



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**EFECTO BIOESTIMULANTE DEL  
VANADIO EN ARÁNDANO  
(*Vaccinium corymbosum* L.)**

RICARDO ANTONIO CISNEROS ALEMAN

T E S I S  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: EFFECTO BIOESTIMULANTE DEL VANADIO EN ARÁNDANO  
(Vaccinium corymbosum L.)


realizada por el (la) alumno (a): Ricardo Antonio Cisneros Aleman

bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y  
aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)

  
DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

ASESOR (A)

  
DR. MANUEL SANDOVAL VILLA

ASESOR (A)

  
DR. CESAR SAN MARTÍN HERNÁNDEZ

ASESOR (A)

  
DR. ANGEL REBOLLAR ALVITER

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2022

# EFFECTO BIOESTIMULANTE DEL VANADIO EN ARÁNDANO (*Vaccinium corymbosum* L.)

Ricardo Antonio Cisneros Aleman, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022

## RESUMEN

Las variaciones climáticas y el crecimiento de la población provocan con el paso de los años que mejorar la producción agrícola en condiciones indeseables sea de los mayores retos para la agricultura. Los bioestimulantes permiten afrontar la problemática anteriormente mencionada, dentro de estos, existe el vanadio (V) que ha mostrado efectos positivos; sin embargo, los reportes son contradictorios debido a factores como especie vegetal, concentración de V y especiación química del V. En arándano no existe información respecto al uso de V lo que permite investigar sus efectos y encontrar concentraciones óptimas. Los objetivos de esta investigación fueron: a) evaluar el efecto de concentraciones de V de 0 (testigo), 10, 20, 40, 80, 160  $\mu\text{M}$  en solución nutritiva durante todo el experimento y 20  $\mu\text{M}$  aplicado foliarmente cada 15 días en aspectos fisiológicos, morfológicos y nutrimentales; b) identificar la concentración y método de aplicación óptimo de V a través de determinaciones morfológicas, fisiológicas y nutrimentales. Se usó un sistema hidropónico con solución nutritiva para establecer un experimento con un diseño completamente al azar con siete tratamientos de concentraciones de V (0, 10, 20, 40, 80, 160  $\mu\text{M}$ , y un tratamiento foliar de 20  $\mu\text{M}$ ), y con tres repeticiones por tratamiento. Cada repetición consistió en una planta de arándano de nueve meses de edad en un contenedor de 5 L, con una oxigenación cada 4 horas durante 20 minutos.

Los resultados mostraron que las aplicaciones foliares de V incrementaron el volumen radical (66 días después de aplicación de tratamiento, ddat), respecto al testigo; asimismo las concentraciones de 80 y 160  $\mu\text{M}$  de V comparadas con el testigo redujeron el peso húmedo fresco y seco del fruto, la tasa de transpiración y longitud de raíz (66 ddat). La aplicación de V foliar (20  $\mu\text{M}$ ) aumentó la tasa fotosintética respecto al testigo, pero disminuyó en aplicaciones en la solución nutritiva entre 40 - 160  $\mu\text{M}$ . Los resultados nutrimentales indicaron que el V aplicado al follaje benefició las concentraciones en hoja de Mn, en tallo incrementó las de Ca, Mg, B y Mn, y en raíz de P. Independiente de la concentración de V en solución se mejoran las concentraciones de P, Fe y Cu en raíz, pero se redujeron las de Mo. La mayor concentración de V (160  $\mu\text{M}$ ) aumentó las concentraciones de Mg en tallo además del Ca y Zn en raíz, pero reduce las de K en este mismo órgano. Todo V suministrado en solución aumenta las concentraciones de V en hojas, tallos y raíces. En general el V afecta tanto positiva como negativamente las características morfológicas, fisiológicas y nutrimentales del arándano, siendo dependiente de la concentración y forma de aplicación. El uso de V de manera foliar ofrece el mejor efecto positivo en términos morfológicos, fisiológicos y nutrimentales del cultivo de arándano.

**Palabras clave:** *Arándano; Bioestimulante; Fotosíntesis; Nutrientes Vanadio.*

**BIOSTIMULANT EFFECT OF VANADIUM IN BLUEBERRY (*Vaccinium corymbosum*  
L.)**

**Ricardo Antonio Cisneros Aleman, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2022**

**ABSTRACT**

Over the years, climatic variations and population increment have caused that improving agricultural production in undesirable conditions be one of the greatest challenges for agriculture. Biostimulants allow us to deal with aforementioned problem, within biostimulants is vanadium (V) which has showed positive effects, nevertheless, reports are contradictory due to factors such as plant species, concentration of V and chemical speciation of V. In blueberries, there is no information about V use, which allows to investigate the effects and to find optimal doses. The aims of this research were: a) to evaluate the effect of V concentrations in a nutrient solution 0 (control), 10, 20, 40, 80, 160  $\mu\text{M}$  during the whole experimental period and 20  $\mu\text{M}$  applied in leaves every 15 days, on physiological, morphological and nutrimental aspects; b) to identify the V concentration and optimal method of application through morphological, physiological and nutrient analysis. A hydroponic system with nutrient solution was used to carry out an experiment under a completely randomized design with seven treatments of V concentration (0, 10, 20, 40, 80, 160  $\mu\text{M}$ , and 20  $\mu\text{M}$  foliar), and three replicates per treatment. Every replicate was a nine-months-old blueberry plant grown in a 5-liter container that was oxygenated every 4 hours during 20 minutes.

Results showed that foliar sprays of V increased root volume (66 days after treatment, dat), compared with the control, in addition V concentrations of 80 and 160  $\mu\text{M}$  compared with the control reduced fresh and dry weight of fruits, transpiration rate and root length (66 dat). Foliar spray of V (20  $\mu\text{M}$ ) increased photosynthetic rate compared to control, but reduced when V were applied to nutrient solution in concentrations between 40 – 160  $\mu\text{M}$ . Nutrient analysis indicated that V applied to leaves benefited concentrations of Mn in leaves, Ca, Mg, B and Mn in stems, and just P in roots. V applied in the nutrient solution improved concentrations of P, Fe and Cu are in root, but decreased Mo concentration. V concentration of 160  $\mu\text{M}$  increased concentrations of Mg in stems, and Ca and Zn in roots, but reduced K concentrations in this organ. All V supply in nutrient solution increased V concentrations in leaves, stems and roots. In general, V affected positively and negatively, morphological, physiological and nutrimental traits in blueberry plants, depending on concentration and type of application. V applied on leaves offered the best positive effect on morphological, physiological and nutrimental traits of blueberry crops.

**Key words:** *Blueberry, Biostimulants, Nutrients, Photosynthesis, Vanadium.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillos por las facilidades para realizar mis estudios de investigación.

Al postgrado de Edafología por permitirme aprovechar de el conocimiento que me ofrecieron desde el inicio de mis estudios de postgrado.

Al Dr. Prometeo Sánchez García por siempre brindar su respaldo en cada decisión tomada durante la realización de esta investigación.

Al Dr. Manuel Sandoval Villa quien siempre permaneció atento en cada paso realizado durante esta investigación y quien siempre mostro disponibilidad en cualquier situación.

Al Dr. Cesar San Martín Hernández quien siempre permaneció en la mejor disposición de ayudar, respalda y dar lo mejor de sí mismo para que esta investigación fuera posible, quien siempre compartió sus conocimientos, brindo los mejores consejos, pero sobre todo por su inigualable apoyo para culminar esta investigación.

Así mismo al Dr. Nicacio Cruz Huerta por sus facilidades y sugerencias realizadas en esta investigación

Al Laboratorio de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, por el apoyo en la medición de las variables fisiológicas.

A los Ing. Wendy Alicia Apaez Barrios y al Ing. Andrés Alberto Valenzuela Antelo quienes siempre permanecieron dispuestos en ayudar desde el inicio de esta investigación y brindar de igual forma su amistad. También se agradece a la M.C María de la Luz Riviello Flores y a la Ing. Atzintlali Martínez Martínez por su apoyo.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Miguel Antonio Cisneros Sallas y María Magdalena Alemán Soto quienes han logrado sacar adelante siempre a nuestra familia, quienes siempre fueron un ejemplo a seguir y que mostraron que con esfuerzo nada es inalcanzable.

A mis hermanos quienes siempre han brindado su apoyo durante este trayecto de mi vida.

A mis profesores de quienes aprendí mucho en aula durante el transcurso de mis estudios.

Al Dr. Cesar San Martin Hernández a quien considero un amigo y ejemplo a seguir, por su calidad humana, dedicación, tiempo y compromiso a esta investigación.

Al Dr. Manuel Sandoval Villa quien demostró siempre su compromiso y apoyo durante el transcurso de esta investigación.

A todos los nuevos amigos que hice durante mi periodo de maestría y a todas aquellas personas con las que compartí momentos de trabajo.

Sinceramente

**RICARDO ANTONIO CISNEROS ALEMAN**

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTAS DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
Objetivos .....	3
Hipótesis.....	3
CAPÍTULO 1. EFECTO DEL VANADIO SOBRE ASPECTOS MORFOLÓGICOS Y FISIOLÓGICOS EN ARÁNDANO ( <i>Vaccinium corimbosum</i> L.) .....	4
1.1 RESUMEN.....	4
1.2 ABSTRACT .....	5
1.3 INTRODUCCIÓN .....	6
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	8
1.4.1. Diseño experimental y tratamientos .....	8
1.4.2. Condiciones del cultivo .....	9
1.4.3. Variables evaluadas .....	9
1.4.3.1. Longitud radical.....	9
1.4.3.2. Volumen radical.....	9
1.4.3.3. Tasa fotosintética.....	9
1.4.3.4. Tasa de transpiración .....	10
1.4.3.5. Biomasa húmeda y seca de hoja, tallo, raíz y fruto .....	10
1.4.4. Análisis estadístico .....	10
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
1.5.1. Longitud radical.....	11
1.5.2. Volumen radical .....	13
1.5.3. Tasa fotosintética.....	14
1.5.4. Tasa de transpiración.....	15
1.5.5. Peso fresco y seco de hoja, tallo, raíz y fruto .....	15
1.6 CONCLUSIONES .....	18

CAPÍTULO II. MODIFICACIONES NUTRIMENTALES EN EL ARÁNDANO	
( <i>Vaccinium corymbosum</i> L.) CAUSADAS POR SUMINISTRO DE VANADIO .....	19
2.1 RESUMEN.....	19
2.2 ABSTRACT .....	20
2.3 INTRODUCCIÓN .....	21
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
2.4.1. Diseño experimental y tratamientos .....	23
2.4.2. Condiciones de cultivo .....	23
2.4.3. Variables evaluadas .....	23
2.4.3.1. Concentraciones de macronutrientes en hoja, tallo y raíz .....	24
2.4.3.2. Concentraciones de micronutrientes y vanadio .....	24
2.4.4. Análisis estadístico .....	24
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
2.5.1. Concentraciones de macronutrientes en hoja, tallo y raíz .....	25
2.5.1.1. Fósforo .....	26
2.5.1.2. Potasio.....	27
2.5.1.3. Calcio.....	27
2.5.1.4. Magnesio.....	28
2.5.2. Concentraciones de micronutrientes en hoja, tallo y raíz.....	28
2.5.2.1. Boro .....	28
2.5.2.2. Hierro.....	28
2.5.2.3. Manganeso.....	30
2.5.2.4. Cobre.....	30
2.5.2.5. Zinc .....	30
2.5.2.6. Molibdeno.....	30
2.5.3 Vanadio.....	31
2.6 CONCLUSIONES .....	34
CONCLUSIONES GENERALES.....	35
LITERATURA CITADA .....	36



## LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1.1. Valor-p en las características morfológicas y fisiológicas del cultivo de arándano expuesto al vanadio.....	11
Cuadro 1.2. Peso fresco y seco de hojas, tallos, raíz y fruto de plantas de arándano por efecto de concentraciones crecientes de vanadio en el ambiente radical y mediante aplicación foliar (20F).....	16
Cuadro 2.1. Valor-p del efecto del vanadio en las concentraciones nutrimentales de hoja, tallo y raíz en el cultivo de arándano. ....	25
Cuadro 2.2. Concentración de macronutrientes en hoja, tallo y raíz de arándano por efecto de la aplicación de V en la solución nutritiva o foliar (20F).....	26
Cuadro 2.3. Concentración de micronutrientes en hoja, tallo y raíz de arándano por efecto del suministro de V en la solución nutritiva o foliar (20F).....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Promedios semanales de temperaturas máximas (Tmax), y mínimas (Tmin), radiación fotosintéticamente activa (PAR, W m <sup>-2</sup> ) y humedad relativa durante el periodo de evaluación experimental de marzo a mayo de 2021. ....	8
Figura 1.2. Longitud radical del cultivo de arándano expuesto al vanadio a 0, 20, 40, 80, 160 y 20F (aplicación foliar) μM, a los 28 y 66 días después de la aplicación de tratamientos. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05) dentro de cada fecha de muestreo. ....	12
Figura 1.3. Comparación visual de los efectos de la aplicación de vanadio a los 66 días después de aplicados los tratamientos: (a) Testigo vs. 20 μM V vía foliar; (b) Testigo vs. 160 μM V. ....	13
Figura 1.4. Volumen radical del cultivo de arándano expuesto al vanadio a 0, 20, 40, 80, 160 y 20F (aplicación foliar) μM, a los 28 y 66 días después de la aplicación de tratamientos. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05). ....	14
Figura 1.5. Tasa fotosintética (a) y tasa de transpiración (b) del cultivo de arándano expuesto al vanadio a 0, 20, 40, 80, 160 y 20F (aplicación foliar) μM, a los 43 días después de la aplicación de tratamientos. Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05). ....	15
Figura 2.1. Efecto tóxico causado por el suministro de 160 μM de V. ....	25
Figura 2.2. Concentraciones de V en hoja (a), tallo (b) y raíz (c); y concentración de Mo en raíz (d) de plantas de arándano tratadas con V en solución o 20 μM de V vía foliar (20F). Barras ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey, p ≤ 0.05). ....	32

## INTRODUCCIÓN GENERAL

El arándano azul (*Vaccinium corymbosum* L.) es un arbusto leñoso perenne que se compone de brotes que emergen de yemas axilares de las plantas, sus hojas son simples, enteras o aserradas y con una disposición alterna a lo largo del tallo, con raíces que carecen de pelos absorbentes que se desarrollan en condiciones de pH ácido y originario de la zona norte de estados unidos (Retamales *et al.*, 2018). En México la superficie de arándano azul es de 4,909 ha, las cuales se encuentran mayormente en los estados de Jalisco, Michoacán y Sinaloa, con un valor de producción de 2,713 mdp (SIAP, 2019) lo cual indica ser un cultivo con alto valor económico para el país. En un contexto mundial México ocupa el quinto lugar siguiendo a Polonia y Canadá (FAO, 2020), en la producción de esta frutilla lo cual impacta positivamente para México. México exportó arándano en cantidades equivalentes a 291 millones de dólares a Estados Unidos y dió sustento a más de 60,000 trabajadores y sus familias, contribuyendo en la captación de divisas de acuerdo con la Secretaría de Economía (SE, 2021).

La población mundial y las variaciones del cambio climático han continuado aumentando con el paso de los años provocando que mejorar la producción agrícola en condiciones indeseables sea uno de los mayores retos para la agricultura (Von Wirén, 2011) lo que señala la necesidad de generar nuevas tecnologías que permitan aumentar la producción agrícola global, dentro de estas se encuentran aquellas sustancias llamadas bioestimulantes que de acuerdo con Du Jardin (2015), “son sustancias o microorganismos aplicados a las plantas con el objetivo de mejorar la eficiencia de la nutrición, tolerancia a estrés abiótico y/o características de calidad del cultivo, independientemente de su contenido de nutrientes”.

Dentro de las categorías presentes en los bioestimulantes existen los compuestos inorgánicos en el cual se encuentran elementos químicos que promueven el crecimiento vegetal, aunque que no son requeridos por las plantas. Marschner (2012) menciona al sodio (Na), selenio (Se), cobalto (Co), silicio (Si) y aluminio (Al), como elementos estimulantes del crecimiento vegetal. Sin embargo, Alcántar *et al.* (2016) agregan al cerio (Ce), lantano (La), titanio (Ti), yodo (I) y vanadio (V), como elementos promotores de la resistencia a factores bióticos y abióticos limitantes del metabolismo vegetal.

El V es un metal de transición que está ganando interés debido a sus diversas aplicaciones industriales como en aceros, pigmentos, catalizadores y fármacos (Wu *et al.*, 2021). Este representa el quinto elemento de transición más abundante en el planeta con concentraciones similares a las del zinc (Zn), la abundancia de este catión sobre la corteza terrestre es debido a la minería, fundición de metales, combustión de combustibles fósiles y a su contenido en fertilizantes fosfatados (Aihemaiti *et al.*, 2019). La especiación del V es dependiente de distintos factores como el potencial redox (Eh), el pH y contenido de materia orgánica (MO), mismos que afectan la solubilidad de este elemento; a pH neutro puede existir en dos estados de oxidación (IV y V) los cuales son absorbidos por las plantas mayormente por transportadores utilizados en la absorción de elementos esenciales, sin embargo, dicha absorción de V es dependiente de la especie vegetal (Chen *et al.*, 2021; Aihemaiti *et al.*, 2019; Alcántar *et al.*, 2016).

Los mecanismos por los cuales el V ha sido considerado como elemento benéfico para las plantas no son completamente entendidos, pero diversas investigaciones muestran mejoras fisiológicas, morfológicas y nutrimentales como contenidos de clorofila, aumento de la biomasa húmeda y seca, mejoramiento del sistema antioxidante, crecimiento radical, volumen radical, contenido de azúcares, absorción de nutrientes y concentración de aminoácidos (Vats, 2018). Sin embargo, los reportes de los efectos de este elemento en las plantas son contradictorias en los aspectos morfológicos y bioquímicos antes indicados, debido a la especiación química del V, la especie vegetal y la concentración de V en la solución (Aihemaiti *et al.*, 2019).

Existen investigaciones en arándano con Cd y Al (Chen *et al.*, 2020; Cárcamo *et al.*, 2019) ambos elementos reconocidos como benéficos pero ambas investigaciones mostraron efectos perjudiciales en plantas de arándano. Hasta ahora, no existe literatura respecto al uso de V sobre plantas de arándano, por tanto, abre la oportunidad de investigar y conocer las concentraciones óptimas de este elemento que permitan utilizar al V como un bioestimulante en varios cultivos, esto debido a las diferentes respuestas obtenidas de varias concentraciones de V.

## Objetivos

### General

- Evaluar el impacto de la concentración y forma de aplicación de V en las características morfológicas, fisiológicas y nutrimentales del arándano en condiciones de hidroponía.

### Específicos

- Evaluar el efecto de concentraciones de V a 0, 10, 20, 40, 80, 160  $\mu\text{M}$  en la solución nutritiva (durante todo el experimento) y 20  $\mu\text{M}$  aplicado de forma foliar cada 15 d en la longitud y volumen radical, el peso húmedo y seco (hoja, tallo, raíz y fruto), así como la tasa fotosintética y transpiratoria del cultivo de arándano.
- Analizar el efecto de V en el estatus nutrimental de hoja, tallo y raíz del arándano.
- Determinar morfológicamente, nutrimentalmente y fisiológicamente las concentraciones y métodos de aplicación de V más adecuados para el arándano.

## Hipótesis

### General

- El suministro de concentraciones crecientes ya sea en la solución nutritiva o aplicado de forma foliar, afecta las características morfológicas, fisiológicas y nutrimentales del cultivo de arándano.

### Específicas

- El suministro de concentraciones crecientes de V de 0 a 160  $\mu\text{M}$  en la solución nutritiva y/o mediante su aplicación foliar al arándano impacta positivamente hasta un nivel óptimo en las características morfológicas y fisiológicas del cultivo.
- El tipo de aplicación y concentración utilizada modifica los aspectos nutrimentales positivamente.
- La aplicación foliar de V (20  $\mu\text{M}$ ), permite detectar las mayores expresiones morfológicas, fisiológicas y nutrimentales del cultivo.

# **CAPÍTULO 1. EFECTO DEL VANADIO SOBRE ASPECTOS MORFOLÓGICOS Y FISIOLÓGICOS EN ARÁNDANO (*Vaccinium corimbosum* L.)**

## **1.1 RESUMEN**

El vanadio (V) es un metal pesado de transición con varios estados de oxidación, considerado no esencial que tiene efectos tóxicos y benéficos, sin embargo, es desconocido el efecto fisiológico en plantas de arándano, por lo tanto, el presente trabajo consistió en evaluar el efecto de 7 concentraciones de V ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) en solución nutritiva (0, 20, 30, 40, 80 y 160  $\mu\text{M}$ ) y foliar (20  $\mu\text{M}$ ) en un diseño completamente al azar con 3 repeticiones. A los 28 y 66 días después de aplicados los tratamientos (ddat) se evaluaron longitud de raíz y volumen radical, mientras que a los 43 ddat se registraron las tasas fotosintéticas y de transpiración; solo el peso de materia fresca y seca (hoja, tallo, raíz y fruto) se evaluó al final del experimento. Con excepción del volumen radical (28 ddat) y peso seco de raíz, el suministro de V en arándano afectó las variables morfológicas y fisiológicas. Las aplicaciones foliares de V incrementaron 66% el volumen radical (66 ddat), respecto al testigo (0  $\mu\text{M}$ ). Las concentraciones de 80 y 160  $\mu\text{M}$  de V redujeron en 81 y 99% la materia fresca de frutos respectivamente comparadas con el testigo de igual forma ocurrió con la materia seca del fruto reduciéndose en 63 y 99%, la tasa de transpiración en 60 y 68% y longitud de raíz (66 ddat) en 27 y 43%. El V foliar (20  $\mu\text{M}$ ) aumentó 76% la tasa fotosintética respecto al testigo, pero disminuyó del 93 al 100%, en concentraciones en la solución nutritiva entre 40 - 160  $\mu\text{M}$  de V. Dependiendo de la concentración y forma de aplicación de V, las características morfológicas y fisiológicas se afectan tanto positiva como negativamente.

***Palabras clave:*** Biomasa; Fotosíntesis; Vanadio.

## 1.2 ABSTRACT

Vanadium (V) is a transition heavy metal with different oxidation states considered not essential that has beneficial and toxic effects, nevertheless, its physiological effect on blueberry remains unknown, thus, this work consisted in evaluating the effect of seven V levels ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) in nutrient solution (0, 20, 30, 40, 80 y 160  $\mu\text{M}$ ) and a foliar spray (20  $\mu\text{M}$ ) in a completely randomized experimental design with 3 repetitions. Length and volume of roots were evaluated 28 and 66 days after treatments (dat), while 43 dat photosynthesis and transpiration rates were recorded, only fresh and dry biomass (leaf, stem, root and fruit) were evaluated at the end of the experiment. V supply in blueberry plants affected morphological and physiological variables, except for root volume (28 dat) and root dry biomass. Foliar sprays of V increased root volume (66 dat) in 66% compared with control treatment. V concentrations of 80 and 160  $\mu\text{M}$  reduced fresh biomass of fruits in 81 and 99% respectively when were compared with control treatment same occurred with dry biomass of fruits reducing 63 and 99%, transpiration rate 60 and 68% and root length (66 dat) 27 and 43%. Foliar sprays with V increased 76% photosynthetic rate compared with control treatment but decreased from 93 to 100% when V levels ranged from 40 to 160  $\mu\text{M}$  contained in nutrient solution. Morphological and physiological characteristics were affected positively and negatively depending on the concentration and form of application of V.

**Key words:** *Biomass; Photosynthesis; Vanadium.*

### 1.3 INTRODUCCIÓN

El vanadio (V) es un metal de transición con una concentración en la corteza terrestre de aproximadamente  $110 \text{ mg kg}^{-1}$ , presenta varios estados de oxidación ( $\text{V}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{V}^{4+}$  y  $\text{V}^{5+}$ ) (Anke, 2004; White, 2016).

El V es un elemento no esencial para las plantas que ha mostrado tener efectos tóxicos (daño celular, limitación de absorción de fosfatos, enanismo, anormalidades en raíz, disminución del contenido de clorofilas, absorción de agua, etc.). Los efectos visibles de toxicidad dependen de la especie, aunque como regla general,  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  de peso de materia seca es considerada tóxica para la mayoría de especies (Nawaz *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2017; Altaf *et al.*, 2020; Aihemaiti *et al.*, 2019). Sin embargo, en concentraciones aproximadas a los  $5 \mu\text{M}$ , se ha encontrado que el V puede promover aumento del peso y altura de planta, aceleración de la floración, incremento en la concentración de aminoácidos y azúcares tanto en hojas como en raíces, mayor concentración de nutrientes en tallos y aumento de la concentración de clorofila 'a' en hojas (García *et al.*, 2018; Aihemaiti *et al.*, 2019; Saco *et al.*, 2012; Akoumianaki *et al.*, 2015).

Hasta ahora, los estudios sobre el efecto agronómico del V en especies de interés agrícola son escasos. La literatura sobre el comportamiento fisiológico y morfológico del cultivo de arándano expuesto a concentraciones de este elemento es nula, aunque existe evidencia del efecto de otros metales pesados como cadmio (Cd) con efectos perjudiciales en el crecimiento de las plantas de arándano mientras que concentraciones similares de plomo (Pb) no afectan al crecimiento (Chen *et al.*, 2020), el aluminio (Al) por su parte disminuye la tasa fotosintética en distintos cultivares de arándano (Cárcamo *et al.*, 2019). El arándano es una especie importante que se cultiva principalmente para exportación del fruto, actividad que reactiva las actividades económicas y genera el ingreso de divisas al país. En los últimos dos lustros, el cultivo de arándano en México ha presentado un incremento hasta alcanzar actualmente las 4,908.88 ha (SIAP, 2019).

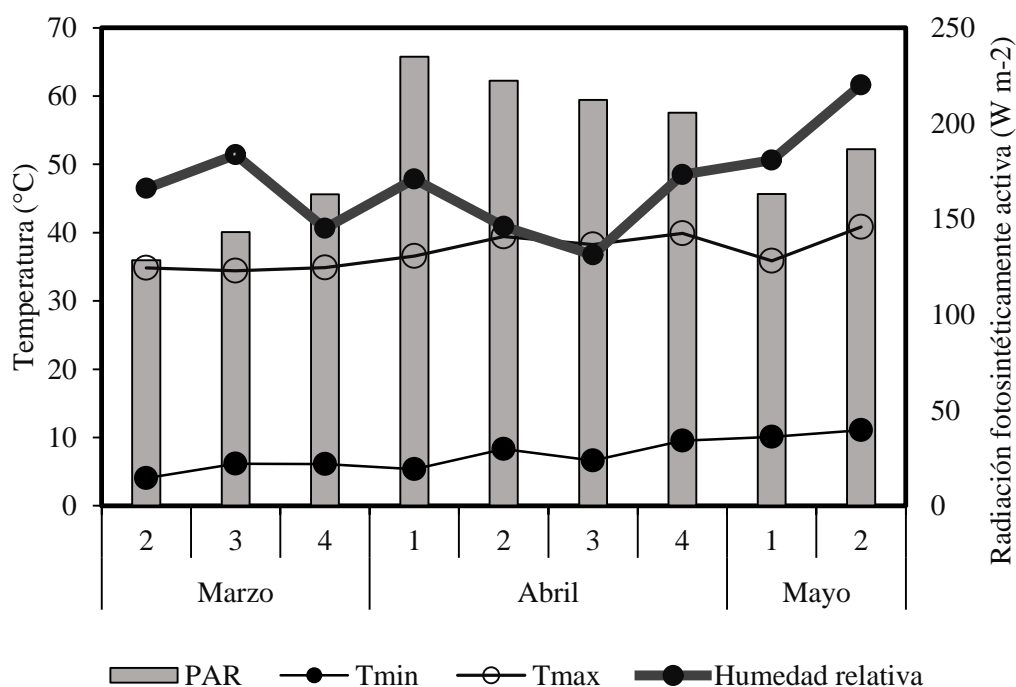
A pesar de la importancia de esta especie en la actividad agrícola, hasta ahora poco se ha explorado con estudios que involucren el efecto benéfico o tóxico del V en la producción de arándano. Esta investigación tuvo como hipótesis que la exposición del cultivo de arándano a distintas concentraciones de V, pueden mejorar los parámetros fisiológicos y morfológicos importantes con impacto en la producción vegetal. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto



tanto de concentraciones crecientes de V en la solución nutritiva, como en aplicación foliar en el crecimiento y comportamiento fisiológico del cultivo de arándano.

## 1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de plástico UV-720 con 85% de transmitancia del Área de Nutrición Vegetal del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, localizado a 19° 43' de latitud norte, 98° 90' de longitud oeste y 2250 m de altitud. En el invernadero se registraron datos de temperatura y radiación solar utilizando sensores DHT-22 para temperatura y BH1750 para radiación solar. Los datos climáticos se reportan como promedios semanales y la radiación solar corresponde a valores promediados entre 12:00 y 14:00 h (Figura 1.1). Para esta investigación se utilizaron plantas de arándano cv. Biloxi.



**Figura 1.1. Promedios semanales de temperaturas máximas (Tmax), y mínimas (Tmin), radiación fotosintéticamente activa (PAR, W m<sup>-2</sup>) y humedad relativa durante el periodo de evaluación experimental de marzo a mayo de 2021.**

### 1.4.1. Diseño experimental y tratamientos

Este trabajo se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar en el cual se evaluaron siete tratamientos con tres repeticiones cada uno. Los tratamientos evaluados fueron las concentraciones de V (aplicado como NH<sub>4</sub>VO): 0 (testigo), 10, 20, 40, 80 y 160 µM, suministrados en la solución nutritiva del contenedor y un tratamiento sin V en el medio de cultivo, mediante el

cual este elemento se aplicó en una solución foliar a 20  $\mu\text{M}$ , cada 14 días. La unidad experimental fue una planta de arándano de nueve meses de edad, cultivada en un contenedor con 5 L de solución nutritiva.

#### **1.4.2. Condiciones del cultivo**

Plantas de arándano cv. Biloxi de 6 meses de edad fueron expuestas por 3 meses a cultivo en solución en contenedores de 5 L. La oxigenación de la solución nutritiva se hizo con una compresora de pecera (Sunsun<sup>®</sup>, ACO-002, China) a intervalos de 4 h durante 20 min. El pH de la solución en cada contenedor fue ajustado diariamente con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{NaOH}$ , y la solución se renovó cada 7 días.

La nutrición del cultivo se basó en la solución nutritiva Steiner (1984) ajustada al 50% y las concentraciones iónicas ( $\text{mol}_c \text{m}^{-3}$ ) siguientes:  $\text{Ca}^{2+}$ : 3.48,  $\text{Mg}^{2+}$ : 1.55,  $\text{K}^+$ : 2.71,  $\text{NO}_3^-$ : 3.67,  $\text{SO}_4^{2-}$ : 5.7,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ : 0.81, con modificaciones en  $\text{NH}_4^+$ : 2.44; mientras que los micronutrientes en  $\mu\text{M}$  fueron Fe: 53.72, Mn: 25.48, Zn: 4.28, B: 23.89, Cu: 1.76 y Mo: 1.084.

#### **1.4.3. Variables evaluadas**

El arándano es una planta de crecimiento lento, por tanto, en la determinación de las variables se realizaron mediciones mensuales, registrando a los 28 y 66 días después de aplicación de tratamiento (ddat); mientras que las mediciones fisiológicas se hicieron a los 43 ddat.

##### **1.4.3.1. Longitud radical**

Esta variable se evaluó desde la base del tallo a la punta de la raíz más larga mediante un vernier digital (Truper<sup>®</sup>, México) registrando la longitud en cm.

##### **1.4.3.2. Volumen radical**

El volumen radical en  $\text{cm}^3$  se midió con base al principio de Arquímedes de desplazamiento de volumen en una probeta graduada.

##### **1.4.3.3. Tasa fotosintética**

La tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) se midió utilizando un dispositivo portátil para medir fotosíntesis LI-6400 (Li-Cor<sup>®</sup>, Lincoln, NE, USA).

#### **1.4.3.4. Tasa de transpiración**

La tasa de transpiración ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) se obtuvo utilizando un dispositivo portátil para medir fotosíntesis LI-6400 (Li-Cor<sup>®</sup>, Lincoln, NE, USA).

#### **1.4.3.5. Biomasa húmeda y seca de hoja, tallo, raíz y fruto**

Una vez alcanzados los 66 ddat, la planta se separó en hojas, tallos, frutos y raíz. Cada órgano se pesó (g/planta) por separado utilizando una balanza digital (OHAUS<sup>®</sup>, Adventurer pro, USA), para el caso de la raíz, primero fueron secadas con papel absorbente y posteriormente pesadas.

Los tallos, hojas, raíces y frutos separados de cada planta, se secaron en una estufa (Riosa<sup>®</sup>, HCF-125D, México) con circulación de aire a 70 °C por 72 h hasta peso seco constante para inmediatamente después registrar el peso de cada órgano en g/planta.

#### **1.4.4. Análisis estadístico**

Los datos obtenidos previamente se analizaron con las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene ( $p \leq 0.05$ ), los cuales resultaron razonablemente normales y con homogeneidad de varianzas. Después se hizo análisis de varianza de una vía de clasificación donde el factor de estudio fue la concentración de V (7 niveles) y las comparaciones de promedios se efectuaron con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Los análisis antes descritos se realizaron con las librerías “Rcmdr” y “Agricolae” del programa estadístico R x64 4.1.1. (2021).

## 1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A excepción de la biomasa seca de raíz y volumen radical (28 ddat), la longitud radical, volumen radical (66 ddat), tasa fotosintética, tasa de transpiración, materia fresca de hoja, tallo, raíz y fruto; así como materia seca de hoja, tallo y fruto mostraron efectos significativos por la exposición del cultivo de arándano al V en condiciones hidropónicas (Cuadro 1.1).

**Cuadro 1.1. Valor-p en las características morfológicas y fisiológicas del cultivo de arándano expuesto al vanadio.**

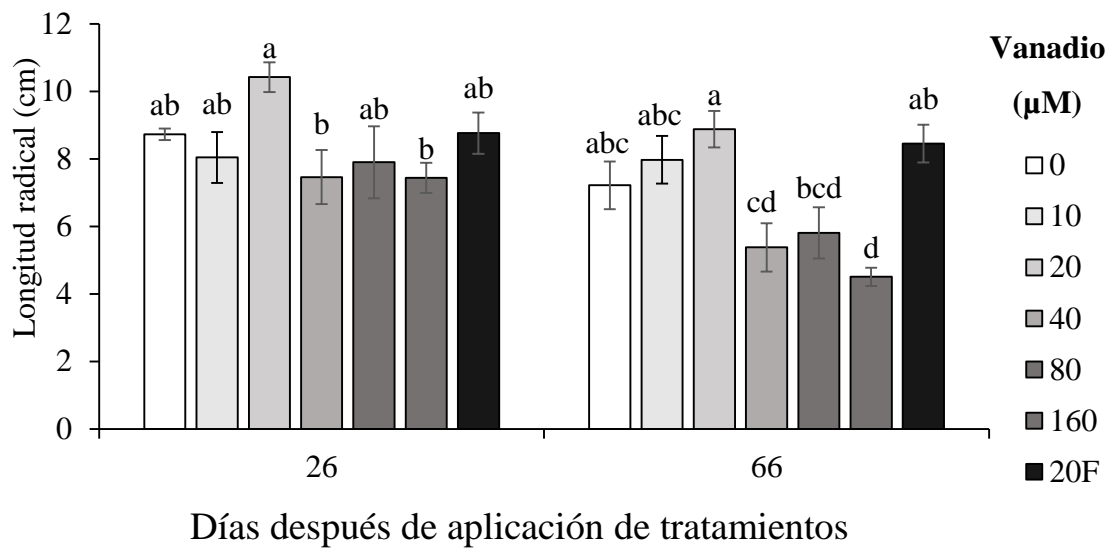
Variable	ddat	Valor-p
	28	0.0113*
Longitud radical	66	<0.001*
	28	0.2756
Volumen radical	66	<0.00001*
Tasa fotosintética	43	<0.00001*
Tasa de transpiración	43	<0.0001*
Peso fresco de hoja	66	0.005*
Peso fresco de tallo	66	<0.0001*
Peso fresco de raíz	66	<0.0001*
Peso fresco de fruto	66	<0.0001*
Peso seco hoja	66	0.02*
Peso seco de tallo	66	0.002*
Peso seco de raíz	66	0.5397
Peso seco de fruto	66	<0.0001*

\* Significativo a  $P \leq 0.05$ . ddat, días después de aplicados los tratamientos.

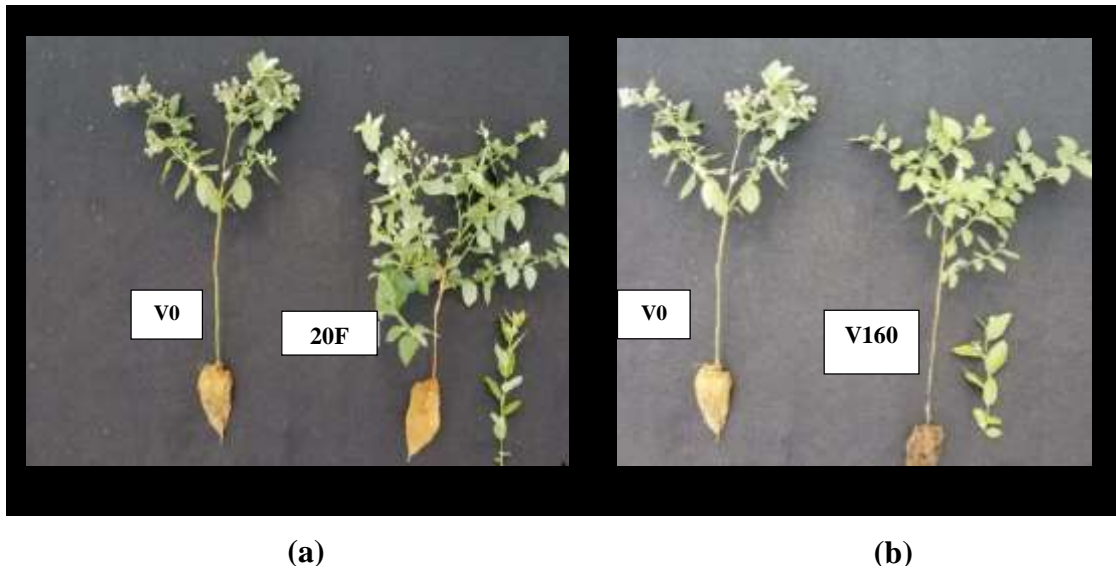
### 1.5.1. Longitud radical

En las dos fechas de evaluación se observaron efectos del V sobre la longitud radical de arándano (Cuadro 1.1). A los 28 y 66 ddat, esta variable experimentó un incremento máximo cuando el cultivo de arándano se expuso a 20  $\mu\text{M}$  de V en la solución nutritiva y fue 40 (28 ddat) y 97% (66 ddat) estadísticamente superior, respecto al tratamiento de mayor suministro (160  $\mu\text{M}$ ). Resultados equivalentes pueden lograrse con V a concentraciones menores o iguales a 20  $\mu\text{M}$  aplicado ya sea

en la solución nutritiva o vía foliar (Figura 1.2). En tabaco se ha reportado reducción del crecimiento radical del 50 al 80% desde 0.01 hasta 4 mg L<sup>-1</sup> (0.19 -78.52 μM) de V en la solución nutritiva (Wu *et al.*, 2021); mientras que en plantas de tomate y mostaza china (*B. campestris ssp. Chinensis var. parachinensis*) la disminución del crecimiento radical se observó entre 20 (392.61 μM) y 10 mg de V L<sup>-1</sup> (196.3 μM) (Vachirapatama *et al.*, 2011). En general, a los 66 ddat, concentraciones mayores a 20 μM de este metal en el ambiente radical, la raíz presentó coloraciones pardo oscuro (Figura 1.3b), asociados a efectos fitotóxicos similar a lo encontrado por Wu *et al.* (2021).



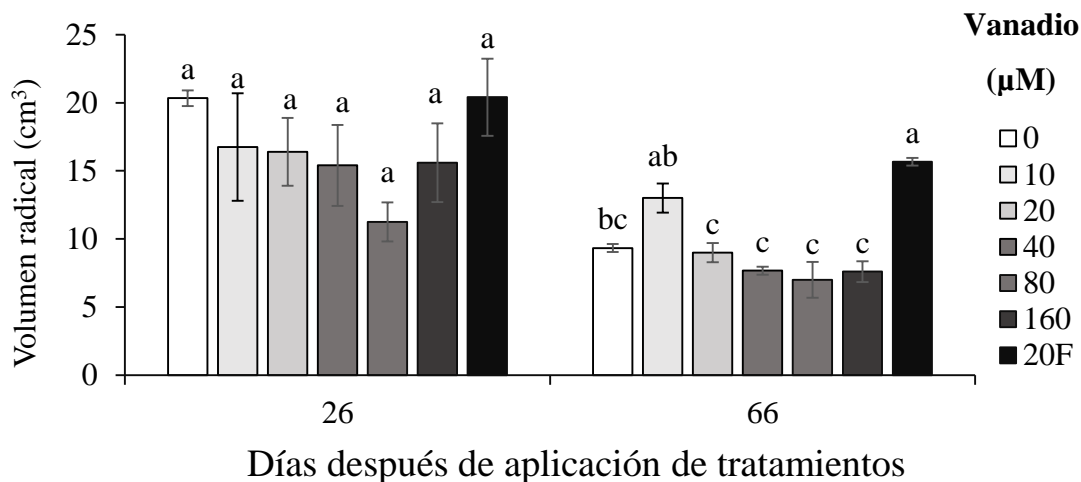
**Figura 1.2. Longitud radical del cultivo de arándano expuesto al vanadio a 0, 20, 40, 80, 160 y 20F (aplicación foliar) μM, a los 28 y 66 días después de la aplicación de tratamientos.** Promedios en barras ± desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) dentro de cada fecha de muestreo.



**Figura 1.3. Comparación visual de los efectos de la aplicación de vanadio a los 66 días después de aplicados los tratamientos: (a) Testigo vs. 20 µM V vía foliar; (b) Testigo vs. 160 µM V.**

### **1.5.2. Volumen radical**

A los 28 ddat el suministro de V no afectó el volumen desplazado de raíz, caso contrario se observó a los 66 ddat, donde aplicaciones foliares (20 µM) incrementaron el volumen radical 66% respecto al testigo (Figura 1.4). Resultados similares se han reportado por el suministro de concentraciones de V en la solución nutritiva de cultivo en chile entre 5 y 10 µM, los cuales aumentaron 40 y 54% el crecimiento radical vegetal, respectivamente (García *et al.*, 2018). Asimismo, la exposición de plántulas de arroz a 35 y 70 mg L<sup>-1</sup> de V (687.01-1374.16 µM) disminuyó del 12 al 75% el volumen radical (Altaf *et al.*, 2020).

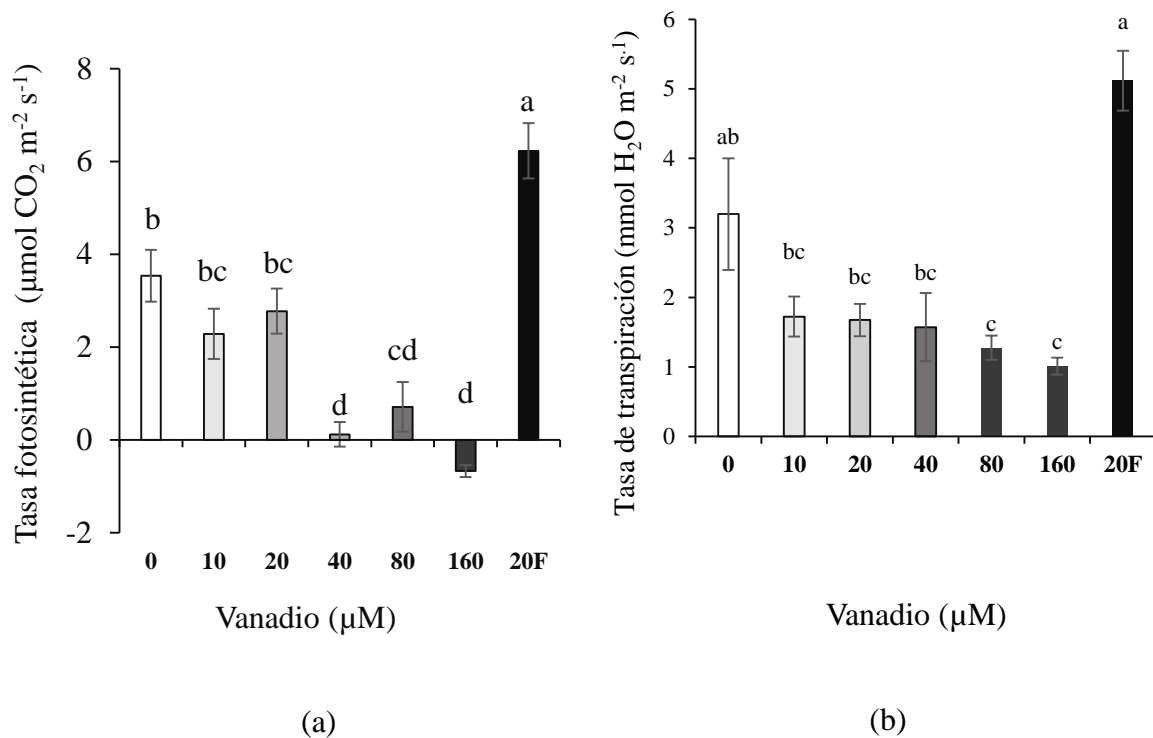


**Figura 1.4.** Volumen radical del cultivo de arándano expuesto al vanadio a 0, 20, 40, 80, 160 y 20F (aplicación foliar)  $\mu\text{M}$ , a los 28 y 66 días después de la aplicación de tratamientos. Promedios en barras  $\pm$  desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### 1.5.3. Tasa fotosintética

A los 43 ddat los efectos negativos de V fueron evidentes puesto que conforme la concentración aumentó de 40 a 160  $\mu\text{M}$  en la solución nutritiva, disminuyó de 93 a 100% la tasa fotosintética (TF) respecto al testigo (Figura 1.5a). Concentraciones de 35 y 70  $\text{mg L}^{-1}$  (687.01-1374.16  $\mu\text{M}$ ) de V en la solución nutritiva de cultivo del arroz, disminuyeron la TF 52.6 y 65.5%, respectivamente, condición asociada al efecto tóxico impuesta por la exposición de altas concentraciones de metales pesados durante el cultivo (Altaf *et al.*, 2020; Cárcamo *et al.*, 2019). Mientras que, aplicaciones foliares (20  $\mu\text{M}$  de V) produjeron un efecto positivo dado que elevaron 76% la TF, en comparación en plantas del tratamiento testigo. La presencia del V en raíz se asocia al efecto negativo del aparato fotosintético debido a la competencia por su analogía a los fosfatos (Pi) y al inhibir la bomba de protones de la membrana plasmática y desencadenar una serie de reacciones fisiológicas y desbalances nutrimentales involucradas con Pi (Aihemaiti *et al.*, 2019).





**Figura 1.5. Tasa fotosintética (a) y tasa de transpiración (b) del cultivo de arándano expuesto al vanadio a 0, 20, 40, 80, 160 y 20F (aplicación foliar)  $\mu\text{M}$ , a los 43 días después de la aplicación de tratamientos. Promedios en barras  $\pm$  desviación estándar con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).**

#### 1.5.4. Tasa de transpiración

La tasa de transpiración (TT) se redujo a medida que aumentaron las concentraciones de V. Los tratamientos 80 y 160  $\mu\text{M}$  disminuyeron estadísticamente la tasa de transpiración 60.1 y 68.4% con respecto al testigo (Figura 1.5b). La concentración de 70  $\text{mg L}^{-1}$  (1374.16  $\mu\text{M}$ ) de V en la solución nutritiva en arroz, disminuyeron la tasa de transpiración en un 91.8% (Altaf *et al.*, 2020). La mayor TT se encontró en el tratamiento 20F y fue estadísticamente diferente a los tratamientos con V suministrado vía raíz y con un aumento de 45% respecto al testigo, aunque sin diferencias significativas.

#### 1.5.5. Peso fresco y seco de hoja, tallo, raíz y fruto

La aplicación de 10  $\mu\text{M}$  de V en la solución nutritiva generó los mayores valores en peso fresco de hoja y raíz (51.3 y 23.3% mayor, respectivamente). Sin embargo, esto no resultó significativo

en términos estadísticos. La concentración de 10  $\mu\text{M}$  mejoró 2.3 y 2.1 veces respecto a mayores concentraciones (80 y 160  $\mu\text{M}$ ) en peso fresco y seco de hoja. Aplicaciones de V (5  $\mu\text{M}$ ) en chile morrón aumentaron 26.3 y 37.5% el peso de hoja y raíz respectivamente (García *et al.*, 2018). En este estudio, la concentración de 160  $\mu\text{M}$  de V redujo 33.6, 32.2 y 37.6% el peso fresco de hoja, tallo y raíz respectivamente cuando es comparado con el testigo. Patrones similares se han reportado en chile donde la concentración de aplicación más alta (15  $\mu\text{M}$  de V) redujo 42, 30.7 y 33.3% el peso en fresco de hoja, tallo y raíz respectivamente, pero sin diferencias significativas respecto al testigo (García *et al.*, 2018). Resultados similares se observan en la biomasa seca de hoja y tallo, reduciendo el peso de estos en la concentración más alta (160  $\mu\text{M}$ ) (Cuadro 1.2).

**Cuadro 1.2. Peso fresco y seco de hojas, tallos, raíz y fruto de plantas de arándano por efecto de concentraciones crecientes de vanadio en el ambiente radical y mediante aplicación foliar (20F).**

Vanadio ( $\mu\text{M}$ )	Hoja	Tallo	Raíz	Fruto	Total
Peso fresco (g/planta)					g
0	11.54 $\pm$ 0.15ab	6.61 $\pm$ 0.5abc	13.64 $\pm$ 0.67ab	10.25 $\pm$ 1.73a	42.04
10	17.47 $\pm$ 1.53a	8.76 $\pm$ 0.79ab	16.83 $\pm$ 2.14a	13.25 $\pm$ 2.66a	56.58
20	13.12 $\pm$ 0.71ab	9.38 $\pm$ 0.78a	12.27 $\pm$ 1.14ab	14.52 $\pm$ 1.22a	49.29
40	10.99 $\pm$ 1.34ab	8.95 $\pm$ 0.95a	9.18 $\pm$ 0.37b	11.2 $\pm$ 1.18a	40.32
80	8.2 $\pm$ 2.08b	5.55 $\pm$ 1.1bc	9.07 $\pm$ 1.34b	1.92 $\pm$ 0.71b	24.74
160	7.66 $\pm$ 1.08b	4.48 $\pm$ 0.63c	8.5 $\pm$ 1.10b	0.06 $\pm$ 0.07b	20.70
20F	12.73 $\pm$ 2.48ab	8.11 $\pm$ 0.45ab	15.85 $\pm$ 1.31a	13.7 $\pm$ 1.49a	50.39
DHS	7.25	3.3	5.71	7.16	
Peso seco (g/planta)					
0	4.90 $\pm$ 0.92ab	2.79 $\pm$ 0.21ab	1.54 $\pm$ 0.04a	1.55 $\pm$ 0.16a	10.78
10	7.43 $\pm$ 0.67a	4.16 $\pm$ 0.54a	1.72 $\pm$ 0.17a	1.44 $\pm$ 0.09a	14.75
20	5.62 $\pm$ 0.34ab	4.05 $\pm$ 0.35a	1.39 $\pm$ 0.17a	2.18 $\pm$ 0.17a	13.24
40	4.09 $\pm$ 1.04ab	4.04 $\pm$ 0.42a	1.36 $\pm$ 0.20a	1.8 $\pm$ 0.2a	11.29
80	3.52 $\pm$ 0.92b	2.59 $\pm$ 0.55ab	1.41 $\pm$ 0.15a	0.57 $\pm$ 0.13b	8.09
160	3.21 $\pm$ 0.46b	2.21 $\pm$ 0.3b	1.41 $\pm$ 0.2a	0.018 $\pm$ 0.013b	6.84
20F	5.45 $\pm$ 0.96ab	3.34 $\pm$ 0.23ab	1.6 $\pm$ 0.1a	1.77 $\pm$ 0.32a	12.16
DHS	3.82	1.66	0.66	0.85	

Promedios  $\pm$  desviación estándar con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

El peso fresco y seco total de plantas de tabaco sometidas a estrés por V en concentración de 4 mg  $\text{L}^{-1}$  (78.52  $\mu\text{M}$ ) disminuyeron en 25.4 y 44.3% respectivamente en relación al testigo (Wu *et al.*, 2021) lo que coincide con esta investigación donde a concentraciones altas de V disminuye la biomasa húmeda y seca.

La exposición de las plantas de arándano al V afectó la biomasa húmeda de raíz, pero no la biomasa seca (Cuadro 1.2). Estos resultados coinciden con la literatura, en el cual plantas de tomate

expuestas a concentraciones de  $80 \text{ mg L}^{-1}$  ( $1570.47 \text{ } \mu\text{M}$ ) de V disminuyeron significativamente el peso de materia fresca de raíz en un 54.4% pero sin afectar el peso de biomasa seca de raíz (Vachirapatama *et al.*, 2011). Al utilizar agua marcada  $^{18}\text{F}$  en plantas de sojas tratadas con  $500 \text{ } \mu\text{M}$  de V por 20 horas se demostró que se inhibía la absorción de agua (Furukawa *et al.*, 2001), lo que explica el fenómeno en cuestión. De acuerdo con Wu *et al.* (2021) la reducción de la absorción de agua en plantas de tabaco fue debido a una inhibición del crecimiento radical y una atenuación de la (TF) que resulta similar a lo obtenido en nuestra investigación, una disminución de la TF promueve de igual forma una baja producción de energía química traducida en crecimiento vegetal.

En general, cualquier estrés al que se exponen las plantas resultan en desordenes de  $\text{Ca}^{+2}$  y otras moléculas, lo cual impacta en el funcionamiento de acuaporinas que son responsables de movimientos de agua a cortas distancias, por tanto, más investigación es necesaria con el fin de comparar si este transporte de agua a corta distancia tiene un impacto significativo sobre los contenidos de agua en raíces con condiciones de estrés.

Las concentraciones de  $80$  y  $160 \text{ } \mu\text{M}$  de V en solución nutritiva disminuyeron  $81.2$  y  $99.5\%$  respectivamente el peso de frutos de las plantas de arándano (Cuadro 1.2). Estos resultados son similares a los encontrados en tomate con concentración de V de  $40$  y  $80 \text{ mg L}^{-1}$  ( $785.23 - 1570.47 \text{ } \mu\text{M}$ ), los cuales redujeron  $35.8$  y  $30.7\%$  respectivamente el peso de los frutos (Vachirapatama *et al.*, 2011).

En general la mayor cantidad de biomasa húmeda y seca se encontró en concentraciones de  $10 \text{ } \mu\text{M}$  de V, caso contrario ocurrió en las concentraciones máximas de V ( $160 \text{ } \mu\text{M}$ ).

## 1.6 CONCLUSIONES

La aspersión foliar de vanadio en arándano incrementó la tasa fotosintética y de transpiración, de igual forma aumenta el volumen de raíz. Caso contrario ocurre cuando el V se aplica en la solución nutritiva (80 y 160  $\mu\text{M}$ ), ya que se impacta negativamente a las plantas de arándano en tasa fotosintética, tasa de transpiración, longitud de raíz, volumen radical, peso fresco y seco de frutos.

Dependiendo de la concentración y forma de aplicación de V, las características morfológicas y fisiológicas se afectan tanto positiva como negativamente.

La aplicación foliar mejoró aspectos fisiológicos sin afectar aspectos morfológicos mientras que utilizar concentraciones altas en solución afecta negativamente aspectos fisiológicos y morfológicos.

## **CAPÍTULO II. MODIFICACIONES NUTRIMENTALES EN EL ARÁNDANO (*Vaccinium corymbosum* L.) CAUSADAS POR SUMINISTRO DE VANADIO**

### **2.1 RESUMEN**

Los ambientes donde se desarrollan las plantas no son exclusivos de elementos esenciales para ellas, en estos existen los llamados metales pesados como lo es el vanadio (V). Diversos estudios con distintas especies muestran modificaciones nutrimentales causadas por V, este efecto permanece desconocido en arándano, por lo tanto, la presente investigación evaluó el efecto de siete concentraciones de V ( $\text{NH}_4\text{VO}_3$ ) en solución nutritiva (0, 20, 30, 40, 80 y 160  $\mu\text{M}$ ) y foliar (20  $\mu\text{M}$ ) en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Una vez alcanzados los 66 días después de aplicados los tratamientos (ddat) se colectaron hojas recientemente maduras, tallos y raíces de cada planta. A excepción de N, el V modificó las concentraciones de los nutrientes en al menos un órgano de las plantas. El V dirigido al follaje benefició las concentraciones de Mn comparado al testigo (67%) en hoja, así como Ca (56%), Mg (40%), B (26%) y Mn (46%) en tallo y P (50%) en raíz. Sin importar la concentración de V en solución, se incrementaron hasta obtener valores máximos en las concentraciones de P (51%), Fe (270%) y Cu (230%) en raíz, pero reduce las concentraciones de Mo hasta un 82%. El uso de 160  $\mu\text{M}$  de V en solución aumenta las concentraciones de Mg respecto a al testigo (40%) en tallo de igual forma las de Ca (32%) y Zn (47%) en raíz, pero disminuye los niveles de K (35%) en este órgano. Todo suministro de V en solución aumentó en hoja, tallo y raíz las concentraciones de V hasta 3, 64 y 225 veces respectivamente. El utilizar V en distintas concentraciones y formas de aplicación estimuló la absorción de diversos nutrientes en distintos órganos.

***Palabras clave:*** Arándano, Elementos, Nutrición, Vanadio

## 2.2 ABSTRACT

Environments where plants grow are not exclusive with essential elements, there exist elements called heavy metals, like vanadium (V). Several studies with different species show nutritional modifications caused by V, nevertheless this effect remains unknowns in blueberries plants, thus, Current investigation evaluated different  $V(NH_4VO_3)$  doses in nutritive solution (0, 20, 30, 40, 80 y 160  $\mu M$ ) and foliar spray (20  $\mu M$ ) in a completely randomized experimental design with 3 repetitions for treatment. Once 66 days after initiated treatments (dait) had passed, recently mature leaf, stems and roots were collected from each plant. Except for N, V modified nutrient concentration in at least an organ. Foliar sprays containing V benefit leaf concentrations of Mn (67%), same as Ca (56%), Mg (40%), B (26%) y Mn (46%) in stems and P (50%) in roots. Any V concentration in solution enhances till reach maximum values of P (51%), Fe (270%) and Cu (230%) in roots but reduces Mo up to 6 times. Nutrient solution containing V (160  $\mu M$ ) increases concentration of Mg (40%) in stems, the same way did with Ca (32%) and Zn (47%) in roots but decreases K (35%) in this organ. All V supply in solution increased its concentration in leaves, stems and roots 3, 64 and 225 times respectively. Utilizing V in distinct concentration and apply methods stimulated various nutrients in distinct organs absorption.

**Key words:** *Blueberry; Elements; Nutrition; Vanadium.*

## 2.3 INTRODUCCIÓN

Los ambientes donde se desarrollan las plantas no son solo exclusivos de elementos esenciales, en ellos existen los llamados metales pesados que dependiendo de su concentración y disponibilidad tienen impacto sobre el desarrollo vegetal.

El vanadio (V) es un metal pesado de transición multivalente sensible a las condiciones de oxidoreducción que se encuentra en todas las plantas en bajas concentraciones. Su rol se ha mantenido en duda debido a las concentraciones en las que este se encuentra en las plantas y su dificultad para aislarlo en experimentos, altas concentraciones de este metal interrumpen el metabolismo vegetal inhibiendo enzimas clave, síntesis de proteínas y transporte de iones, por lo tanto, su papel benéfico o esencial aún permanece incierto (White *et al.*, 2016). La absorción de V por las plantas ocurre de forma pasiva y es altamente dependiente del pH del suelo, materia orgánica, potencial redox, contenidos de hierro (Fe), aluminio (Al) y otros metales con los que pueden coexistir y afectar su biodisponibilidad (García *et al.*, 2018; Aihemaiti *et al.*, 2019).

El arándano es un arbusto leñoso perenne considerado una planta calcífuga, es decir, adaptada a suelos ácidos en el intervalo de pH 4.2 a 4.55 y a medida que el pH disminuye, aumenta la disponibilidad de los metales pesados, entre ellos el V (Retamales *et al.*, 2018 y Aihemaiti *et al.*, 2019).

Dependiendo de la concentración de V, del tejido y del cultivo, se han encontrado incrementos o disminuciones en las concentraciones de elementos esenciales ya sea de macro o micronutrientes. En el cultivo de chile con suministro de V en solución (0-15 $\mu$ M), este disminuyó las concentraciones de K, Mg, Mn en hojas, incrementó las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Cu y B en tallo, mientras que en raíz se elevan las concentraciones de P, K, Ca, Mg, Cu y B (García *et al.*, 2018). En plantas de *Mentha pulegium* el uso de V (0- 785.23  $\mu$ M) disminuyó las concentraciones de Fe, Mn, Zn, Ca, K y Mg al igual que las de Fe, Zn y Ca en tallo y solo en raíz mejoró las concentraciones de Fe y Mg (Akoumianaki *et al.*, 2015). Al utilizar concentraciones de 0 a 785.23  $\mu$ M de V en plantas de albahaca (*Ocimum basilicum*) la concentración de Fe solo disminuyó en hojas, sin afectar el tallo y disminuyendo las concentraciones de Fe, Zn, Ca y Mg (Akoumianaki *et al.*, 2016), sin embargo, hasta ahora se desconocen las modificaciones nutrimentales que genera el suministro de V al cultivo de arándano. Con base en la poca

información que existe respecto al uso de V y condiciones de desarrollo del arándano, este trabajo se basó en la hipótesis de que la concentración y forma de aplicación de V, estimula la absorción nutrimental en distintos órganos de esta especie. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de concentración y forma de aplicación de V en la concentración nutrimental de arándano.



## 2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Plantas de arándano cv. Biloxi fueron tratadas con vanadio en un invernadero desde marzo a mayo del 2021, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. En este experimento, la temperatura y humedad relativa se registraron con el sensor DHT-22 (Smarg-Da<sup>®</sup>, México) y los datos se reportan como promedios semanales (Figura 1.1).

### 2.4.1. Diseño experimental y tratamientos

Esta investigación se realizó mediante un diseño completamente al azar, en la cual se evaluó el efecto de los tratamientos a base de concentraciones crecientes de V (0, 10, 20, 40, 80 y 160  $\mu\text{M}$ ) suministradas con  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  en la solución nutritiva (SN) y por vía foliar 20  $\mu\text{M}$  (cada 15 días), en el cultivo de arándano. Tres repeticiones por tratamiento fueron consideradas y la unidad experimental consistió en una planta de arándano por contenedor con 5 L de solución nutritiva.

### 2.4.2. Condiciones de cultivo

Plantas de arándano 'Biloxi' de 6 meses de edad se establecieron en un sistema de cultivo en solución al 50% de la composición nutritiva de Steiner (1984) modificada (relación  $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^+$  75%:25%), la cual tuvo una oxigenación de 20 min con intervalos de 4 h, utilizando una compresora de aire de pecera (Sunsun<sup>®</sup>, ACO-002, China) durante los 3 meses del periodo experimental. Diariamente se hizo el ajuste con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{NaOH}$  a  $\text{pH}=5$ . la solución nutritiva fue renovada semanalmente considerando la composición siguiente en  $\text{mol}_e \text{ m}^{-3}$ :  $\text{Ca}^{2+}$ : 3.48,  $\text{Mg}^{2+}$ : 1.55,  $\text{K}^+$ : 2.71,  $\text{NH}_4^+$ : 2.44,  $\text{NO}_3^-$ : 3.67,  $\text{SO}_4^{2-}$ : 5.7 y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ : 0.81; mientras que los micronutrientes ( $\mu\text{M}$ ) fueron Fe: 53.72, Mn: 25.48, Zn: 4.28, B: 23.89, Cu: 1.76 y Mo: 1.084.

### 2.4.3. Variables evaluadas

Una vez alcanzados los 66 días después de aplicados los tratamientos (ddat) se hizo el muestreo de plantas. Las plantas de arándano fueron separadas en raíz, tallo, fruto y hojas. Cada órgano se colocó en bolsas de papel para secado en una estufa (Riosa<sup>®</sup> HCF-125D, México) con circulación de aire a 70 °C por alrededor de 72 horas hasta obtener peso de materia seca constante. Después, cada órgano con excepción de frutos fue pulverizado en una licuadora domestica (Oster<sup>®</sup>, México) para realizar el análisis mineral posterior. Las hojas consideradas fueron aquellas que tenían una madurez reciente.

#### **2.4.3.1. Concentraciones de macronutrientes en hoja, tallo y raíz**

Las concentraciones de P, K, Ca, Mg, en  $\text{g kg}^{-1}$  de materia seca (ms) de hoja, tallo y raíz fueron determinadas mediante la digestión húmeda de tejido seco con una mezcla de ácidos perclórico-sulfúrico con una relación 2:1, los extractos obtenidos fueron analizados en un equipo de espectrometría de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (Agilent® 725 Series ICP-OES). El N fue extraído siguiendo el procedimiento antes indicado y mediante el método semimicro-Kjeldahl de acuerdo con Brenner (1965).

#### **2.4.3.2. Concentraciones de micronutrientes y vanadio**

Las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y V en  $\text{mg kg}^{-1}$  ms se determinaron también mediante digestión húmeda del tejido vegetal con la misma mezcla de ácidos perclórico-sulfúrico. Los extractos se analizaron en un equipo ICP-OES 725 Series (Agilent®, USA).

#### **2.4.4. Análisis estadístico**

El programa R x64 4.1.1, (2021) con las librerías “Rcmdr” y “agricolae” se usó para realizar el análisis estadístico. Previo al análisis de varianza se comprobó que los datos de las variables respuesta cumplieran con los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad (prueba de Levene) y cuando alguno de estos no fue satisfecho, se hizo transformación logarítmica. El análisis de varianza de una vía y las comparaciones de promedios se realizaron mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## 2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La exposición de plantas de arándano al V en la solución nutritiva o por vía foliar mostró distintos efectos en la concentración nutrimental de cada órgano vegetal evaluado. En hoja, los efectos del vanadio se observaron en las concentraciones de P, B, Fe, Mn y V; en tallo N, P y Cu no tuvieron efectos por el V; mientras que, en raíz, la exposición del V afectó la mayoría de los nutrientes excepto en N, B y Mn (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1. Valor-p del efecto del vanadio en las concentraciones nutrimentales de hoja, tallo y raíz en el cultivo de arándano.**

Elemento	Hoja	Tallo	Raíz
	-----Valor -p-----		
Nitrógeno	0.0775	0.0749	0.5544
Potasio	0.0551	0.0012*	0.0127*
Fósforo	0.0024*	0.2947	0.0051*
Calcio	0.4351	<0.0001*	<0.0001*
Magnesio	0.1888	<0.0001*	0.0107*
Boro	0.0091*	<0.0001*	0.8172
Cobre	0.3659	0.0537	<0.0001*
Hierro	0.0065*	0.0083*	0.0003*
Manganeso	0.0018*	<0.0001*	0.3974
Zinc	0.9385	0.0211*	0.0001*
Molibdeno	ND	ND	<0.0001*
Vanadio	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*

ND: No detectado, \* Significativo a  $p \leq 0.05$

### 2.5.1. Concentraciones de macronutrientes en hoja, tallo y raíz

El uso de V aplicado en solución en concentraciones de 160  $\mu\text{M}$  causó efectos tóxicos (Figura 2.1) que inhibieron el crecimiento de las plantas de arándano, por tanto, fue imposible realizar el análisis químico de las hojas que pertenecían a este tratamiento.



**Figura 2.1. Efecto tóxico causado por el suministro de 160  $\mu\text{M}$  de V.**

### 2.5.1.1. Fósforo

En hojas, la concentración de P aumentó hasta 51% conforme la concentración de V se elevó en la solución nutritiva hasta 80  $\mu\text{M}$ , siendo estadísticamente diferente a los demás tratamientos, pero similar cuando este metal se aplicó al nivel de 40  $\mu\text{M}$  (Cuadro 2.2).

**Cuadro 2.2. Concentración de macronutrientes en hoja, tallo y raíz de arándano por efecto de la aplicación de V en la solución nutritiva o foliar (20F).**

Vanadio ( $\mu\text{M}$ )	N	P	K	Ca	Mg
-----g kg <sup>-1</sup> ms hoja-----					
<b>0</b>	18.43a	0.82b	6.16a	4.63a	0.85a
<b>10</b>	19.34a	0.88b	5.05a	4.32a	0.95a
<b>20</b>	13.04a	0.74b	5.85a	4.87a	0.94a
<b>40</b>	18.2a	0.91ab	5.4a	4.21a	0.92a
<b>80</b>	18.67a	1.24a	6.41a	4.68a	1.07a
<b>20F</b>	14.18a	0.75b	5.57a	4.99a	0.98a
<b>CV</b>	19.55	16.78	10.12	12.45	10.64
<b>HSD</b>	8.13	0.35	1.42	1.38	0.24
<b>Suficiencia<sup>a</sup></b>	16.53 – 20.66	0.83 – 3.06	4.03 – 7.16	3.7 – 8.33	1.26 – 2.83
-----g kg <sup>-1</sup> ms tallo-----					
<b>0</b>	9.18a	1.76a	2.42ab	3.46c	0.53c
<b>10</b>	8.48a	1.67a	2.42ab	3.62bc	0.55c
<b>20</b>	8.75a	1.48a	2.52ab	4.61ab	0.60bc
<b>40</b>	9.68a	1.54a	2.26b	4.12bc	0.59c
<b>80</b>	10.9a	1.6a	2.22b	4.2bc	0.65abc
<b>160</b>	9.97a	1.68a	2.17b	4.41abc	0.74a
<b>20F</b>	8.92a	1.49a	2.76a	5.4a	0.75a
<b>CV</b>	12.13	11.43	7.16	10.92	9.49
<b>HSD</b>	2.7	0.42	0.39	1.07	0.14
-----g kg <sup>-1</sup> ms raíz-----					
<b>0</b>	20.91a	2.12b	3.77a	4.81bc	1.37b
<b>10</b>	18.98a	3.25a	3.23ab	4.28c	1.46ab
<b>20</b>	20.73a	3.20a	4.02a	4.04c	1.71ab
<b>40</b>	20.03a	3.09a	3.13ab	4.67bc	1.72ab
<b>80</b>	17.93a	3.08a	2.92ab	5.54ab	1.9a
<b>160</b>	18.28a	3.15a	2.44b	6.4a	1.87ab
<b>20F</b>	17.76a	3.2a	3.4ab	4.43bc	1.41ab
<b>CV</b>	16.35	12.17	15.85	10.07	13.69
<b>HSD</b>	9.44	0.91	1.33	1.17	0.51

Promedios con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

<sup>a</sup> Datos adaptados de Retamales *et al.* (2018).

En raíces, aplicaciones de V  $\geq 10 \mu\text{M}$  y foliar (20F) incrementaron estadísticamente la concentración de P; con V a  $10 \mu\text{M}$  la mayor concentración de P ( $3.25 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ms}$ ).

En plántulas de *Setaria viridis* en suelos contaminados con V, se encontraron resultados similares a esta investigación ya que las concentraciones de P en plántulas aumentaron a medida que incrementaba el nivel de V (Aihemaiti *et al.*, 2019). En raíces de plantas de Chile al utilizar V en solución nutritiva ( $5\text{-}15 \mu\text{M}$  de V), las concentraciones de P aumentaron en 2.1 veces cuando se comparó el tratamiento de mayor concentración ( $15 \mu\text{M}$  de V) contra el testigo (García *et al.* 2018).

### **2.5.1.2. Potasio**

La aplicación  $20 \mu\text{M}$  de V al follaje generó la mayor concentración de K ( $2.76 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ms}$ ) en tallo, pero sin diferencias estadísticas con el suministro de V  $\leq 20 \mu\text{M}$  en la solución nutritiva ( $2.52 \text{ mg kg}^{-1} \text{ ms}$ ). En raíz, la aplicación de V en concentración de  $160 \mu\text{M}$  en solución, disminuyó ( $P < 0.05$ ) la concentración de K en un 35% respecto al testigo (Cuadro 2.2). El suministro de V en solución nutritiva de  $15 \mu\text{M}$  aumentó en 83.33% las concentraciones de K en raíces de Chile comparado con el testigo (García *et al.*, 2018). Lo anterior contrasta con esta investigación y puede asociarse a un efecto tóxico (Figura 2.2) causado por metales pesados, ya que altas concentraciones de V producen especies reactivas de oxígeno (Wu *et al.*, 2021) que pueden abrir canales selectivos y no selectivos de K que permiten la salida de este mismo en la raíz, y degradan la membrana celular debido a la peroxidación de lípidos (Demidchik, 2014).

### **2.5.1.3. Calcio**

En comparación con el tratamiento testigo, las aplicaciones de V  $20 \mu\text{M}$  tanto en raíz, como al follaje, aumentaron 33% y 56% la concentración de Ca en tallo respectivamente. En raíz, la concentración mayor de V ( $160 \mu\text{M}$ ) incrementó 32% la concentración de Ca respecto al testigo (Cuadro 2.2). La aplicación de V (entre  $5$  y  $15 \mu\text{M}$  de V en solución nutritiva) favoreció la concentración de Ca en tallos de Chile hasta 81% mientras que en raíz el uso de V en concentración de  $15 \mu\text{M}$  fue la que aumentó la concentración de Ca 2.3 veces respecto al testigo (García *et al.*, 2018). En tallos el transporte de Ca ocurre principalmente en xilema siguiendo el flujo de transpiración, dicho flujo es más eficaz en incrementar la concentración de Ca en frutos que aumentar el suministro de este elemento en el sustrato, sin embargo un alto flujo transpiratorio prioriza el movimiento de Ca hacia follaje debido a la baja tasa de transpiración de los frutos con

respecto al follaje (Marschner, 2012), por lo tanto, se requiere más investigación respecto al efecto del V en tasas de transpiración de hoja y fruto.

#### **2.5.1.4. Magnesio**

La concentración de 160  $\mu\text{M}$  de V aplicado en raíz, aumentaron estadísticamente (40%) la concentración de Mg en tallo, aunque sin diferencias con el tratamiento de aplicación foliar. Por otra parte, el uso de 80  $\mu\text{M}$  dirigido a la raíz causó un aumento de la concentración de Mg en este órgano un 39% comparado con el testigo (Cuadro 2.2). La exposición del cultivo de chile a 15  $\mu\text{M}$  de V en raíz, incrementaron 133% las concentraciones de Mg en raíz (García *et al.*, 2018). En plantas de *Mentha pulegium* agregar 20  $\text{mL L}^{-1}$  de V en solución aumentó la concentración de Mg en raíz en un 20% comparado con el testigo (Akoumianaki *et al.*, 2015) similar a lo encontrado en esta investigación.

### **2.5.2. Concentraciones de micronutrientes en hoja, tallo y raíz**

#### **2.5.2.1. Boro**

El V no afectó las concentraciones de B en hoja y raíz respecto al testigo. Sin embargo, los tallos de plantas tratadas con V aplicado al follaje, incrementaron 26% la concentración de B comparado con el testigo. En el cultivo de chile suministrado con V en solución en concentraciones de 5 y 10  $\mu\text{M}$  aumentaron hasta 2 veces las concentraciones de B en tallo (García *et al.*, 2018), similar a lo encontrado en este trabajo (Cuadro 2.3).

#### **2.5.2.2. Hierro**

La aplicación de V foliar en arándano originó la mayor concentración de Fe en hojas y fue 43% superior al tratamiento de V con 80  $\mu\text{M}$  suministrado en la solución nutritiva. Las concentraciones de 10 a 160  $\mu\text{M}$  de V en la solución de cultivo incrementan estadísticamente de 2 a 2.7 veces la concentración de Fe en raíz comparado con el testigo, pero sin diferencias con el tratamiento de V foliar. En tallo, los efectos de los tratamientos evaluados no fueron consistentes en la concentración de Fe, observándose sus valores mayores cuando se aplicaron 40  $\mu\text{M}$  de V en la solución nutritiva o por el tratamiento foliar (Cuadro 2.3). En plantas de *Mentha pulegium* L. el uso de V en concentraciones entre 10 y 40  $\text{mg L}^{-1}$  (196.3 – 785.23  $\mu\text{M}$ ) suministrados en la solución, aumentan

la concentración de Fe de 25.11 a 62.27% en raíz (Akoumianak *et al.*, 2015) resultados similares a los encontrados en esta investigación.

**Cuadro 2.3. Concentración de micronutrientes en hoja, tallo y raíz de arándano por efecto del suministro de V en la solución nutritiva o foliar (20F).**

Vanadio ( $\mu\text{M}$ )	B	Cu	Fe	Mn	Zn
-----mg kg <sup>-1</sup> ms hoja-----					
<b>0</b>	76.21ab	2.67a	128.42ab	335.31bc	11.99a
<b>10</b>	56.33b	2.61a	139a	322.09bc	12.57a
<b>20</b>	70.84ab	2.46a	108.4ab	498.19ab	12.76a
<b>40</b>	67.13ab	2.94a	116.09ab	419.8abc	11.59a
<b>80</b>	67.72ab	3.43a	99.36b	266.61c	12.13a
<b>20F</b>	89.93a	2.69a	141.92a	560.93a	12.48a
<b>CV</b>	13.28	20.7	10.74	18.38	13.58
<b>HSD</b>	24.36	1.43	35.08	205.7	4.11
<b>Suficiencia<sup>a</sup></b>	25.6 – 66.66	5 – 17.5	53.66 – 156.66	40 – 283.33	8 - 30
-----mg kg <sup>-1</sup> ms tallo-----					
<b>0</b>	23.98bc	5.74a	82.26ab	963.79bc	25.3ab
<b>10</b>	21.72c	4.22a	69.59ab	907.44bc	20.86b
<b>20</b>	25.67b	4.75a	75.49ab	1176.01ab	24.81ab
<b>40</b>	27.41ab	6.16a	85.76a	1025.01bc	27.95ab
<b>80</b>	27.07ab	4.88a	57.46b	836.39c	28.9ab
<b>160</b>	27.24ab	5.49a	60.15ab	1167.31ab	37.42a
<b>20F</b>	30.32a	4.52a	84.91a	1411.23a	29.66ab
<b>CV</b>	5.71	15.55	14.64	9.47	20.72
<b>HSD</b>	3.73	2.27	26.94	273.35	13.26
-----mg kg <sup>-1</sup> ms raíz-----					
<b>0</b>	23.26a	43.25d	1035.07b	328.52a	47.63c
<b>10</b>	26.34a	71.06bc	2132.94a	230.12a	52.28bc
<b>20</b>	22.16a	82.17ab	2392.17a	354.64a	58.59abc
<b>40</b>	25.68a	100.67a	2652.22a	379.82a	58.22abc
<b>80</b>	23.27a	100.78a	2125.78a	289.91a	63.44ab
<b>160</b>	23.57a	89.29ab	2795.34a	368.3a	70.19a
<b>20F</b>	22.92a	51.01cd	1884.87ab	293.57a	48.59c
<b>CV</b>	6.59	11.61	17.96	27.88	9.37
<b>HSD</b>	3.91	21.15	955.32	230.38	13.05

Promedios con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

<sup>a</sup> Datos adaptados de Retamales *et al.* (2018).

### **2.5.2.3. Manganeso**

Las aplicaciones de V al follaje incrementaron 67% en hoja y 46% en tallo la concentración de Mn comparadas con el testigo, mientras que en raíz el V no afectó las concentraciones de Mn (Cuadro 2.3). El Mn tiene función en diversos procesos de las plantas como fotosíntesis, respiración, barrido de especies reactivas de oxígeno, defensa contra patógenos y señalización de hormonas, entre estas, las más estudiadas son el Mn en la fotólisis del agua y la enzima MnSOD (Alejandro *et al.*, 2020), por tanto, un aumento en la concentración de Mn puede impactar de manera positiva en procesos fotosintéticos o eliminación de especies reactivas de oxígeno de tal manera que más investigación es necesaria.

### **2.5.2.4. Cobre**

Concentraciones crecientes de V aplicado en la solución nutritiva, elevaron estadísticamente la concentración de Cu hasta 2.3 veces comparado con el testigo en raíz, la mayor concentración de este elemento ocurrió cuando el V se suministró entre 40 y 80  $\mu\text{M}$  (Cuadro 2.3). Suministrar 15  $\mu\text{M}$  de V durante el cultivo de chile, incrementa la concentración de Cu en raíz en 2.3 veces

### **2.5.2.5. Zinc**

Las concentraciones de Zn en hoja y tallo no se afectaron en comparación al tratamiento testigo; mientras que, en raíz al elevar la concentración de V hasta 160  $\mu\text{M}$  en la solución nutritiva, la concentración de Zn aumentó 47% respecto al testigo (Cuadro 2.3). El uso de 15  $\mu\text{M}$  de V en solución nutritiva incrementó en raíz las concentraciones de este elemento en 1.07 veces comparado con el testigo en plantas de chile (García *et al.*, 2018), resultados que fueron similares en esta investigación. Bajo condiciones de estrés por metales pesados, el Zn mejora la actividad de enzimas como superóxido dismutasa (SOD) y catalasa (CAT), disminuye la producción de malonaldehído (MDA) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), moléculas relacionadas a situaciones de estrés (Hassan *et al.*, 2017), aspectos que pueden explicar la mayor acumulación de Zn en las raíces de este experimento.

### **2.5.2.6. Molibdeno**

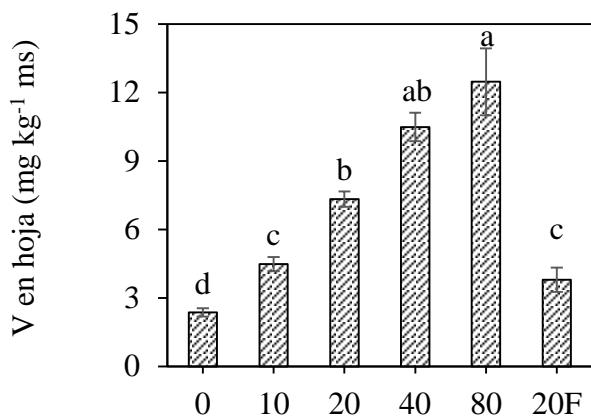
Al elevar la concentración de V de 0 hasta 160  $\mu\text{M}$  en la solución de cultivo, se obtuvieron reducciones estadísticas de hasta el 82% en la concentración de Mo en raíz (Figura 2.2d).



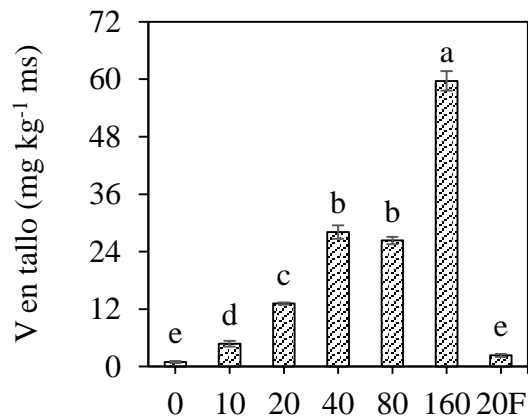
Entre los roles importantes del Mo destaca su función en la enzima nitrato reductasa (NR), enzima involucrada en la asimilación del N (Bittner *et al.*, 2014); por lo tanto, un decremento de Mo puede resultar en una baja tasa de actividad de la enzima NR, por lo cual es necesario estudiar el comportamiento de esta enzima en presencia de V y ausencia de Mo.

### **2.5.3 Vanadio**

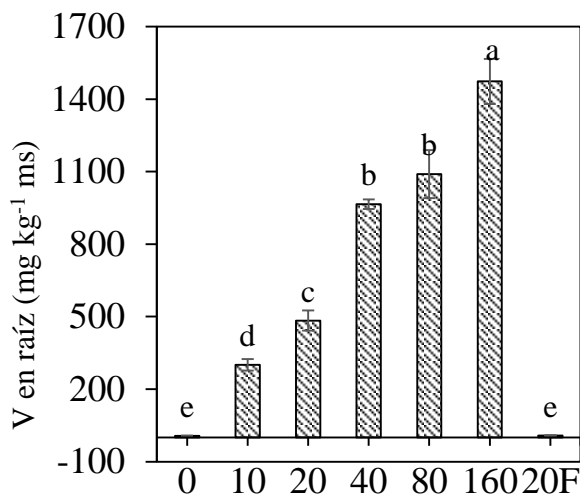
El suministro de V desde 0 hasta 160  $\mu\text{M}$  durante el cultivo de arándano en solución, aumentaron estadísticamente 3, 64 y 225 veces, la concentración de V en hoja (con suministros de V hasta de 80  $\mu\text{M}$ ), tallo y raíz (Figura 2.2a, 2.2b y 2.2c) respectivamente. En plantas de Chile con aplicaciones de V en concentraciones de 0 a 15  $\mu\text{M}$  de V en la solución nutritiva, se aumentó las concentraciones de V en raíz de aproximadamente 19 veces respecto al testigo (García *et al.*, 2018), tendencia observada similarmente en esta investigación. En plantas de tabaco la adición de V en solución en concentraciones crecientes (1.96 – 78.52  $\mu\text{M}$  de V) aumentó las concentraciones de este catión en raíz hasta 19 veces en el tratamiento de mayor concentración (272.5  $\text{mg kg}^{-1}$ ) respecto al de menor concentración (14.1  $\text{mg kg}^{-1}$ ) mientras que en tallo el incremento fue de 110 veces y en hoja hasta 32 veces (Wu *et al.*, 2021).



(a)

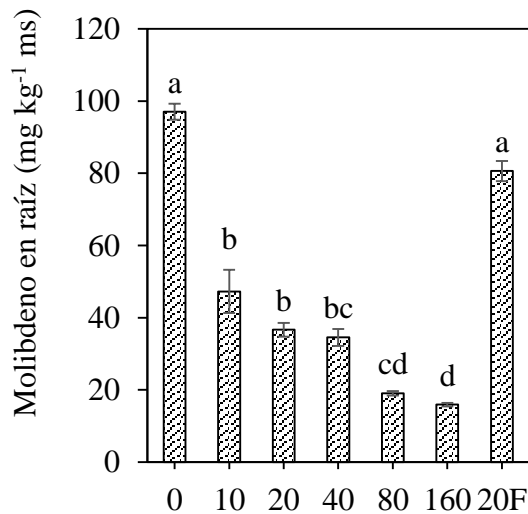


(b)



Vanadio (μM)

(c)



Vanadio (μM)

(d)

**Figura 2.2. Concentraciones de V en hoja (a), tallo (b) y raíz (c); y concentración de Mo en raíz (d) de plantas de arándano tratadas con V en solución o 20 μM de V vía foliar (20F). Barras ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).**

En general, los elementos analizados en hojas mostraron diferentes comportamientos con excepción del K, Ca, Cu y Zn, donde la concentración de estos cationes no se vio afectado por la adición de V y se mantuvieron dentro de los rangos de suficiencia, mientras que las

concentraciones de N no se modificaron significativamente por la adición de V, pero la concentración 20  $\mu\text{M}$  de V tanto en solución como foliar permanecieron por debajo del intervalo de suficiencia para este elemento. Por su parte el P aumentó su concentración en las concentraciones más elevadas de V mostrando significancia, pero manteniéndose en los niveles de suficiencia con excepción de las aplicaciones foliares y en solución de 20  $\mu\text{M}$  de V, donde estas concentraciones se ubicaron por debajo del rango de suficiencia. Por otro lado, las concentraciones de Fe se mantuvieron siempre dentro de los intervalos óptimos para dicho elemento, aunque existió diferencia significativa. El Mg en todos los tratamientos se mantuvo por debajo del rango de suficiencia. Las concentraciones de Mn donde solo se adicionó la concentración máxima de V, se mantuvieron dentro de los niveles óptimos para este catión mientras que concentraciones inferiores de V mantuvieron las concentraciones de Mn por encima del intervalo de suficiencia.

## 2.6 CONCLUSIONES

El uso del vanadio en distintas concentraciones y formas de aplicación estimuló la absorción de diversos nutrientes en distintos órganos, sin embargo, esto no ocurrió con K y Mo. Cuando el vanadio es utilizado en solución ocurren efectos tanto positivos como negativos, 20  $\mu\text{M}$  de V en solución y follaje incrementan la concentración de Ca en tallo mientras que aplicaciones de 80  $\mu\text{M}$  de V beneficia la concentración de P en hoja y de Mg en raíz. El uso de 160  $\mu\text{M}$  de V en solución mejora las concentraciones de Mg en tallo de igual forma las de Ca y Zn en raíz, pero reduce las de K en este mismo órgano. Todo suministro de V en solución incrementa la concentración de P, Fe y Cu en raíz, mientras que disminuye la de Mo en este mismo órgano. La aplicación de V al follaje estimula las concentraciones de Mn en hoja, Ca, Mg, B y Mn en tallo y P en raíz sin disminuir la concentración de ningún otro en cualquier tejido. Cuando 20  $\mu\text{M}$  de V es aplicado al follaje o en solución las concentraciones de N y P caen por debajo del intervalo óptimo.

## CONCLUSIONES GENERALES

En general, el V afecta las características morfológicas, fisiológicas y nutrimentales del arándano, y es dependiente de la concentración y forma de aplicación.

El uso de V impactó positivamente la morfología y fisiología del cultivo de arándano, alcanzándose un nivel óptimo mediante su aplicación foliar. A los 66 días después de aplicación de tratamientos, cuando 20  $\mu\text{M}$  de V se aumenta el volumen radical, pero este solo por suministro vía foliar. El V afectó positivamente los procesos fisiológicos de transpiración y fotosíntesis cuando fue suministrado foliarmente.

Cuando el cultivo de arándano se expone al V tanto en la solución nutritiva como foliar, se obtienen respuestas diferenciales en los niveles nutrimentales entre órganos. En hoja, la concentración de Mn aumenta cuando el V se aplica vía foliar y en la concentración de P foliar pueden obtenerse respuestas similares cuando este catión se aplica en la solución nutritiva a concentración de 80  $\mu\text{M}$ .

En tallo la concentración de Ca, Mn y B aumentó cuando se aplicó el tratamiento de V foliar. Las aplicaciones foliares y hasta 160  $\mu\text{M}$  de V en la solución nutritiva, incrementan las concentraciones de Mg.

Las raíces de arándano expuestas al V en cualquier tipo de aplicación mejoraron las concentraciones de P; mientras que, para Cu y Fe, estos incrementan cuando el suministro de V es solo en raíz. La concentración de Ca, Mg y Zn incrementan cuando se aplican niveles superiores a 80  $\mu\text{M}$  de V.

El tratamiento foliar (20  $\mu\text{M}$ ) permitió detectar las mayores expresiones fisiológicas (tasa fotosintética y transpiratoria), morfológicas (volumen de raíz) y nutrimentales (Mn en hoja; Ca, Mn, Mg y B en tallo) del cultivo de arándano.

En virtud de lo encontrado en esta investigación se concluye que el mejor tratamiento corresponde a las aplicaciones foliares de V (20  $\mu\text{M}$ ) cada 15 días, para el cultivo de arándano.

## LITERATURA CITADA

- Aihemaiti, A., Gao, Y., Meng, Y., Chen, X., Liu, J., Xiang, H., Xu, Y., Jiang, J. (2019). Review of plant-vanadium physiological interactions, bioaccumulation, and bioremediation of vanadium-contaminated sites. *Science of the Total Environment*, 135637. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135637>
- Aihemaiti, A., Jiang, J., Gao, Y., Meng, Y., Zou, Q., Yang, M., ... Tuerhong, T. (2019). The effect of vanadium on essential element uptake of *Setaria viridis*' seedlings. *Journal of Environmental Management*, 237, 399–407. <https://doi:10.1016/j.jenvman.2019.02.054>
- Akoumianaki Ioannidou, A., Barouchas, P. E., Kyramariou, A., Iliá, E., & Moustakas, N. K. (2015). Effect of vanadium on dry matter and nutrient concentration in penny royal (*Mentha pulegium* L.). *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 72 (2). <https://doi:10.15835/buasvmcn-hort:11348>
- Akoumianaki-Ioannidou A, Barouchas PE, Iliá E, Kyramariou A, Moustakas NK. (2016). Effect of vanadium on dry matter and nutrient concentration in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Austral J Crop Sci.* 2016; 10: 199±206.
- Alcántar-González G., Trejo-Téllez L. & Gómez-Merino F. (2016). *Nutrición de Cultivos*. Biblioteca básica de agricultura.
- Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., & Peiter, E. (2020). Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi:10.3389/fpls.2020.00300>
- Altaf, M. M., Diao, X., ur Rehman, A., Imtiaz, M., Shakoor, A., Altaf, M. A., ... Ghani, M. U. (2020). Effect of vanadium on growth, photosynthesis, reactive oxygen species, antioxidant enzymes, and cell death of rice. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi:10.1007/s42729-020-00330-x>
- Anke, M. (2004). Vanadium- An element both essential and toxic to plants, animals and humans. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia*, 70: 961-999.
- Bittner, F. (2014). Molybdenum metabolism in plants and crosstalk to iron. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi:10.3389/fpls.2014.00028>
- Cárcamo, M. P., Reyes-Díaz, M., Rengel, Z., Alberdi, M., Omena-García, R. P., Nunes-Nesi, A., & Inostroza-Blancheteau, C. (2019). Aluminum stress differentially affects physiological performance and metabolic compounds in cultivars of highbush blueberry. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi:10.1038/s41598-019-47569-8>
- Chen, J., Zhou, L., Tian, C., Yang, F., (2020) Effects of cadmium and lead on the growth and the activity of peroxidase and superoxide dismutase of blueberry plantlets in vitro. *Biologia Plantarum* 64: 784-788.

- Chen, L., Liu, J., Hu, W., Gao, J., & Yang, J. (2021). Vanadium in soil-plant system: Source, fate, toxicity, and bioremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124200. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124200> [10.1016/j.jhazmat.2020.124200](https://doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124200)
- Demidchik, V. (2014). Mechanisms and physiological roles of K<sup>+</sup> efflux from root cells. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 696–707. <https://doi:10.1016/j.jplph.2014.01.015>
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi:10.1016/j.scienta.2015.09.021> [10.1016/j.scienta.2015.09.021](https://doi:10.1016/j.scienta.2015.09.021)
- FAO. 2020. The Food and Agriculture Organization. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Furukawa, J., Yokota H., Tanoi K. Ueoka S., Matsuhashi S., Ishioka N., Watanabe S., Uchida H., Tsuji A., Ito T., Mizuniwa T., Osa A., Sekine T., Hashimoto S. & Nakanishi M. (2001). Vanadium uptake and an effect of vanadium treatment on <sup>18</sup>F-labeled water movement in a cowpea plant by positron emitting tracer imaging system (PETIS). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 249(2), 495–498. <https://doi:10.1023/a:1013276224300>
- García, A., Trejo, L. I., Guillén, D., & Gómez, F. C. (2018). Vanadium stimulates pepper plant growth and flowering, increases concentrations of amino acids, sugars and chlorophylls, and modifies nutrient concentrations. *PLOS ONE*, 1-20. <https://doi:10.1371/journal.pone.0201908>
- Hassan, Z., Ali, S., Rizwan, M., Hussain, A., Akbar, Z., Rasool, N., & Abbas, F. (2017). Role of Zinc in Alleviating Heavy Metal Stress. *Essential Plant Nutrients*, 351–366. [https://doi:10.1007/978-3-319-58841-4\\_14](https://doi:10.1007/978-3-319-58841-4_14)
- Nawaz, M. A., Jiao, Y., Chen, C., Shireen, F., Zheng, Z., Imtiaz, M., ... Huang, Y. (2018). Melatonin pretreatment improves vanadium stress tolerance of watermelon seedlings by reducing vanadium concentration in the leaves and regulating melatonin biosynthesis and antioxidant-related gene expression. *Journal of Plant Physiology*, 220, 115–127. <https://doi:10.1016/j.jplph.2017.11.003>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier
- Retamales, B, J., & Hancock J, F.(2018). *Blubberies*. CABI
- Saco, D., Martín, S., & San José, P. (2012). Vanadium distribution in roots and leaves of *Phaseolus vulgaris*: morphological and ultrastructural effects. *Biologia Plantarum*, 57(1), 128–132. <https://doi:10.1007/s10535-012-0133-z>
- Secretaría de Economía. (2021, 12 de enero). Secretaría de Economía defiende las exportaciones mexicanas de arándanos azules en audiencia pública en Estados Unidos [comunicado 003]. <https://www.gob.mx/se/articulos/secretaria-de-economia-defiende-las-exportaciones-mexicanas-de-arandanos-azules-en-audiencia-publica-en-estados-unidos>

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2019) Anuario estadístico de la producción agrícola. Consultado el 9 de marzo de 2022. Página electrónica: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Steiner, A. A. (1984) The universal nutrient solution. *En: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. 633-649 pp.
- Vachirapatama, N., Jirakiattikul, J., Townsend, A., Dicinoski, G., & Haddad, P. (2011). Effect of vanadium on plant growth and its accumulation in plant tissues. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 33 (3), 255-261.
- Vats S. (2018). *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*. Springer
- Von Wirén, N. (2011). Grand Challenges in Plant Nutrition. *Frontiers in Plant Science*, 2. <https://doi:10.3389/fpls.2011.00004>
- White W., M. (2016). *Encyclopedia of Geochemistry*. Springer International Publishing
- Wu, Z., Yang, J., Zhang, Y., Wang, C., Guo, S., & Yu, Y. (2021). Growth responses, accumulation, translocation and distribution of vanadium in tobacco and its potential in phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207, 111297. <https://doi:10.1016/j.ecoenv.2020.111297>
- Yang, J., Wang, M., Jia, Y., Gou, M., & Zeyer, J. (2017). Toxicity of vanadium in soil on soybean at different growth stages. *Environmental Pollution*, 231, 48–58. <https://doi:10.1016/j.envpol.2017.07.075>