.73	\pm 2.02 ^{z NS}	42.88	\pm 2.11 ^{z NS}	
1.0	1.41	\pm 0.08	ab	38.46	\pm 0.80	46.71	\pm 1.92	40.49	\pm 1.20	
2.5	1.41	\pm 0.10	ab	38.88	\pm 1.84	48.18	\pm 4.16	42.11	\pm 1.82	
5.0	1.50	\pm 0.14	ab	39.42	\pm 1.64	46.02	\pm 1.66	41.31	\pm 1.37	
7.5	1.67	\pm 0.23	ab	40.11	\pm 1.76	49.83	\pm 3.75	43.02	\pm 1.65	
10.0	1.74	\pm 0.25	a	42.12	\pm 1.92	49.63	\pm 1.54	42.98	\pm 1.85	
15.0	1.55	\pm 0.20	ab	40.75	\pm 2.13	49.86	\pm 1.95	41.86	\pm 1.47	
20.0	1.49	\pm 0.06	ab	41.06	\pm 2.22	47.75	\pm 2.95	41.83	\pm 2.18	
30.0	1.40	\pm 0.12	ab	40.72	\pm 1.61	49.78	\pm 2.21	42.98	\pm 1.45	
40.0	1.35	\pm 0.06	b	42.55	\pm 1.24	49.52	\pm 1.16	44.11	\pm 1.26	
CV (%)	19.69			8.32		10.33		7.87		
DMS	0.36			4.11		6.11		4.06		

^zMedias \pm error estándar. Letras distintas en cada columna son diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$). L*: luminosidad, C*: croma; h°: ángulo hue; NS: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

2.10. Acumulación nutrimental en fruto

2.10.1. Zinc

Sin la aplicación de Zn y con aplicación de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ en la solución nutritiva la acumulación de Zn fue menor con respecto al resto de las dosis evaluadas de Zn (Figura 23). La mayor acumulación se dio cuando la dosis de Zn fue de $7.5 \mu\text{mol L}^{-1}$, y en las dosis de 10 a $40 \mu\text{mol L}^{-1}$ la acumulación de Zn en el fruto disminuyó ligeramente, probablemente debido a que la mayor acumulación de este micronutriente se quedó en las hojas y raíces, esta tendencia coincide con lo reportado por Nestby *et al.* (2005), quienes mencionan una acumulación de Zn menor en frutos de fresa cv. Elsanta en comparación con otros órganos de la planta. A pesar de ello, es importante mencionar que el hecho de que el Zn se acumule en los frutos nos puede indicar que al menos este micronutriente es importante para la calidad del fruto (Nestby *et al.*, 2005).

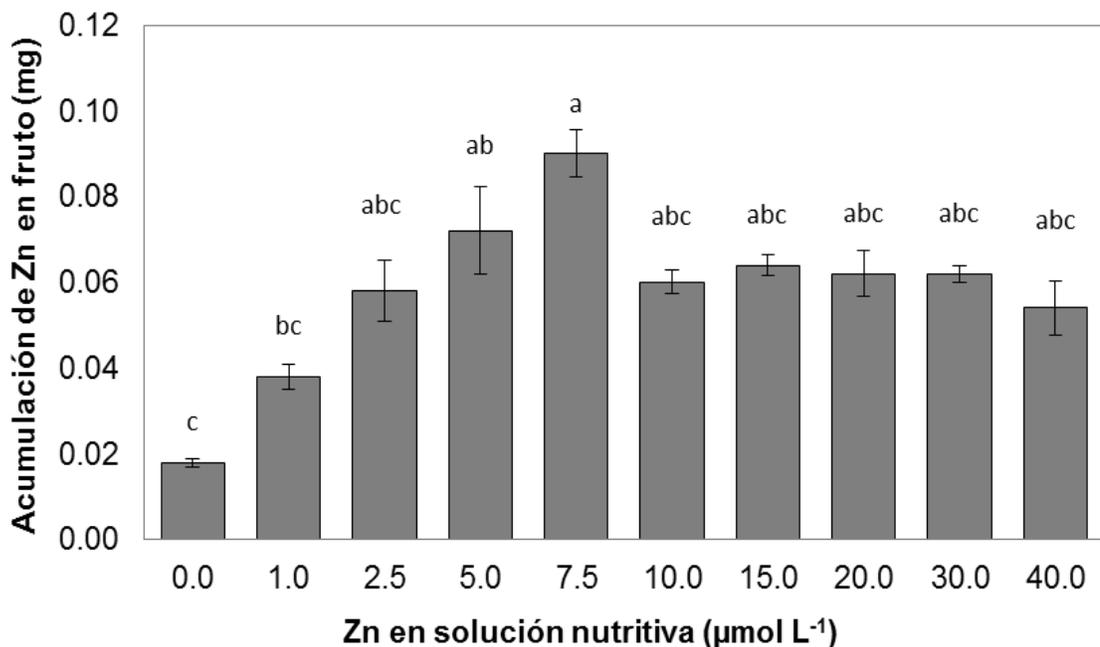


Figura 23. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Zn en frutos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.10.2. Nitrógeno

Sin aplicación de Zn y con las aplicaciones de 1, 2.5 y 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn, la acumulación de N disminuyó. En tanto que con las aplicaciones de 5 a 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Zn, la acumulación de N fue mayor (Figura 24). El Zn mejoró la absorción de N, un macronutriente que está relacionado con la calidad del fruto en fresa (Nestby *et al.*, 2005).

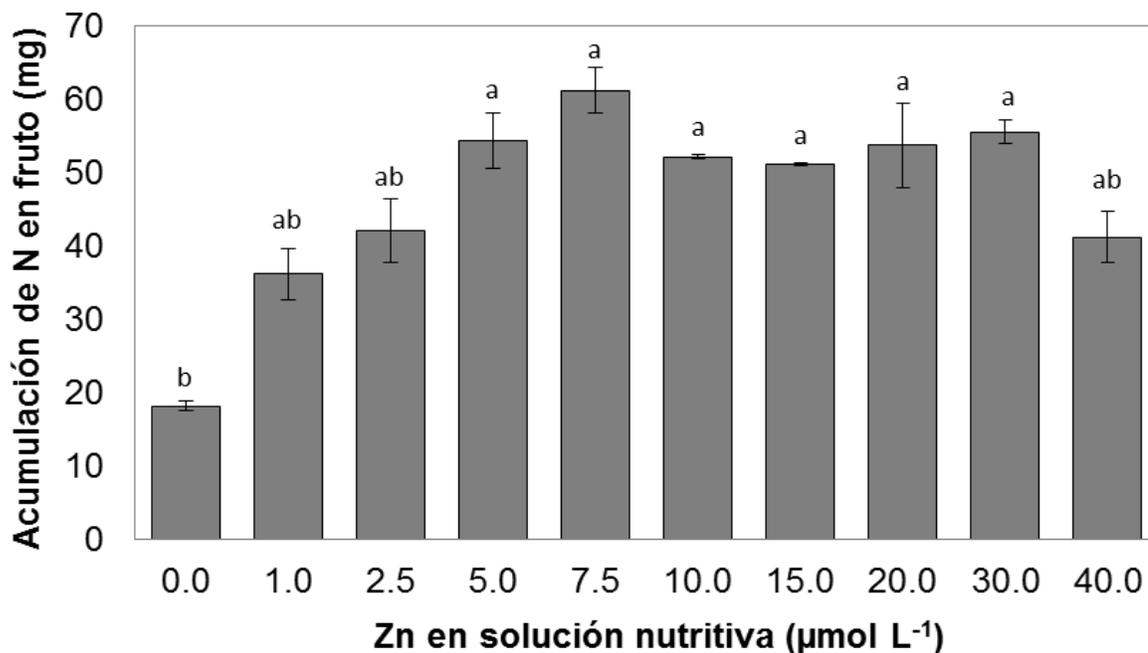


Figura 24. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de N en frutos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.10.3. Fósforo

Cuando no se aplicó Zn, se observó una disminución significativa en la acumulación de este macronutriente (Figura 25). Debido a la alta movilidad del P en la planta, éste se pudo traslocar a los frutos cuando las aplicaciones de Zn en la solución nutritiva oscilaron entre 1 a 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

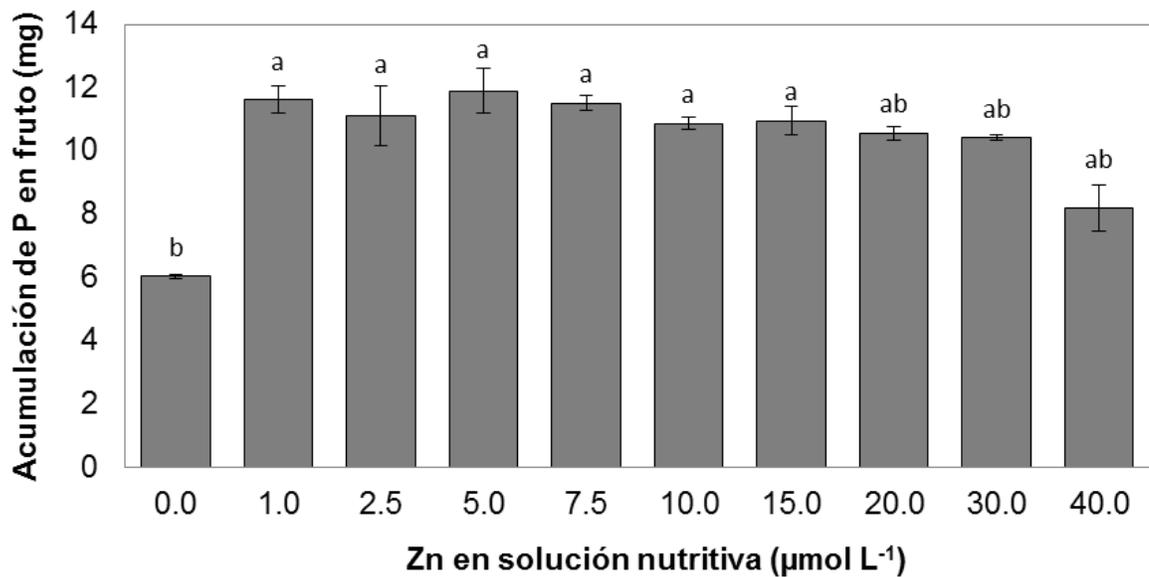


Figura 25. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de P en frutos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.10.4. Potasio

El Zn incrementó la absorción de K de forma sinérgica en las dosis de 2.5 a 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$, sin embargo; cuando las dosis de Zn fueron deficientes o altas la acumulación de K disminuyó (Figura 26). Esta tendencia también fue observada en la concentración y acumulación en el resto de la planta, probablemente respondiendo a los niveles diferenciales de Zn en la solución nutritiva.

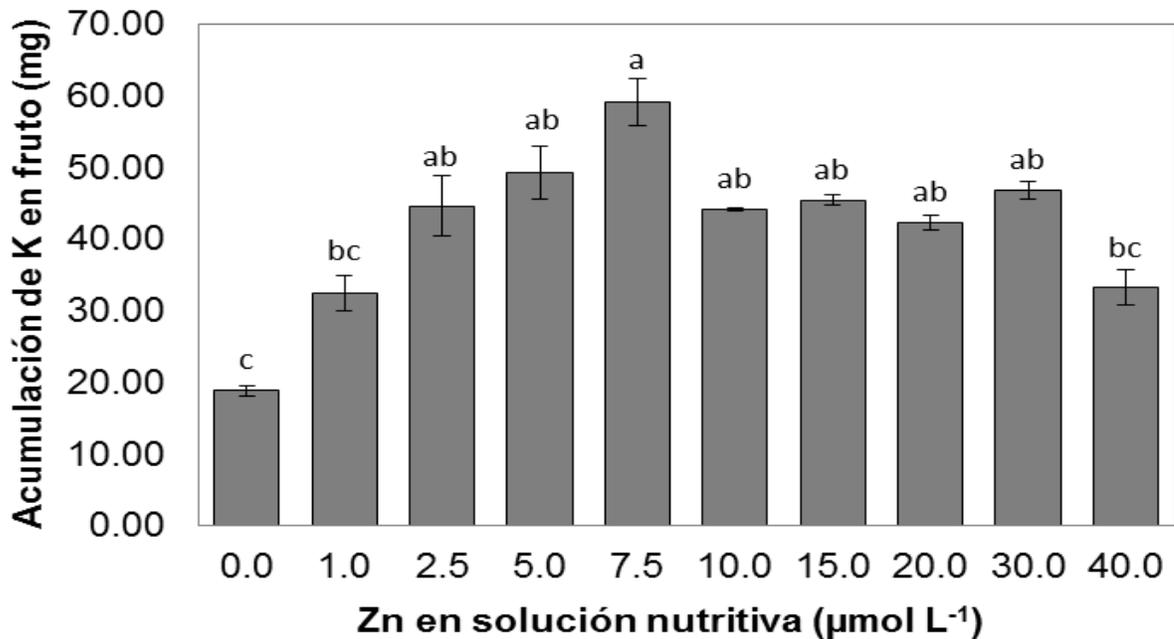


Figura 26. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de K en frutos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

2.10.5. Hierro

No se encontraron diferencias en la acumulación de Fe en el fruto (Cuadro 15). Sin embargo, a partir de $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn y conforme se incrementó el Zn en la solución nutritiva, la acumulación de Fe disminuyó, posiblemente como resultado de un antagonismo entre el Zn y el Fe. De acuerdo con Mengel y Kirkby (2001) altas concentraciones de Zn pueden inducir una deficiencia de Fe.

Cuadro 15. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la acumulación de Fe en frutos de fresa cv. Albión.

Zn en solución nutritiva ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Acumulación de Fe (mg)		
0.0	0.17	±	0.01 ^{z ND}
1.0	0.27	±	0.02
2.5	0.25	±	0.02
5.0	0.25	±	0.01
7.5	0.25	±	0.01
10.0	0.25	±	0.01
15.0	0.24	±	0.01
20.0	0.22	±	0.01
30.0	0.22	±	0.01
40.0	0.18	±	0.01
CV (%)	21.70		
DMS	0.11		

^zMedias ± error estándar (Tukey, $P \leq 0.05$). NS: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

2.10.6. Acumulación de macro y micronutrientes en fruto

El N y el K fueron los macronutrientes que se acumularon en mayor cantidad y de forma similar en el fruto, en comparación con el P, respondiendo de mayor a menor movilidad (Figura 27). En tanto que el Fe se acumuló más que el Zn (Figura 28), encontrándose estos últimos nutrientes en menor cantidad en el fruto con respecto a su acumulación en el resto de los órganos de la planta, tal como lo sugiere Nestby *et al.* (2005) para plantas de fresa.

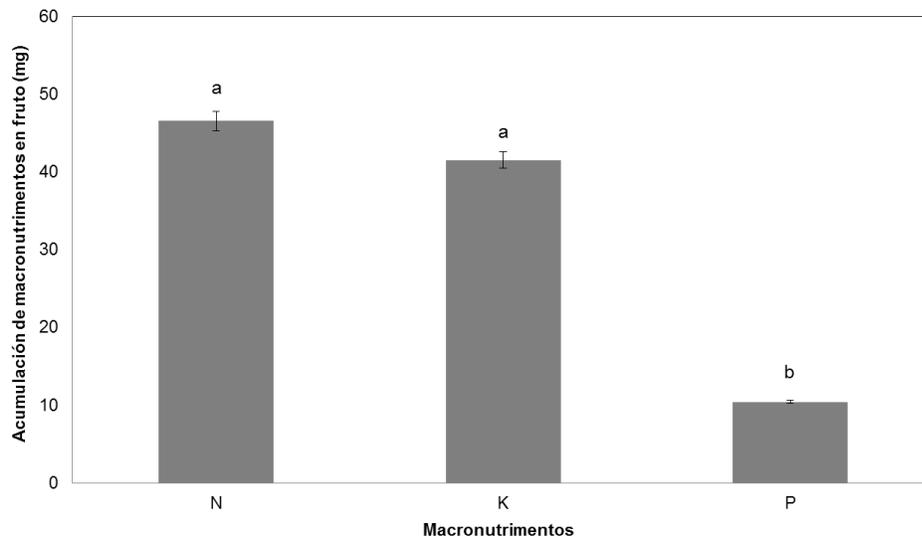


Figura 27. Acumulación de macronutrientos en frutos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar. Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

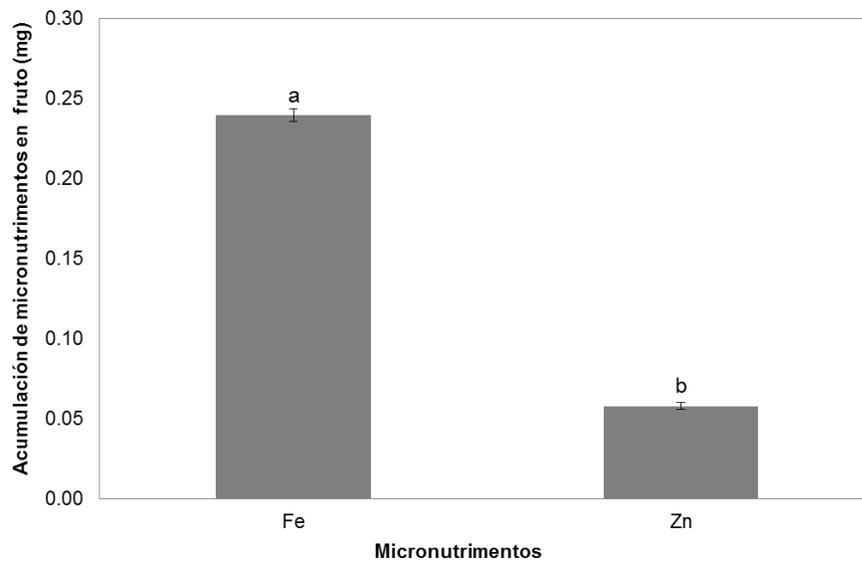


Figura 28. Acumulación de micronutrientos en frutos de fresa cv. Albión. Medias \pm error estándar (Tukey, $P \leq 0.05$). Letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

3. Curvas de abastecimiento nutrimental

Las concentraciones críticas para el Zn fueron definidas a través de un modelo estadístico en el cual se empleó la concentración de Zn en la planta y su relación con el 100 % y 95 % de rendimiento (Figura 29) y biomasa acumulada (Figura 30). Una vez definida la concentración de Zn crítica para estas variables, se estimó la dosis de Zn en la solución nutritiva relacionada con el 100 % y 95 % del rendimiento y biomasa acumulada (Figura 31).

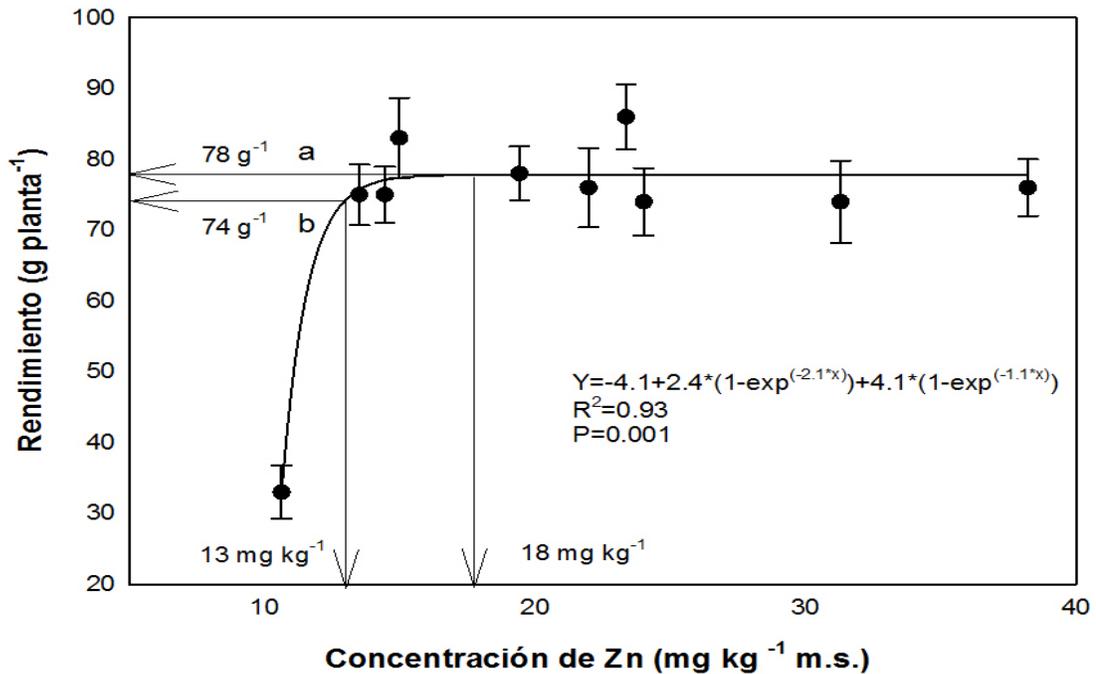


Figura 29. Relación de la concentración de Zn en la planta con el rendimiento en fresa cv. Albión. Las flechas indican la concentración de Zn en la planta relacionada con el 100 % (a) y 95 % (b) del rendimiento. Barras representan el error estándar. n=10.

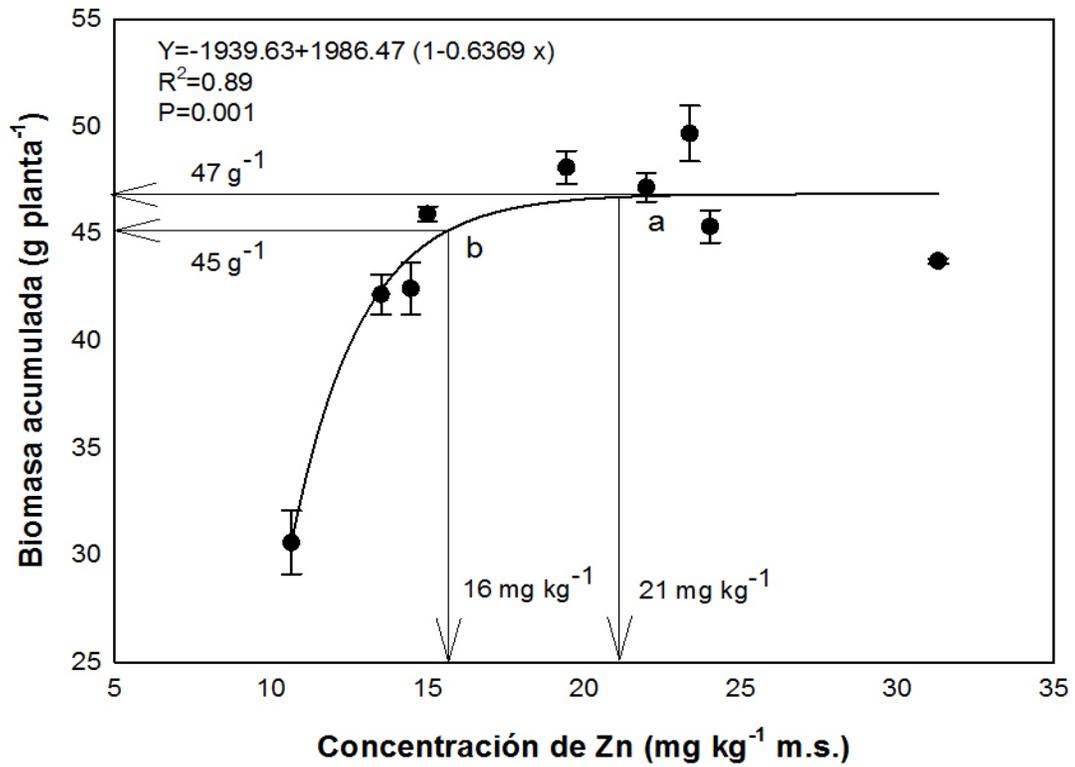


Figura 30. Relación de la concentración de Zn en la planta con la biomasa acumulada en fresa cv. Albión. Las flechas indican la concentración de Zn en la planta relacionada con el 100 % (a) y 95 % (b) de biomasa acumulada. Barras representan el error estándar. n=10.

La concentración de Zn interno en la planta se incrementó exponencialmente cuando el Zn en la solución nutritiva incrementó de 0 a 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 31).

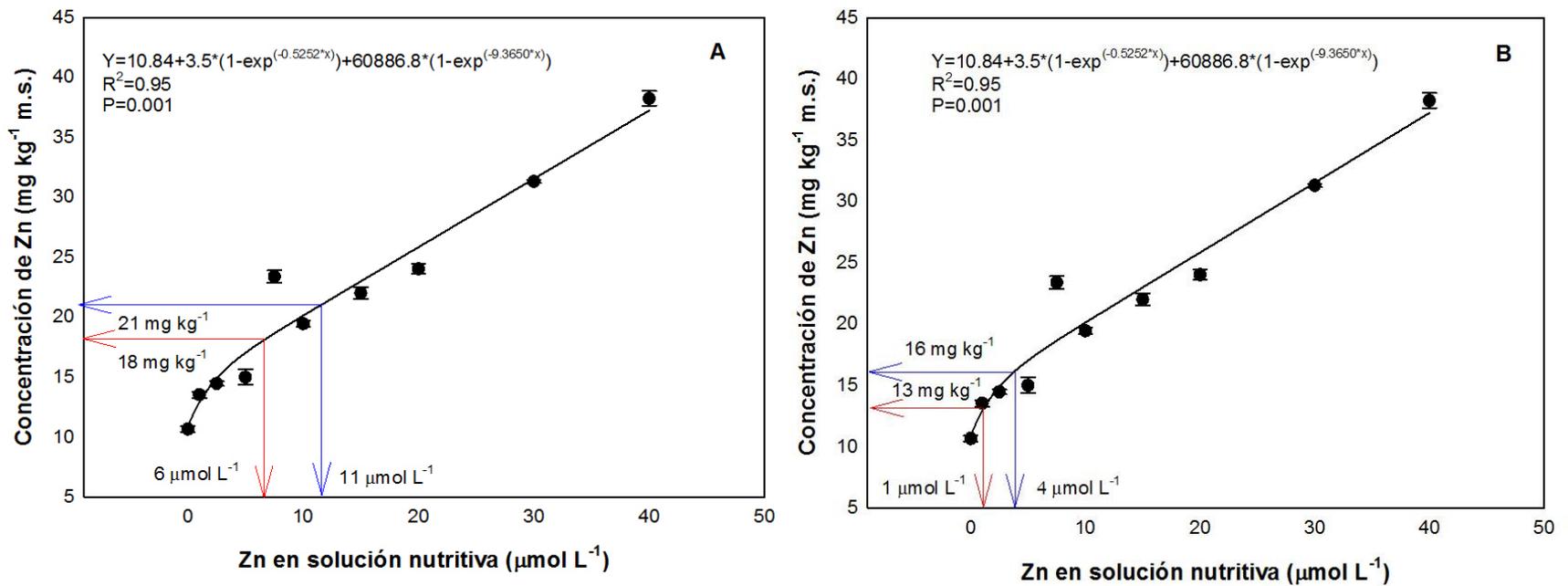


Figura 31. Efecto de la dosis de Zn en la solución nutritiva en la concentración de Zn en fresa cv. Albi3n. Las flechas indican la concentraci3n de Zn en la soluci3n relacionada con la concentraci3n cr3tica de Zn en la planta correspondiente al 100 % (A) y 95 % (B) de rendimiento (flechas rojas) y acumulaci3n de biomasa (flechas azules). Barras representan el error est3ndar. n=10.

El modelo estimó que la concentración crítica de Zn en las solución nutritiva que se relacionó con el 100 % de rendimiento (78 g planta⁻¹) fue 6 $\mu\text{mol L}^{-1}$, correspondiendo a 18 mg kg⁻¹ de Zn, en tanto que para el 100 % de biomasa acumulada (47 g planta⁻¹) fue de 11 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn en la solución nutritiva, correspondiendo a 21 mg kg⁻¹ de Zn (Figura 31A).

Por otra parte, la dosis de Zn en la solución nutritiva que se relacionó con el 95% de rendimiento de fruto (74 g planta⁻¹) fue de 1 $\mu\text{mol L}^{-1}$, correspondiendo a 13 mg kg⁻¹ de Zn, en tanto que la dosis en la solución nutritiva que se relacionó con el 95 % de biomasa acumulada (45 g planta⁻¹) fue de 4 $\mu\text{mol L}^{-1}$, correspondiendo a 16 mg kg⁻¹ de Zn (Figura 31B).

Si se localizan estos valores críticos en una línea recta (Figura 32) se puede observar que la zona en la cual coincidiría la obtención de un buen rendimiento y producción de biomasa seca es cuando el valor crítico corresponde a 16 mg kg⁻¹ de materia seca.

Este valor crítico constituye una forma de interpretación del análisis nutrimental y aunque su principal limitación radica en que se designa la parte más baja del intervalo de suficiencia en la curva de abastecimiento nutrimental, también nos sugiere la concentración debajo de la cual se presentarán síntomas de deficiencia y por consiguiente de la disminución de rendimiento y biomasa acumulada.

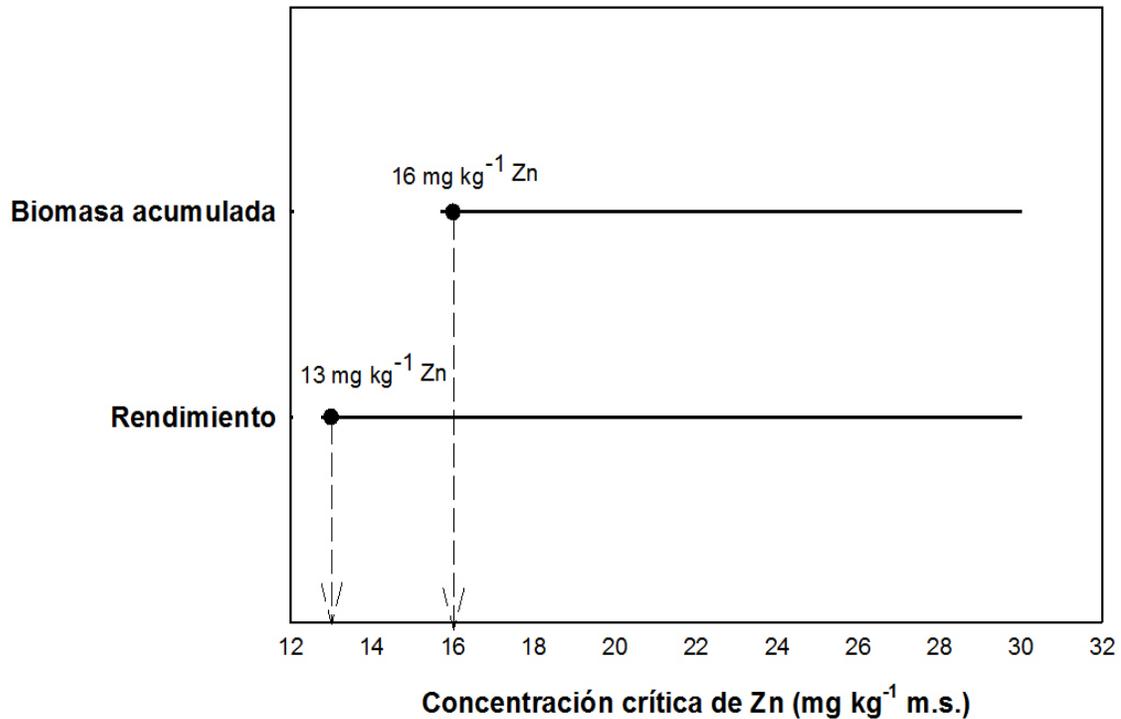


Figura 32. Concentración crítica de Zn asociado con el 95 % de biomasa acumulada y rendimiento en fresa cv. Albión.

Por otra parte, el valor crítico de 16 mg kg^{-1} de Zn en materia seca corresponden a $4 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn en la solución nutritiva y son equivalentes a 1.16 mg L^{-1} de Zn, un valor que estaría arriba del valor propuesto para Zn en la formulación de la solución nutritiva de Steiner (1984), el cual corresponde a 0.11 mg L^{-1} de Zn. Esto sugiere que los valores reportados en la bibliografía no siempre son extrapolables para todos los cultivos, cultivares y zonas en que éstos se producen, haciendo también evidente la necesidad de generar estudios como el presente, con la finalidad de obtener mejores estándares de comparación y en particular para el cultivo de la fresa. El Zn no solo mejora su

rendimiento y calidad, sino también al estar contenido en los frutos, podrían ser una fuente de este micronutriente, contribuyendo a disminuir los problemas de salud causados por su deficiencia en los alimentos.

VII. CONCLUSIONES

No existieron diferencias estadísticas en el grosor de las hojas con respecto a las dosis de Zn aplicadas.

El orden de acumulación de los elementos en la planta y fruto fue: N, K, P, Fe y Zn.

Con las dosis de Zn entre 5 y 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ en la solución nutritiva se obtuvo el mejor crecimiento, biomasa acumulada, rendimiento, concentración nutrimental y calidad del fruto. Sin embargo, al modelar la curva de abastecimiento el valor crítico se estimó en 4 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Dosis de Zn por arriba de 30 $\mu\text{mol L}^{-1}$ afectaron las variables antes mencionadas; sin embargo, no fue posible establecer la concentración crítica de toxicidad en las curvas de abastecimiento nutrimental.

Bajo las condiciones en las que se desarrolló el cultivo y de acuerdo con las curvas de abastecimiento nutrimental modeladas, para obtener el 95 % de rendimiento y biomasa acumulada, la concentración de Zn en la planta se estimó en 16 mg por kg de materia seca (valor crítico de suficiencia), la cual corresponde a 4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Zn en la solución nutritiva.

VIII. LITERATURA CITADA

- ABDOLLAHI, M.; ESHGHI, S.; TAFAZOLI, E. 2010. Interaction of Paclobutrazol, Boron and Zinc on Vegetative Growth, Yield and Fruit Quality of Strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Selva). *Journal Biology Environmental Science* 4 (11): 67-75.
- AGUSTÍ, M. 2011. Fruticultura. Mundi Prensa. 2ª edición. Madrid, España. 507 p.
- ALCÁNTAR G, G.; SANDOVAL, V. M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 156 p.
- ALCÁNTAR G, G.; TREJO-TÉLLEZ, L.I.; FERNÁNDEZ P, L.; RODRÍGUEZ M, MA. DE LAS NIEVES. 2012. Elementos esenciales, pp. 7-47. *In: Nutrición de Cultivos*. ALCÁNTAR G, G.; TREJO-TÉLLEZ, L. I. (coord.). Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Estado de México.
- AOAC (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY). 1980. Official Methods of Analysis. 12ª edición. Washington, D. C. U.S.A. 1018 p.
- AVITIA, G.E. 1996. Anatomía Precigótica y Postcigótica en Relación al Aborto de Óvulos y Semillas en *Spondias purpurea* L. Tesis de Doctorado. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Botánica. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Estado de México. 118 p.
- BIANCHI, P. G. 1999. Guía completa del cultivo de las fresas. De Vecchi, S. A. Barcelona, España. 94 p.

- BOSQUEZ, M. E. 1992. Manual de Prácticas de Laboratorio de Fisiología Postcosecha de Frutos y Hortalizas. UAM-I Iztapalapa, México. D.F. 74 p.
- BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. 2012. Function of nutrients: Micronutrients, pp.191-243. *In: Marschner's mineral plant nutrition of higher plants*. MARSCHNER, P. (ed). 3^a edición. Elsevier, Londres.
- CAKMAK, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist Cambridge* 146: 185-205.
- CAKMAK, I. 2014. ¿Por qué las plantas necesitan zinc? 3er Congreso Internacional de Nutrición y Fisiología Vegetal Aplicadas. INTAGRI. Guadalajara, Jalisco, México.
- CALDERÓN A., E. 1977. El esfuerzo del hombre, fruticultura general. Vol 1. México, D.F. 759 p.
- CASIERRA-POSADA, F.; POVEDA, J. 2005. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria* sp. cv. Camarosa). *Agronomía Colombiana* 23 (2): 283-289.
- CASTELLANOS, J.Z.; DÍAZ, D.; SANTIAGO, J.D. 2014. Realidades del zinc (Zn) en los Suelos de México. Hojas Técnicas de Fertilab, México. 5 p.
- COOPER, H.D.; CLARKSON, D.T. 1989. Cycling amino-nitrogen and other nutrients between shoots and roots in cereals. A possible mechanism integrating shoot and root in the regulation of nutrient uptake. *Journal of Experimental Botany* 40: 753-762.

- DALE, A.; LUBY, J.J. 1991. The Strawberry Into the 21st Century. Proceedings of the Third North American Strawberry Conference. Timber Press. Portland, Oregon. 152 p.
- ERENOGLU, E.B.; KUTMAN, U.B.; CEYLAN, Y.; YILDIZ, B.; CAKMAK, I. 2011. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root to shoot translocation and remobilization of zinc (^{65}Zn) in wheat. *New Phytologist* 189: 438-448.
- EYAL R., I. 2008. Microelementos en la agricultura. Red Hidroponía. Boletín No. 38. Lima, Perú. 11 p.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). 2014. Consultado el 9 de marzo de 2014 en <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.
- FOX, T. C.; GUERINOT, M. L. 1998. Molecular Biology of cation transport in plants. *Plant Molecular Biology* 49: 669-696.
- GHONEIM, M. F.; BUSSLER, W. 2007. Diagnosis of zinc deficiency in cotton. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 143: 377–384.
- GIBSON, R. S. 2012. Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. *Plant and Soil* 361: 291-299.
- GONZÁLEZ, A.; CEDILLO, E.; DÍAZ, L. 2013. Morfología y Anatomía de las Plantas con Flores. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 276 p.
- GUNNESS, P.; KRAVCHUK, O.; NOTTINGHAM, S.M.; D'ARCY, B.R.; GIDLEY, M.J. 2009. Sensory analysis of individual strawberry fruit and comparison

- with instrumental analysis. *Postharvest Biology and Technology* 52: 164-172.
- HANCOCK, J. F. 1999. Strawberries. CABI. New York, USA. 237 p.
- HERRERO, A.; GUARDIA, J. 1992. Conservación de frutos, manual técnico. Mundi-Prensa. S.A. Madrid, España. 409 p.
- IMTIAZ, M.; ALLOWAY, B.J.; SHAH, K.H.; SIDDIQUI, S.H.; MEMON, M.Y.; ASLAM, M.; KHAN, P. 2003. Zinc Nutrition of Wheat: II: Interaction of Zinc with other Trace Elements. *Asian Journal of Plant Sciences* 2: 156-160.
- JONES, JR. J. B. 1998. Plant Nutrition Manual. CRC Press. Boca Raton. Florida, USA. 147 p.
- KEUTGEN, A.; PAWELZIK, E. 2007. Modifications of taste-relevant compounds in strawberry fruit under NaCl salinity. *Food Chemistry* 105: 1487-1494.
- KIRKBY, E.A.; RÖMHELD, V. 2007. Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility (Versión en español). Proceedings 543. The International Fertilizer Society, P.O. Box, York, YO32 5YS, United Kingdom.
- LIETEN, F. 1997. Zinc nutrition of strawberries grown on rockwool. Proc. Int'l Symp. On Growing Media and Plant Nutrition. *Acta Horticulturae* 450: 215-220.
- LIETEN, F. 2003. Zinc Nutrition of Strawberries Grown on Peat Bags. *Small Fruits Review* 2 (4): 63-72.

- MALVI, U. 2011. Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. *Karnataka Journal Agriculture Science* 24 (1): 106-109.
- MARSCHNER, H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. 2^a edición. Academic Press. London, U.K. 889 p.
- MARSCHNER, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3^a edición. Academic Press. London, U.K. 651 p.
- MARTÍNEZ-BOLAÑOS, M.; NIETO-ÁNGEL, D.; TÉLIZ-ORTÍZ, D.; RODRÍGUEZ-ALCAZAR, J.; MARTÍNEZ-DAMIÁN, MA. T.; VAQUERA-HUERTA, H.; CARRILLO-MENDOZA, O. 2008. Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares mexicanos y estadounidenses. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14 (2): 113-119.
- McGUIRE, R. G. 1992. Reporting of Objective Color Measurements. *HortScience* 27 (12): 1254-1255.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5^a edición. Kluwer Academic Publisher. 849 p.
- MENZEL, C. M.; SMITH, L. 2012. Relationship Between the Levels of Non-structural Carbohydrates, Digging Date, Nursery-growing Environment, and Chilling in Strawberry Transplants in a Subtropical Environment. *HortScience* 47 (4): 459-464.
- MILLS, H. A.; JONES, JR. J. B. 1996. Plant Analysis Handbook II. MicroMacro Publishing. Atenas, Georgia, USA. 422 p.

- MITCHELL, F.G.; MITCHAM, E.; THOMPSON, J.F.; WELCH, N. 1996. Handling strawberries for fresh market. Oakland, CA: Univ. Calif. *Agr. Nat. Resources, Special Publ.2442*. 14 p.
- MONTERO, T. M.; MOLLÁ, E.M.; ESTEBAN, R.M.; LÓPEZ-ANDRÉU, F.J.1996. Quality attributes of strawberry during ripening. *Scientia Horticulturae* 65: 239-250.
- NESTBY, R.; LIETEN, F.; PIVOT, D.; RAYNAL, L. C.; TAGLIAVINI, M. 2005. Influence of Mineral Nutrients on Strawberry Fruit Quality and Their Accumulation in Plant Organs: A Review. *International Journal of Fruit Science* 5 (1): 139-156.
- NUNES, M. C. N.; BRECHT, J.K.; MORAIS, A.M.M.B.; SARGENT, S.A. 2006. Physicochemical changes during strawberry development in the field compared with those that occur in harvested fruit during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86: 180-190.
- ORNELAS-PAZ, J. DE. J.; YAHIA, E. M.; GARDEA, A. A. 2008. Changes in external and internal color during postharvest ripening of 'Manila' and 'Ataulfo' mango fruit and relationship with carotenoid content determined by liquid chromatography-APCl⁺-time-of-flight mass spectrometry. *Postharvest Biology and Technology* 50: 145-152.
- ORNELAS-PAZ, J. DE. J.; YAHIA, E.M.; RAMÍREZ-BUSTAMANTE, N.; PÉREZ-MARTÍNEZ, J.D.; ESCALANTE-MINAKATA, M. DEL. P.; IBARRA-JUNQUERA, V.; ACOSTA-MUÑIZ, C.; GUERRERO-PRIETO, V.; OCHOA-REYES, E. 2013. Physical attributes and chemical composition of organic

- strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch. cv. Albion) at six stages of ripening. *Food Chemistry* 138: 372-381.
- PEREYRA, M. 2001. Asimilación del nitrógeno en plantas, pp.1-16. *In*: Memorias del 4^{to} Congreso Internacional en nutrición vegetal y fisiología aplicada. Guadalajara, Jalisco. México.
- ROWLEY, D.; BLACK, B.L.; DROST, D. 2011. Late-season Strawberry Production Using Day-neutral Cultivar in High elevation High Tunnels. *HortScience* 46 (11): 1480-1485.
- SÁNCHEZ G., P.; MOLINOS DA SILVA, C.; ALCÁNTAR G., G.; SANDOVAL V., M. 2012. Diagnóstico nutrimental en plantas, pp. 201-247. *In*: Nutrición de Cultivos. ALCÁNTAR G., G.; TREJO-TÉLLEZ, L. I. (coord.). Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Estado de México.
- SAS INSTITUTE INC. 2006. Base SAS 9.1.3 Procedures Guide. 2^a edition. Volumes 1, 2, 3 y 4. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1906 p.
- SHARMA, P.N.; CHATTERJEE, C.; AGARWALA, S.C.; SHARMA, C.P. 1990. Zinc deficiency and pollen fertility in maize (*Zea mays*). *Plant and Soil* 124: 221-225.
- SHAW, D.V.; LARSON, K.D. 2006. Strawberry plant named 'Albión' US Patent PP16 228 P3.
- SIAP (SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA). 2014. Consultado el 12 de mayo de 2014 en <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.

- SILLANPÄÄ, M. 1982. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. FAO Boletín Núm. 48. 444 p.
- SILVA, L. F.; ESCRIBANO-BAILÓN, M.T.; PÉREZ, J.J.; RIVAS-GONZALO, J.C.; SANTOS-BUELGA, C. 2007. Anthocyanin pigments in strawberry. *LWT Food Science and Technology* 40: 374-832.
- STEINER, A. A. 1984. The universal nutrient solution, pp. 633-650. *In*: Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.
- TAGLIAVINI, M.; ZAVALLONI, C.; ROMBOLA, A.D.; QUARTIERI, M.; MALAGUTI, D.; MAZZANTI, F.; MILLARD, P.; MARANGONI, B. 2000. Mineral nutrient partitioning to fruits of deciduous trees. XXV International Horticultural Congress, Part 2: Mineral Nutrition and Grape and Wine Quality. *ISHS Acta Horticulturae* 512: 131-140.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. 2006. Fisiología vegetal. Universitat Jaume I de Castellón. Traducción de: *Plant Physiology*, 3^a edición. Castellón de la Plana, España. 1338 p.
- WANG, S.Y.; CAMP, M.J. 2000. Temperatures after bloom affect plant growth and fruit quality of strawberry. *Scientia Horticulturae* 85: 183-199.
- WITHAM F., H.; BLAYDES D., F.; DEVLIN R., M. 1971. Experiments in Plant Physiology. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 245 p.