

**EVALUACIÓN DE LA BIOFORTIFICACIÓN CON YODO EN LECHUGA (*Lactuca sativa*) Y  
DOS VARIEDADES DE KALE (*Brassica oleracea* var. *sabellica*, *Brassica oleracea* var. *palmifolia*,)  
EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO TIPO NFT**

**PRESENTADO POR**

**DIANA LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN TECNOLÓGICA EN HORTICULTURA PROTEGIDA  
CHÍA, COLOMBIA 2022**

**EVALUACIÓN DE LA BIOFORTIFICACIÓN CON YODO EN LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) Y  
DOS VARIEDADES DE KALE (*Brassica oleracea* var. *sabellica*, *Brassica oleracea* var. *palmifolia*,)  
EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO TIPO NFT**

**DIANA LOPEZ DIAGO**  
**PRESENTADO A**  
**RODRIGO GIL CASTAÑEDA**  
**ASIGNATURA**  
**TRABAJO DE GRADO**

**UNIVERSIDAD DE BOGOTA JORGE TADEO LOZANO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA**  
**ESPECIALIZACIÓN TECNOLÓGICA EN HORTICULTURA PROTEGIDA**  
**CHÍA, COLOMBIA 2022**

## Contenido

1. Resumen.....	8
1a. Abstract .....	8
2. Introducción .....	9
3. Problema de investigación .....	11
4. Pregunta de investigación .....	14
6. Hipótesis .....	15
7.Objetivos.....	15
7a. Objetivo general .....	15
7b. Objetivos específicos .....	15
8. Materiales y métodos .....	15
8a. Área de estudio.....	15
8b. Materiales y métodos .....	16
8c. Análisis de datos .....	19
9.Resultados .....	20
9a. Biomasa y calidad de las plantas.....	20
9b. Bioforticiación de yodo.....	22
10.Discusión.....	23
10a. Biomasa y calidad de plantas .....	23
10b. Biofortificación de yodo .....	24
11.Conclusiones .....	25
12.Bibliografía .....	25
13.Anexos .....	28

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Métodos usados para la biofortificación de yodo .....	10
<b>Tabla 2.</b> Composición de la solución nutritiva empleada para el cultivo de la mizuna y el kale liso y rizado.....	18
<b>Tabla 3.</b> Actividades realizadas durante el experimento.....	19
<b>Tabla 4.</b> Resultados de peso fresco y seco .....	21
<b>Tabla 5.</b> Biofortificación con yodo en dos variedades de kale y lechuga .....	22

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Sistema NFT. Imagen tomada y editada de Sharma et al. (2018). .....	12
<b>Figura 2.</b> Temperaturas registradas durante la fase experimental.....	16
<b>Figura 3.</b> Estructura NFT. a. Vista frontal de los 3 tratamientos y 1 control. b. Vista lateral canales de siembra.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figura 4.</b> Plantas cosechadas a. Kale liso (control) b. Kale liso (KI) c. Kale rizado (control) d. Kale rizado (KI) e. Lechuga mizuna (control) f. Lechuga mizuna (KI).....	20
<b>Figura 5.</b> Promedio peso seco por planta en el tratamiento y el control. ....	21
<b>Figura 6.</b> Intervalo de confianza de la cantidad de yodo en foliares.....	23

## Lista de anexos

<b>Anexo 1.</b> Monitoreo de conductividad y pH en los 4 tanques .....	28
--	----

## **1. Resumen**

El uso de vegetales biofortificados con yodo representan una alternativa a la sal yodada para prevenir la deficiencia de este elemento y sus efectos en la salud. En este estudio, tres variedades de hortalizas (lechuga (*Lactuca sativa*) variedad mizuna verde, kale rizado (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) y kale liso (*Brassica oleracea* var. *palmifolia*) se cultivaron en un sistema hidropónico tipo NFT con 10 $\mu$ mol/L de yoduro de potasio KI para inducir la absorción de yodo por parte de las plantas y de esta manera lograr su biofortificación. Se evaluó el crecimiento y desarrollo de las plantas por medio de sus características morfológicas, su peso fresco y seco. Adicionalmente, el contenido de yodo fue determinado por medio del análisis cuantitativo de la materia seca basada en la titulación con tiosulfato de sodio. No se evidenciaron efectos negativos sobre el crecimiento y la morfología de las plantas expuestas al yodo ni una diferencia significativa en el contenido de yodo entre las plantas del tratamiento y el control; sin embargo, ya que el diseño experimental tuvo limitaciones por la falta de réplicas del control, es necesario considerar este parámetro en la lectura de los resultados de absorción de yodo.

### **1a. Abstract**

The use of iodine-biofortified vegetables may be a health alternative instead of iodine-biofortified salt for preventing iodine (I) deficiency and related human disorders. In this study, three species varieties (Mizuna lettuce (*Lactuca sativa*), curly kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) and lacinato kale (*Brassica oleracea* var. *palmifolia*) were grown in a NFT system with 10 $\mu$ m of potassium iodide KI to produce iodine-biofortified vegetables. Crop performances and quality traits were analyzed; iodine content was measured on dry matter based on a titration methodology with the use of sodium thiosulfate. There were no negative effects on the plant's growth or morphology on those exposed to I. Also, there were no significant differences between those plants exposed to iodine and the control group. Due to the limitations on the experimental design related to the lack of repetitions on the control, it is necessary to take into account this when analyzing these results.

## 2. Introducción

El yodo es uno de los elementos más importantes para la salud humana al ser el componente principal de las hormonas tiroideas, las cuales regulan reacciones bioquímicas como la síntesis de proteínas y la actividad metabólica del organismo. Así mismo, son fundamentales para desarrollo neuronal, por lo que es imprescindible en la gestación y el desarrollo infantil (Martínez-Gascón *et al.*, 2005). La fuente principal de yodo para el humano es la dieta. Su concentración en los alimentos varía dependiendo del contenido de yodo en el suelo donde se producen estos alimentos. Los suelos más ricos en este elemento suelen ser aquellos que se derivan de rocas eruptivas, aunque la principal reserva la constituye el mar. Este yodo marino se volatiliza fácilmente y reacciona con el oxígeno para luego, ser depositado en el suelo por medio de la precipitación (Plantin-Carrenard, Beaudeau & Foglietti, 2000).

El balance entre la fijación y volatilización del yodo en el suelo depende de características tales como su contenido de materia orgánica, microbiota, el pH y su potencial oxido-reductor. Esto da como resultado una amplia gama de concentraciones de yodo en suelo, reportándose así, valores que pueden ir de los 0.1 a 150 ppm, siendo más común encontrar niveles altos cerca de fuentes oceánicas (Johnson, 2003). Este yodo puede ser absorbido por las raíces de las plantas dependiendo, tanto de su capacidad de retención, como también de la del suelo para proveer este elemento en formas bioactivas (Dávila-Rangel *et al.* 2019). En muchas regiones del mundo los suelos bajos en yodo son muy comunes, los productos cosechados en estos terrenos deficientes serán pobres en yodo y como consecuencia, las poblaciones que dependen de ellos pueden presentar efectos negativos severos en el metabolismo y llevar al desarrollo de enfermedades mentales irreversibles (Martínez-Gascón *et al.*, 2005).

Para mitigar el déficit de yodo en la alimentación se ha optado por adicionarlo a la sal de mesa, que si bien ha sido una solución efectiva, es limitada, ya que actualmente el 40% de la población mundial todavía presenta problemas relacionados con su déficit. Por esta razón, en busca de métodos alternativos para el consumo de yodo, múltiples estudios investigan su suplementación a partir de la biofortificación de los cultivos (Duborská, Urík & Šeda, 2020). Este proceso consiste en una serie de técnicas que permiten obtener alimentos con concentraciones de yodo que puedan suplir o complementar los requerimientos diarios (Díaz-Gómez *et al.* 2017; Weng *et al.*, 2013). Según, Tonacchera *et al.*, (2013), el consumo de estos vegetales es efectivo en cuanto al suministro de yodo al cuerpo humano.

Sin embargo, el yodo no es considerado como un elemento esencial para las plantas, por lo que su absorción y acumulación dependen de numerosos factores ambientales. El método más estudiado para la biofortificación con yodo se ha enfocado en su aplicación en forma de sales tanto en suelo, agua de irrigación o solución nutritiva, y se ha encontrado que la concentración de yodo en las plantas aumenta a

medida que su concentración incrementa en el sustrato. Sin embargo, dependiendo del compuesto de yodo aplicado, los resultados varían en cuanto a que se modifican las respuestas por parte de la planta y cambia su distribución y concentración en sus órganos. En la tabla 1 se resumen algunas de las principales investigaciones llevadas a cabo con yoduro de potasio KI y yodato de potasio KIO<sub>3</sub>, los principales compuestos de yodo usados en la biofortificación.

**Tabla 1.** Métodos usados para la biofortificación de yodo

Cultivo	Forma del yodo	Tipo de aplicación	Conclusiones	Autores
Col asiática, Apio	KI, KIO <sub>3</sub>	Suelo	Los tallos del apio representan un potencial reservorio de yodo para la planta	Li et al., 2018
Repollo chino	KI, KIO <sub>3</sub>	Solución nutritiva	Mayor cantidad de yodo presente en la SN permitió mayor acumulación de yodo en la planta	Li et al., 2018
Espinaca	KIO <sub>3</sub>	Irrigación	La combinación del yodo junto con sustancias orgánicas permitió la mayor absorción del mismo	Smolen et al., 2017
Tomate	KI, KIO <sub>3</sub>	Solución nutritiva	La concentración del yodo en los frutos fue proporcional a la concentración del mismo en la SN	Kiferle et al., 2013
Lechuga	KI, KIO <sub>3</sub>	Solución nutritiva	KI es absorbido más efectivamente por las plantas que KIO <sub>3</sub>	Voogt, Holwerda & Khodabaks, 2010

Lechuga y albahaca	KI	Solución nutritiva	10Mg de KI en la SN son suficientes para producir hojas comestibles que suplan las necesidades de yodo	Pucchinelli et al., 2021
Papa	KIO <sub>3</sub>	Solución nutritiva	La adición de selenio en la SN mejora significativamente la absorción de yodo por la planta	Smolen et al., 2018

---

Para las especies como la lechuga o el kale, se han visto efectos positivos con el uso del yoduro de potasio. Este es un compuesto iónico formado por el catión potasio K<sup>+</sup> y el anión yoduro I<sup>-</sup>, su peso molecular es 166,003 g/mol, es un componente muy soluble en agua: 149 g/100 g de agua a 25 °C, su punto de ebullición es 1330 ° C. Debido a su estabilidad, se utiliza como patrón primario en la estandarización de soluciones patrones de tiosulfato de sodio para determinar concentraciones de yodo en muestras problemas.

### 3. Problema de investigación

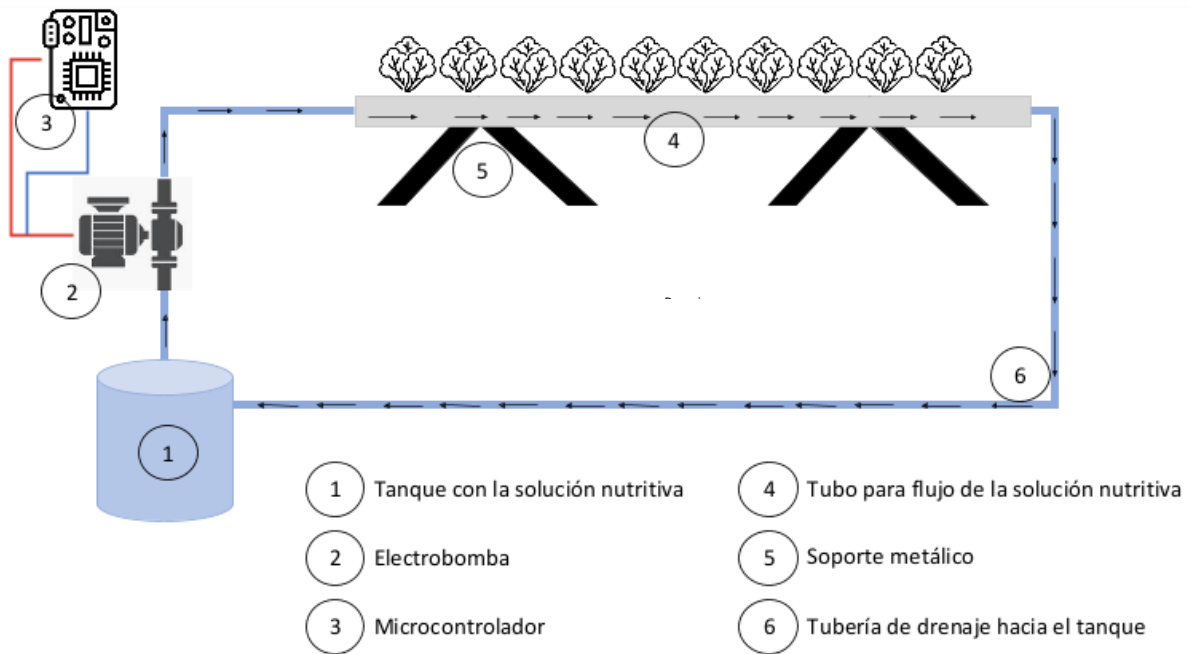
Uno de los principales retos de la biofortificación con yodo en suelo es su disponibilidad para las plantas debido a la reactividad con otros elementos y su estabilidad basada en el pH del medio. Según Johnson (2003), la mayor cantidad de yodo no biodisponible para la planta se encuentra en los primeros 10 cm del horizonte edáfico; sin embargo, la mayor parte se encuentra en forma no biodisponible y, por el contrario, las formas más comunes como IO<sub>3</sub> o I<sup>-</sup> pueden ser lixiviadas o volatilizadas. Según Dávila-Rangel et al. (2019), la materia orgánica juega un papel muy importante en la retención del yodo en el suelo, ya que este reacciona fácilmente con el carbono en sustancias orgánicas. Sin embargo, la asociación del yodo con el suelo no es permanente, ya que depende de los cambios oxidativos del suelo; por ejemplo, cuando hay grandes cantidades de agua, el yodo puede volatilizarse en forma orgánica – CH<sub>3</sub>I. Todos estos factores hacen que el yodo no siempre esté disponible para la planta en el suelo.

Sin embargo, se ha comprobado que cuando la solución de yodo se aplica a una solución nutritiva en lugar del suelo, la eficiencia en la bioacumulación es superior que en otros métodos (Duborská, Urík & Šeda, 2020). Las soluciones nutritivas (SN) son sustancias acuosas que contienen iones inorgánicos de sales



solubles esenciales para las plantas, los cuales son elementales para completar su ciclo de desarrollo. La hidroponía, por otra parte, es una técnica de cultivo que usa como medio de crecimiento una SN sin el uso de suelo. Los sistemas hidropónicos pueden tener varias modificaciones, algunos incluyen sustrato que provee soporte para el crecimiento, mientras que otras no lo usan y se basan únicamente en la SN como único medio en la raíz (Sharma *et al.*, 2018).

La técnica de la lámina nutritiva o NFT (*Nutrient Film Technique*) es un sistema donde las raíces se ubican en una canal con una pendiente de hasta 2% sin el uso de sustrato. Por dentro de la canal la SN es continuamente aplicada en los extremos elevados para que esta fluya a una velocidad suficiente para mantener las raíces húmedas y aireadas. Al final del canal el agua se drena para que regrese al contenedor en donde se conserva la SN (van Os *et al.*, 2019) (Fig 1.).



**Figura 1.** Sistema NFT. Gil, 2022.

La SN recirculante en el sistema debe mantener sus características físico-químicas durante todo el proceso para asegurar la estabilidad de las plantas. Estas son:

### 3a. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de la solución para conducir corriente, por lo que es proporcional a la cantidad de iones en la solución. El rango adecuado para la mayoría de cultivos se encuentra entre 1.5

y 2.5 dS/m. Valores más altos o bajos previenen la absorción de nutrientes debido a la presión osmótica (Sharma et al., 2018).

### **3b. pH**

El pH es una medida que determina la alcalinidad o la acidez de una sustancia, indicando la relación entre los iones H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup> presentes en una solución. Los nutrientes que se disuelven en el medio tienen un rango de disponibilidad que por lo general está entre 5.5 y 6.5.

### **3c. Temperatura**

La temperatura tanto del medio externo como la de la solución nutritiva, influye en la toma de agua y nutrientes de la planta. La relación principal está dada por la disponibilidad de oxígeno que consume la planta: a mayor temperatura en la solución nutritiva, menor cantidad de oxígeno disuelto. A mayor temperatura en el medio ambiente, mayor es el metabolismo y su consumo de oxígeno (Trejo-Téllez & Gómez-Merino, 2012).

### **3d. Selección de especies**

Las especies idóneas para ser fortificadas con yodo deben tener la capacidad de asimilar y acumular el elemento en sus tejidos. Se ha encontrado que el yodo se transporta predominantemente por medio del xilema desde las raíces hasta las hojas, con una proporción mucho menor en el floema, dando como resultado que las hojas acumulen más cantidad de yodo comparado con frutos o semillas (Gonzali et al., 2017; Weng et al. 2013). Así, las hortalizas de hoja presentan un potencial muy alto para ser biofortificadas. Algunas especies que han presentado buenos resultados son la lechuga (Voogt, Holwerda & Khodabaks, 2010) y algunas brasicáceas como el kale (Gonella et al., 2019). Se ha encontrado que en estas especies la acumulación de yodo es proporcional a la cantidad adicionada en la solución nutritiva; sin embargo, en altas concentraciones el yodo afecta negativamente al crecimiento de la lechuga, aunque no se han reportado efectos negativos para el crecimiento de las brásicas como el kale (Zhu et al., 2003; Voogt, Holwerda & Khodabaks., 2010; Gonella et al., 2019). Si bien el tipo de sal adicionado a la solución nutritiva ha tenido efectos diferentes en su acumulación y sobre el crecimiento de la planta, el yoduro de potasio (KI), ha demostrado ser un elemento eficaz en cuanto su absorción (Voogt, Holwerda & Khodabaks., 2010).

#### **4. Pregunta de investigación**

¿Cuál es el efecto de la adición de 10  $\mu\text{mol/L}$  de yoduro de potasio KI sobre el crecimiento y acumulación de yodo en las hojas de tres especies de hortalizas cultivadas en un sistema hidropónico NFT?

#### **5. Justificación**

El yodo al ser un elemento básico para el funcionamiento del metabolismo humano es esencial en la dieta e imprescindible en los alimentos de consumo diario. Cuando los niveles de yodo son menores a lo requerido por la glándula tiroidea, se producen desórdenes por deficiencia de yodo. Esto provoca que no se puedan sintetizar los niveles necesarios de las hormonas y causen síntomas como el bocio, el insuficiente desarrollo mental y físico en niños o la baja productividad en adultos (Lazarus, 2015). Si bien este déficit ha sido atenuado por el consumo de sal yodada, se ha identificado la presencia de bocio endémico asociado al exceso de consumo de yodo inorgánico (Zhao et al. 2000), lo que ha llevado a que se exploren técnicas de biofortificación para incrementar el yodo orgánico como complemento o alternativa a la yodatización de la sal de mesa.

Para la obtención de cultivos biofortificados se ha encontrado que la nutrición mineral en hidroponía ofrece la posibilidad de modificar los perfiles bioquímicos de las plantas a través de la aplicación de compuestos de yodo en la SN en diferentes concentraciones controladas; principalmente en especies hortícolas que sean de consumo frecuente y estén al alcance de la población. Además, es un método de cultivo versátil que permite la producción cuando las condiciones de campo tradicionales son adversas.

La lechuga, al ser ampliamente consumida, presenta gran potencial para ser una especie biofortificada de gran alcance y se ha reportado que aumenta su resistencia a la salinización y la concentración de fenoles y ácido ascórbico en la presencia de yodo en la SN (Blasco et al. 2013). Por otro lado, el kale es una especie propicia para alcanzar niveles de yodo adecuados en las dietas debido al consumo de sus hojas y tallos, y su riqueza en compuestos benéficos como antioxidantes, junto con los cuales el incremento en el yodo puede añadir un valor adicional a su consumo (Gonella et al, 2019). El kale rizado, liso y la lechuga tipo mizuna se han posicionado en el mercado actual y representan altos potenciales para incrementar el consumo de yodo.

Esta práctica ampliará parámetros indispensables para promover la biofortificación con yodo bajo sistemas NFT de dos variedades de brásicas y una de lechuga para mejorar la diversidad de fuentes de yodo en la dieta

## **6. Hipótesis**

La adición de 10  $\mu\text{m}$  KI en la solución nutritiva aumentará la concentración de yodo en las hojas de kale rizado, liso y lechuga variedad mizuna, y este no tendrá efectos negativos en el crecimiento de las plantas.

## **7. Objetivos**

### **7a. Objetivo general**

Evaluar el efecto de la adición de yoduro de potasio en una solución nutritiva sobre la acumulación de yodo y la biomasa generada por tres especies de hortalizas cultivadas en un sistema NFT.

### **7b. Objetivos específicos**

Establecer parámetros del uso del yodo en cultivos NFT para biofortificar hortalizas que permitan la diversificación de la dieta y el consumo del yodo.

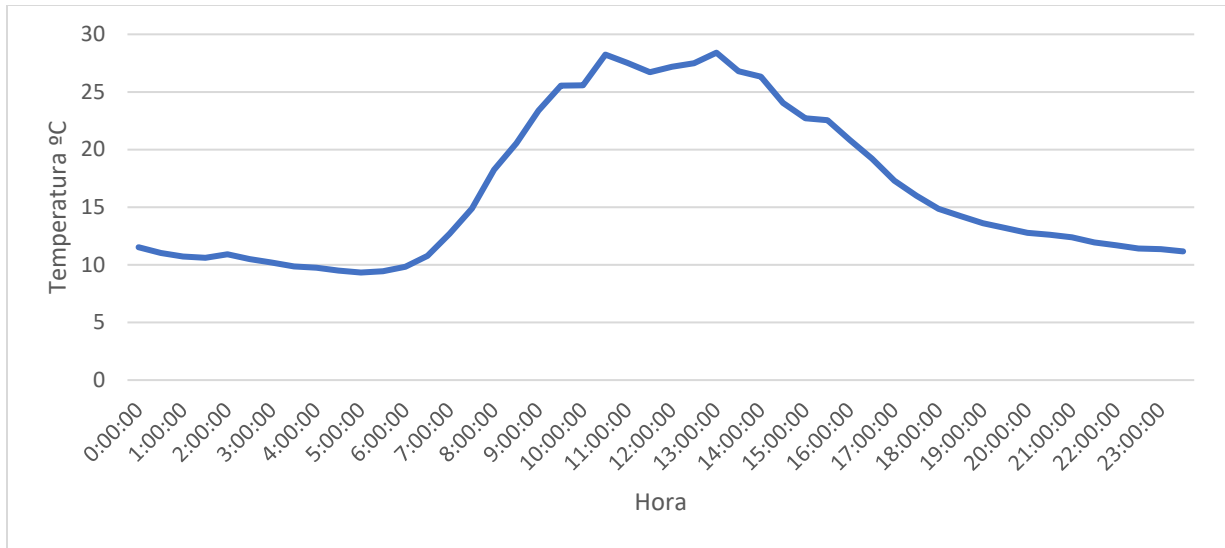
Determinar los efectos de la adición de yodo en la solución nutritiva sobre el crecimiento de las tres hortalizas.

Cuantificar mediante un método analítico estándar la acumulación de yodo foliar en las tres especies de hortalizas.

## **8. Materiales y métodos**

### **8a. Área de estudio**

El estudio fue realizado en la Sabana de Bogotá bajo condiciones de invernadero en el Centro de Biosistemas de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Chía, Colombia 4°53'04" N, -74°00'48 'W, 2620 m.s.n.m. desde el 5 de octubre al 19 de noviembre de 2021. La temperatura promedio fue de 17°C durante el día y de 11°C durante la noche. El comportamiento diario promedio de temperatura se registra en la figura 2.



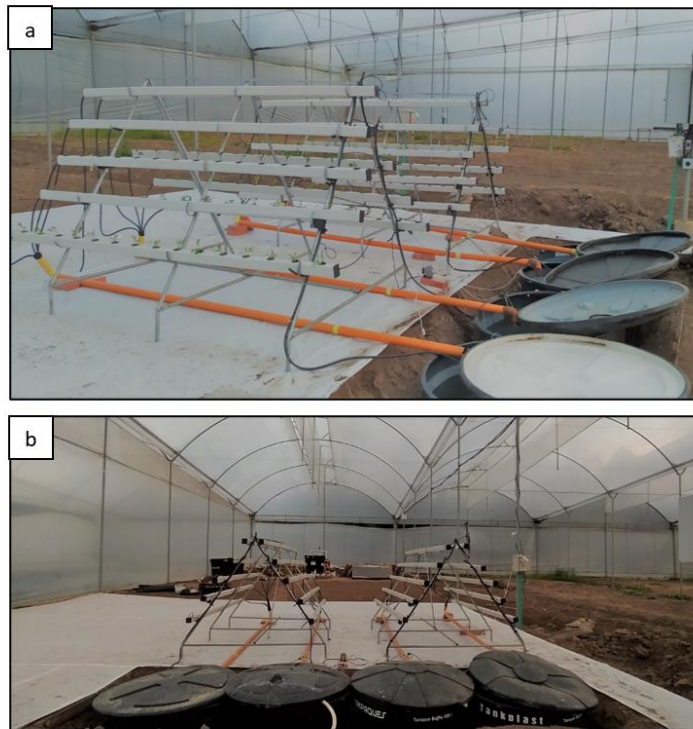
**Figura 2.** Temperatura promedio a lo largo del día en el área de estudio.

## 8b. Materiales y métodos

### Sistema NFT:

El sistema NFT se ubicó de manera piramidal con canales rectangulares y tres niveles a cada lado. El sistema de riego fue en paralelo, en donde cada canal recibió la SN directamente del tanque de reserva y cada especie se ubicó de manera aleatoria en un nivel del sistema. Se establecieron tres réplicas del tratamiento y se comparó con un control sin réplicas, el cual no tenía yoduro de potasio adicionado a la solución nutritiva. Los cuatro tanques fueron ubicados de manera separada para generar réplicas del tratamiento y así obtener una estimación del error experimental que permita calcular una respuesta más precisa del efecto del yodo en las plantas.

Se ubicaron 15 plantas por canal con distancia de 15 cm entre ellas. En total se ubicaron 60 plantas por especie. Los tanques almacenaron 500 L de solución nutritiva y se ubicaron a una profundidad de 1m por debajo del nivel del suelo (Fig. 3). En cada uno se implementó una manguera de aireación para mejorar la oxigenación en los tanques. La solución nutritiva se recirculó con pulsos de 15 minutos cada 30 minutos desde las 8:00 am hasta las 6:00 pm y se mantuvo en circulación constante desde las 11:00 am hasta las 2:00 pm, cuando se presenta la mayor radiación solar y por lo tanto, la mayor demanda de agua y oxígeno.



**Figura 3.** Estructura NFT. a. Vista frontal de los 3 tratamientos y 1 control. b. Vista lateral canales de siembra

### **Siembra:**

Las semillas germinaron en una mezcla de turba con coco en una cámara oscura a 25°C durante 3 días.

Para el trasplante, se seleccionaron las plántulas con tamaños similares, y se retiró el exceso de turba. Las plantas se sembraron en canastillas de 4 cm de diámetro y se aseguró que las raíces estuvieran en contacto con el agua en circulación.

### **Solución nutritiva:**

Todos los tanques contenían la solución modificada estándar de Hoagland (tabla 2) calculada con los parámetros basados en el reporte generado desde el programa Euphoros (Incroncci et al. 2001). Los fertilizantes para la elaboración de la solución nutritiva fueron: nitrato de calcio, nitrato potásico, sulfato de magnesio, fosfato monopotásico, nitrato potásico, hierro EDTA, bórax, quelato de cobre, quelato de zinc, quelato de manganeso y heptamolibdato de amonio.

**Tabla 2.** Composición de la solución nutritiva empleada para el cultivo de la mizuna y el kale liso y rizado.

Elemento	Unidad	Concentración
NO3	mmol / L	14
NH4		1
P		1
K		6
Ca		4
Mg		2
SO4		2
Na		0
Fe	μmol / L	45
B		45
Cu		1
Zn		1
Mn		10
Mo		1

Se ha reportado que estas tres variedades de hortalizas presentan rangos de tolerancia al yodo diferentes, siendo el máximo 10μm/L en lechuga (Puccinelli et al. 2021), y en kale, Gonella et al. (2019) reportaron que 11.8μm/L no afectaron la acumulación de biomasa en las plantas, por lo que se usó el máximo valor para la lechuga sin afectar su rendimiento.

Todos los contenedores se llenaron con 500 L de solución en un relación de dilución 1:1 con conductividad eléctrica (CE) de 3.0 dS m<sup>-1</sup>, y con un pH de 6. Para disminuir la conductividad, se adicionó agua suficiente para reducirla a 2.0 dS m<sup>-1</sup>. En la cuarta semana de crecimiento la solución fue reemplazada por la original sin adición de agua para sostener la CE a 3.0 dS m<sup>-1</sup>. Los tanques con el tratamiento de yodo se adicionaron con 10μmol/L de KI. La conductividad eléctrica y el pH se midieron regularmente durante todo el experimento y debido a que la CE se mantuvo estable no se realizaron ajustes posteriores (anexo 1).

#### **Cosecha:**

La lechuga y el kale se cosecharon cuatro y seis semanas después de la siembra, respectivamente (Tabla 3). Se separaron las raíces y se pesaron únicamente las hojas. La calidad de la planta se juzgó visualmente por su apariencia, color y síntomas. Posteriormente, se secaron en horno a 70°C durante 48h. Las muestras fueron pesadas en seco y los valores fueron promediados por tratamiento y réplica.

**Medición de yodo:**

El yodo fue identificado por medio de una yodimetría. Este método está basado en la liberación del yodo en medio ácido y su posterior valoración volumétrica con tiosulfato de sodio al 0.005N en presencia de almidón.

**Tabla 3.** Actividades realizadas durante el experimento

<b>Actividad</b>	<b>Fecha</b>
Siembra	5/10/2021
Cambio de solución nutritiva	29/10/2021
Cosecha mizuna	3/11/2021
Cosecha kale	19/11/2021
Análisis de yodo en laboratorio	12/01/2022

**8c. Análisis de datos**

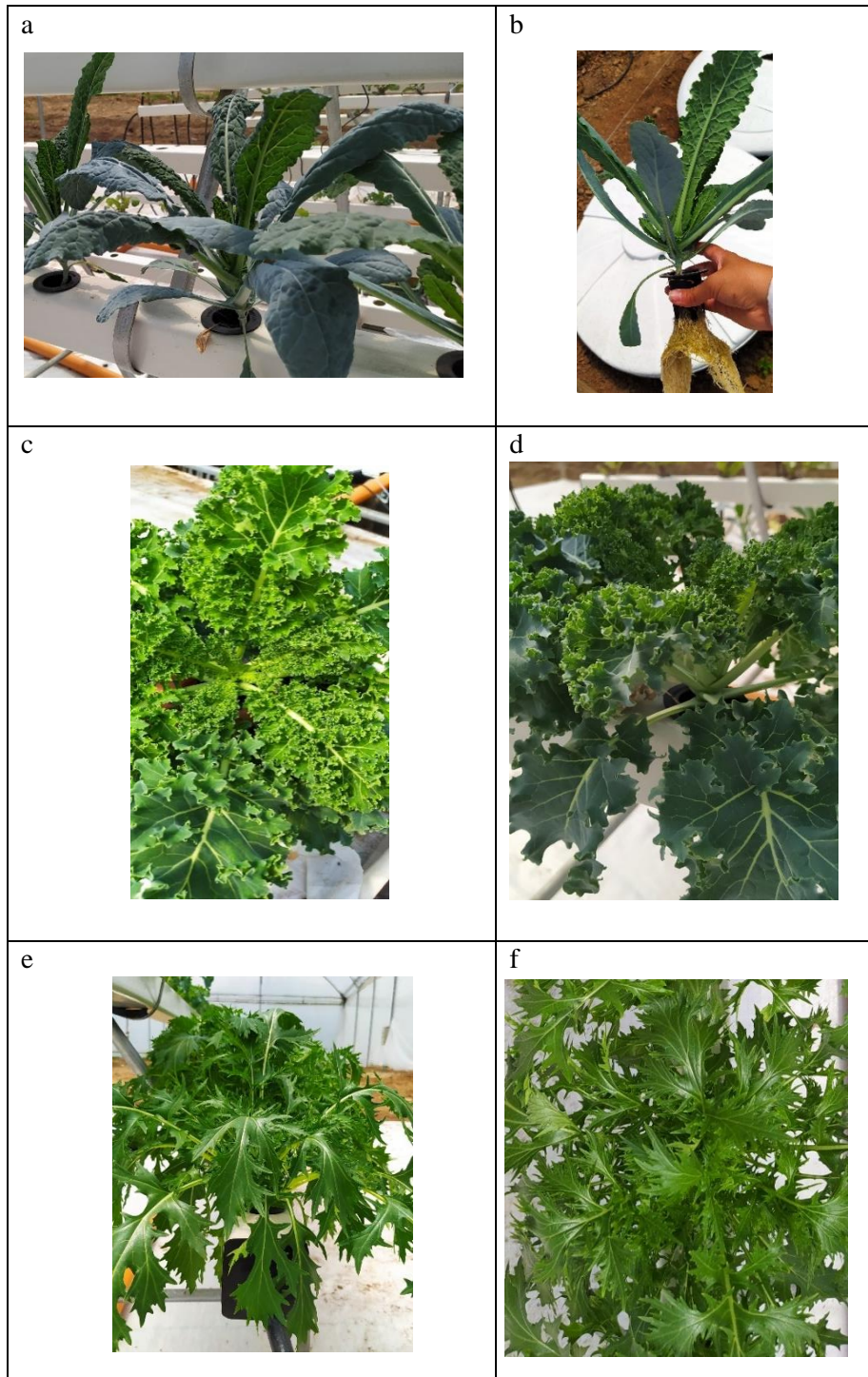
Se compararon los valores obtenidos tanto en productividad como en concentración de yodo y se determinó un intervalo de confianza para comparar las medias de cada réplica. Estos valores fueron comparados con otros estudios realizados en el mismo tema.



## 9.Resultados

### 9a. Biomasa y calidad de las plantas

En ninguno de los cultivos las plantas mostraron síntomas de intoxicación por yodo, los cuales se manifiestan con síntomas como bordes secos en las hojas, clorosis general y parches necróticos (Fig.4).



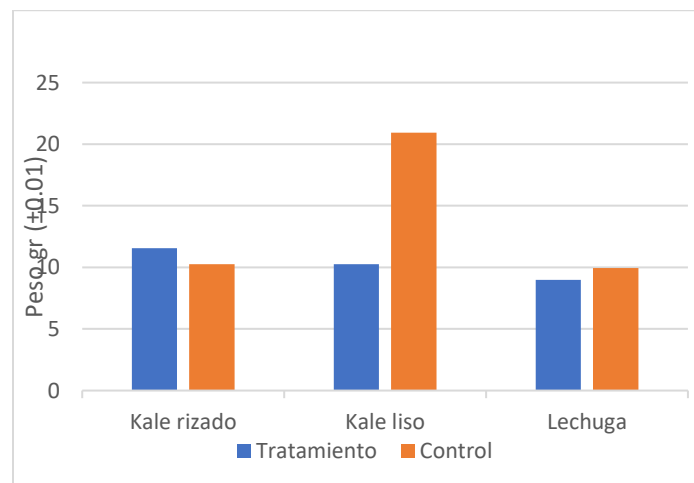
**Figura 4.** Plantas cosechadas a. Kale liso (control) b. Kale liso (KI) c. Kale rizado (control) d. Kale rizado (KI) e. Lechuga mizuna (control) f. Lechuga mizuna (KI).

En cuanto a la biomasa, no se encontró una relación directa entre la masa y el yodo en la solución nutritiva (tabla 4).

**Tabla 4.** Resultados de peso fresco y seco

Repetición	Promedio peso fresco hojas (g) $\pm 0.5$	Peso seco total (g) $\pm 0.01$	Promedio peso seco por planta (g) $\pm 0.01$
Control	58	82.15	10.26
Repetición 1	94	170.85	17.08
Repetición 2	53	82.00	9.11
Repetición 3	46	75.95	8.43
Control	109	230.37	20.94
Repetición 1	76	205.86	17.15
Repetición 2	26	76.47	6.95
Repetición 3	29	73.64	6.69
Control	109	129.14	9.93
Repetición 1	119	133.96	10.30
Repetición 2	112	132.61	11.05
Repetición 3	55	67.01	5.58

Si bien en el caso del kale liso, el promedio indica una mayor concentración de biomasa, los datos presentan una amplia dispersión, por lo que no es posible concluir que el tratamiento con yodo tuvo algún efecto diferente al control (Fig. 5). Adicionalmente, debido a la falta de réplicas en el control, no es posible realizar una comparación precisa entre los dos.



**Figura 5.** Promedio peso seco por planta en el tratamiento y el control.

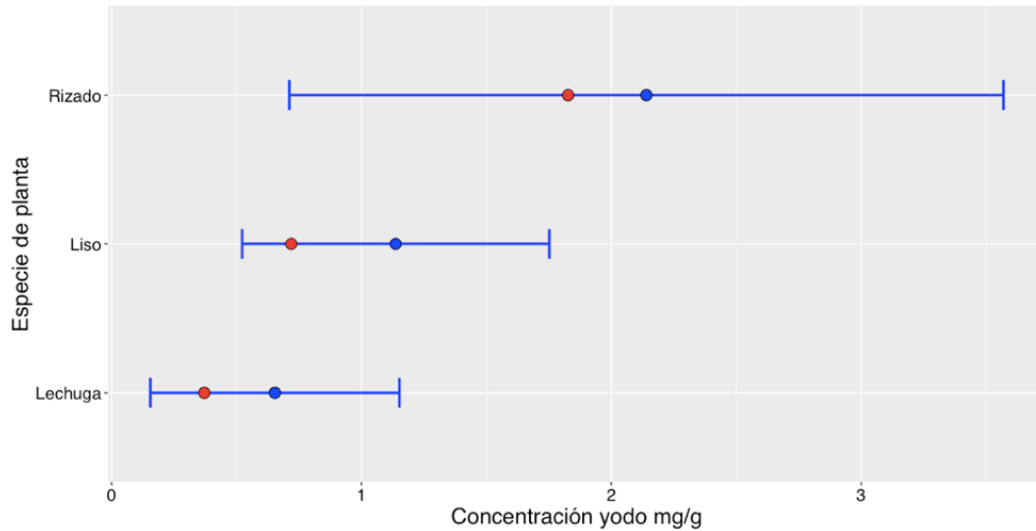
A continuación, se presentan los resultados del contenido de yodo por cada una de las especies estudiadas (tabla 5).

**Tabla 5.** Cuantificación de yodo en dos variedades de kale y lechuga

<b>Variedad</b>	<b>Repetición</b>	<b>Concentración yodo promedio mg/g (g)±0.001</b>
<b>Kale rizado</b>	Control	0.178
	Repetición 1	0.182
	Repetición 2	0.170
	Repetición 3	0.210
<b>Kale liso</b>	Control	0.034
	Repetición 1	0.090
	Repetición 2	0.117
	Repetición 3	0.160
<b>Lechuga</b>	Control	0.037
	Repetición 1	0.094
	Repetición 2	0.034
	Repetición 3	0.114

### **9b. Biofortificación de yodo**

Se encontró que todos los tratamientos, incluyendo el control, presentaron cantidades positivas de yodo (Tabla 1), con valores que van desde 0.034 a 0.182 mg/g. En el caso del kale rizado y la lechuga, los controles presentan cantidades de yodo similares al tratamiento, mientras que, para el kale liso, el control presenta menor contenido de yodo que el tratamiento. Se realizó un intervalo de confianza para determinar si las medias de los tratamientos se encontraban dentro del rango de valores esperados, y se encontró que los valores del control (rojo) presentan cantidades de yodo similares a la del tratamiento (Fig. 6), por lo que no hay diferencias significativas entre el control y el tratamiento con yodo.



**Figura 6.** Intervalo de confianza de la cantidad de yodo en foliares. Resultados del tratamiento con yodo ilustrados en azul, resultado del tratamiento control en rojo.

## 10. Discusión

### 10a. Biomasa y calidad de plantas

El tratamiento de yodo no tuvo efectos de toxicidad en las plantas a lo largo del estudio. Estos resultados se verificaron a través de un análisis morfológico y de color. Debido a la cantidad de yodo agregado a la solución nutritiva ( $10\mu\text{M}$  /L KI), no se esperaba tener efectos negativos en el desarrollo cualitativo de las plantas. Con respecto a las alteraciones morfológicas, otros estudios encontraron los mismos resultados (Gonella, 2019; Voogt, Holwerda & Khodabaks, 2010) ya que no se reportaron cambios de color notables. Este resultado denota la cantidad de clorofilas que están presentes en las hojas, según Smolen, Kowalska & Sady (2014), los contenidos de carotenoides y de clorofila no cambian por la adición de yodo en la solución nutritiva debido a la concentración baja de I en los tratamientos. En comparación, otros estudios aplicaron dosis de  $39$  y  $80\mu\text{M}$  a brásicas y a lechugas respectivamente (Weng et al. 2008; Blasco et al. 2011) donde las plantas presentaron síntomas como clorosis, manchas de necrosis y bordes secos.

En cuanto al crecimiento de las plantas, si bien los resultados no son concluyentes debido al diseño experimental, es posible que no haya diferencias de la acumulación de biomasa entre el control y el tratamiento. Según Blasco *et al.* (2010), los tratamientos con yodo menores a  $40\mu\text{M/L}$ , no afectan el contenido de nitrógeno en las hojas, lo cual no tiene efectos sobre el crecimiento y acumulación de biomasa. Aun así, algunos estudios reportan que puede haber un incremento de biomasa con bajas dosis de yodo en la solución nutritiva (Smolen, Ledwozyw-Smolen & Włodzimierz, 2016). Según Voogt, Holwerda & Khodabaks. (2010) es posible que estas diferencias en la acumulación de biomasa dependan de la especie

que se cultiva, ya que las especies que reportan resultados positivos son espinaca y tomate, mientras que el kale y la lechuga no han mostrado diferencias.

### **10b. Biofortificación de yodo**

Debido al contenido de yodo en las muestras control, es posible que existiera contaminación mediante el agua de los tanques de la solución nutritiva, o durante la manipulación de las muestras en la etapa de molienda. Voogt, Holwerda & Khodabaks (2009), encontraron que el control también presentó niveles de yodo, lo cual atribuyen en contaminaciones cruzadas de la SN entre tratamientos. Así mismo, la presencia de yodo en las muestras control pudo deberse a la presencia de yodo en el agua o en la turba usada para la germinación de las semillas. Según Zhao et al. (2021), dependiendo de las características de la turba, esta puede contener desde 1.6 a 11.9  $\mu\text{g/g}$ .

Los valores de yodo obtenidos en lechuga se asemejan a los reportados por Smolen, Kowalska & Sady (2014), quienes encontraron 50 mg/kg de yodo acumulado en la biomasa en un tratamiento de 1mg/L de I<sup>-</sup>. Si bien la concentración de yodo en la SN es superior a la usada en este estudio (10 $\mu\text{M}$ ), se obtuvo mayor concentración de I<sup>-</sup> (80mg/kg) en las muestras foliares. La diferencia de asimilación de yodo pudo deberse a las temperaturas más elevadas en este estudio (17°C > 13°C), lo cual incrementa la transpiración de las plantas; según Herrett *et al.*, (1962) , el yodo se transporta en gran medida por arrastre en las masas de agua. Voogt, Holwerda & Khodabaks (2010) encontraron que la acumulación de yodo es proporcional a la temperatura del experimento ya que las plantas en verano acumulan más cantidad de yodo en las hojas y el volumen de agua que consumen desde los tanques es mayor que en invierno, donde las temperaturas son menores.

En cuanto a las brásicas, los valores reportados (188, 122 mg/kg Kale rizado y liso) son similares a los encontrados por Weng *et al.* (2008), quienes reportaron 566 mg/kg en masa seca, en un tratamiento con una concentración de 20 $\mu\text{M}$ . Esto se debe a que a mayor concentración de I<sup>-</sup> aplicada a la SN, mayor es la retención de yodo en los tejidos de las plantas (Weng *et al.*, 2008; Smolen, Kowalska & Sady, 2014). Estos resultados difieren con lo encontrado por Gonella *et al.* (2019), quien reporta que obtuvieron valores bajos comparados con otros estudios, debido a que usaron una mezcla de perlita y turba (3:1) lo que causó la absorción del yodo por parte del sustrato, reduciendo la capacidad de las raíces para obtener el I<sup>-</sup>.

## 11. Conclusiones

La aplicación de yodo (KI) en una solución nutritiva para un cultivo hidropónico NFT en variedades de Kale y lechuga mitzuna representa una metodología viable para obtener plantas biofortificadas con yodo. Según los análisis de laboratorio, es posible medir los niveles de yodo foliar mediante técnicas cuantitativas.

El yodo no tuvo efectos sobre el crecimiento de las plantas tanto en sus características morfológicas como en su acumulación de biomasa. Sin embargo, es necesario resaltar que la metodología presentó limitaciones en su diseño y se debe tener en cuenta para el análisis de estos resultados.

## 12. Bibliografía

Blasco, B., Leyva, R., Romero, L. & Ruiz, J. 2013. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* (61)11: 2591-2596. <https://doi.org/10.1021/jf303917n>

Blasco, B.; Rios, J.J.; Cervilla, L.M.; Sánchez-Rodríguez, E.; Rubio-Wilhelmi, M.M.; Rosales, M.A.; Ruiz, J.M. & Romero, L. 2010. Photorespiration process and nitrogen metabolism in lettuce plants (*Lactuca sativa* L.): Induced changes in response to iodine biofortification. *Journal of Plant Growth Regulation*. 29: 477–486.

Blasco, B.; Rios, J.J.; Cervilla, L.M.; Sánchez-Rodríguez, E.; Rubio-Wilhelmi, M.M.; Rosales, M.A.; Romero, L. & Ruiz, J.M. 2011. Iodine application affects nitrogen-use efficiency of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica B Soil Plant Science*. 61: 378–383.

Dávila-Rangel, I., Lejía-Martínez, P., Medrano-Macías, J., Fuentes-Lara, L., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A. & Benavides-Mendoza, A. 2019. Iodine biofortification of crops. Nutritional quality improvements in plants. *Concepts and strategies in plant sciences*. Springer Nature Switzerland. 79-113pp.

Díaz-Gómez, J., Twyman, R., Zhu, C., Farré, G., Serrano, J., Portero-Otin, J., Muñoz, P., Sandmann, G., Capell, T. & Christou, P. 2017. Biofortification of crops with nutrients: factors affecting utilization and storage. *Current Opinion in Biotechnology*, (44): 115-123

Duborská, E., Urik, M., Seda, M. 2020. Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status. *Agronomy*. 10:1574. doi:10.3390/agronomy10101574

Gonella, M., Renna, M., D'imperio, M., Santamaría, P. & Serio, F. 2019. Iodine Biofortification of Four Brassica Genotypes is Effective Already at Low Rates of Potassium Iodate. *Nutrients*. 11: doi:10.3390/nu11020451

Gonzali, S., Kiferle, C. & Perata, P. 2017. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current opinion in biotechnology*. 44: 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.10.004>

Herrett, R., Hatfield Jr., H., Crosby, D & Vlitos, A. 1962. Leaf abscission induced by the iodide ion. *Plant Physiol* 37:358–363 (1962).

Incrocci L., Massa D., Pardossi A., Bacci L., Battista P., Rapi B., Romani M., (2012). A decision support system to optimise fertigation management in greenhouse crops. *Acta Horticulturae*. 927: 115- 122

Johnson, C. 2003. Database of the iodine content of soils populated with data from published literature. British Geological Survey. Nottingham, UK. 40p.

Kiferle, C., Gonzali, S., Howerlda, H., Real, R. & Perata, P. 2013. Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Frontiers in plant science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>

Lazarus, J. 2015. The importance of iodine in public health. *Environmental geochemistry and health*. 37: 615-618

Li R, Li DW, Yan AL, Hong CL, Liu HP, Pan LH, Song MY, Dai ZX, Ye ML, Weng HX (2018). The bioaccessibility of iodine in the biofortified vegetables throughout cooking and simulated digestion. *J Food Sci Technol* 55:366–375. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2946-4>

Martínez-Gascón, L., Ros, G., Periago, J. & Martínez, C. 2005. Importancia del yodo en la nutrición humana y en la práctica clínica. *Alimentación, nutrición y salud*. 13 (2):53-60

Plantin-Carrenard E, Beaudoux J, Foglietti M. 2000. Physiopathology of iodine: current interest of its measurement in biological fluids. *Ann Biol Clin* 58 (4): 395-403.

Puccinelli, M., Landi, M., Maggini, R., Pardossi, A. & Incrocci, L. 2021. Iodine biofortification of sweet basil and lettuce grown in two hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109783>

Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N. & Chaurasia, O. 2018. Hydroponics as an advance technique for vegetable production: an overview. *Journal of soil and water conservation*. 17(4): 364-371. DOI: 10.5958/2455-7145.2018.00056.5

Smolen, S., Kowalska, I. & Sady, W. 2014. Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system. *Scientific Horticulture*.166: 9–16.

Smoleń, S., Kowalska, I., Skoczylas, L., Liszka-Skoczylas, M., Grzanka, M., Halka, M. & Sady, W. 2018. The effect of salicylic acid on biofortification with iodine and selenium and the quality of potato cultivated in the NFT system. *Scientia Horticulturae*. 240: 530-543

Smolen, S., Smolen, Ledwozyw-Smolem, I., Halka, M., Sady, W. & Kovacik, P. 2017. The absorption of iodine from 5-iodosalicylic acid hydroponically grown lettuce. *Scientia Horticulturae*. 225: 716-725.

Tonacchera, M.; Dimida, A.; De Servi, M.; Frigeri, M.; Ferrarini, E.; De Marco, G.; Grasso, L.; Agretti, P.; Piaggi, P.; Aghini-Lombardi, F.; Perata, P., Pinchera, A. & Viti, P. 2013. Iodine Fortification of Vegetables Improves Human Iodine Nutrition: In Vivo Evidence for a New Model of Iodine Prophylaxis. *Journal of Clinical Endocrinology Metabolism*. 98: 694–697.

Trejo-Tellez, L. & Gomez, M. 2012. Nutrient Solutions for Hydroponics Systems, *Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. Dr. Toshiki Asao (eds). ISBN 978-953-51-0386-8.

Van Os, E., Giegling, T., Lieth, H. 2019. Technical equipment in soilless production systems. In: *Soilless Culture* (second edition). Raviv, M., Lieth, H. & Bar-Tal, A (Eds). Elsevier. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00013-X>

Voogt, W., Holwerda, H. & Khodabaks, R. 2010. Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration in the nutrient solution on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture. *Journal of the Science of Food Agriculture*. 90 (5): 906-13. doi: 10.1002/jsfa.3902

Weng, H.; Hong, C.; Xia, T.; Bao, L.; Liu, H. & Li, D. 2013. Iodine biofortification of vegetable plants—An innovative method for iodine supplementation. *China Science Bulletin*.58: 2066–2072.

Weng, H.X.; Hong, C.L.; Yan, A.L.; Pan, L.H.; Qin, Y.C.; Bao, L.T. & Xie, L.L. 2008. Mechanism of iodine uptake by cabbage: Effects of iodine species and where it is stored. *Biology trace element research*. 125(1):59-71. DOI: 10.1007/s12011-008-8155-2.

Zhao, Z.; Hou, X.; Zhang, D.; Yang, Y.; Huang, Z. & Liu, Q. 2021. Records of iodine isotopes (<sup>129</sup>I, <sup>127</sup>I) in the Barkol peat bog from northwest China and their sources, transport and preservation. *Chemosphere*. 279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130531>



Zhao, J.; Wang, P.; Shang, L.; Kevin, M.; Sullivan, K. M.; Van der Haar, F. & Maberly, G. 2000. Endemic goiter associated with high iodine intake. American Journal of Public Health. 90 (10):1633-635

Zhu YG, Huang YZ, Hu Y, Liu YX. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. Environment International 29(1):33-7. doi: 10.1016/S0160-4120(02)00129-0

### 13.Anexos

#### Anexo 1. Monitoreo de conductividad y pH en los 4 tanques de SN

Fecha	Tanque 1		Tanque 2		Tanque 3		Tanque 4 (control)	
	Ce	pH	Ce	pH	Ce	pH	Ce	pH
8/10/2021	3.5	6.3	3.2	6.15	3.3	6.25	3.4	6.4
10/11/2021*	2.34	6.38	2.2	6.36	2.21	6.39	2.2	6.41
12/10/2021	2.09	6.36	2.15	6.39	2.1	6.25	2.19	6
13/10/2021	2.08	6.37	2.25	6.39	2.12	6.25	2.12	6.1
14/10/2021	2.08	6.37	2.25	6.39	2.12	6.25	2.12	6.1
15/10/2021	2.16	6.37	2.13	6.34	2.17	6.42	2.13	6.3
19/10/2021	2.34	6.38	2.2	6.36	2.21	6.39	2.2	6.41
20/10/2021	2.34	6.38	2.2	6.36	2.21	6.39	2.2	6.41
21/10/2021	2.33	6.37	2.21	6.36	2.19	6.4	2.2	6.46
22/10/2021	2.34	6.4	2.2	6.36	2.21	6.39	2.2	6.46
25/10/2021	2.4	6.48	2.18	6.46	2.22	6.43	2.26	6.49
26/10/2021	2.4	6.48	2.18	6.46	2.22	6.43	2.26	6.49
27/10/2021	2.45	6.48	2.18	6.5	2.2	6.42	2.26	6.49
28/10/2021	2.48	6.5	2.2	6.55	2.27	6.49	2.21	6.51
10/29/2021**	3.25	6.3	3.17	6.17	3.07	6.12	3.03	6.33
2/11/2021	3.25	6.3	3.17	6.27	3.07	6.12	3.03	6.3
3/11/2021	3.25	6.3	3.07	6.27	3.17	6.12	3.03	6.3
4/11/2021	3.35	6.3	3.07	6.17	3.17	6.12	3.23	6.33
5/11/2021	3.35	6.3	3.07	6.17	3.17	6.12	3.23	6.33
8/11/2021	3.38	6.3	3.12	6.2	3.21	6.09	3.28	6.25
9/11/2021	3.25	6.3	3.27	6.27	3.27	6.12	3.13	6.3
10/11/2021	3.38	6.3	3.12	6.2	3.21	6.09	3.28	6.35
11/11/2021	3.25	6.3	3.22	6.2	3.28	6.19	3.38	6.25
15/11/2021	3.41	6.5	3.2	6.4	3.33	6.3	3.42	6.38
16/11/2021	3.41	6.53	3.2	6.41	3.33	6.34	3.42	6.4
17/11/2021	3.4	6.55	3.22	6.41	3.3	6.34	3.47	6.43

\*Dilución de la solución nutritiva

\*\*Recomposición de la solución nutritiva