

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

Trabajo Final de Graduación sometido a la consideración de la Comisión
de Trabajos Finales de Graduación para optar por el grado de Licenciado
en Ingeniería Química

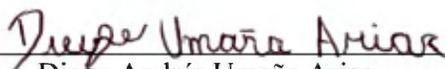
**Puesta en marcha de un prototipo para el tratamiento de aguas
contaminadas con arsénico(V) mediante el uso de la planta *Justicia
pectoralis* Jacq**

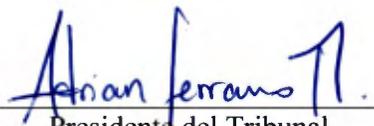
Diego Andrés Umaña Arias
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca
San José, Costa Rica

2023

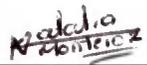
Tribunal Examinador

Este trabajo final de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química.

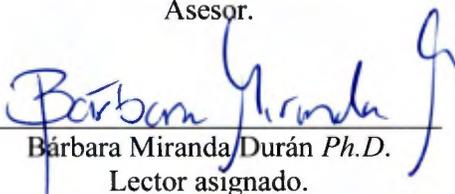

Diego Andrés Umaña Arias.
Postulante


Presidente del Tribunal.
Adrián Serrano Mora, *Ph.D.*


Rosaura M. Romero Chacón, *Ph.D.*
Directora de tesis.


Lic. Natalia Montero Rambla
Asesora.


Lic. Esteban Gamboa Gamboa.
Asesor.


Bárbara Miranda Durán *Ph.D.*
Lector asignado.

Dedicatoria

Primero que nada a Dios, por ser siempre mi fuente de inspiración, tranquilidad y refugio en todo momento, tanto de felicidad como de angustia, así como poner en el camino personas tan maravillosas y especiales a mi vida.

A mi amada y querida madre Vera, gracias por enseñarme a leer, escribir y estudiar. Gracias por sentarte conmigo a estudiar durante mi niñez, por llenarme de sueños, metas y sobre todo por apoyarme y motivarme en todo momento. Eres uno de los pilares de mi vida y estoy orgulloso de dedicarte esto, gracias por amarme tanto. Te amo infinitamente.

A mi padre Andrés, gracias por tu gran esfuerzo, amor y dedicación para conmigo y mi madre. Gracias por ser un ejemplo de hombre para mí, amarme tanto y por simplemente ser mi superhéroe. Te admiro y estoy agradecido de ser quien soy gracias a ti. Te amo con todo viejo.

A mi novia, gracias por llegar a mi vida y ser una fuente increíble de inspiración constante y amor, sin lugar a duda quiero dedicarte esto porque gracias a ti hubo un cambio radical y he logrado cumplir muchos sueños a tu lado. Te amo.

Por último, a mi viejito Carlos, a quien sé que desde el cielo estará orgulloso de esté logró y a quien dedico con todo mi ser esto. Viejo gracias por tu apoyo, por motivarme a estudiar, tus consejos, tus risas y regaños. Va para ti viejo, te amo y amaré por toda mi vida.

Agradecimientos

A Doña Rosaura M. Romero y CIPRONA por recibirme con los brazos abiertos dentro del Centro de Investigación, así como por todo su apoyo y mentoría durante el proceso del estudio. No tengo como pagarles por tal oportunidad, gracias.

A la profesora Natalia y Esteban, por querer formar parte del equipo de trabajo, por su apoyo constante y mentorías brindadas. Adicionalmente gracias durante toda la carrera por su constante impulso, amistad y apoyo en todos los ámbitos, infinitas gracias por su apoyo a AIChE.

Al Tecnológico de Costa Rica por su apoyo durante el análisis de las muestras, gracias por el recibimiento, asesoramiento y trabajo realizado.

A mi amada Universidad de Costa Rica, gracias por su infinito apoyo, ya que gracias a este se permitió que un joven con sueños pudiera estudiar en tan prestigiosa casa de conocimientos. Además agradezco al sistema de becas ya que gracias a este puedo decir que me convertí en un profesional.

A mi amigo y tío Minor, gracias estimado, por tus enseñanzas, regaños y constante motivación para salir adelante. Gracias por tantos viajes, pláticas y sabiduría brindada.

Y sobre todo y más importante a mis queridos padres por su constante apoyo, motivación y ayuda durante el proceso del TFG y estudios, sin ustedes, definitivamente mi éxito no sería posible.

Índice general

Portada.....	i
Tribunal Examinador.....	iii
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vii
Índice general.....	ix
Índice de figuras.....	xi
Índice de cuadros.....	xv
Resumen.....	xix
1. Fundamento Teórico.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.1 Contaminación a causa de metales pesados.....	2
1.1.1 Contaminación en aguas por arsénico.....	4
1.1.2 Contaminación por arsénico en Costa Rica.....	6
1.1.3. Efectos en la salud por el consumo de arsénico.....	8
1.2. Tratamiento de agua contaminada con metales pesados: tecnologías disponibles, métodos fisicoquímicos y biológicos.....	9
1.2.1. Tratamientos convencionales para la remoción de metales pesados en aguas residuales.....	10
1.2.2. Tratamientos no convencionales (biológicos) para remoción de metales.....	12
1.3. Sistemas hidropónicos.....	13
1.3.1 Tipos de sistemas hidropónicos.....	18
1.4 Fitorremediación para tratamiento de aguas.....	22
1.4.1 Selección de plantas para su uso en fitorremediación.....	23
1.4.2 Bioética en el uso de plantas para tratamiento de contaminantes.....	26
2. Metodología.....	31
2.1 Objetivo General.....	31
2.2 Objetivos Específicos.....	31
2.3 Metodología de trabajo.....	31
2.3.1 Selección de la especie vegetal.....	31

2.3.2	Diseño y construcción del prototipo para tratamiento de agua contaminada con arsénico	31
2.3.3	Adaptación de las plantas al medio hidropónico y al prototipo diseñado.....	33
2.3.4	Cuantificación de masa del sistema radicular de las plantas.....	34
2.3.5	Adaptación de las plantas al medio hidropónico con agua contaminada con arsénico 34	
2.3.6	Instrumentación y metodología utilizada para la determinación de remoción de arsénico.....	35
3.	Análisis de Resultados	37
	Conclusiones	65
	Recomendaciones	65
	Nomenclatura.....	67
	Bibliografía	69
4.	Apéndices	75
A.	Resultados.....	75
B.	Cálculos realizados	88
a.	Número de Reynolds.....	88
b.	Selección de potencia de la bomba para sistema hidropónico	88
c.	Volumen para utilizar en contenedor para crecimiento de planta <i>Justicia pectoralis</i> Jacq	89
d.	Tiempo de llenado tubos.....	89
e.	Tiempo de drenados tubos	90
5.	Anexos.....	91
1.	Resultados de laboratorio externo	91

Índice de figuras

Figura 1. Formas del arsénico en el ambiente y su toxicidad (Sanz, 2015).	5
Figura 2. Mapa de concentración de arsénico en los suelos de Costa Rica (Castillo, 2019).....	7
Figura 3. Relación de los componentes de un sistema hidropónico (Oasis, 2015).	15
Figura 4. Tipos de sistemas hidropónicos existentes (Generación Verde, 2017).	19
Figura 5. Principales estrategias asociadas al proceso de fitorremediación (Peralta-Pérez & Volke-Sepúlveda, 2012).....	26
Figura 6. Esquema de tratamiento de muestras con arsénico.	36
Figura 7. Plantas madre tomadas del invernadero del CIPRONA.	37
Figura 8. Separación de las plantas madre en recipiente rectangular	37
Figura 9. Plantas madre reproducidas para obtención de estacas para ensayos.....	38
Figura 10. Crecimiento de plantas en frascos tipo Gerber.	38
Figura 11. Sistema radicular plantas en frasco tipo Gerber tras 3 semanas.	39
Figura 12. Diseño de caja negra para el sistema hidropónico.	40
Figura 13. Diseño del sistema hidropónico, vista lateral (cuña), vista superior (tubo) (elaboración propia).....	41
Figura 14. Caja tipo uso pesado implementada como contenedor en el sistema hidropónico (EPA, 2022).	42
Figura 15. Diseño conceptual final del sistema hidropónico a implementar (2 vistas).	42
Figura 16. Ensamble final del prototipo hidropónico implementado.....	43
Figura 17. Crecimiento de las plantas en el prototipo hidropónico construido, día cero.	44
Figura 18. Crecimiento de las plantas en el prototipo hidropónico día 16 (izquierda) y día 29 (derecha).	45
Figura 19. Datos de masa de raíz de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en cada sistema utilizado en el prototipo construido para tratamiento de agua con arsénico.	47
Figura 20. Comportamiento del valor de pH bajo ensayos de crecimiento de sistema radicular de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido.	48
Figura 21. Comportamiento del valor de electroconductividad bajo ensayos de crecimiento de sistema radicular de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido.	49

Figura 22. Comparación de sistema radicular y aéreo de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq tras 3 semanas en ensayo 2 de crecimiento en prototipo construido.....	50
Figura 23. Comparación de los tiempos de llenado y drenado del sistema acorde a la película inicial de disolución nutritiva en los tubos.....	51
Figura 24. Sistema radicular de la planta <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en prototipo diseñado bajo configuración NFT modificado.	52
Figura 25. Remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq (ensayo 1).	53
Figura 26. Remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq (ensayo 2).	54
Figura 27. Comportamiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en un prototipo para el tratamiento de Arsénico.....	55
Figura 28. Remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq (ensayo 3, 4 y 5).....	56
Figura 29. Tendencia de remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	56
Figura 30. Extrapolación de datos mediante uso de la tendencia de remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.....	57
Figura 31. Tasa de Acumulación de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	57
Figura 32. Lista de salarios mínimos por ocupación II Semestre 2022 (Ministerio de Trabajo de Costa Rica, 2022).	84
Figura 33. Cotización bomba sumergible modelo KRT Drainer FI 500 (Novatec, 2022).	85
Figura 34. Curva de bombeo bomba sumergible KRT Drainer FI 500 (Novatec, 2022).	85
Figura 35. Tanque 1.1 m ³ tricapa marca Ecotank (Construplaza, Agosto 2022).....	86
Figura 36. Factura Bomba Boyu FP-1500.....	86
Figura 37. Factura madera para construcción de cuñas de soporte.....	87
Figura 38. Factura insumos necesarios para construcción de sistema hidropónico.	88
Figura 39. Primer ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2021).	91

Figura 40. Segundo ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2022).....	92
Figura 41. Tercer ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2022).....	93
Figura 42. Cuarto ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2022).....	94
Figura 43. Quinto ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2022).....	95
Figura 44. Cuantificación de arsénico en planta mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2022).....	96
Figura 45. Determinación de masa total de la muestra en estado sólido para cuantificación de arsénico removido por plantas en ensayo 5 (CEQUIATEC, 2022).	97
Figura 46. Calcinación de masa total de la muestra en estado sólido para cuantificación de arsénico removido por plantas en ensayo 5 (CEQUIATEC, 2022).	97
Figura 47. Filtración de réplicas de las muestras en estado sólido calcinadas y digeridas cuantificación de arsénico removido por plantas en ensayo 5 (CEQUIATEC, 2022).....	98

Índice de cuadros

Cuadro 1. Características, fuentes de exposición y toxicología de algunos metales pesados (Londoño Franco et al., 2016).	3
Cuadro 2. Valores de dosis letal media de las principales especies de arsénico presentes en el medio ambiente (Villegas, 2014).	6
Cuadro 3. Principales ventajas y desventajas de la fitorremediación (Núñez, 2004).	23
Cuadro 4. Datos técnicos de la bomba BOYU modelo FP-1500 para alimentación y recirculación del sistema (obtenido de manual técnico de SERA Precision).	41
Cuadro 5. Configuración de cada uno de los tubos del prototipo construido para el crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	43
Cuadro 6. Estimación de costos fijos para la construcción y operación de un prototipo NFT modificado para el tratamiento de arsénico mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	58
Cuadro 7. Estimación de costos variables para la construcción y operación del prototipo para el tratamiento de arsénico mediante uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	60
Cuadro 8. Estimación de costos fijos con factor de escalación para la construcción para el tratamiento de arsénico por metro cúbico de agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	62
Cuadro 9. Estimación de costos variables escalados para la construcción y operación del prototipo para el tratamiento de arsénico mediante uso de sistema <i>Justicia pectoralis</i> Jacq. ...	63
Cuadro 10. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el primer ensayo de crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.	75
Cuadro 11. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el segundo ensayo de crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.	75
Cuadro 12. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el tercer ensayo de crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.	76
Cuadro 13. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el cuarto ensayo de crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.	76
Cuadro 14. Valores óptimos de pH y electroconductividad a manejar para el crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en sistemas hidropónicos (elaboración propia).	76
Cuadro 15. Valores de masa de raíz obtenidos de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuración NFT en cada uno de los ensayos admisibles.	77
Cuadro 16. Valores de masa de raíz obtenidos de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuración NFT Modificado en cada uno de los ensayos admisibles.	77

Cuadro 17. Valores de masa de raíz obtenidos de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuración Raíz Flotante en cada uno de los ensayos admisibles.	78
Cuadro 18. Valores de masa de raíz obtenidos de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas en tercer ensayo (no admisible).	78
Cuadro 19. Valores promedio de masa de raíz de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq obtenidos en el prototipo construido bajo configuraciones distintas de sistema hidropónico.	78
Cuadro 20. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 1.	79
Cuadro 21. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 2.	79
Cuadro 22. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 3.	80
Cuadro 23. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 4.	80
Cuadro 24. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 5.	80
Cuadro 25. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, promedio ensayos 3 al 5.	81
Cuadro 26. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, cálculo por día bajo curva de adsorción-absorción.	81
Cuadro 27. Datos obtenidos para la determinación de tipo de flujo en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq y remoción de arsénico.	82
Cuadro 28. Datos obtenidos para la selección de la bomba a utilizar en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq y remoción de arsénico.	82
Cuadro 29. Datos obtenidos para la selección del volumen de agua en el contenedor a utilizar en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	82
Cuadro 30. Datos obtenidos para la selección del volumen de agua en el contenedor a utilizar en el sistema hidropónico construido para ensayos de remoción de arsénico mediante el uso de <i>Justicia pectoralis</i> Jacq.	83
Cuadro 31. Datos de tiempo de llenado y drenado sistema hidropónico acorde a nivel de película de nutrientes en tubos de crecimiento.	84

Resumen

El presente proyecto tiene como fin la implementación del tratamiento biológico conocido como fitorremediación, por medio del diseño de un prototipo que permita la reducción de arsénico en aguas contaminadas con el metaloide.

Se estudiaron 3 configuraciones diferentes para el crecimiento del sistema radicular de la planta. Ellas se construyeron y se sometieron a pruebas a nivel mecánico e hidráulico, determinando que eran aptas para la ejecución de las corridas de crecimiento y remoción de arsénico.

En primera instancia se buscaron las condiciones y las variables necesarias para el crecimiento de la planta *Justicia pectoralis* Jacq en un sistema hidropónico, Entre los factores que se toman en consideración se encuentran los materiales de diseño, instrumentación requerida, caudal, tubería y accesorios requeridos, tipo de sistemas a implementar, así como la calidad de la disolución de los nutrientes utilizados. Tanto el pH y la electroconductividad juegan un papel fundamental, siendo que el pH óptimo para el crecimiento entre 6 y 6,5, y la electroconductividad mayor a 0,780 mS/cm.

Los sistemas hidropónicos seleccionados para el crecimiento y la la obtención de mayor masa de la planta fueron un sistema NFT (inclinación 2% y 1%), un NFT modificado (con sistema de inundación y drenaje) y un sistema de raíz flotante (sin recirculación). Tras la ejecución de diferentes ensayos con un tiempo aproximado de 27 días, se selecciona el sistema NFT modificado por presentar el rendimiento con menor variabilidad y mayor cantidad de masa producida a nivel radicular.

Los ensayos de remoción de arsénico en el sistema seleccionado contaron con una muestra de 30 L de agua conteniendo una disolución de arsénico, a la cual se expusieron 30 plantas por un periodo de 12-18 días. Las concentraciones de arsénico se lograron disminuir a menos de 10 µg/L.

El costo de inversión total estimado del proyecto es de ¢446 521,56 para un tratamiento de 30 L de agua contaminada con arsénico bajo las condiciones empleadas. Por otro lado, al realizar un escalamiento geométrico resulta que para un tratamiento de arsénico por metro cúbico se tiene un costo aproximado cercano a los ¢4 260 226,87 bajo el diseño propuesto.

El prototipo seleccionado cumple con su objetivo dado que se alcanza la reducción del metaloide a valores solicitados por la OMS, mediante la implementación de sistemas hidropónicos tipo NFT modificado. Sin embargo, se recomienda la ejecución de ensayos *in situ* para la disminución del tiempo de remoción de arsénico mediante fitorremediación con el uso de la planta *Justicia pectoralis* Jacq. Se sugiere explorar cuáles otras tecnologías emergentes pueden acoplarse al diseño de este prototipo para así disminuir el tiempo tratamiento a menos de 12 días, así como la reducción de la inversión.

1. Fundamento Teórico

1.1. Introducción

En los últimos años la preocupación debido al impacto que tienen las actividades desarrolladas por el ser humano sobre el ambiente y su entorno han incrementado de manera gradual, a tal punto en el que no se pueden pasar por alto las consecuencias que estas generan sobre el ambiente y en la salud de las personas. Es por ello por lo que continuamente se siguen generando investigaciones, proyectos, normas, entre otros trabajos o documentos, con el fin de buscar una solución que minimice o erradique el problema de la contaminación (Garzón et al., 2017).

Lo primero que hay que comprender cuando se habla del impacto de las actividades humanas sobre el ambiente son dos conceptos claves: contaminación y contaminantes. El primero se refiere a la presencia o incorporación de sustancias (contaminantes) en el aire, agua o suelo, en concentraciones que puedan generar afectaciones en la salud y bienestar de los seres vivos, así como el uso del o los recursos contaminados. Por otro lado, un contaminante se refiere a cualquier sustancia, ya sea de carácter orgánico o inorgánico y forma de energía que puede causar un daño de manera reversible o irreversible sobre un ecosistema, ya sea directamente sobre el espacio físico o directamente en el individuo (Magallón, 2011).

Dentro de los contaminantes se tienen distintos tipos los cuales pueden ser clasificados de la siguiente manera de acuerdo con Magallón (2011):

Contaminantes no degradables: Son aquellos que no se degradan de manera natural, es decir, requieren de un tratamiento en caso de contaminación. Se recomienda un adecuado manejo de ellos, evitando arrojarlos al ambiente mediante un programa de prevención, así como su correcta disposición o reciclaje en caso de ser reutilizables. Ejemplo de este tipo de contaminantes son los elementos químicos como los metales y metaloides en sus diferentes formas, tales como el plomo, el arsénico y el mercurio.

Contaminantes de degradación lenta: Se refiere a aquellos que una vez en el ambiente requieren un prolongado período de tiempo para degradarse, ya sea años, décadas o incluso mayor cantidad de tiempo. Ejemplo de ellos son los polímeros conocidos como plásticos.

Contaminantes degradables: Son aquellos que se descomponen de manera completa o parcial a niveles toxicológicos aceptables (dentro de los valores límites) mediante

procesos naturales, ya sea físicos, químicos o biológicos. Un ejemplo de ello son las cáscaras de las frutas o pañuelos de algodón, entre otros.

Contaminantes biodegradables: Son aquellos que se descomponen o metabolizan en sustancias más sencillas debido a la acción o intervención de microorganismos. Un ejemplo de ello son las aguas negras, las cuáles se degradan rápidamente por las bacterias siempre y cuando no se exceda el flujo al cual se dan los procesos de descomposición.

En el presente estudio el problema en cuestión se enfocará en la contaminación del agua por un contaminante no degradable: el arsénico.

1.1 Contaminación a causa de metales pesados.

El agua como ya se mencionó, es un recurso de vital importancia tanto para el desarrollo y operación de las diversas industrias alrededor del mundo, así como el diario acontecer de las personas en sus hogares y comunidades. Es por ello que resulta de vital importancia garantizar un correcto manejo y uso de este recurso, así como una adecuada disposición y tratamiento en caso de contaminarse en algún proceso ya sea de carácter comercial o no, asegurando de esta forma la calidad, consumo y acceso seguro a agua potable.

Uno de los principales contrastes de lo anterior es el concerniente a la contaminación de fuentes de agua causados por metales pesados, los cuales se pueden encontrar de manera natural en la corteza terrestre. Algunos de estos son el cobre, cobalto, hierro, magnesio, zinc, plomo, mercurio, níquel, entre otros, y a los cuales los seres vivos se encuentran expuestos.

Además, las aguas pueden contaminarse también debido a la acumulación de metales pesados y metaloides, producida por las emisiones causadas de las distintas actividades industriales, la explotación minera, su incorrecta disposición, la gasolina con plomo, pinturas, efluentes industriales, uso de fertilizantes y pesticidas empleados en los cultivos, derrames de productos petroquímicos, entre otros (Castro, 2006).

Los metales pesados de acuerdo con la tabla periódica de los elementos son aquellos que poseen una alta densidad (mayor a 4 g/mL), así como una masa y peso atómico por encima de 20. Otra característica fundamental es que algunos de estos son considerados como tóxicos a bajas concentraciones, como por ejemplo el arsénico, cadmio y el mercurio.

Algunos de estos elementos son los siguientes: aluminio, bario, berilio, cobalto, cobre, cadmio, estaño, hierro, zinc, plomo, arsénico, manganeso, mercurio, cromo, molibdeno,

plata, níquel y otros. Algunos de ellos pueden ser esenciales para la dieta, sin embargo, la gran mayoría más bien resultan tóxicos para los seres vivos. Por lo anterior, siempre es mejor evitarlos completamente.

El riesgo que se presenta por ellos involucra normalmente dos vías: la primera debido al transporte medioambiental en el aire, agua, polvo, suelo y comida, mientras que la segunda por alteraciones en su forma bioquímica. El cuadro 1 contiene un resumen de las características de algunos de estos metales, así como su toxicología (Londoño Franco et al., 2016).

Cuadro 1. Características, fuentes de exposición y toxicología de algunos metales pesados (Londoño Franco et al., 2016).

Metal	Características	Fuentes de exposición y toxicidad
Cadmio	Número atómico 48, peso atómico de 112 g/mol y densidad relativa de 8 g/mL. Se encuentra raramente en la naturaleza, no obstante, se ve asociado en muchas ocasiones al zinc. En su estado natural posee un color blanco con una cierta tendencia al azul. Él es usado en pinturas, plásticos, pilas, abonos, fármacos, entre otras industrias.	La exposición se da mayoritariamente por medio de alimentos y el agua. En casos particulares se puede aducir a personas expuestas al humo del tabaco. Las personas con intoxicación crónica pueden presentar anemia, disfunción renal, cálculos renales, cáncer de próstata y pulmón. En caso de intoxicación aguda algunos síntomas son presencia de vómito, diarrea, fallo renal, entre otros.
Plomo	Número atómico 82, peso atómico 207 g/mol y densidad relativa de 11,6 g/mL. Posee un color azulado y tiende a formar muchas sales, óxidos y compuestos de origen organometálico.	La exposición mayoritaria a éste se da por el continuo uso de pinturas u otros productos que lo contengan, así como por ingesta de agua asociado al uso de plomería metálica con contenido de plomo o también ingesta accidental.

<p>Él se encuentra en la industria en forma de óxidos y como tetraetilo de plomo, además de ser parte de aleaciones con otros metales como el estaño, cobre, arsénico, cadmio y sodio. También se le puede encontrar en minerales comerciales, como aditivo antidetonante de la gasolina, computadores, pantallas y otros.</p>	<p>Según datos de la OMS la ingestión vía oral es de un 10% en adultos y se incrementa en 50% en niños.</p> <p>El metal una vez absorbido, se distribuye en diferentes órganos tales como el riñón, hígado, encéfalo y huesos. En caso de estos últimos, tiende a acumularse hasta por 20 años causando inhibición de la hemoglobina y causando daño neurológico.</p>
<p>Mercurio Número atómico 80, peso atómico de 200 g/mol y densidad relativa de 13,6 g/mL. Él se encuentra en forma líquida y es de color blanco plateado a temperatura ambiente. Tiende a formar amalgamas con otros metales tales como el oro, la plata, cobre y otros. Se puede encontrar comúnmente como sulfuro y como rojo de cinabrio. Sus usos y aplicaciones van desde empastes dentales, fluorescentes, cosméticos, cremas y jabones hasta usos en minería.</p>	<p>La exposición a este metal se relaciona principalmente a la ingesta por productos alimenticios contaminados, tal como es el caso de los peces. También por el contacto directo o indirecto como pueden ser las nubes de polvo a la que son expuestos los mineros o bien por ingesta de agua con trazas del metal.</p> <p>En caso de intoxicación crónica se puede presentar síntomas como temblores, hipertrofia, taquicardia, pérdida de memoria, alucinaciones y otros. Adicional a ello puede ser causa de daño renal, afección al sistema nervioso y pérdida de visión</p>

1.1.1 Contaminación en aguas por arsénico

El arsénico es un metaloide que se localiza de manera natural en la corteza terrestre y que está presente tanto en el agua, aire y la tierra, y que al presentarse en su forma inorgánica

resulta muy tóxico (Organización Mundial de la Salud, 2018). Posee el número atómico 33 y un peso atómico de 74,9 g/mol. Se le considera un elemento ubicuo, es decir, al estar presente en muchos lugares y situaciones da la apariencia de estar en todas partes (Wang, 2004) . Lo anterior dado que sus fuentes son múltiples. Naturalmente se presenta por meteorización, rocas sedimentarias marinas, procesos de vulcanización, erosión, cenizas de rocas volcánicas, carbón, petróleo o bien por actividad biológica. Por otro lado, él puede presentarse en productos derivados de la actividad humana, tal como la minería, la fundición de metales, el uso de pesticidas, biocidas o sustancias químicas que lo contengan, entre muchas otras fuentes (Colina Blanco, 2015).

Al igual que con otros metales y metaloides, la exposición a altas concentraciones se puede aducir al consumo de agua o bien a su uso en la preparación de las diferentes comidas a lo largo del día. No obstante, también puede provenir del riego con agroquímicos de diferentes cultivos alimentarios, así como a los diferentes procesos industriales e inadecuada manipulación y disposición de los residuos (Nava, 2011).

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza y es el número 52 en abundancia dentro de la corteza terrestre, con un aproximado de 2 ppm. Se clasifica como semimetálico y se considera como uno de los elementos más peligrosos en el ambiente. Los estados de oxidación que caracterizan a este metaloide son el As (III) y As (V) y en menor medida As (0) y As (-III) (Montero-Campos et al., 2010).

El arsénico se puede encontrar tanto en forma orgánica como inorgánica y de acuerdo con la Academia Nacional de Ciencias (1999) su toxicidad es la siguiente escala descendente: “arsina > As^{3+} inorgánico > As^{3+} orgánico > As^{5+} inorgánico > As^{5+} orgánico > compuestos arsenicales > arsénico elemental”, siendo la toxicidad del As^{3+} 10 veces más tóxico que el As^{5+} (Villegas, 2014). En la figura 1 se puede apreciar con detalle las formas en las que se encuentra el arsénico, así como su escala de toxicidad.



Figura 1. Formas del arsénico en el ambiente y su toxicidad (Sanz, 2015).

Los estados de oxidación, así como la movilidad dependen directamente del potencial redox y del pH en el que se encuentre el metaloide. El arsénico trivalente y pentavalente son ambos móviles en el medio, no obstante, el As (III) es la especie más móvil en el medio ambiente y la más tóxica (Rodríguez Martínez et al., 2017).

El arseniato, es decir, As (V) ocupa un aproximado del 60% del total presente en la Tierra. Por ende, su presencia tanto en agua como en suelos es mayor a las otras especies (Arias-Barrantes et al., 2018).

Los compuestos del arsénico tienen alta capacidad de sorberse y desorberse de partículas, así como una gran facilidad para cambiar de estado de oxidación al entrar en contacto directo con el oxígeno presente en el aire, suelo y agua o bien por la acción de microorganismos con alto poder oxidante (Rodríguez Martínez et al., 2017). Lo anterior resulta preocupante dado que el arsenito (As³⁺) es altamente tóxico a concentraciones mayores a 10 mg/kg.

A continuación, se presenta el cuadro 2 que muestra la dosis letal media (DL50) del arsénico en sus diferentes formas.

Cuadro 2. Valores de dosis letal media de las principales especies de arsénico presentes en el medio ambiente (Villegas, 2014).

Especie de arsénico	DL ₅₀ (mg/kg)
As ³⁺	10
As ⁵⁺ (inorgánico)	150
As ⁵⁺ (orgánico)	1800

1.1.2 Contaminación por arsénico en Costa Rica

Según los estudios realizados por la OMS se estima que un aproximado de 200 millones de personas en el mundo ingieren agua contaminada con arsénico. De acuerdo con la OMS el nivel máximo permitido del metaloide en agua es de 10 ug/L y este valor también es el permisible, según el decreto N°38924-S (Ministerio de Salud, 2013). Sin embargo, el ideal siempre es que la persona no esté expuesta del todo, dado que el metaloide se acumula y resulta tóxico también.

Una reciente publicación en el Atlas Geoquímico de Costa Rica por parte del investigador Rolando Castillo Muñoz, muestra la problemática vivida en Costa Rica al realizar un

estudio a lo largo y ancho del territorio nacional. La contaminación por arsénico en los diferentes mantos acuíferos del país no es tema exclusivo de zonas como Bagaces, Cañas, Los Chiles o Aguas Zarcas, sino más bien de toda la nación. La problemática es severa dado que el metaloide se encuentra en algunas zonas a valores de 92,73 ppm, mientras tanto en las zonas del Caribe Sur se reporta presencia de arsénico a una concentración de 174,3 ppm (Castillo, 2019).

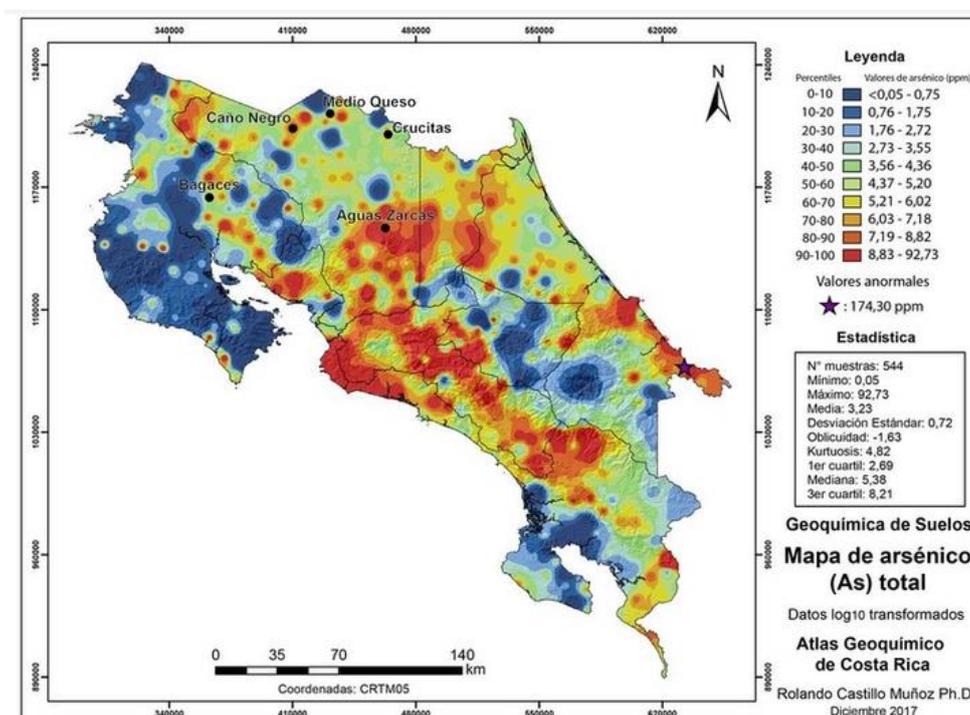


Figura 2. Mapa de concentración de arsénico en los suelos de Costa Rica (Castillo, 2019).

De acuerdo con el decreto N° 37757-S denominado Reglamento sobre valores guía en suelos para descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales y derrames), se establece el valor límite permisible (VLP) de arsénico en suelos en 5 ppm, mientras que el valor de intervención es fijado en 35 ppm. El VLP es aquel valor por debajo del cual se espera que la mayoría las personas, entorno o medio puedan estar expuestos diariamente, sin que estos puedan sufrir efectos adversos en la salud o propiedades del mismo, mientras tanto el valor de intervención es aquella concentración elevada a la que se encuentra una sustancia tras lo cual puede provocar riesgos potenciales, ya sea de manera directa o no a la salud de las personas, ambiente o medio que se expongan de manera continua a la sustancia (Ministerio de Salud, 2013).

Como se puede detallar, los casos expuestos por el investigador Castillo están por encima del valor máximo permisible a partir de las zonas de color amarillo. Tomando como punto de partida este dato y teniendo en cuenta que gran parte del material del suelo llega a los diferentes mantos acuíferos de estas zonas (lagos, ríos, lagunas, pozos, entre otros) no es de extrañar que los valores reportados en agua estén también por encima del valor límite permisible de 10 µg/L establecido por el decreto N° 38924: Reglamento para la calidad del agua potable (Ministerio de Salud, 2002).

La problemática por contaminación con arsénico tiene vital relevancia en el país, y aunque el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados ha tratado de mitigar el problema con la construcción de varias plantas de tratamiento de agua que eliminan el metaloide, existen zonas que siguen al descubierto por no contar con el tratamiento adecuado para sus aguas. Por otro lado, investigadores como la toxicóloga Virginia Montero, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, concluyó que los filtros implementados por el AyA en sus plantas de tratamiento en la zona de Bagaces, en vez de ser una solución representan un punto de perjuicio para la población ya que estos están siendo dejados cerca de zonas de habitación de la población, así como en canales de agua de riego agrícola. Como bien lo expresa la Sra. Montero, la situación es preocupante dado que este tipo de contaminante tiene una estrecha relación con la alta incidencia de padecimientos de enfermedad crónica renal no tradicional, tanto en niños como en adultos, principalmente aquellos que laboran en el ámbito agrícola (Montero, 2019).

1.1.3. Efectos en la salud por el consumo de arsénico.

Acorde al estudio realizado en 2009 por The National Research Council se logró confirmar algunos de los efectos crónicos provocados por el consumo y exposición a arsénico a través de agua. Algunos de los síntomas mencionados son lesiones en la piel, afecciones respiratorias tales como tos o bronquitis, afección a los sistemas cardiovasculares, gastrointestinales y urinarios (Villegas, 2014). La terminología empleada por médicos y personal de salud para referirse a enfermedades provocadas por la exposición a arsénico se denomina Arsenicosis, la cual resulta de la ingesta de agua con niveles del metaloide por encima o cercanos del valor límite por un período largo de tiempo. En relación con esto y según el Centro de Estudios Avanzados de Bangladesh (1997) se establecieron y reconocieron 4 etapas de la arsenicosis, las cuales se describen a continuación:

1) **Preclínico:** Los pacientes no muestran síntomas, no obstante, se puede realizar la detección del metal en muestras de tejido u orina.

2) **Clínico:** Se presentan efectos en la piel, tal como lo es el oscurecimiento (melanosis). Este se presenta principalmente en las palmas de la mano, sin embargo, se pueden presentar también en pecho, espalda, miembros u otras partes del cuerpo. Otro síntoma asociado en esta etapa es el endurecimiento de la piel, enfermedad conocida como queratosis.

3) **Complicaciones:** Los síntomas clínicos se presentan con mayor intensidad y pronunciamiento. Adicional a esto se presenta afección en los órganos internos, tal como lo es la dilatación en riñones, hígado y otros, a su vez se asocia a la aparición de síntomas de conjuntivitis, bronquitis y diabetes.

4) **Malignidad:** Se presentan síntomas cancerígenos, dándose el desarrollo de tumores en zonas tales como la piel u otros órganos vitales como los riñones, pulmones e hígado.

En relación con lo anterior, se puede confirmar la gravedad de la situación por contaminación con arsénico y la afección que puede tener sobre la salud humana. Sin embargo, se debe señalar que estos padecimientos mencionados, no son los únicos posibles a presentarse. Uno de los síntomas que se deben tomar en cuenta son las lesiones neurológicas, causadas debido al consumo en altas dosis de arsénico inorgánico, la cual es conocida como una neurotoxina que afecta severamente las funciones neurológicas de desarrollo, así como las cognitivas (O'Bryant et al., 2011).

1.2. Tratamiento de agua contaminada con metales pesados: tecnologías disponibles, métodos fisicoquímicos y biológicos.

Dado el problema de contaminación del agua por metales pesados, se hace necesario realizar una adecuada protección y restauración de este recurso, tomando en cuenta los múltiples y diferentes tipos de tratamientos existentes. Sin embargo, el presente proyecto se enfocará en los tratamientos y técnicas de prevención relacionadas con la contaminación producida por arsénico. En Costa Rica la investigación en torno a este tema no ha sido tan ampliamente desarrollado como debería, no obstante, la preocupación es real, a tal punto que se han incluido leyes y decretos ejecutivos que buscan regular la emisión de contaminantes en diferentes mantos acuíferos. Pese a ello, las leyes, decretos e investigaciones realizadas no son lo suficientemente robustas, teniendo que basarse en normas internacionales o trabajos realizados en otras latitudes del mundo. Por ello es por

lo que el desarrollo e impulso de investigaciones que giren en torno a la contaminación del agua es esencial y como nación se tiene la obligación de preservar nuestros recursos, desarrollando las tecnologías que lo permitan.

El primer paso en toda remediación es la caracterización del agua, con la cual se puede brindar una idea del contaminante se encuentra dentro de la muestra en estudio, así como su concentración. Sin embargo, la remediación conlleva además el conocimiento de la fuente de contaminación, la química básica de las sustancias encontradas, así como los riesgos ambientales y en la salud de las personas asociados a los metales presentes en el sitio afectado (Williams et al., 2019).

Dentro de las tecnologías disponibles y comprobadas se encuentran los tratamientos por métodos físicos, químicos, fisicoquímicos o métodos biológicos. De estos últimos un ejemplo es la fitorremediación, que es donde este proyecto se centrará y la cual se vale de agentes biológicos (plantas) para la remoción de los contaminantes.

Si bien, las otras tecnologías son ya comprobadas para el metaloide, algunas no son respetuosas del ambiente y conllevan un gasto económico alto, surgiendo así la necesidad de investigar otros métodos y tecnologías alternativas tal como lo es la fitorremediación (René & Julio, 2010).

Para profundizar más en estos tipos de tratamientos se procederá a explicar algunos de los tipos existentes.

1.2.1. Tratamientos convencionales para la remoción de metales pesados en aguas residuales.

Este tipo de técnicas son aquellas que se utilizan de manera habitual a nivel industrial para la remoción de metales pesados en aguas residuales. Dentro de estas tecnologías se encuentran la filtración por membranas, la ósmosis inversa, la nanofiltración, la ultrafiltración, el intercambio iónico, la adsorción, la precipitación química, la electrocoagulación, la coagulación-floculación, entre otras (Caviedes Rubio et al., 2015).

A continuación, se explica de manera breve algunas de las tecnologías mencionadas.

Filtración por membranas: Técnica que utiliza un material poroso (membrana) con el fin de separar sólidos que se encuentren como contaminantes en presencia de sustancias en fase sólida, líquida o gaseosa. Dos factores son claves en este tipo de tecnología: la membrana a escoger y su selectividad. Este tipo de tecnología presenta eficiencias altas, sin embargo, tiene el inconveniente de generar lodos (residuos sólidos) con altas cantidades de metales. Esto conlleva un problema adicional dado que debe buscarse su

tratamiento o disposición final. Puede ser empleado en aguas residuales industriales, agua potable y aguas domésticas (poco común) (Caviedes Rubio et al., 2015).

Ultrafiltración: Consiste en un proceso similar a la filtración por membrana y permite la separación de sólidos suspendidos y disueltos mediante el uso de una superficie semipermeable y selectiva, sometida a una presión de hasta 145 psi. Una de las grandes ventajas de esta tecnología es el tamaño de poro que se utiliza en las membranas, el cual varía entre 0,04 y 0,1 μm . Su principal desventaja es que presenta una baja eficiencia en procesos de tratamiento de agua con altos contenidos de elementos, así como una disminución del flujo a tratar con el paso del tiempo (Caviedes Rubio et al., 2015).

Intercambio Iónico: Los iones no deseados en el agua o efluente a tratar son intercambiados por otros iones de carga similar. Dentro de este grupo se puede hablar de cationes (iones de carga positiva) u aniones (iones de carga negativa). La selección de cual tipo de ion utilizar dependerá de varios factores siendo el más importante el tipo de molécula o elemento a remover. Una de las principales ventajas del intercambio iónico es que a bajas concentraciones de contaminante se logra una alta eficiencia de remoción a costos menores que otros procesos con largos períodos de remoción (Arias Barrantes, 2016).

Sin embargo, en caso de que las concentraciones sean altas el ciclo de uso se acorta, requiriendo el uso de mayores cantidades de regenerante, aumentando a su vez el coste del proceso.

Adsorción: Este proceso consiste en exponer una sustancia contra la superficie de un material y cuyas moléculas son atrapadas o retenidas en este. Como resultado de este proceso se da la formación de una capa líquida o gaseosa en un medio sólido (usualmente) o líquido, según se requiera. Este procedimiento conlleva la gran ventaja de remover una amplia variedad de contaminantes, una alta capacidad y una cinética rápida. Sin embargo, presenta la desventaja de que el absorbente puede retener otras sustancias no deseadas. Ejemplos de sólidos utilizados en estos procesos son: zeolitas, carbón activado, plantas, biopolímeros, entre otros (Benamburg Vargas, 2018).

Coagulación-Floculación: En este procedimiento se agregan sustancias químicas al agua contaminada, con el fin de ayudar en la sedimentación de material no sedimentable o bien acelerar el proceso mediante la formación de flóculos. Es importante tomar en cuenta que los coagulantes deben de tener una carga contraria al ion a tratar, entre mayor carga tenga,

el coagulante tendrá mejores características. Dentro de las variables y limitantes se debe tomar en cuenta el tipo de coagulante seleccionado, dosis empleada, pH del medio y el tiempo de agitación en el sistema. La floculación busca la unión entre los flóculos que se formen con el fin de aumentar el volumen y peso de tal forma que precipiten y puedan ser decantados.

1.2.2. Tratamientos no convencionales (biológicos) para remoción de metales

Métodos utilizados de manera menos frecuente y que se encuentran en desarrollo en algunos casos. La investigación en este tipo de técnicas resulta fundamental, dado que representan en muchos casos métodos menos invasivos para el ambiente. Las investigaciones actuales se centran en el aprovechamiento de residuos agrícolas e industriales que permitan la búsqueda de adsorbentes de bajo coste y nuevos adsorbentes.

Dentro de estos se emplean una amplia variedad de materiales biológicos como lo son las algas, hongos, plantas, bacterias y levaduras o bien el uso de hidrogeles, biopolímeros, entre otros. A continuación, se detalla más acerca de estos (Caviedes Rubio et al., 2015).

Residuos Agrícolas e industriales: El carbón activado, como se mencionó anteriormente, es ampliamente utilizado en la industria. Sin embargo, su elevado costo hace que su uso no sea tan viable.

Es por lo anterior, por lo que los investigadores han centrado su búsqueda en el uso de residuos provenientes de la agroindustria, los cuales por su procedencia resultan de bajo coste. Sin embargo, se debe estudiar si ellos son viables o no para la remoción de algunos metales pesados. Ejemplos de usos de residuos agrícolas, minerales o industriales son: residuos industriales de celulosa y papel, aprovechamiento de cenizas de caldera, la cascarilla de arroz, vermiculitas, entre otros.

Biopolímeros: Sustancias producidas de manera natural o artificial que pueden ser biodegradados de manera más eficiente que los polímeros convencionales (polietileno y polipropileno). Este tipo de material resulta altamente llamativo dado que son capaces de reducir la concentración de metales pesados a partes por billón, en especial aquellos iones metálicos de transición. Además, ellos son altamente seguros ambientalmente y se encuentran en gran disponibilidad.

Hidrogeles: Sustancias con la capacidad de ampliar su volumen gracias a su afinidad con el agua y que se expanden estando en esta. Gracias a esta característica este tipo de material es utilizado en el tratamiento de aguas residuales y en la actualidad se dirigen

investigaciones con el fin de observar el comportamiento de hidrogeles sintetizados y con capacidad de remoción de metales pesados. Ejemplos de estos son: cenizas volantes silico-aluminosas y cenizas volantes sulfo-cálcicas

Fitorremediación: Técnica que hace uso de plantas y microbios del suelo, con el fin de remover las concentraciones de contaminantes y sus efectos tóxicos en la matriz a tratar, es decir, suelo o agua. Como mayor ventaja sobre los métodos fisicoquímicos convencionales) se tiene que esta tecnología ofrece una amplia aplicabilidad y sobre todo una reducción de costos significativa. Como gran desventaja se tiene que ella se considera lenta al compararla con otras tecnologías. Sin embargo, la aceptación del público y sobre todo las ventajas ofrecidas como su rentabilidad, eficiencia, respeto hacia el medio ambiente e integración con tecnologías como la solar la convierten en una tecnología a estudiar e impulsar (Agudelo Betancur et al., 2005).

1.3. Sistemas hidropónicos

A través de los años y durante la existencia de la humanidad el abastecimiento de alimentos siempre ha sido una problemática que nos aqueja como especie, tras lo que continuamente se han buscado soluciones que permitan garantizar el acceso a los alimentos a las personas. Esto último ha permitido el desarrollo de técnicas tales como la hidroponía, la cual data del siglo XIX.

El término hidroponía se compone de las palabras hydros = agua y ponos = actividad. Teniendo en cuenta esto, se puede definir la hidroponía como la técnica en la cual las plantas se cultivan o producen sin suelo, mediante el abastecimiento de agua y nutrientes, bajo condiciones ambientales y parámetros de diseño que permiten su crecimiento y desarrollo. (Melvix, 2014). Otros términos para referirse a esta técnica son: cultivo sin suelo, nutricultura, quimiocultura, cultivo artificial o agricultura sin suelo (Son et al., 2019).

Precisamente una de las principales peculiaridades de esta técnica es que no requiere del uso de suelo en ninguna de las etapas de crecimiento de la planta, ya sea como soporte o fuente de nutrimento, ya que la planta toma de manera directa los nutrientes disueltos en el agua. Dentro de los elementos requeridos para el desarrollo de un sistema hidropónico se encuentran los siguientes (Zárate, 2014):

- **Material vegetal:** Especie o conjunto de especies que se desean cultivar. Se puede optar por esta técnica en cualquier material vegetal que posea un sistema radicular y no presente un desarrollo como el presentado en los tubérculos.
- **Contenedor o recipiente:** Fuente de almacenamiento de la disolución nutritiva elaborada.
- **Disolución nutritiva:** Conjunto de macro y microelementos disueltos en agua que permiten el desarrollo y crecimiento del cultivo.

Dentro de las ventajas y desventajas del uso de sistemas hidropónicos se encuentran las citadas a continuación (Oasis, 2015):

Ventajas técnicas

- Balance adecuado entre cantidad de agua, oxígeno y nutrientes.
- Control eficiente de variables como pH, electroconductividad y salinidad.
- Eliminación de malezas dado que rara vez se presentan.
- Reducción o eliminación de enfermedades en las raíces.
- Facilidad de limpieza y esterilización del proceso.

Ventajas Económicas

- Productos de mayor calidad.
- Mayor uniformidad en los productos que en métodos tradicionales.
- Menor consumo de agua y fertilizantes por kilogramo producido.
- Uso de agua con cierto nivel de dureza o salinidad.
- Productos obtenidos con alto grado de limpieza.
- Mayor producción a lo largo del año.
- Altos rendimientos por unidad de superficie empleada.
- Poco espacio requerido para la implementación de la técnica.
- Facilidad para producir en cualquier zona sin importar si hay suelo o no.

Desventajas

- Se debe realizar una inversión económica inicial alta.
- Técnica no tan desarrollada como métodos tradicionales de siembra.
- Poco conocimiento de la persona a cargo del sistema.

- Requiere de muchos cuidados y mantenimiento constante (limpieza).
- En algunos países puede existir un impedimento para la adquisición de materiales para el desarrollo de estos sistemas.

Cabe mencionar que estas ventajas y desventajas están estrictamente correlacionadas con los elementos y diseño del sistema hidropónico seleccionado. Lo anterior, dado que cada uno de estos componentes están correlacionados entre sí, tal y como lo muestra la ilustración de la figura 3.

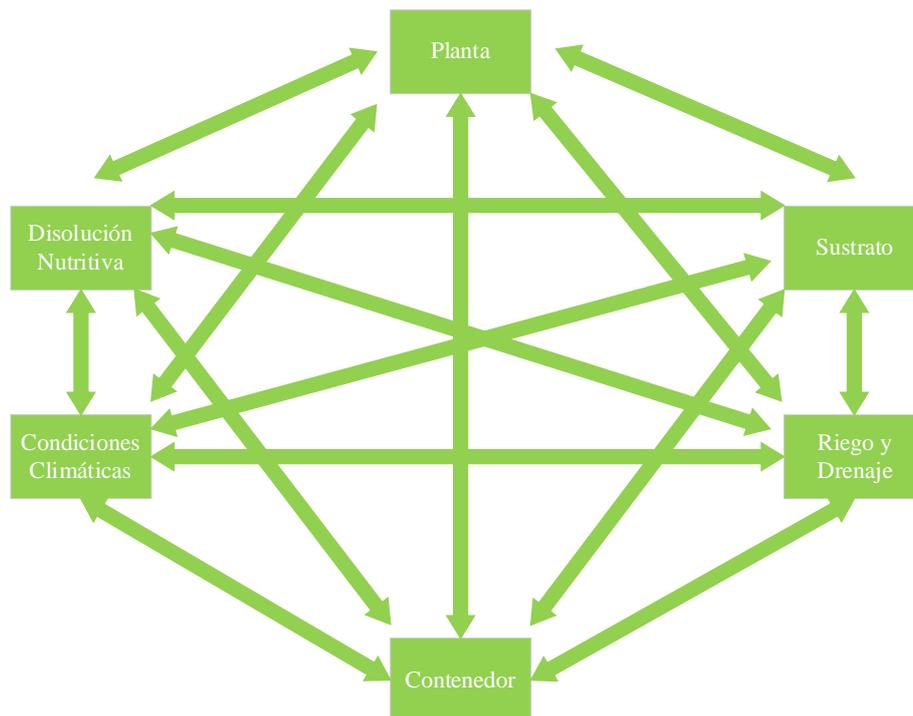


Figura 3. Relación de los componentes de un sistema hidropónico (Oasis, 2015).

La planta como tal es quizá el elemento más importante dentro del diseño y selección de un sistema hidropónico, ya que los demás componentes serán quienes dicten la calidad de la planta, así como de los rendimientos obtenidos en la producción o uso que se le dé al sistema. Dado lo anterior se debe tomar en cuenta que la técnica hidropónica es recomendable con los siguientes tipos de plantas (Oasis, 2015):

- Hortalizas: de hoja como la lechuga, espinaca, apio o arúgula, de flor como el brócoli o la coliflor y de fruto como el tomate, pepino, fresas, melón o sandía.
- Especies aromáticas: albahaca, menta, cilantro, lavanda u otras
- Ornamentales: rosas, orquídeas, crisantemos, lirios y otros.

Cómo se mencionó, uno de los requisitos indispensables para el uso de plantas en sistemas hidropónicos es que estas posean un sistema radicular y el producto a obtener no se desarrolle en este, tal y como ocurre en los tubérculos. Dado lo anterior y a que la raíz será el componente de la planta que estará en contacto directo con la disolución nutritiva se le debe poner especial atención. Zárte (2014) establece que se deben tomar las siguientes consideraciones para tener un mejor desarrollo del sistema radicular de la planta:

- a) Acceso constante al agua.
- b) Acceso a nutrimentos minerales esenciales, macro y microelementos, en balance a la proporción de agua utilizada.
- c) Aireación. Se debe oxigenar el sistema de manera natural (siempre que el diseño usado lo permita) o automático (por bombeo). Las plantas necesitan de oxígeno para realizar el proceso de respiración celular.
- d) La disolución nutritiva debe permanecer en oscuridad, ya que de lo contrario conllevaría a la formación de algas dentro del sistema, las cuales compiten por oxígeno y nutrimentos.
- e) Control de temperatura del agua para el adecuado funcionamiento de la raíz, dado que requiere estar fresca (La temperatura máxima tolerable varía según el tipo de planta utilizada).
- f) Control de plagas, inóculos, malezas o enfermedades. Debe mantenerse un control constante de las plantas, eliminando cualquier factor externo que pueda afectarles.
- g) Profundidad del lecho utilizado ya que la raíz requiere de un espacio óptimo para su desarrollo y crecimiento. Esto varía según la especie utilizada, sin embargo, se recomienda que el mismo sea entre 5 y 10 cm.
- h) Control de pH y electroconductividad. Las raíces son susceptibles a los cambios de pH, por lo que conviene mantener un valor entre 5,5 y 6,5. Por otro lado, la electroconductividad es un indicativo de la carga de sales minerales presentes en el sistema y afecta directamente su absorción. Se recomienda un valor entre 0,8 y 2 mS/cm. Se puede determinar mediante el uso de un EC o un TDS.
- i) En ciertos casos se requiere de la aplicación de fertilización. Se recomienda la aplicación de la mitad de la concentración que se aplica normalmente en el sustrato.

- j) Cambio de disolución nutritiva en un período de entre 3 a 4 semanas, agregando agua al sistema el resto de los días.
- k) Evitar la presencia de elementos tóxicos.

Tal y como se observa de lo anterior, la disolución nutritiva también juega un papel fundamental en el desarrollo de las plantas por lo que se debe tomar en cuenta su composición. A continuación, se presenta en el cuadro 4, los elementos necesarios para el desarrollo y crecimiento de una planta, así como la función que estos tienen (Escuderos et al., 2017)

A continuación, se detalla información sobre la composición de macro y microelementos dentro de una disolución nutritiva (Zárate, 2014):

Nitrógeno: Forma parte de la clorofila y proteínas, y estimula el desarrollo de hojas y tallos. En caso de deficiencia, los tallos suelen adelgazarse, se presentan hojas más pequeñas y el crecimiento de las plantas es lento.

Fósforo: Favorece el desarrollo radicular de la planta, forma parte del ácido nucleico y fosfolípidos, y es vital para el crecimiento en la etapa inicial de la planta. En caso de deficiencia se presentan tallos cortos y delgados, las hojas suelen volverse de color morado y se da un crecimiento lento de las plantas.

Potasio: Brinda resistencia a la planta ante enfermedades, actúa como transportador de carbohidratos, regula el agua contenida en las células y acelera la acción enzimática. A falta de este las hojas maduras se tornan grises y se aprecian daños en el borde de las hojas.

Calcio: Constituye parte de la pared celular, estimula el desarrollo de las raíces, indispensable en el crecimiento inicial y afecta en la absorción de nutrientes. Los ápices de las raíces mueren y la raíz no crece en caso de deficiencia.

Magnesio: Trascendental en la formación de clorofila. En caso de ausencia se presenta un tono amarillento en las hojas, así como su desprendimiento.

Azufre: Es parte de los aminoácidos y proteínas de la planta, que ayudan en el desarrollo vegetativo. Promueve el desarrollo radicular. En caso de ausencia se presenta una ramificación de la raíz y en exceso se promueve la formación de cloruros.

Hierro: Permite la síntesis de la clorofila, así como la portación de electrones durante la fotosíntesis. Promueve la captación de nutrientes, ayuda en los procesos de reducción y oxidación de la planta. En caso de ausencia se presenta una tonalidad de color amarillo en las venas de las hojas jóvenes.

Molibdeno: Es parte de la nitro-reductasa (reducción de nitratos). Forma parte de las enzimas que estimulan los procesos redox en la planta. En caso de déficit se presenta color amarillento en las venas, así como adelgazamiento en las hojas.

Zinc: Útil para que se dé la formación de ácido indolacético, el cual es un regulador de crecimiento. Ayuda al desarrollo de enzimas involucradas en el metabolismo de la planta, así como en carbohidratos, proteínas y fosfatos.

Manganeso: Estimula la formación de clorofila y permite la producción de oxígeno a través del agua. En deficiencia de este se da formación de áreas de color amarillo en plantas jóvenes, donde posteriormente las plantas presentan un color verde pálido.

Boro: Está involucrado en el transporte de carbohidratos. Regulador de la relación potasio/calcio, facilita la absorción del nitrógeno y colabora al sistema vascular de la raíz. En caso de deficiencia las zonas de crecimiento de la planta mueren, los tallos se hacen cortos y endurecen, y se presentan hojas distorsionadas.

Cobre: Forma parte de la pared celular. Tiene un rol fundamental en procesos fisiológicos como fotosíntesis, distribución de carbohidratos, fijación y reducción de nitrógeno, metabolismo de proteínas y metabolismo de pared celular. Las hojas se tornan amarillas en su ausencia

1.3.1 Tipos de sistemas hidropónicos

De acuerdo con el diseño que se requiera, así como el fin al cual estará destinado el equipo se pueden seleccionar diferentes configuraciones, técnicas y tipos de sistemas hidropónicos. En la figura 4, se pueden apreciar las diferentes configuraciones existentes, las cuales procederán a ser explicadas.

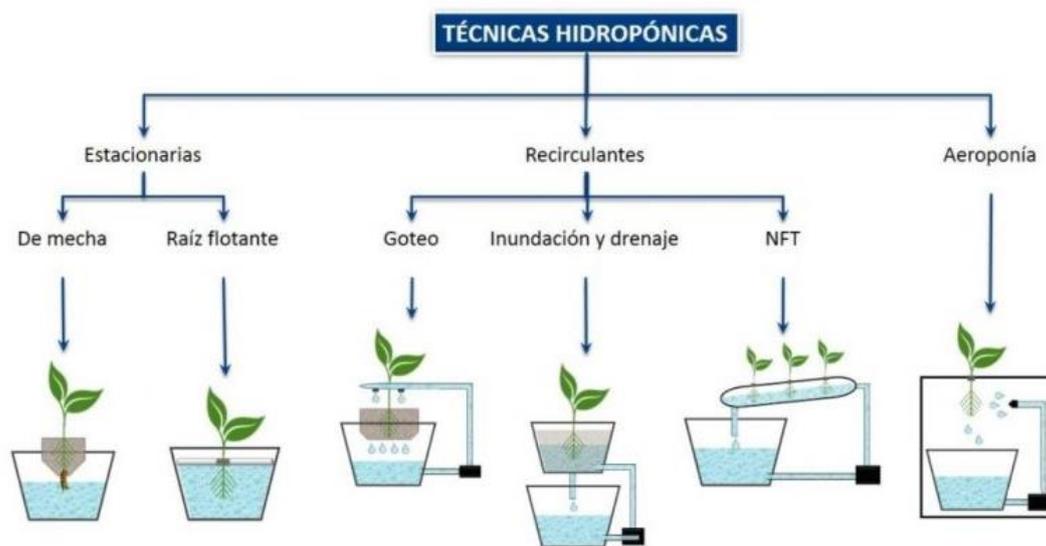


Figura 4. Tipos de sistemas hidropónicos existentes (Generación Verde, 2017).

Sistemas hidropónicos estacionarios (abiertos): Son aquellos sistemas en los cuales la disolución nutritiva se encuentra dentro de un tanque o caja de almacenamiento de forma permanente y donde la raíz de la planta es expuesta/sumergida. Como principales ventajas de este tipo de técnica se presenta el bajo coste de inversión para poner en marcha y el poco espacio requerido (Carrasco et al., 1996).

Sin embargo, presenta graves desventajas como el alto coste de mantenimiento, alto consumo de agua y disolución nutritiva, asociado a que ella debe ser cambiada de forma semanal y tiene necesidad de aireación mediante un sistema externo o manual (Moreno & Castillo, 2015).

Dentro de esta técnica se encuentran dos variantes:

Raíz flotante: Técnica de cultivo en agua, en la cual las plantas crecen y desarrollan su parte aérea flotando, sostenidas en una placa que se mantiene a flote dentro de un recipiente contenedor. De esta forma la planta tendrá siempre sus raíces dentro de la disolución nutritiva.

Mecha: Técnica de cultivo que hace uso de una base para sostener las plantas y en la cual se coloca una “mecha” con el fin de que los nutrientes contenidos dentro del agua sean absorbidos por medio de acción capilar. Como gran ventaja presenta la baja necesidad de cambio de la disolución y la no implementación de sistemas mecánicos, pero presenta la

desventaja de que en su mayoría se trata de un sistema individual y no a gran escala como lo pueden ser los demás.

Sistemas hidropónicos con recirculación (cerrados): A diferencia de los sistemas estacionarios, en estos sistemas la disolución nutritiva se encuentra en constante circulación a través del sistema diseñado. Como principales ventajas se encuentran la disminución en el consumo de agua y nutrientes dado que estos estarán en constante recirculación y en muchos casos, según el diseño desarrollado, la necesidad de un sistema de aireación se ve eliminado. Adicional a ello, el mantenimiento de estos es menor al de los sistemas estacionarios y en muchos casos pueden ser automatizados mediante controladores o temporizadores (Moreno & Castillo, 2015).

No obstante, este tipo de sistemas conllevan una alta inversión inicial en comparación a los estacionarios, lo cual puede representar una desventaja en caso de no contarse con los recursos necesarios. A continuación, se procederá a explicar los distintos sistemas cerrados existentes (Maucieri et al., 2018a).

Sistema por Goteo: En este tipo de sistemas la disolución nutritiva es suministrada a cada planta a través del uso de goteros, conectados por medio de mangueras, a través de las cuales fluye la disolución nutritiva a un determinado caudal. Este tipo de sistema permite la aplicación de pequeñas cantidades de la disolución nutritiva de forma directa en la zona radicular de la planta, permitiendo una mejor hidratación y absorción de los nutrientes. La frecuencia de riego se debe establecer de acuerdo con el estado fenológico de la planta, tipo de sustrato y las condiciones climáticas.

Inundación y drenaje: En este tipo de sistemas la disolución nutritiva se hace circular hasta la caja de crecimiento, en la cual al momento de activación del ciclo la inunda de manera parcial o total, permitiendo un mayor contacto entre la raíz de la planta y la disolución. Una vez completado el ciclo, el agua se drena por medio de un orificio en la parte inferior de la caja de crecimiento.

La variación de los ciclos de llenado dependerá de la naturaleza de la planta a utilizar y el comportamiento de esta. Una de las ventajas notables de este tipo de sistema va asociado de la mano del drenaje, el cual permite una oxigenación del sistema. Sin embargo, presenta el gran inconveniente de una dependencia total del sistema de bombeo mecánico, dado que en caso de que este falle las plantas procederán a secarse ante la falta

de nutrientes y agua. Este tipo de sistema se conoce también con el nombre de circulación-recirculación (Maucieri et al., 2018a).

NFT (Nutrient Film Technique): Conocida como la técnica de película nutritiva, esta representa la metodología más utilizada en el mundo gracias a las innumerables ventajas que presenta. Dicha técnica consiste en una continua circulación de la disolución nutritiva por medio de una capa muy delgada, la cual está siempre en contacto con el sistema radicular de las plantas.

La circulación en este tipo de sistemas se realiza por medio de un sistema de bombeo, el cual permite llevar la disolución hasta el extremo más alto de cada uno de los tubos o canales del sistema y que ella fluya por gravedad o inundación hasta el desagüe, permitiendo el contacto con todas las raíces de las plantas colocadas a lo largo del sistema. (Christie, 2014).

Una de las consideraciones más importantes en este tipo de sistemas es la necesidad de mantener un volumen constante en el depósito o contenedor con la disolución nutritiva, así como en los tubos o canales establecidos. Otra necesidad es el constante seguimiento que debe darse mediante ensayos químicos a la disolución, controlando factores como el pH y la conductividad eléctrica, elementos vitales para el crecimiento de las plantas (Terceros & Blanco Villacorta, 2019).

Los sistemas NFT brindan ventajas tales como un excelente control sobre el nivel del agua y los nutrientes, permite una gran variedad de cultivos en donde el sistema radicular pequeño es capaz de soportar plantas de gran tamaño y no requiere de esterilizaciones previas. Sin embargo, tras cada ciclo de cosecha se debe realizar una limpieza de los tubos o canales. De esta manera se evita la pérdida de agua por drenaje, evaporación o algún tipo de fuga y además brinda la posibilidad de operación automatizada en caso de ser requerida, lo que disminuye los costos de operación (Christie, 2014).

A diferencia de las demás técnicas, en este sistema las raíces de la planta se encuentran colocadas dentro de un canal, contenedor o tubo, sin estar en contacto directo con la disolución, es decir, quedan suspendidas en el aire. La alimentación de la disolución nutritiva se realiza por medio de sistemas de aspersores o nebulizadores, los cuales irrigan las plantas según la programación deseada por el usuario (Pablo & Alvarado, 2013).

Dentro de los requerimientos de este tipo de sistemas se encuentra la necesidad de precisar de sistemas de tubería especiales en caso de realizarse verticalmente. Adicional a ello independientemente de la posición y diseño del sistema, es necesario el uso de una bomba y aspersores con el fin de realizar un riego constante o por ciclos, acorde a los recursos y requerimientos del diseño. Sin embargo, se recomienda que el sistema de aspersión sea lo más fino posible, esto con el fin de obtener una nutrición homogénea y satisfactoria en las plantas utilizadas (Bello et al., 2018).

Como principal ventaja sobre otros sistemas, la aeroponía brinda una mayor oxigenación a las raíces de las plantas, así como a la disolución nutritiva. A pesar de lo anterior, esta técnica cuenta con algunas desventajas a escala comercial, donde el control técnico requerido es sumamente delicado dado que las plantas al estar suspendidas en el aire necesitan de una irrigación casi que constante, lo que implica la necesidad de mantener un sistema de bombeo continuo y sin fallas, ya que en caso de presentarse supondrían una pérdida total del cultivo (Lakhiar et al., 2020).

1.4 Fitorremediación para tratamiento de aguas

Como se mencionó anteriormente dentro de las tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados han surgido técnicas biológicas, dentro de las cuales se encuentra la fitorremediación.

Esta técnica hace uso de diversas plantas para limpiar la fuente contaminada por algún metaloide, bifenilos policlorados, entre otros, a través de procesos de degradación, extracción o inmovilización de los contaminantes. En otras palabras, es un proceso en el cual se utilizan plantas capaces de remover, transferir, estabilizar, acumular, absorber y destruir contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos de suelos, lodos, sedimentos y agua (López et al., 2011).

Dado que es una tecnología altamente rentable e innovadora, las investigaciones realizadas en torno a ella son cada vez más frecuentes debido a que representa una alternativa a los métodos de ingeniería convencionales usados en el tratamiento de residuos peligrosos (Walker, 2017).

Dentro de las ventajas que ofrece esta tecnología sobre otras se encuentra que puede ser aplicada ya sea en el área afectada (*in situ*) como fuera del área que debe ser tratada (*ex situ*), siendo la aplicación en sitio la preferida por los investigadores, ya que representa una menor inversión económica y facilita la puesta en marcha, operación y mantenimiento de los sistemas a implementar (Jerez, 2013).

A continuación, se presenta el cuadro 5 que resume las principales ventajas y desventajas de la fitorremediación.

Cuadro 3. Principales ventajas y desventajas de la fitorremediación (Núñez, 2004).

Ventajas	Desventajas
1- Se trata de una tecnología altamente sustentable y sostenible.	1- En el caso de utilizar especies como árboles o arbustos el proceso se vuelve lento.
2- Presenta una alta eficiencia para la remoción de contaminantes <i>in situ</i> .	2- Dependencia de las plantas a la estación del año.
3- Se puede aplicar en sitios con contaminaciones de leves a moderadas.	3- En situaciones de extrema concentración del contaminante el crecimiento de la planta se verá limitado.
4- Bajo coste de implementación y mantenimiento.	4- En el caso de especies perennes, estas pueden volver a incorporar los contaminantes acumulados al ambiente, principalmente por las hojas.
5- Es amigable con el ambiente, pues se reduce el uso de químicos u otros procesos perjudiciales.	5- Los contaminantes pueden bioacumularse dentro de maderas utilizadas posteriormente para combustión.
6- No genera ni produce contaminantes secundarios derivados del proceso.	6- No todas las plantas son acumuladoras, ni todas son tolerantes.
7- Alta probabilidad de aceptación por parte de la población.	7- Requerimiento de espacios relativamente grandes para su implementación.
8- Estéticamente puede representar un embellecimiento del sitio donde se aplique.	8- Favorecimiento de invasión de plagas como mosquitos u otros organismos.
9- Alta versatilidad y variedad de contaminantes a tratar ya sean orgánicos o inorgánicos.	
10- Permite el reciclaje y reuso de recursos (agua, metales, biomasa, otros).	

1.4.1 Selección de plantas para su uso en fitorremediación

Uno de los pasos más importante para la adecuada implementación de la tecnología conocida como fitorremediación es sin lugar a duda, la selección de la especie a utilizar, tomando en cuenta los factores propios como lo son medio a tratar y el contaminante a

remover. De esta selección dependerá la eficiencia del proceso, por lo que es importante que se tomen en consideración algunas características de la especie (Núñez et al., 2004):

1. Estado de crecimiento.
2. Estacionalidad.
3. Tolerancia a altas concentraciones del contaminante a tratar.
4. Capacidad de acumular metales pesados dentro de su estructura (raíz, tallo, hojas o frutos).
5. Tasa de crecimiento acelerada, así como una alta reproductividad.
6. Especies de la biota local, es decir, que sean representativas de la comunidad natural y no especies invasivas.
7. Facilidad para su siembra y cosecha.

En años recientes se ha generado y desarrollado una serie de terminologías y estudios los cuales se basan en el rol que tienen las plantas en el desarrollo de la fitorremediación, dando paso así a una serie de fitotecnologías o mecanismos que serán explicados a continuación (Figura 5) (Carpena & Bernal, 2007).

Fitoextracción: uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos o compuestos orgánicos para retirarlos del medio contaminado mediante su absorción y concentración en la planta. Esta técnica explota la capacidad de algunas especies que son capaces de acumular contaminantes ya sea en sus raíces, tallo o follaje, presentando la gran ventaja de ser fácilmente cosechadas. Gracias a este tipo de mecanismo de acumulación es que esta técnica es ampliamente utilizada para la remoción de metales pesados. Sin embargo, la misma también puede ser implementada en la remoción de algunas sustancias orgánicas y elementos, así como isótopos radioactivos. Esta técnica puede ser implementada tanto en suelos como en sistemas de tratamiento para aguas residuales.

Fitoestabilización: uso de plantas para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio. Esta metodología hace uso de plantas con un denso sistema radicular con el objetivo de disminuir la biodisponibilidad de metales y otros contaminantes en el ambiente por medio de los procesos llevados a cabo por las plantas tales como lo son la secuestación, lignificación o humidificación.

De esta forma se ejerce un control hidráulico por parte de la especie vegetal en el sitio contaminado, succionando así humedad del suelo o medio en el que se encuentren gracias

a los altos niveles de evapotranspiración que poseen y funcionando así, como una especie de bomba solar en el medio, permitiendo una inmovilización de los metales.

Fitovolatilización: Utilización de plantas capaces de volatilizar elementos tales como lo son el selenio y el mercurio que se encuentran en suelos, agua o bien en sedimentos, gracias a su capacidad de absorberlos, metabolizarlos y transportarlos desde su sistema radicular a sus partes superiores, donde los liberan en forma de sustancias volátiles, menos tóxicas o peligrosas con respecto a las especies absorbidas. La liberación de estos elementos metabolizados ocurre gracias al proceso de transpiración de las plantas.

Fitodegradación o fitotransformación: Este tipo de mecanismo se basa en la utilización de plantas con el fin de degradar o transformar diversos contaminantes tales como hidrocarburos aromáticos, plaguicidas, compuestos clorados y surfactantes, mediante reacciones enzimáticas que ocurren en la rizosfera. Los contaminantes son parcial o totalmente degradados del medio o bien son transformados en sustancias menos tóxicas y nocivas, siendo absorbidos por la planta y retenidos por las vacuolas o bien fijados a estructuras celulares insolubles presentes en estas, tal como lo es el caso de la lignina (Núñez, 2004).

Rizofiltración: esta técnica consiste en la implementación de sistemas en los cuales se promueva el crecimiento de las plantas por medio de cultivos hidropónicos, obteniendo de esta forma raíces de plantas terrestres con una alta tasa de crecimiento. Dicha raíz gracias a su tamaño representa un área superficial que permite absorber, concentrar y precipitar diferentes metales que se encuentren presentes en aguas residuales.

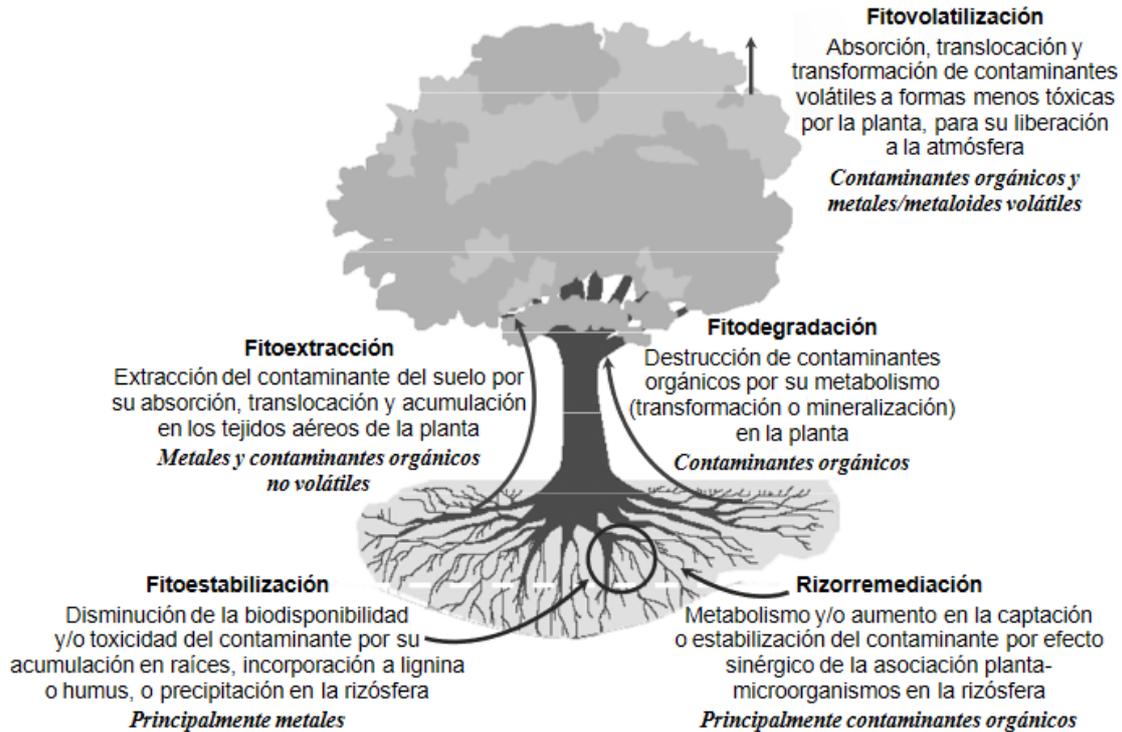


Figura 5. Principales estrategias asociadas al proceso de fitorremediación (Peralta-Pérez & Volke-Sepúlveda, 2012).

Acorde a estudios previos realizados en el Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA) se ha llegado a constatar el posible uso de la planta *Justicia pectoralis* Jacq. (Tilo Criollo) para la remoción de arsénico en aguas contaminadas con dicho metal.

En los ensayos realizados por el investigador Elías Espinoza, éste concluye que esta planta tiene la capacidad de bioacumular arsénico al exponerla a un ambiente hidropónico, e incluso muestra una mayor resistencia que otras plantas ensayadas. En experimentos llevados a cabo, los individuos del tilo criollo se expusieron durante 28 días continuos a concentraciones de arsénico disuelto de entre 0 y 15 mg/L en medio acuoso, obteniendo una remoción de $7,8 (\pm 0,6) \times 10^2$ mg/kg del metal. En el caso del uso de agua contaminada naturalmente con arsénico los ensayos realizados (muestras de 8 L) demostraron una remoción de $3,41 (\pm 0,09) \times 10^2$ mg/kg usando un sistema de 13 plantas durante 14 días (Espinoza, 2018).

1.4.2 Bioética en el uso de plantas para tratamiento de contaminantes

En muchas ocasiones la fitorremediación y técnicas similares han generado un gran debate entre diversos especialistas, tras lo cual se realiza la pregunta: ¿Es justificable el

uso de plantas o cualquier especie vegetal para el tratamiento de contaminantes ambientales?

Según Goodin (1995), Para empezar a responder la pregunta hay que describir y comprender bien el problema de origen y así poder entender por qué se debe pensar en el uso de plantas para tratar contaminantes. Este problema cuyo origen radica en las innumerables formas de contaminación en que el ser humano ha participado de forma directa e indirecta desde el inicio de la I Revolución Industrial (1760) y más en concreto desde la segunda mitad del siglo XX, y hasta la época actual, en donde los avances tecnológicos e industriales se han acelerado, acortando en muchas ocasiones los tiempos de producción y desarrollo.

Si bien es cierto, estos avances traen consigo una cantidad considerable de beneficios para la sociedad, en muchas ocasiones no se ha considerado del todo las consecuencias que generan y he aquí la raíz del problema. Durante mucho tiempo las actividades humanas han dado paso a una contaminación desmesurada o sin fronteras, donde las consecuencias a mediano y largo plazo “parecen” nunca haber sido contempladas. Hasta tiempos actuales, gracias a las alarmas disparadas a raíz del cambio climático, se piensa en que “se debe de hacer algo para preservar al planeta y al ser humano”.

Como ya se ha mencionado, la fitorremediación se presenta como una tecnología o metodología que hace uso de especies de origen vegetal con el fin de limpiar la fuente contaminada ya sea por algún metaloide, bifenilos policlorados, entre otras sustancias, a través de procesos de degradación, extracción o inmovilización de los contaminantes presentes.

Para entender si esta metodología es viable, se debe de cuestionar si la misma es “útil, buena o mejor” en comparación a otras tecnologías ya establecidas. De esta forma y tal como lo menciona Goodin se pueden dividir las teorías éticas en dos clases: las teorías de lo correcto y las teorías del bien, donde está última hace especial enfoque en que se deben de fomentar las consecuencias buenas, por lo que necesita de una teoría que justifique que consecuencias son buenas y cuales no han de serlo. Para ello se debe mencionar a la teoría utilitarista como teoría del bien (Goodin, 1995).

Esta teoría se basa meramente en que tan útil resulta realizar “x” o “y” acción, es decir, que tanta utilidad tiene. Para analizar esta teoría según el problema planteado se debe analizar lo siguiente mencionado por Goodin (1995):

“Cuando nuestras acciones afecten a diversas personas de diversas maneras, la conclusión característicamente utilitarista es que la acción correcta es aquella que maximiza la utilidad (se conciba como se conciba) agregada de forma impersonal para todas las personas afectadas por esa acción”.

Visto desde esta teoría el uso de plantas para tratamiento de contaminantes se ha de justificar, siempre y cuando la utilidad obtenida maximice los beneficios. Para ver esto en perspectiva se plantea el caso particular de nuestro interés el cual consiste en el tratamiento del metaloide arsénico. Si se supone que se tienen dos plantas distintas denominadas A y B, donde ambos individuos comparten diversas características, entre ellas: tamaño similar, pueden crecer en suelo y agua, sistema radicular abundante, capacidad de acumulación de metaloides y ambos pueden ser utilizados eventualmente como alimentos. Ahora bien, cada característica mencionada se puede analizar también desde el punto de vista del utilitarismo.

En el caso de si ambas plantas resultan de un tamaño similar, este no sería un factor determinante para maximizar la eventual utilidad de una u otra. Lo mismo ocurre con el medio para su crecimiento, así como el sistema radicular, son características que, si bien podrían implicar un factor en la selección de una u otra, no inciden de manera importante en la toma de la decisión. Caso contrario ocurre en la capacidad de acumulación de los metales, así como en su posible uso como alimentos.

Diferentes especialistas establecen que para que una planta sea utilizada en fitorremediación debe de cumplir ciertos requerimientos, donde se hace especial énfasis en la capacidad de bioacumulación de la especie utilizada. Si planteamos que la planta A es capaz de absorber 1 mg/L de arsénico, mientras tanto la planta B tiene una capacidad de 2 mg/L. Visto de forma simple la planta B resultaría como ganadora. Sin embargo, se debe de tener en cuenta no solo la capacidad de absorción, sino también la cantidad que puede almacenar. Precisamente otra de las características diferenciadoras que indican los especialistas es si la planta resulta en ser hiperacumuladora, acumuladora o no acumuladora del metal a tratar. Siguiendo con el ejemplo, se sabe que la planta A resulta un individuo con características que la definen como hiperacumuladora, mientras tanto la planta B es acumuladora, por tanto, en este caso la planta que maximiza la utilidad será la planta A, en otras palabras, desde el punto de vista del utilitarismo la planta A es más útil que la planta B.

Ahora bien, se debe analizar a profundidad el gran dilema sobre la justificación o no en el uso de plantas para el tratamiento de contaminantes, el cual no es otro que su posible uso como fuente alimento. Para comprender esto se procede a nombrar a las plantas A y B, siendo la primera una planta de tilo criollo (*Justicia pectoralis* Jacq) y la segunda una planta de tomate. Ambas como podrá comprender el lector pueden convertirse eventualmente en alimento, sin embargo, visto desde la perspectiva más simplista pareciera ser que el sacrificio podría realizarse por el lado del tilo criollo, dado que “no mucha población lo consume”.

Resulta fácil para este caso particular hacer una selección. No obstante, se debe tener en consideración que una planta útil para fitorremediación debe tener una alta tolerancia al contaminante, la habilidad de degradarlo y/o acumularlo en su biomasa, la capacidad de absorber grandes cantidades de agua del suelo, gran biomasa y crecimiento rápido.

Si se parte de que ambas plantas tienen una alta tolerancia al contaminante y pueden degradarlo/acumularlo (teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente), pareciera ser que el factor trascendental para la selección sería el tiempo en que dure la planta en crecer. El tomate tarda alrededor de 3 meses en desarrollarse y dar frutos, por otro lado, el tilo criollo tarda alrededor de 1 mes y medio. Por lo tanto, se puede reconfirmar que el tilo tendría mayor utilidad en el tratamiento de arsénico. De esta forma y visto desde el utilitarismo se justifica el uso de plantas para tratamiento de contaminantes siempre y cuando estas maximicen su utilidad (bioacumulación) en función de ciertas características fundamentales como su capacidad de acumulación y el tiempo de crecimiento.

Por otro lado, es posible que surjan una serie de nuevas preguntas ¿De dónde se obtendrá estos recursos? ¿Cómo se puede justificar tomar una planta que resulta como posible fuente de alimento? ¿Es válido superponer el derecho a la alimentación de las personas sobre su derecho al acceso a agua potable libre de contaminantes? Para responder estas preguntas se debe hablar de bioética ambiental, la cual debe ser analizada no solo por los ecologistas, sino también por diferentes expertos y expertas en ética.

Es así, que la ética ambiental debe tener como objetivo la búsqueda la preservación y restauración del ambiente, donde se incluya al hombre mismo, las plantas y animales, y el hábitat dependiente de ecosistemas. “Aire limpio, agua potable, mundo libre de basuras y contaminantes, puede ser la bandera de un ecologismo simple, en cuyos propósitos se inscribe también la Bioética contemporánea, incluso la de Potter” (Sarmiento, 2001).

De esta forma la justificación del uso de alimentos para tratamiento de contaminantes se justifica, siempre y cuando la alteración que se realice sobre el ambiente sea mínima, de manera que no altere los procesos naturales. Para comprender esto se puede retomar nuestra planta A, el tilo criollo. Se conoce con antelación, que tiene la capacidad de acumular el metaloide deseado a tratar, por ende, desde el utilitarismo es útil y se puede utilizar.

Si la planta se encuentra en gran cantidad dentro de un ecosistema ¿Se puede tomar una gran cantidad de material “a la libre” o se debe buscar un método de obtención alternativo y que minimice el impacto ambiental?

Como sugerencia para este caso en particular, la solución consiste en buscar un método alternativo, por ejemplo, la clonación natural de individuos procedentes de un individuo madre, la cual en el caso de la gran mayoría de plantas es posible de realizar siempre y cuando se realicen los estudios previos.

En el caso particular de la planta *Justicia pectoralis* Jacq, es tan simple como tomar una muestra pequeña (realizar un corte a partir del tercer nudo de una de las ramificaciones) y sembrarla en suelo o agua. Esta muestra crecerá y permitirá a futuro la obtención de más muestras, las cuales tendrán siempre como fuente madre la muestra inicial tomada. Por ende, se dará un menor impacto ambiental y a su vez un menor impacto en la disponibilidad de alimentos para consumo (Espinoza, 2018).

De esta forma, se responde a la pregunta de dónde obtener los recursos, cumpliendo con las premisas establecidas en torno al utilitarismo y a la bioética ambiental. Volviendo a la pregunta del inicio sobre si ¿Es justificable el uso de plantas o cualquier especie vegetal para el tratamiento de contaminantes ambientales? Se puede concluir que sí es justificable, siempre y cuando se cumplan los principios discutidos, así como otros factores importantes que pudieran quedar por fuera dada la naturaleza del presente trabajo. Sin embargo, mucho más importante resulta encontrar un punto en común entre la teoría bioética ambiental y el utilitarismo, en donde los diferentes actores políticos tienen una vital e ineludible importancia. Estos últimos son quienes tienen el poder de decidir que es útil y que no, y pueden incrementar la problemática ambiental o impulsar una agenda centrada en búsqueda de soluciones basadas en una perspectiva bioética ambiental.

2. Metodología

2.1 Objetivo General

Determinar las condiciones para la puesta en marcha de un prototipo que utilice la planta *Justicia pectoralis* Jacq. para el tratamiento de agua contaminada con arsénico.

2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar los parámetros de diseño del prototipo.
2. Realizar el diseño y construcción del prototipo para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico con base en el modelo seleccionado.
3. Realizar la puesta en marcha del prototipo construido.
4. Llevar a cabo una estimación de costos centrada en el escalamiento del prototipo construido.

2.3 Metodología de trabajo

2.3.1 Selección de la especie vegetal

Para la selección de la especie vegetal se siguieron los criterios mencionados por Núñez (2004), en los cuales se considera que la planta cumple con los siguientes requisitos:

- 1- Perteneciente a la región geográfica contaminada.
- 2- Presenta resistencia a plagas y enfermedades.
- 3- Estacionalidad, alta tasa de crecimiento y facilidad para su cultivo, por medio de técnicas sencillas y que no requieran de alta inversión económica o de tiempo.

Adicional a estas características, para la selección de la especie, se tomó en cuenta su capacidad de absorber y remover el metal a tratar, en este caso arsénico. Tras conversaciones con la Dra. Rosaura M. Romero y de acuerdo con el estudio realizado por Espinoza (2018) se llegó a la conclusión de que la especie a utilizar en el prototipo sería *Justicia pectoralis* Jacq. La planta exhibe una mayor tolerancia a los medios de cultivo hidropónico enriquecidos con arsénico, en comparación a otras plantas estudiadas en investigaciones (Jerez, 2013).

2.3.2 Diseño y construcción del prototipo para tratamiento de agua contaminada con arsénico

Una vez seleccionada la planta a utilizar en los ensayos se procedió con la estructuración del diseño del prototipo para el tratamiento requerido. Para dicho prototipo se tomó en consideración diferentes clases de sistemas hidropónicos con los cuales se podría trabajar.

Sin embargo, al desconocer en cuál de las diferentes configuraciones posibles el sistema radicular de la planta crecería más y por ende se obtendría mayor biomasa y área superficial se procedió a realizar la construcción de un sistema que albergará 3 distintas configuraciones, permitiendo un análisis previo del crecimiento de las plantas en cada uno de estos sistemas.

Se realizó una investigación bibliográfica de sistemas hidropónicos y los posibles soportes que permitieran albergar diferentes configuraciones. Se seleccionó un sistema de soporte mediante el uso de cuñas, el cual permitiría el anclaje de los tubos de cultivo. Para el dimensionamiento de las cuñas se consideran los siguientes factores en el diseño:

1. Distanciamiento entre los tubos de cultivo.
2. Altura máxima de la especie vegetal seleccionada.
3. Material robusto y de fácil acceso.
4. Tipos de anclajes y uniones de las piezas que conforman las cuñas.

Seleccionado el tipo de soporte utilizado se procedió al diseño de los tubos de cultivo, dentro de los cuales se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Tipos de configuraciones hidropónicas a utilizar (raíz flotante, recirculación y NFT).
2. Impedimento del paso de luz hacía el interior del tubo.
3. Material resistente a sustancias químicas (medio hidropónico y otros).
4. Distancia de separación entre punto de cultivo (longitud del tubo).
5. Crecimiento del sistema radicular de la planta para selección del diámetro del tubo.

Una vez considerados los factores asociados a los tubos de crecimiento se procedió con el diseño del contenedor y selección de la bomba a utilizar, tomando en consideración:

1. Volumen total que utilizar en los ensayos.
2. Altura máxima de las cuñas y posicionamiento de los tubos de cultivo.
3. Longitud máxima de los tubos (posición de descarga hacía el contenedor).

Tras la obtención de todas las medidas de diseño se procedió a realizar la construcción del modelo conceptual mediante el uso del programa AutoCAD, permitiendo la obtención de los planos de construcción del prototipo y el escalamiento adecuado.

Confirmado el diseño mediante modelo conceptual, se procede a la construcción del equipo, el cual se realiza en etapas con el siguiente orden: cuñas, tubos, contenedor, uniones de cuñas, tubería y accesorios, bomba sumergible, descarga del sistema, otros. Finalmente se procede a la colocación de un temporizador con el fin de lograr la automatización del sistema mediante ciclos de alimentación al equipo.

2.3.3 Adaptación de las plantas al medio hidropónico y al prototipo diseñado

Construido el prototipo se procedió a la ejecución de los ensayos de crecimiento de la especie *Justicia pectoralis* Jacq. Inicialmente se procedió con el cultivo de la planta mediante el uso de frascos tipo “Gerber” y canastas de cultivo, en los cuales se coloca una estaca (fragmento del tallo) obtenida mediante un corte en el tercer o cuarto nudo, dependiendo del tamaño de la especie.

Para este corte se preseleccionan aquellos tallos que mediante caracterización cualitativa (vista) se observan con mayor robustez y salud. Todos los frascos se llenaron con una disolución hidropónica comercial compuesta de una disolución mayor y una disolución menor de la marca Evergreen®, bajo las indicaciones recomendadas por el fabricante (5 mL de disolución mayor y 2,5 L de disolución menor por cada litro de agua utilizado). Para el control del pH se utilizó un sensor de pH portátil y una disolución de NaOH 1M. Para el control de la electroconductividad se utilizó un sensor de TDS portátil.

Realizado los cortes se procede al llenado de cada uno de los frascos con la disolución hidropónica, en los cuales se sumergen las estacas, soportadas mediante el uso de las canastas de cultivo. El material es expuesto por un período de un mes a dicha disolución con el fin de propiciar la formación de la primera etapa del sistema radicular.

Una vez, formado el sistema radicular, se procede a preparar el prototipo diseñado para el recibimiento de estas. Para ello, se define previamente un volumen de agua de 50 L enriquecida mediante el uso de las disoluciones hidropónicas comerciales marca Evergreen®, la cual se prepara en el contenedor interconectado con los tubos de crecimiento.

Las canastas con las plantas desarrolladas se traspasan a cada uno de los huecos de los tubos de crecimiento, tras lo cual se llenan mediante la acción de la bomba sumergible marca BOYU modelo FP-1500. Luego del llenado, se cierra la válvula de bola del tubo de crecimiento inferior (sistema de raíz flotante, es decir, sin recirculación), mientras que

para el caso de los tubos superiores (NFT y recirculación) se mantiene abierta a $\frac{3}{4}$ de su capacidad, permitiendo de esta forma un flujo de ingreso en régimen laminar.

Seguidamente, se procede a colocar un temporizador para el control de cada uno de los ciclos de recirculación de la disolución preparada, brindando un tiempo de retención de 2 h y una recirculación de 5 min, por un período aproximado de un mes (27 días calendario).

Transcurrido el mes de crecimiento en el prototipo diseñado, se procede a sacar cada una de las plantas contenidas en las canastas de cultivo, se extraen de estas y se procede a realizar la separación del sistema radicular del resto de la planta, el cual se almacena en una bolsa comercial tipo Ziploc hasta su posterior análisis, etiquetando cada una de las muestras acorde al tubo de crecimiento y posición en la que se encontraba. Por último, se procede a realizar el lavado completo de cada uno de los tubos de cultivo mediante el uso de una disolución comercial de cloro y jabón, tras lo cual se inicia con un nuevo ciclo de cultivo.

2.3.4 Cuantificación de masa del sistema radicular de las plantas.

Tras el almacenamiento de cada una de las muestras obtenidas del ciclo de crecimiento correspondiente, se procede a llevar cada una de estas a una estufa marca Fisher Scientific por un período de 30 min a 60 °C, esto con el fin de secar la biomasa obtenida y determinar la materia en base seca.

Para el pesado de cada una de estas se procede a usar canastas de aluminio las cuales se colocan en una balanza analítica marca Mettler Toledo Modelo ME-104, con una resolución de 0,1 mg.

2.3.5 Adaptación de las plantas al medio hidropónico con agua contaminada con arsénico

Tras los ensayos realizados para determinar cuál de los diferentes tubos de crecimiento otorgaban una mayor masa de raíz de la planta se procede a la selección de este y adaptación del prototipo construido para que cada tubo de crecimiento cumpla con las mismas condiciones (un solo tipo de configuración). Tras dicha adecuación del sistema se procede se coloca una muestra de 40 L de agua contaminada con arsénico a una concentración de 20 µg/L (acorde a caracterización realizada).

Se carga el sistema con plantas en crecimiento (mismo período para adaptación y crecimiento del sistema radicular) y se dejan expuestas por un período de 18 días en los

tubos de crecimiento. El tiempo de retención para dichas pruebas se aumentó a 4 h, mientras tanto se mantuvo el tiempo de recirculación de 5 min. Durante el transcurso de los 18 días, se tomaron alícuotas de 100 mL cada 3 días, las cuales fueron almacenadas en frascos plásticos hasta el momento de su posterior análisis.

2.3.6 Instrumentación y metodología utilizada para la determinación de remoción de arsénico.

Una vez realizado el muestreo a lo largo de los 18 días establecidos se procede con el análisis y cuantificación de arsénico en el agua contaminada mediante espectrofotometría de absorción atómica acoplada a horno de grafito, técnica comúnmente empleada para la determinación de metales. Los análisis fueron realizados por el Laboratorio del Centro de Investigación y servicios Químicos y Microbiológicos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC).

Las muestras en estado líquido fueron tratadas utilizando la metodología 3113 B del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd Edition. Dicha metodología se aplica para la determinación de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica (horno de grafito).

En dicho método se toman 100 mL de la muestra, a la cual se le mide inicialmente la turbidez, en caso de que el valor sea menor a 1 NTU, se procede a agregar 1 mL de HNO₃ concentrado y 2 mL de H₂O₂ al 30 %, para posteriormente ser llevado al equipo de medición. En caso de que el valor de turbidez sea mayor a 1 NTU se debe calentar y reducir la muestra hasta un volumen de 50 mL, para posteriormente añadir una disolución de Nitrato de Níquel 1 M.

Las muestras vegetales (raíz y parte aérea de la planta) fueron inicialmente cortadas de forma manual mediante el uso de tijeras de mesa y molidas en licuadora, y tras su homogenización se determinan masas por triplicado de cada una de las muestras a las cuales se les adiciona ácido nítrico para ser digeridas en una mufla a 600 °C por un período de 2 h. Tras la digestión se filtra cada una de las muestras hacia un balón de 25 mL el cual se afora con agua destilada.

A continuación, se muestra un esquema a manera de resumen sobre las metodologías utilizadas en el tratamiento de las muestras (Figura 6).

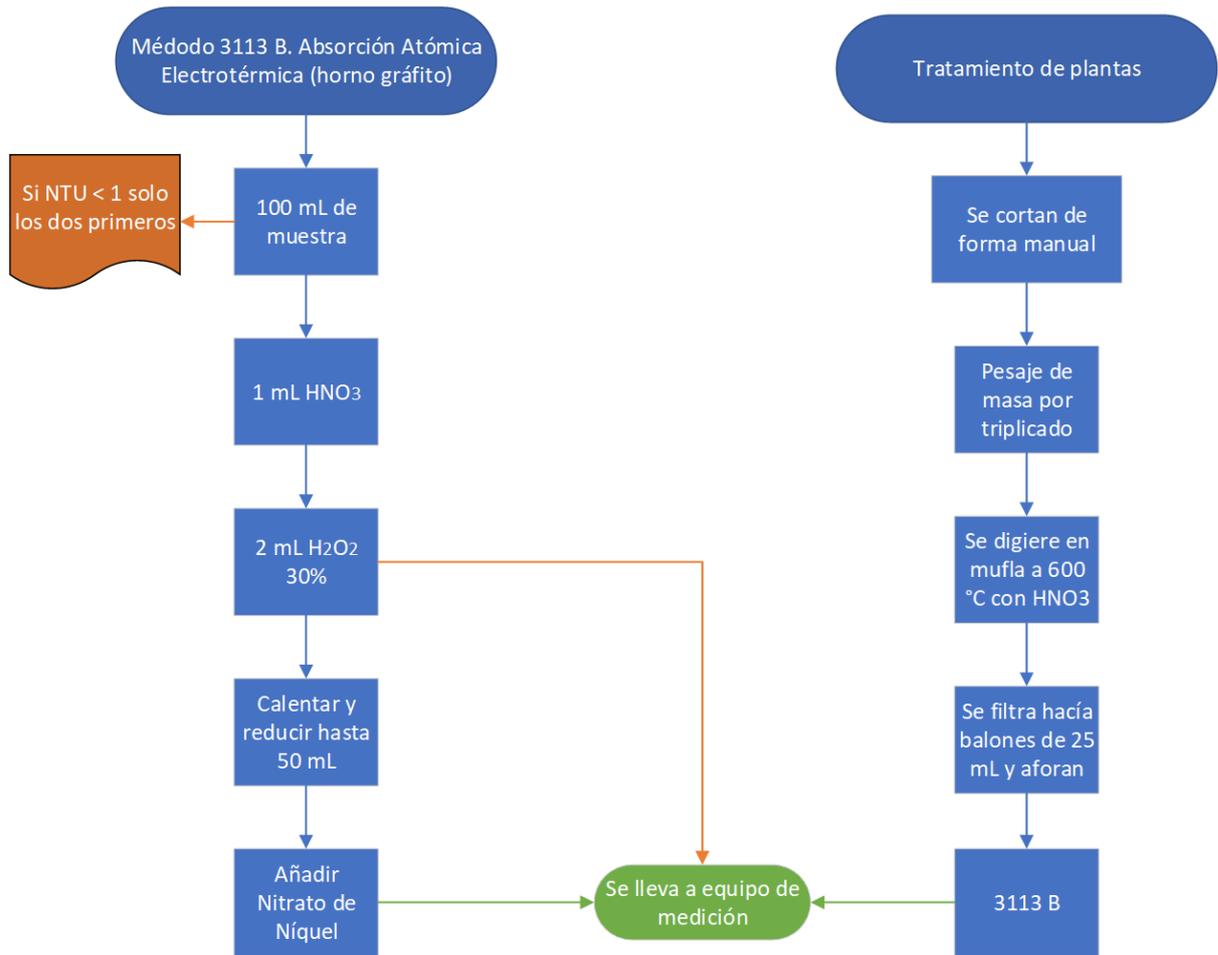


Figura 6. Esquema de tratamiento de muestras con arsénico.

3. Análisis de Resultados

Las plantas madre de *Justicia pectoralis* Jacq. se tomaron del invernadero del CIPRONA el día 4 de agosto del 2020 (figura 7). Las mismas se extrajeron de forma directa de los cultivos del invernadero, realizando un corte transversal en el tercer o cuarto nudo de los tallos con mejor aspecto (grosor, color, otros parámetros). En total se sembraron 44 estacas, las cuales se colocaron en un recipiente plástico de 35 L (14,5 x 58,0 x 43,0 cm) separadas por una distancia 10 cm horizontal y 5 cm verticalmente entre cada orificio (figura 8), esto con el fin de permitir y promover un desarrollo óptimo de la planta.



Figura 7. Plantas madre tomadas del invernadero del CIPRONA.

En dicho recipiente se colocaron 30 L de la disolución nutritiva con la mezcla de las disoluciones hidropónicas marca Evergreen® acorde a las indicaciones del fabricante mencionadas anteriormente. Tras 3 semanas de crecimiento se observa la formación de las primeras raíces, donde posteriormente se dejan las mismas por un período de 2 meses para la obtención del sistema madre (figura 9).



Figura 8. Separación de las plantas madre en recipiente rectangular

Una vez pasado el período de crecimiento de dichas plantas (2 meses aproximadamente) se observa que de las 44 muestras iniciales únicamente 4 no presentaron desarrollo, por el contrario, se secaron, por lo cual se procedió con su desecho. Esta afectación puede darse por factores asociados como con la recirculación del medio, oxigenación, luz, temperatura, otros. Para este experimento al no contarse con un invernadero con las condiciones deseables se considerarán algunas de estas variables como constantes (luz, temperatura y humedad) (Maucieri et al., 2018b).



Figura 9. Plantas madre reproducidas para obtención de estacas para ensayos.

Obtenido material vegetal madre en la zona de experimentación, se procedió a propagar más material para los ensayos. Para ello se adaptaron 33 estacas en frascos de Gerber para su reproducción, propagación y uso, siguiendo el procedimiento previamente descrito. Tal y como se puede observar en la figura 10, las plantas se encuentran libres de cualquier enfermedad o plaga, es decir, en un estado óptimo para su debido desarrollo.



Figura 10. Crecimiento de plantas en frascos tipo Gerber.

Para el desarrollo en estos recipientes se colocaron aproximadamente 100 mL de disolución nutritiva con su respectiva dosis de nutrimentos, a un pH cercano a 6 y una electroconductividad mayor a 0,780 mS/cm, esto ya que acorde a la literatura son condiciones prioritarias para el crecimiento óptimos de las plantas (Bittsánszky et al., 2016).

Tras 3 semanas de adaptación en los recipientes tipo Gerber, las plantas presentan raíces relativamente jóvenes tal como el comportamiento visto en el sistema madre (ver figura 11). No obstante, las estas plantas en comparación a las del sistema madre se observan, cualitativamente, con mayor volumen de raíz. Este comportamiento se puede atribuir al recipiente utilizado, dado que el consumo de nutrientes es individual, y no existe una competencia por la captación de los nutrientes y ellos pueden desarrollarse ligeramente más en el mismo período de tiempo. Lo anterior, concuerda con los estudios realizados por Hernández (2018), donde el crecimiento de los cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) y culantro castilla (*Coriandrum Sativum* L.) presentaron mayores rendimientos bajo condiciones donde la cantidad de nutrientes era mayor (Hernández Castro, 2018).



Figura 11. Sistema radicular plantas en frasco tipo Gerber tras 3 semanas.

Durante el periodo de crecimiento de las plantas se procedió a la construcción del sistema hidropónico donde dichas plantas procederían a estar durante un período de 27 días aproximadamente. Para dicha construcción se tomaron diversos aspectos en cuenta, siendo uno de ellos y de los más críticos, la selección del sistema de bombeo, así como del tipo de tubería a utilizar y su respectiva configuración (Figura 12).

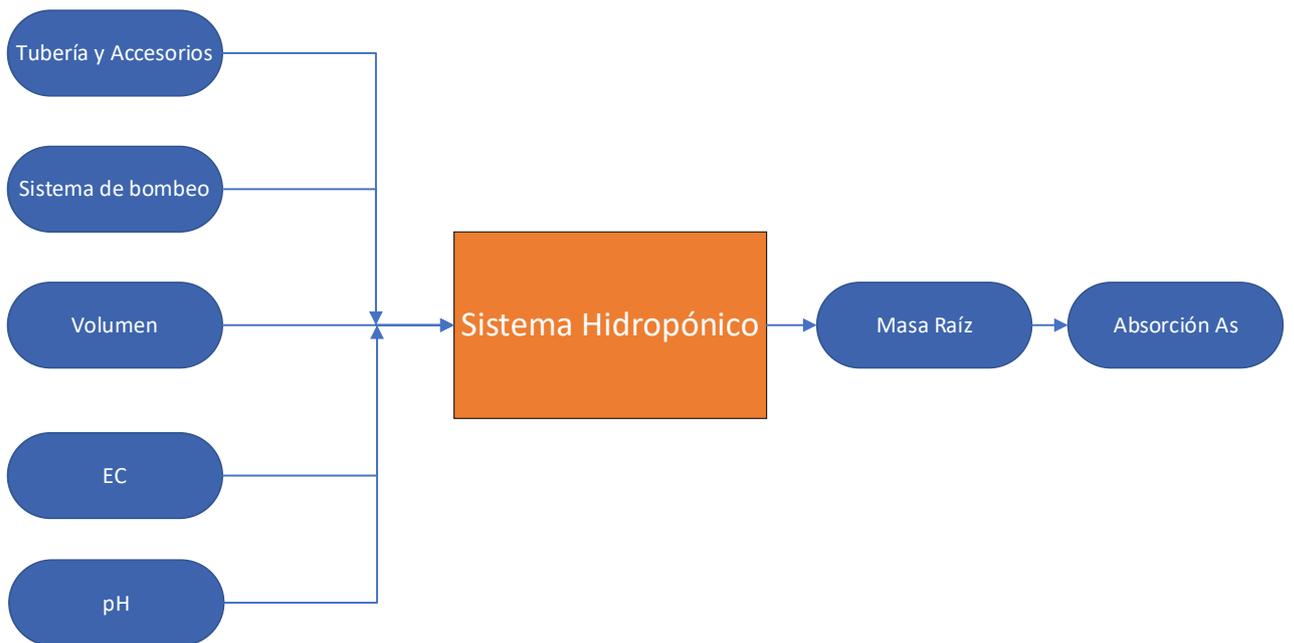


Figura 12. Diseño de caja negra para el sistema hidropónico.

Tomando en cuenta esta serie de variables que determinarán e incidirán sobre el crecimiento del sistema radicular de la planta se procedió a realizar la revisión de cada una de las entradas. De primera mano y en concordancia al diseño mostrado en la figura 13, el sistema cuenta con una altura aproximada de 1 metro, por lo cual la bomba seleccionada debe tener la capacidad mínima de levantar una cabeza de agua de 1,5 m, considerando las pérdidas ocasionadas por los tramos de tubería, así como las subdivisiones de esta, para garantizar un drenaje acorde a lo estipulado en la teoría y que garantice una eficiente recirculación del medio (de La Rosa-Rodríguez et al., 2018).

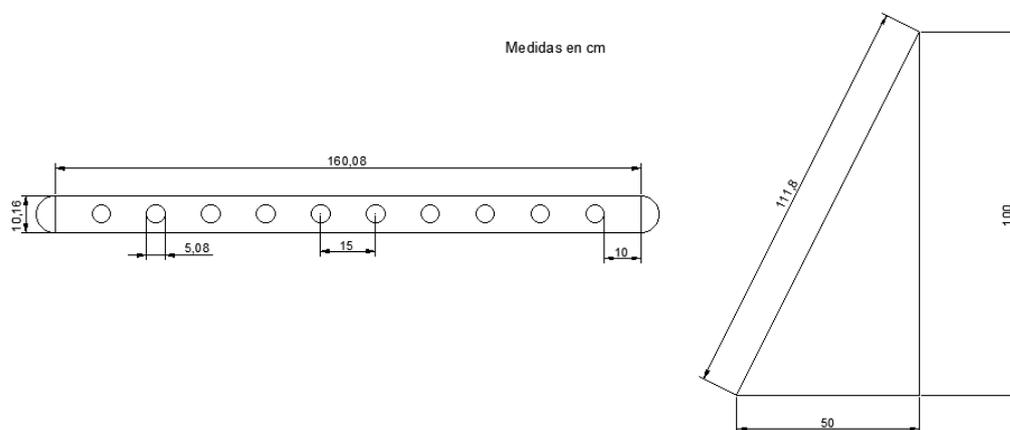


Figura 13. Diseño del sistema hidropónico, vista lateral (cuña), vista superior (tubo)
(elaboración propia).

Considerando lo mencionado por Campoverde (2021), el caudal del sistema debe de encontrarse entre (1,25 y 1,5) L/min, el cual se medirá al final del canal diseñado. Además, para los sistemas con recirculación se debe considerar un flujo laminar con el objetivo de mantener un caudal constante durante los ciclos de llenado, así como garantizar una distribución de los nutrientes presentes en la disolución y una eficiente oxigenación del fluido, condiciones que fomentarán un mejor crecimiento de las plantas en el sistema hidropónico.

Con todas estas consideraciones, se procede a seleccionar una bomba marca BOYU modelo FP-1500. Las características de dicho equipo (cuadro 4), garantizan un caudal de 1,43 L/min, acorde a los cálculos realizados con el sistema implementado y por ende un número de Reynolds de 1193,51 (adim), con lo que se obtiene un flujo del sistema en el régimen laminar, condición adecuada para su operación.

Cuadro 4. Datos técnicos de la bomba BOYU modelo FP-1500 para alimentación y recirculación del sistema (obtenido de manual técnico de SERA Precision).

Modelo	Potencia (W)	Q _{máx} (L/h)	H _{máx} (m)	Temperatura Agua máx (°C)
FP1000	16	1000	1,8	35
FP1500	25	1500	2,5	35
FP2000	43	2000	3,0	35

Para el diseño de los tubos se consideró un total de 3 sistemas con 10 plantas cada uno, para un total de 30 plantas en total. De esta forma y siguiendo las recomendaciones dictadas en la teoría hidropónica (Zárate, 2014), se procede a seleccionar una distancia de 10 cm de separación entre la entrada del fluido al tubo y el primer orificio y de 15 cm aproximadamente (de centro a centro) entre cada uno de los orificios, considerando las características fenotípicas y de crecimiento de la *Justicia pectoralis* Jacq, dando como resultados tubos de un largo total de 1,6 m. Otro aspecto importante que considerar como se ha mencionado anteriormente es el material utilizado, no debe permitir el paso de luz al interior de los tubos. De esta forma se procede a buscar a nivel comercial en Costa Rica un tubo tipo PVC que se adapte a estas condiciones, siendo el tubo marca SAM-UK de 3" SDR50 el seleccionado para esta aplicación.

Por último, se procede con el cálculo para la selección y diseño del contenedor a utilizar. Tomando en consideración el volumen de trabajo requerido se escoge un volumen de diseño de 35 L. No obstante, otros aspectos importantes a considerar en los sistemas hidropónicos y sobre todo dada la naturaleza del presente proyecto (absorción de arsénico) son la inhibición de formación de algas, el sobrecalentamiento del agua, disminución de pérdidas de nutrientes u otros compuestos por evaporación. Dado lo anterior, se procede con la selección de un contenedor tipo uso pesado, con una capacidad de 102 L (78 cm x 52 cm x 36 cm), tal como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Caja tipo uso pesado implementada como contenedor en el sistema hidropónico (EPA, 2022).

El ensamblaje del sistema se realiza manteniendo una distancia de 30 cm entre cada uno de los tubos, según su configuración y acorde a las recomendaciones de las diferentes fuentes sobre teoría hidropónica consultadas, tal como se observa en la Figura 15.

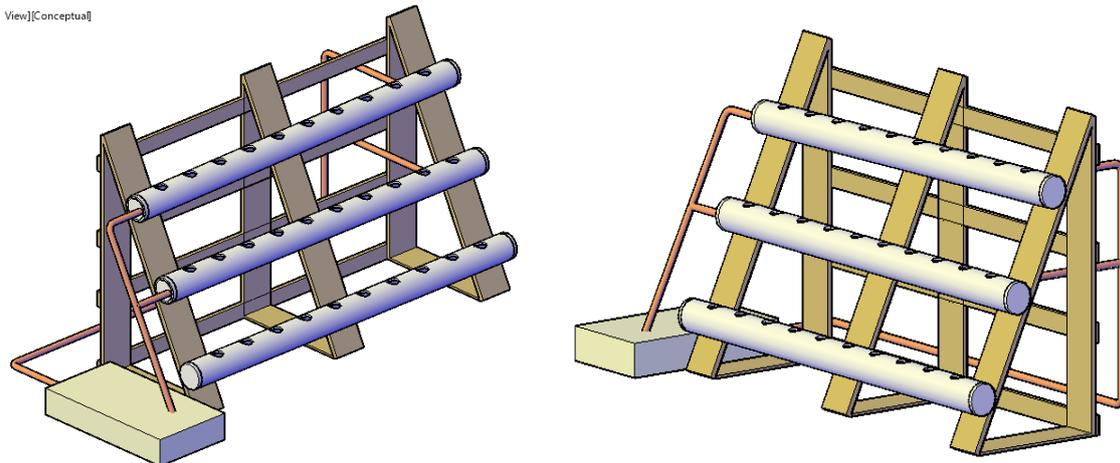


Figura 15. Diseño conceptual final del sistema hidropónico a implementar (2 vistas).

Una vez ensambladas todas las partes del equipo se procede con la colocación de los tubos acorde a cada una de las configuraciones. Se selecciona un sistema NFT con un grado de

inclinación de 2% para el primer tubo, con el cual se espera obtener un porcentaje mayor de masa de raíz al generar un leve estrés en las plantas, pero con la desventaja de la posible muerte secado de las plantas. Para el segundo sistema se elimina la inclinación, el cual funciona como un sistema de NFT modificado tipo inundación y drenaje, con la única diferencia de que siempre permanecerá un grado mínimo de agua con nutrientes en contacto con cada una de las plantas. Por último, se selecciona un sistema de raíz flotante para el tubo inferior, en el cual se dará un mayor tiempo de retención y contacto entre las plantas y la disolución nutritiva, pero con la desventaja de carecer de oxigenación. El cuadro 5 y en la figura 16 se puede observar el equipo empleado

Cuadro 5. Configuración de cada uno de los tubos del prototipo construido para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq.

Tubo	Configuración
Superior	NFT (inclinación 2 %)
Medio	NFT Modificado (tipo inundación y drenaje)
Inferior	Raíz flotante



Figura 16. Ensamble final del prototipo hidropónico implementado.

Configurado por completo el sistema se procede a realizar la puesta marcha del equipo llenándolo primero con agua para observar cualquier posible fuga. Tras realizar 5 corridas de 10 min cada una con un intervalo de 5 min entre ellas, se determina que solamente existe un problema con el tapón de sellado del tubo inferior. Para solventarlo se usa cinta

tipo teflón, sellando por completo el sistema y evitando futuras pérdidas. No obstante, es importante aclarar que, tras cada ciclo de crecimiento y limpieza de los tubos, dicho teflón se reemplazó por nuevo.

Solucionada la fuga se colocan las plantas previamente acondicionadas en frascos Gerber, a cada uno de los orificios de los tubos, para un total de 30 plantas en buen estado, tal como se muestra en la figura 17.

Para dicho crecimiento se colocan 35 L de disolución hidropónica en el contenedor, con las dosis de disolución mayor y menor recomendadas por el fabricante a un pH de 6,0 y una conductividad inicial cercana a los 0,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una recirculación diaria de 10 min durante cada 4 h. Dichas condiciones son recomendadas para el crecimiento de plantas en sistemas hidropónicos (Laura et al., 2014).



Figura 17. Crecimiento de las plantas en el prototipo hidropónico construido, día cero.

Tras un período de dos semanas (día 16) se observa como las plantas en las posiciones 1 y 2 del sistema NFT (tubo superior), se encuentran secas, es decir, presentan una necrosis (muerte celular) a lo largo de su estructura (tallos, hojas y raíz). Dicha afectación se aduce al grado de inclinación otorgado al sistema, así como a las características propias de la planta durante su período de crecimiento, donde pese a ser menor a 2 % se presenta dicho comportamiento. Mismo comportamiento se observa 13 días posteriores (29 días) para la planta colocada en la posición #3 del sistema hidropónico como se aprecia en la figura 18.



Figura 18. Crecimiento de las plantas en el prototipo hidropónico día 16 (izquierda) y día 29 (derecha).

Tras dicha corrida preliminar se procede con el reajuste del sistema, realizando los siguientes cambios:

- 1- Se mueve el sistema a un lugar con mayor iluminación, esto con el fin de que todas las plantas tengan una captación de luz pareja.
- 2- Se reduce el grado de inclinación, pasando de un 2 % a un 1 %, reduciendo de esta forma la posible afectación a las plantas ubicadas en las posiciones 1,2 y 3 plantas del sistema NFT.
- 3- Se disminuye el tiempo de recirculación del sistema, pasando de 4 h a 2 h y de 10 min a 5 min.

Realizado los ajustes en el sistema, se procede con cada uno de los ensayos de crecimiento de raíz con el objetivo de determinar cuál de los 3 sistemas utilizados brinda una masa de raíz mayor. En total se realizaron 4 ensayos de crecimiento entre Enero y Junio del 2021, en cuyo caso se monitorean diversos parámetros (pH, electroconductividad, oxigenación, coloración, follaje, raíz, otros).

Es importante resaltar que se realizó el descarte del ensayo número 3, a causa de que se agrega menor cantidad de disolución nutritiva a la mezcla (se queda sin disolución al momento de iniciar la corrida), dando como resultado un valor inicial de electroconductividad (0,722 mS/cm) en la mezcla menor a lo recomendado en la teoría hidropónica (usar valores mayores a 0,800 mS/cm) y por ende los valores obtenidos en los análisis presentados no son significativamente comparables a los de los otros ensayos.

Tal y como se puede observar en la figura 19, los resultados del sistema NFT presentaron valores mínimos de 0,0000 g en cada uno de los ensayos realizado. Valores aducidos a la pérdida de las 3 primeras plantas. Tras dicha observación, se descarta el uso del sistema NFT dado que se requirió de un sistema que brinde la mayor cantidad de plantas con raíces sanas y fuertes para poder realizar la captación del metaloide deseado. Por otro lado, si se considera la mediana de dicho gráfico 0,1354 g y la media es 0,3256 g, se presentan datos menores a los valores de los otros dos sistemas utilizados, así como una clara desviación de los datos con respecto a la media y mediana, producto de los valores en cero obtenidos. Además, se puede inferir que más del 50% de los datos se encuentran por encima del cuartil 2 (mediana), no obstante, el valor máximo del conjunto de datos (0,9897 g) es menor al valor máximo de los otros 2 conjuntos de datos restantes.

Tras realizar el descarte del uso del sistema NFT, se procedió a realizar la comparación entre los dos sistemas restantes, en cuyo caso una de las primeras observaciones realizadas es que, para el sistema de raíz flotante, los datos se encuentran menos dispersos que los resultados obtenidos en el sistema NFT modificado. Lo anterior es un indicio de que, a mayor tiempo de retención en el sistema, las plantas crecerán de mejor manera en comparación a un sistema con menor tiempo de retención.

Este comportamiento coincide con lo mencionado en la teoría de sistemas hidropónicos, en donde a mayor tiempo de retención se obtendrán raíces más fuertes y con mayor volumen, por ende, dando como resultado valores de masa mayores (Maucieri et al., 2018).

Siguiendo con la comparación de los dos sistemas, se puede determinar que los valores de mediana y media en el sistema de raíz flotante (0,9506 g y 0,9315 g), se encuentran por encima de los obtenidos en el sistema tipo NFT modificado (0,8243 g y 0,8374 g), confirmando de esta forma la observación mencionada en el párrafo anterior. Sin embargo, se puede de igual forma observar que para el tramo entre el cuartil 3 y el valor máximo los valores obtenidos en el sistema NFT modificado se encuentran más agrupados entre sí que para los valores del sistema de raíz flotante.

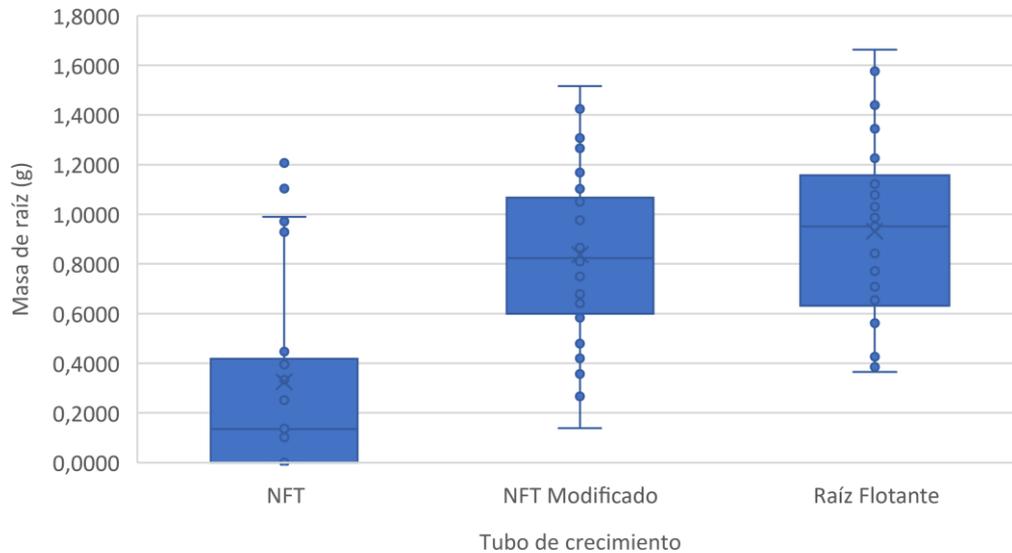


Figura 19. Datos de masa de raíz de *Justicia pectoralis* Jacq en cada sistema utilizado en el prototipo construido para tratamiento de agua con arsénico.

Con respecto al valor del pH a lo largo de los ensayos (disolución inicial 5,9 y 6,0) se puede observar que tanto para el sistema NFT como el sistema NFT modificado los valores se encuentran menos dispersos que para los obtenidos en el sistema de raíz flotante (Figura 20).

Dicho comportamiento se puede aducir con facilidad al efecto neto que tiene la no recirculación de la disolución en el sistema, la cual provoca que no exista una renovación de la disolución en los tubos, sumado a la liberación de ácidos por parte de las plantas. Lo anterior provoca una disminución exponencial en el valor del pH, lo cual se puede corroborar con el comportamiento de los datos. Un pH cercano a 5,0 se obtiene, y acorde con la teoría, valores menores a 5,3 no son recomendados dado que provocan una disminución en la tasa de crecimiento y captación de nutrientes por parte de las plantas (Maucieri et al., 2018c).

Comparando los resultados obtenidos tanto en el sistema NFT como en el sistema NFT modificado se observa cómo los valores de pH presentan un comportamiento similar, siendo que para el último sistema la variación entre los datos es menor. Los datos del extremo inferior y superior del gráfico del sistema NFT modificado se encuentran más cercanos a sus respectivos cuartiles en comparación al sistema NFT, y se da una mayor agrupación de datos en torno a la mediana y media aritmética. Por otro lado, el valor del extremo inferior se encuentra en un pH de 5,5 en comparación al valor de 5,4 obtenido

en el otro sistema, presentando de esta forma el sistema NFT modificado un comportamiento mayormente aceptable que en comparación a los otros 2 sistemas utilizados.

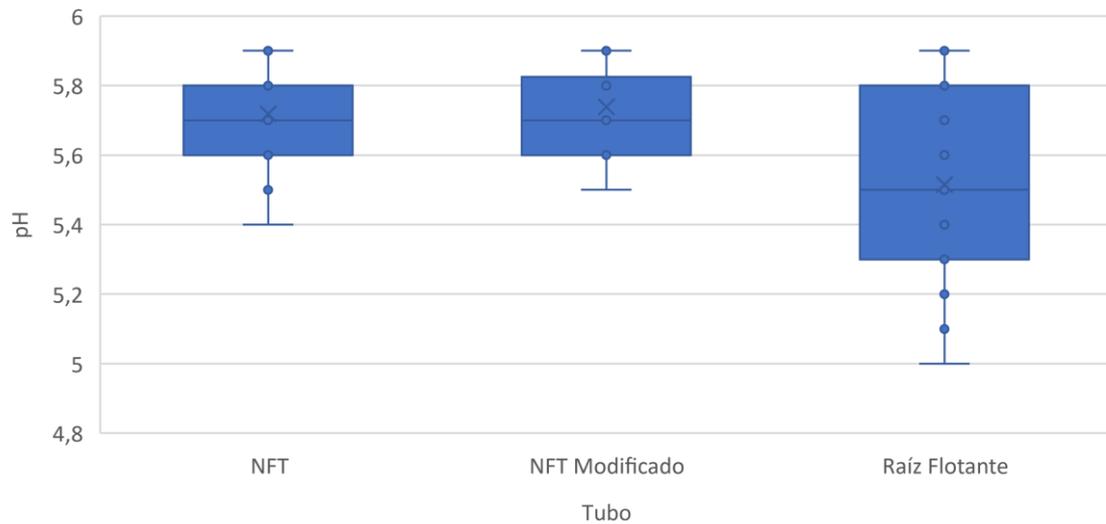


Figura 20. Comportamiento del valor de pH bajo ensayos de crecimiento de sistema radicular de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido.

Si se compara el comportamiento del valor de electroconductividad se puede observar un comportamiento similar con respecto al comportamiento del pH, en cuyo caso los valores del sistema de raíz flotante se encuentran mayormente dispersos que con respecto a los otros dos sistemas (Figura 21). Este comportamiento se puede atribuir a que la captación de nutrientes en este sistema es claramente mayor. Las plantas captan los nutrientes contenidos en la disolución con mayor facilidad y la concentración de ellos se reduce y por ende la electroconductividad. A mayores tiempos de retención mayor captación de nutrientes y por ende mayor crecimiento del sistema radicular de la *Justicia pectoralis* Jacq. No obstante, a futuro esto puede representar un riesgo, ya que si no se renueva a tiempo la disolución nutritiva se puede presentar valores por debajo de los recomendados.

Dicho de otra forma, si se desea utilizar este tipo de sistemas se debe calcular el tiempo de renovación de la disolución nutritiva, ya que en caso contrario el crecimiento de las plantas se verá impactado.

En los otros dos sistemas utilizados el valor de la electroconductividad se mantuvo estable y dentro de los valores recomendados. Los datos no se encuentran tan dispersos entre sí

en comparación al sistema de raíz flotante. Este efecto neto se relaciona nuevamente a la recirculación permanente de la disolución nutritiva en estos dos sistemas.

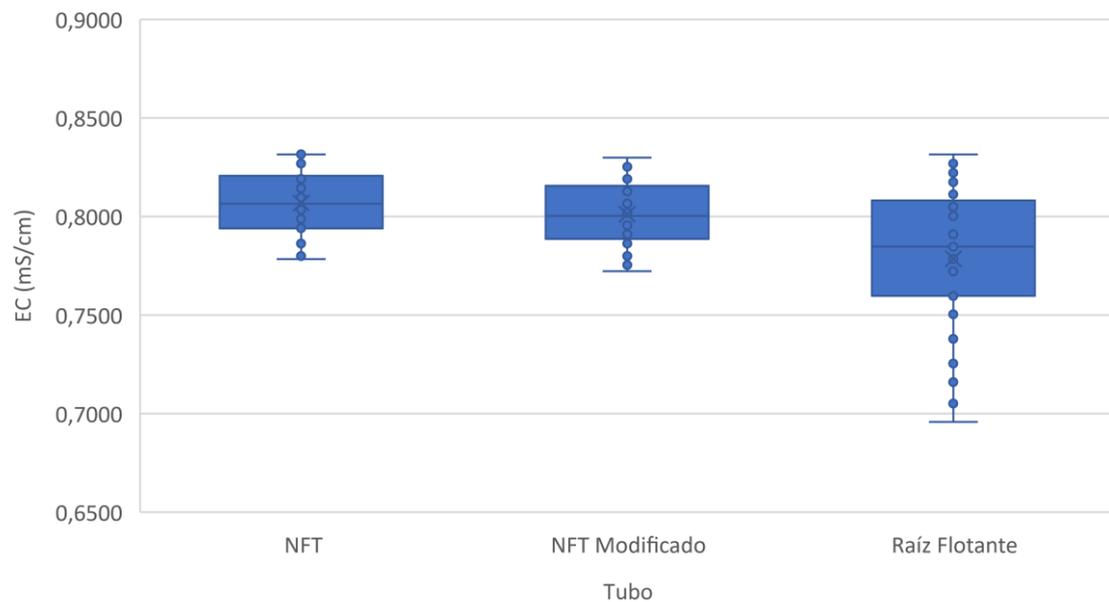


Figura 21. Comportamiento del valor de electroconductividad bajo ensayos de crecimiento de sistema radicular de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido.

Hasta este punto se concluye que el sistema de raíz flotante es el mejor candidato por utilizar acorde a los requerimientos, seguido por el sistema NTF modificado y por último el sistema NFT. No obstante, todavía se debe de revisar el factor de oxigenación, para definir el sistema a utilizar para los posteriores ensayos de captación de arsénico.

El oxigenar la disolución es uno de los requisitos indispensables de cualquier sistema hidropónico (Zárate, 2014). esto dado que permite la obtención de raíces sanas, por ende, con una mayor fortaleza y resistencia a la hora de ser expuestas a otros tipos de sustancias ajenas.

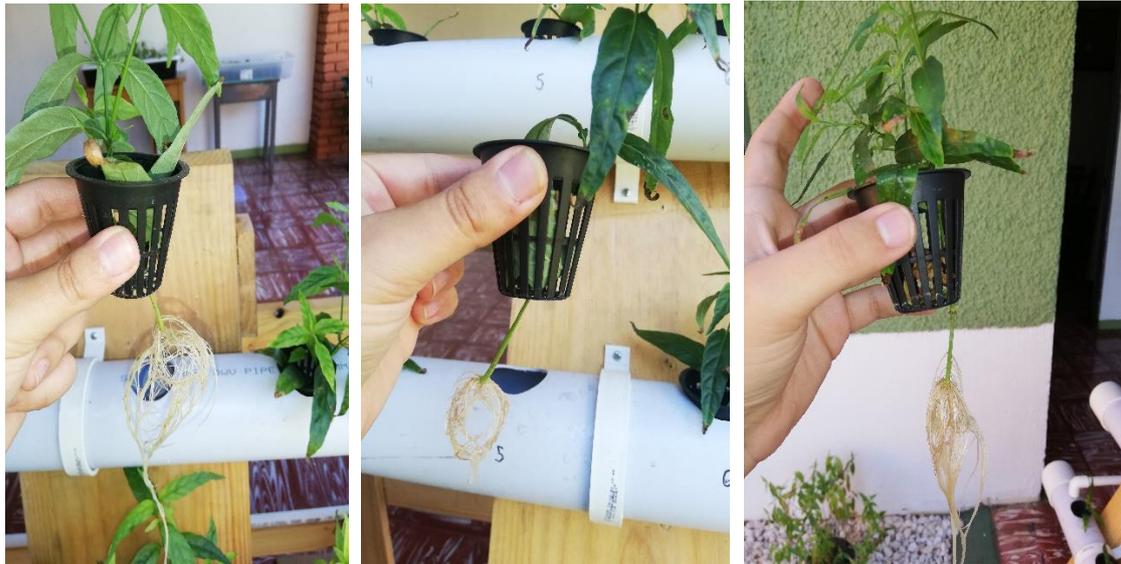


Figura 22. Comparación de sistema radicular y aéreo de *Justicia pectoralis* Jacq tras 3 semanas en ensayo 2 de crecimiento en prototipo construido.

Considerando lo anterior y acorde con el análisis visual de las plantas, (Figura 22), se verifica tomando como ejemplo la planta ubicada en la posición #5 (se toma en esta posición al ser el punto central) de cada tubo de crecimiento, que las raíces de los dos primeros sistemas (NFT y NFT modificado) se encuentran sanas y sin ningún impacto mayor sobre la parte aérea de la planta, mientras bajo la configuración de raíz flotante, las raíces ya tienen indicios de oscurecimiento, producto de la falta de oxigenación. Lo observado se intensifica para las raíces más lejanas a la entrada del sistema (posición de 8 a 10). Lo anterior, representa una afectación considerable y a futuro para los ensayos de captación de arsénico, ya que, de no contarse con una planta sana, se corre el riesgo de que la remoción del metaloide sea menor a la de si se cuenta con una planta en óptimas condiciones (Beltrán-Pineda & Gómez-Rodríguez, 2016).

Bajo el análisis realizado se llega a la conclusión de que el mejor sistema a utilizar, tanto para el crecimiento del sistema radicular como para la captación de arsénico por medio del uso de la planta *Justicia pectoralis* Jacq es el sistema de NFT modificado, con un tiempo de retención de 4 h con el fin de promover la mayor remoción de nutrientes de la disolución nutritiva, así como de captación del contaminante.

Dicho lo anterior, se procede a realizar el ajuste en la configuración de cada uno de los dos tubos restantes, para que cumplan con los ciclos de 6 semanas entre crecimiento preliminar y adaptación al sistema, bajo un modelo de drenado y llenado de los tubos que

garantice un apto crecimiento de las plantas, así como una adecuada recirculación de los nutrientes y la muestra contaminada con arsénico. Para esto se realizan los cálculos matemáticos (Apéndice B, cálculo d) para determinar los tiempos de llenado y drenado según el nivel inicial de disolución contenida en los tubos (capa o película requerida en un sistema NFT).

Acorde con el gráfico suministrado en la figura 23 se determina que con una película que cubra una cuarta parte del tubo se obtendrá un tiempo de llenado de 2 min con 57 segundos y un drenado de 2 min con 43 segundos. Esto, siendo concordante con lo reportado por Christie (2014), quien menciona que para una buena recirculación de nutrientes el tiempo de llenado debe rondar entre los 2,5 y 3 min, mientras que el drenado debe ubicarse entre los 2 y los 2,5 min para que garantice una buena oxigenación, y que, el tiempo entre ambos ciclos no sea mayor a 5 min.

Si se compara estos valores con los obtenidos en caso de tener una película mayor a $\frac{1}{4}$ del tubo, el tiempo de llenado disminuye, mientras que el drenado aumenta considerablemente, por lo que se tendrá una sobre oxigenación de la disolución y una mala recirculación de nutrientes. Si por el contrario se trabaja con una película menor a $\frac{1}{4}$ del tubo, se aumenta el tiempo de llenado y disminuye el tiempo de drenado del sistema, obteniendo una buena recirculación de nutrientes, pero una inadecuada oxigenación de la disolución.

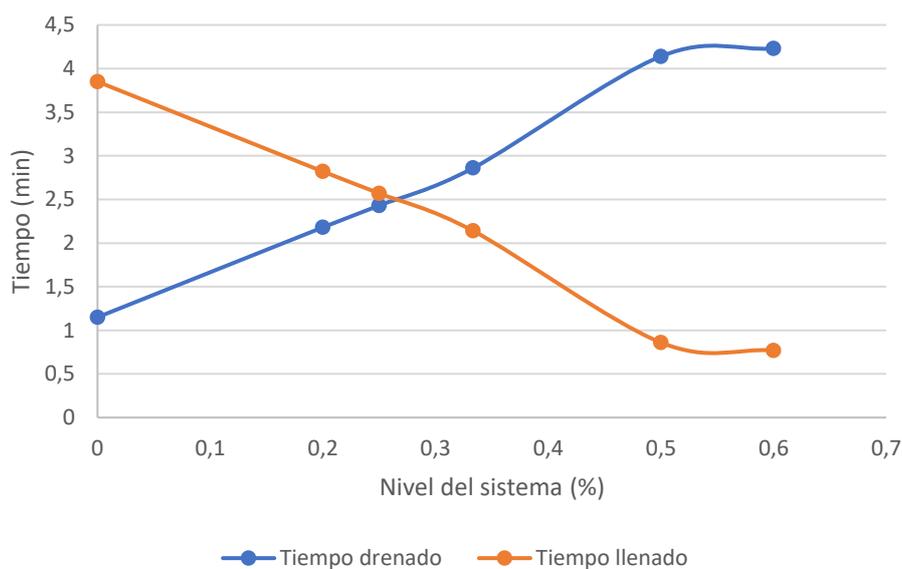


Figura 23. Comparación de los tiempos de llenado y drenado del sistema acorde a la película inicial de disolución nutritiva en los tubos.

De esta forma dando seguimiento bajo las condiciones establecidas se observa en la figura 24 una mejora significativa en el crecimiento del sistema radicular de las plantas, aumentando la cantidad de biomasa y por ende el área superficial, lo que por ende propiciará una mejora en la captación del contaminante a tratar.



Figura 24. Sistema radicular de la planta *Justicia pectoralis* Jacq en prototipo diseñado bajo configuración NFT modificado.

Para cada uno de los ensayos de remoción de arsénico se calcula un volumen base de 30 L a colocar en el tanque contenedor. El primer ensayo se realizó con muestra de una naciente de agua conteniendo 0,0015 mg/L de As y a la que se le adicionaron nutrientes. Si bien es cierto, podría presentarse una interferencia en la captación del metaloide debido a la presencia de fosfatos, se toma esta decisión por lo reportado por Elías (2018), quien no encontró que los iones de fosfato (H_2PO_4^-) ni los iones de hierro (Fe^{2+} y Fe^{3+}), inhibieran la captación de arsénico bajo sus condiciones experimentales a una concentración del metaloide menor a 0,020 mg/L (Espinoza, 2018).

Transcurrido los 18 días de remoción y acorde a los datos obtenidos de los análisis realizados en conjunto con el Centro de Investigaciones y de Servicios Químicos y Microbiológicos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se observa en la figura 25 como en el transcurso de los primero 9 días ocurre una disminución progresiva en la concentración de arsénico, pasando de un valor de 0,015 mg/L a un valor de 0,010 mg/L. No obstante, se observa como a partir del día 9 hasta el día 18 no ocurre un mayor cambio en la tasa de captación del metaloide por parte de las plantas utilizadas.

Bajo las condiciones experimentales empleadas, parece que ocurre una interferencia producto de la adición de nutrientes a la muestra contaminada con el metaloide, dada la

competitividad entre iones con características similares. Tras dicho resultado, se decide optar por la eliminación de nutrientes en los siguientes ensayos.

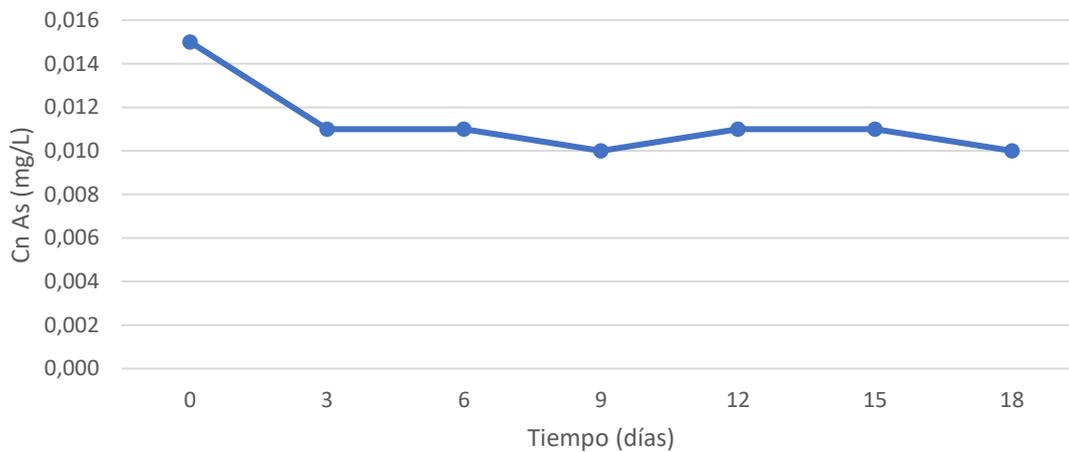


Figura 25. Remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq (ensayo 1).

Para el segundo ensayo se opta por realizar diversas modificaciones al sistema, con el fin de garantizar una mejor captación del metaloide deseado:

- 1- Cambio de tamaño (volumen) del contenedor de la disolución nutritiva, pasando de un contenedor de 102 L de capacidad a un recipiente de 60 L.
- 2- Eliminación de nutrientes a la disolución contaminada.
- 3- Ajuste de la concentración inicial de arsénico a 0,020 mg/ mediante el uso de una disolución de arsénico de 1000 mg/L.

Realizados estos cambios, se procede a correr el ensayo y tras la obtención de los resultados se observa un comportamiento diferente al esperado: un incremento de la concentración del metaloide de 0,043 mg/L a una concentración de 0,060 mg/L (Figura 26).

El principal contribuyente al comportamiento observado se aduce al cambio en el tipo de contenedor utilizado, dado al material del que está hecho el mismo, esto ya que se detecta la formación de algas a lo largo del contenedor, siendo este producto del paso de luz hacia la disolución presente en el contenedor. También se puede evaluar el efecto neto de la temperatura interior del contenedor, dado que el nuevo recipiente al ser de un grosor menor permite con facilidad el aumento de temperatura del agua, provocando de esta

forma a ello un falso positivo producto de la evaporación del agua de la disolución del contenedor.

Tal y como se mencionó con anterioridad en el presente proyecto, la adecuada selección de materiales de construcción es un factor contribuyente importante en la tasa de captación de crecimiento y remoción de sustancias por parte de las plantas en un sistema hidropónico (Peralta, 2014).



Figura 26. Remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq (ensayo 2).

Con el objetivo de no provocar mayor cantidad de interferencias en el sistema empleado y comprobar la eficiencia del proceso de remoción se opta por devolver el prototipo a su estado inicial, es decir, utilizar el contenedor de 102 L, en cuyo caso funcionó sin mayor problema, evitando impactos en el proceso. Por último, a falta de disponibilidad de agua naturalmente contaminada, se opta por la utilización de agua de tubo a la que se le agrega el contaminante.

De esta forma se opta por la ejecución de 3 ensayos adicionales con el fin de tener una comparación estadísticamente significativa al mantener la mayor cantidad de variables fijas y controladas. Con esto en consideración se procede a adicionar 6 mL de una disolución de arsénico de 1000 mg/L en 30 L de agua del tubo, obteniendo teóricamente una disolución final de entre 0,015 mg/L y 0,020 mg/L de arsénico.

Conforme se fueron ejecutando cada uno de estos ensayos se realizó un seguimiento cercano al comportamiento de las plantas, observando sus características físicas y estado de salud. Tras este seguimiento, se observa como a lo largo del ensayo las plantas sufren

algunos síntomas, tales como la caída de hojas, degradación de la clorofila y pérdida de fuerza en tallos y hojas (turgencia) (Figura 27). Dicho comportamiento es similar al reportado por Espinoza (2018) en sus ensayos, los cuales se asocian a la remoción de arsénico por parte de la planta *Justica pectoralis* Jacq y los efectos que provoca.



Figura 27. Comportamiento de *Justica pectoralis* Jacq en un prototipo para el tratamiento de Arsénico.

Los resultados obtenidos de los 3 ensayos se ven reflejados en la figura 28. Se puede observar con claridad que en ellos se da una disminución en la concentración de arsénico en las disoluciones, cumpliendo con el objetivo inicial planteado en este proyecto.

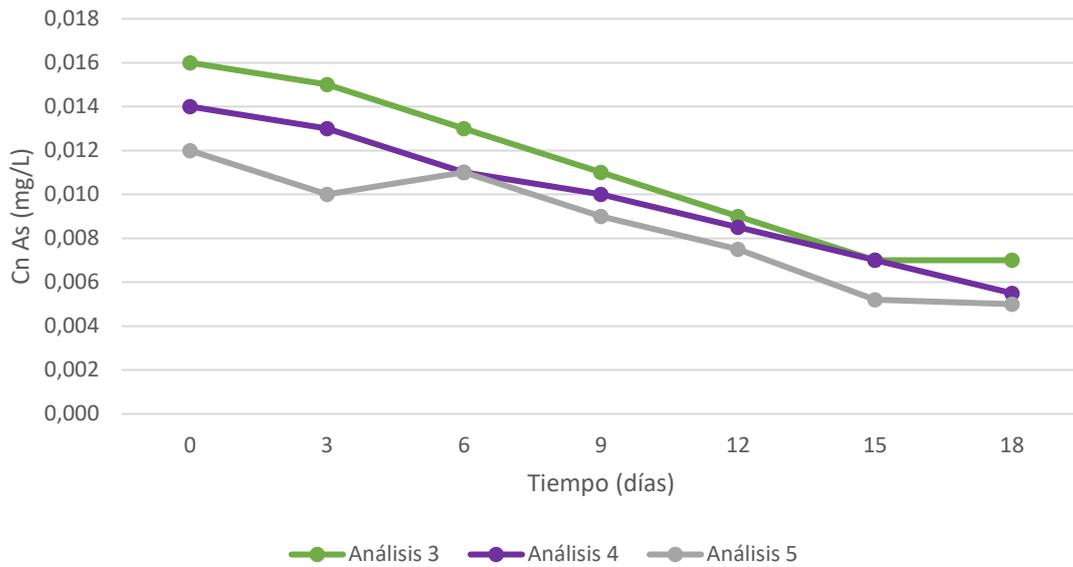


Figura 28. Remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq (ensayo 3, 4 y 5).

El cálculo de la tendencia de remoción del arsénico a través del uso de un sistema hidropónico NFT modificado con 30 plantas de *Justicia pectoralis* Jacq, da como resultado la gráfica de figura 29. La recta de mejor ajuste es una ecuación polinómica de grado 3, con un valor R cercano a 1. De acuerdo con ella, en un término de 12 días, se logra obtener valores menores a 10 $\mu\text{g/L}$ de As en la disolución, cumpliendo con los valores normados y aptos para el consumo humano.

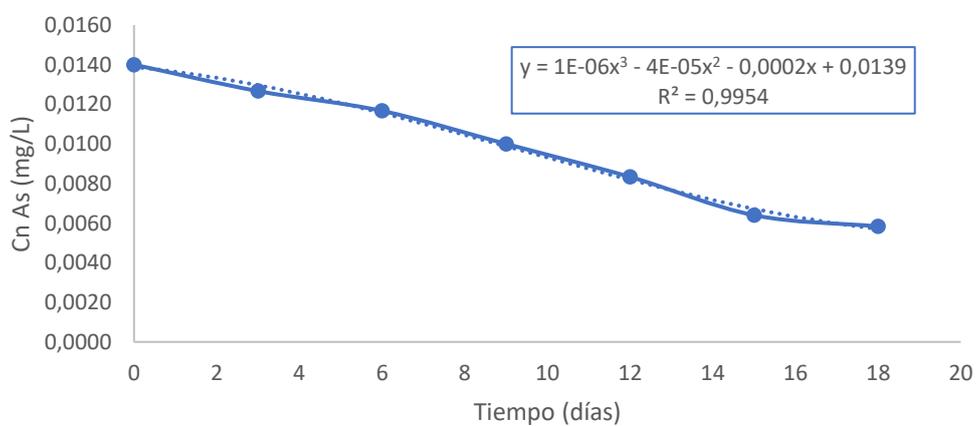


Figura 29. Tendencia de remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

Si se realiza una extrapolación de datos diarios acorde al modelo obtenido es posible que transcurridos los 18 días del ensayo se obtengan valores de concentración de arsénico menores a 5 $\mu\text{g/L}$ partiendo de concentraciones iniciales cercanas a los 14 $\mu\text{g/L}$ con 30 plantas de *Justicia pectoralis* Jacq. (Figura 30)

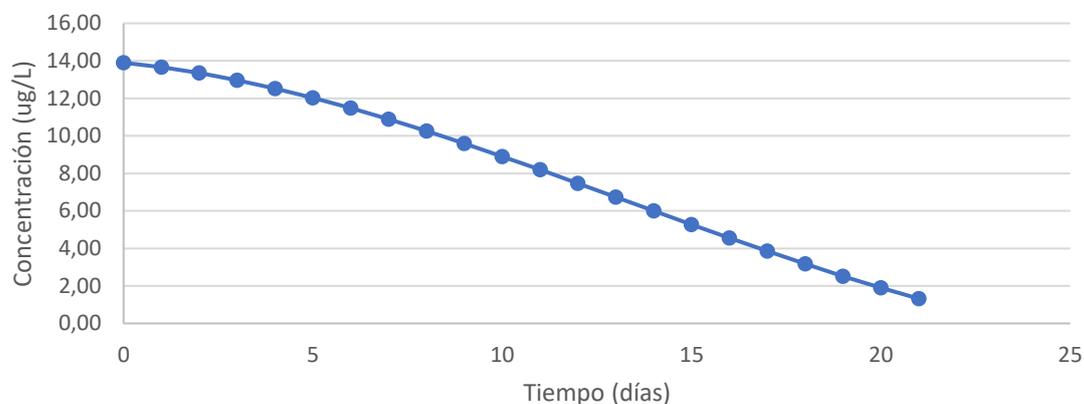


Figura 30. Extrapolación de datos mediante uso de la tendencia de remoción de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

Esta proyección debe corroborarse experimentalmente, dado que la planta se puede ver afectada nocivamente por el metaloide. Ella es únicamente acumuladora y por lo tanto se debe dar una disminución en la velocidad de acumulación del elemento hasta que se produzca la muerte de la especie. La afectación por el metaloide en la capacidad de remoción por parte de la planta se aprecia en la figura 31., A partir del día 12 en adelante la tasa de eliminación de arsénico se reduce de forma gradual. De ahí la necesidad de valorar experimentalmente si es posible reducir la cantidad de arsénico exponiendo las mismas plantas por un tiempo mayor.

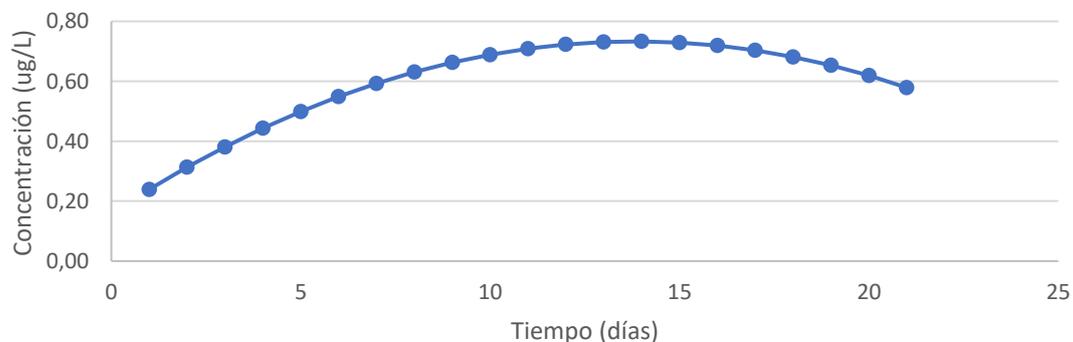


Figura 31. Tasa de Acumulación de arsénico en sistema NFT modificado mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

La estimación de costos a partir del escalamiento geométrico se realiza mediante el cálculo de los insumos utilizados en la construcción del prototipo, acorde con la selección de materiales realizada en el prediseño; la mano de obra y el manteniendo son costos fijos que no representarán un gasto adicional para el desarrollo de más sistemas del tipo desarrollado en el presente proyecto (herramientas, sensores). El costo unitario de cada uno de los materiales necesarios se detalla en el cuadro 6.

Un ahorro importante para futuros proyectos o diseños que se deseen implementar se podría obtener en el material utilizado para la estructura del equipo, esto ya que podría implementarse una madera de otro tipo y grosor o bien otro tipo de material estructural (metal, PVC, otros) que logren soportar el peso de los tubos con el agua contaminada o disolución hidropónica.

Para el presente proyecto se optó por la selección de una madera con un grosor y peso suficiente para brindar dicho soporte, no obstante, acorde al diseño que se seleccione podría haber cambios a nivel de costos significativos.

La bomba seleccionada, una Boyu modelo FP-1500 garantiza la suficiente potencia para brindar un flujo laminar dentro del prototipo diseñado y a su vez permitir una tasa de llenado y drenado acorde a lo requerido por el sistema y necesidades previamente establecidas (ver Apéndice A, figura 34).

Cuadro 6. Estimación de costos fijos para la construcción y operación de un prototipo NFT modificado para el tratamiento de arsénico mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

Material	Cantidad	Costo unitario (€)	Costo Total (€)
Madera Pino Seco 1/4" (m)	12.3	2 038,5	25 069,25
Tubo PVC 1/2" SCH 40 (m)	1	530,00	530,00
Adaptador hembra PVC 1/2" SCH40 (und)	3	121,56	364,68
Adaptador macho PVC 1/2" SCH40 (und)	3	76,82	230,46
Codo PVC potable liso 90° 1/2" SCH40 (und)	1	92,75	92,75
Tee PVC potable liso 1/2" SCH40 (und)	1	93,52	93,52
Bomba Boyu FP-1500 (und)	1	20 300,00	20 300,00
Tornillo carrocería 1/4x2-1/2" (10 und)	3	520,35	1 561,05
Broca Sierra Metal 1" (und)	1	5 897,00	5 897,00
Pegamento PVC Agua Fría (120 mL)	1	3 225,00	3 225,00
Llave de paso PVC 1" (und)	3	1 838,25	5 514,75
Tapón hembra 3" (und)	6	1 786,17	10 717,02

Cuadro 6. Estimación de costos fijos para la construcción y operación de un prototipo NFT modificado para el tratamiento de arsénico mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq (continuación).

Material	Cantidad	Costo unitario (₡)	Costo Total (₡)
Tee PVC potable liso 1" SCH40 (und)	2	956,54	1 913,08
Codo PVC potable liso 90° 1" SCH40 (und)	3	384,75	1 154,25
Soporte para broca sierra (und)	1	2 601,77	2 601,77
Broca Sierra Metal 2" (und)	1	6 938,06	6 938,06
Caja plástica 39 L (und)	1	7 400,00	7 400,00
Tubo Sanitario Pluvial 3" (m)	4.5	6 500,00	29 250,00
Tubo SCH40 Blanco 1" ASTM D1785 (m)	3	833,33	2 500,00
pH metro portátil comercial (und)	1	10 000,00	10 000,00
Sensor de electroconductividad uso hidropónico (und)	1	10 000,00	10 000,00
Time General Electric (und)	1	13 295,00	13 295,00
Caja Uso pesado 102 L (und)	1	12 950,00	12 950,00
			₡ 171 601,93
Costos Fijos Totales, materiales e instrumentación			\$ 274,56

Tipo de cambio al 3 de Octubre 2022, ₡1,00 = \$625,30

Por otro lado, deben de considerarse los costos variables del proyecto, los cuales son asociados al consumo de la disolución hidropónica que se requiere para que las plantas crezcan, la disolución de 1% NaOH para estabilización de pH, el consumo mensual de agua, el consumo eléctrico para la operación del sistema y la mano de obra que conlleva la operación del equipo como tal.

En el caso del consumo mensual de la disolución hidropónica, se toma en cuenta la recomendación suministrada por el fabricante, según las dosificaciones pertinentes, por lo que para las corridas realizadas de 35 L no es necesario la compra de más de 1 Litro de disolución hidropónica mayor y 1 L de disolución hidropónica menor.

Para el caso del consumo mensual eléctrico y de agua, se realiza un cálculo estimado acorde a las necesidades y operación diaria del equipo según los períodos de crecimiento establecidos y acorde a las tarifas de Costa Rica obtenidas en Setiembre del 2022 de los diferentes entes gubernamentales asociados (AyA y CNFL).

Posteriormente para el cálculo de la mano de obra del equipo, se considera un operador dedicado que pueda construir, poner en marcha el prototipo y operarlo durante 5 días a la semana durante un turno de 8 h (empezando a las 8 am y culminando a las 5 pm). Estos costos son asociados al mantenimiento y operación del equipo, los cuales para el caso del

prototipo no son aplicables dado que ya fueron desarrollados por el estudiante a cargo. Por lo tanto, se contempla un costo diario de operación de ₡ 12 289,59 acorde a la tabla de salarios mínimos del Ministerio de Trabajo para el segundo semestre del 2022, en el puesto de operario.

Otro de los factores importantes a tomar en cuenta para los costos variables es el asociado a la propagación de las plantas. Si bien es cierto, para el presente proyecto se procedió a maximizar el uso de los recursos, es importante recalcar que se requieren de insumos y tiempo para la obtención de las plantas para el proceso de tratamiento. Para ello, se obtiene el valor del costo asociado a la cantidad de disolución requerida por corrida realizada, mantenimiento diario y seguimiento de parámetros críticos, los cuales dan como tal un costo aproximado de ₡10 000,00.

Por último, con el fin de generar un ahorro y una mejora al sistema asociado a los costos variables se recomienda el uso o implementación de un control automático, el cual mediante el uso de un dosificador suministre al sistema las cantidades necesarias de cada compuesto para mantener los valores de pH, electroconductividad y otros dentro de la especificación necesaria para el crecimiento óptimo de la planta. De esta forma se puede lograr disminuir el consumo de las disoluciones hidropónicas, el consumo eléctrico e hídrico y abaratar el costo de operación.

Cuadro 7. Estimación de costos variables para la construcción y operación del prototipo para el tratamiento de arsénico mediante uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

Insumo	Cantidad	Costo unitario (₡)	Costo Total (₡)
Solución hidropónica menor marca Evergreen (L)	1	4 200,00	4200,00
Solución hidropónica mayor marca Evergreen (L)	1	4 200,00	4200,00
Disolución NaOH 1%, control de pH (L)	1	5 000,00	5000,00
Costo de la planta	1	2 000,00	2000,00
Propagación de la planta	1	10 000,00	10 000,00
Consumo mensual agua (m ³)	0,07	409,00	28,63
Mano de obra (día)	20	12 289,59	245 791,80
Consumo eléctrico mensual equipo, 2,5 kW/h / CRC 82,3 por kW/h	1	3703,50	3703,50
			₡ 274 923,93
Costos variables insumos			\$ 439,88

Tipo de cambio al 3 de Octubre 2022, ₡1,00 = \$625,30

Para la estimación de costos del proyecto centrada en el escalamiento geométrico se procede a escalar el prototipo construido para un tratamiento de 1 m³ de agua.

Al tomar en cuenta el diseño original, en el cual se tratan aproximadamente 30 L y llevándolo hasta un volumen de 1000 L, se obtiene un factor de escalamiento aproximado de 1:33. Sin embargo, para algunos de los insumos, servicios o equipos utilizados este factor no se puede utilizar de forma directa.

Se debe mencionar que para equipos tales como el medidor de pH o electroconductividad, el temporizador, las brocas tipo sierra, estas no requieren más de una unidad para la con los cuales se procederá a realizar la medición diaria dentro del tanque contenedor o bien para la construcción de los tubos del prototipo. Sin embargo, se deben considerar otros factores a futuro como el mantenimiento o su reemplazo.

Otro de los insumos que no sufren mayor afección a la hora de realizar el escalamiento son aquellos asociados con la construcción de las cuñas de soporte para los tubos. En este caso, al escalar el equipo mediante un escalamiento geométrico se contemplará únicamente extender la longitud de los tubos de crecimiento a 52 m, obteniendo como resultado inmediato un requerimiento de más cuñas del mismo tipo. El factor de escala mencionado se puede aplicar de forma directa para dicha estructura.

De igual forma, al mantener la altura del prototipo diseñado, es decir, de aproximadamente 1 m, la cantidad de accesorios de PVC para la alimentación y la recirculación no se verían mayormente impactadas. Sin embargo, se recomienda que se coloquen otras entradas (ramificaciones) a lo largo del tubo de alimentación y que conecten a los tubos de crecimiento; esto para garantizar una correcta distribución de nutrientes a lo largo de todo el tubo. Se recomienda poner al menos dos entradas más para lo cual se requiere el triple de accesorios y tubería de ½” para la confección de estas nuevas zonas de ramificación.

Si se toma en cuenta el aumento en la distancia del tubo de crecimiento, así como la distancia entre la primera zona de alimentación (primera ramificación) y el contenedor, se debe aumentar la distancia del tubo de alimentación de 1”, pasando a necesitar un tubo de 55 m. Al tener que cambiar el sistema de bombeo, se debe seleccionar la tubería adecuada para evitar posibles fallos en el diseño, por lo que se debe usar tubo de alimentación de 2”.

Cuadro 8. Estimación de costos fijos con factor de escalación para la construcción para el tratamiento de arsénico por metro cúbico de agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

Material	Cantidad	Costo unitario (₡)	Costo Escalado (₡)
Madera Pino Seco 1/4" m	410	2 038,15	834 805,86
Tubo PVC 1/2" SCH 40 (m)	3	530	1 590,00
Adaptador hembra PVC 1/2" SCH40 (und)	3	121,56	364,68
Adaptador macho PVC 1/2" SCH40 (und)	3	76,82	230,46
Codo PVC potable liso 90° 1/2" SCH40 (und)	1	92,75	92,75
Tee PVC potable liso 1/2" SCH40 (und)	1	93,52	93,52
Bomba Sumergible KRT Drainer FI 500 0.5 HP	1	523 582,87	523 582,87
Tornillo carrocería 1/4x2-1/2" (10 und)	30	520,35	15 610,50
Broca Sierra Metal 1" (und)	1	5 897	5 897,00
Pegamento PVC Agua Fría (120 mL)	10	3 225	32 250,00
Llave de paso PVC 1" (und)	3	1 838,25	5 514,75
Tapón hembra 3 " (und)	6	1 786,17	10 717,02
Tee PVC potable liso 1" SCH40 (und)	2	956,54	1 913,08
Codo PVC potable liso 90° 1" SCH40 (und)	3	384,75	1 154,25
Soporte para broca sierra (und)	1	2 601,77	2 601,77
Broca Sierra Metal 2" (und)	1	6 938,06	6 938,06
Caja plástica 39 L (und)	33	7 400,00	244 200,00
Tubo Sanitario Pluvial 3" (m)	53	6 500	344 500,00
Tubo SCH40 Blanco 2" ASTM D1785 (m)	55	1 800	99 000,00
pH metro portátil comercial (und)	1	10 000	10 000,00
Sensor de electroconductividad uso hidropónico (und)	1	10 000	10 000,00
Time General Electric (und)	1	13 295	13 295,00
Tanque EcoTank Tricapa 1,1 m ³	1	130 000	130 000,00
Total			₡ 2 294 351,57
			\$3 670,96

Tipo de cambio al 3 de Octubre 2022, ₡1,00 = \$625,30

Otro de los aspectos relevantes a los costos fijos, es el asociado a la bomba a utilizar en el nuevo sistema, la cual deberá ser de aproximadamente 0.5 HP, para garantizar un flujo laminar a lo largo de la tubería de alimentación 2" y evitar pérdidas por caída de presión y que el efecto de accesorios incorporados sea despreciable. De esta forma se selecciona la bomba sumergible modelo KRT Drainer FI 500 (Apéndice A, figura 33).

Tomando en cuenta los costos variables del proyecto, se procede al cálculo de estos de forma mensual. Para ellos primero se debe contemplar un aumento en el consumo de las disoluciones implementadas, requiriendo de esta forma un consumo mensual de al menos

5 L para el caso de la disolución mayor y de 2,5 L para el caso de la disolución menor, quintuplicando de esta forma el consumo mensual al ser escalado.

Por otro lado, el consumo del reactivo de 1% NaOH mensual es de 350 mL, una presentación de 1 L garantiza la operación del sistema.

Con respecto al proceso de propagación de la planta, se considera el aumento en el consumo de los reactivos, así como en el trabajo a realizar para el corte, colocación y cuidado de cada una de las canastas colocadas a lo largo del sistema. Esto lograría multiplicar el costo inicial al escalado según el factor de escalamiento mencionado anteriormente.

Cuadro 9. Estimación de costos variables escalados para la construcción y operación del prototipo para el tratamiento de arsénico mediante uso de sistema *Justicia pectoralis* Jacq.

Insumo	Cantidad	Costo unitario (₡)	Costo Escalado(₡)
Solución hidropónica menor marca Evergreen (L)	5	4 200	21 000,00
Solución hidropónica mayor marca Evergreen (L)	2.5	2 100	10 500,00
Disolución NaOH 1%, control de pH (L)	1	5 000	5 000,00
Costo de la planta	1	2 000	2 000,00
Propagación de la planta	33	10 000,00	330 000,00
Consumo mensual agua (m3)	1	409	409
Mano de obra (días), 4 operadores	4	368 687,70	1 474 750,80
Consumo eléctrico mensual equipo, 2,5 kW/h / CRC 82,3 por kW/h	33	3 703,50	122 215,50
Total			₡ 1 965 875,30
			\$ 3 145,40

Tipo de cambio al 3 de Octubre 2022, ₡1,00 = \$625,30

En el caso de la mano de obra requerida para la construcción, puesta en marcha y monitoreo del equipo, se contemplan 4 turnos diurnos de 8 h durante 5 días a la semana, con operadores dedicados a la revisión del sistema, su mantenimiento y control, ejecución de mediciones y otras funciones asociadas, para lo cual se necesitaría un total aproximado de 1.5 millones de colones de costo de operación mensual. Estos valores se basan en la tabla de salarios mínimos indicadas por el Ministerio de Trabajo de Costa Rica, con valores de referencia de Octubre 2022, tomando en cuenta que a un operador no calificado se le pagan por día ₡ 12 289,59, cumpliendo con un salario de ₡ 368 687,70 para 4 empleados que se requieren, cubriendo en horarios de 6 am a 2 pm y 2 pm a 10 pm, El horario nocturno no se contempla dado que acorde a lo desarrollado en el proyecto y la investigación bibliográfica realizada la actividad metabólica de las plantas disminuye durante la madrugada, siendo innecesario la programación de ciclos de llenado y vaciado del sistema.

De esta forma y tras los cálculos realizados se obtiene un total de ¢ 446 521, 56 (\$714,43) para la construcción y operación del prototipo, mientras que para el equipo escalado se necesitaría de una inversión de ¢ 2 694 351,57 (\$3 670,96) para la construcción del equipo, mientras tanto se necesitarían ¢ 1 965 875,30 (\$3 145,40) para la operación, control y mantenimiento del equipo de forma mensual, dando como resultado un total de ¢ 4 260 226,87 (\$6 816,36) para el uso de un sistema hidropónico que trate 1 m³ de agua contaminada con arsénico mediante el uso *Justicia pectoralis* Jacq.

Por último, tras la obtención de este resultado, se puede concluir que la fitorremediación se presenta como una tecnología emergente y una solución a futuro para el tratamiento de múltiples contaminantes, esto dado el potencial que pueden tener algunas plantas en la remoción de estos, tal y como lo fue demostrado por *Justicia pectoralis* Jacq a lo largo del presente proyecto.

Sin embargo, cabe mencionar también que la fitorremediación es una tecnología la cual requiere sin duda de mayor cantidad de estudios que permitan su implementación, donde factores como el tiempo de remoción de los contaminantes, el costo económico asociado al diseño como a la puesta en marcha y operación juegan un papel preponderante en su implementación. No obstante, como se ha detallado la cantidad de beneficios que se pueden obtener son de alto interés y valor para su uso en sistemas de tratamiento de aguas al ser sistemas que reducen la carga de químicos en el agua.

Conclusiones

- La selección de materiales en el diseño conceptual de cualquier sistema hidropónico resulta de vital importancia para el crecimiento del sistema radicular y aéreo de cualquier planta que se pueda adaptar a esta tecnología.
- Los materiales de los tubos, la disolución hidropónica (pH, electroconductividad y nutrientes) y el sistema de riego y drenaje implementado representan los parámetros más críticos para el diseño y construcción de un prototipo hidropónico para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq.
- La configuración del sistema NFT modificado se presenta como el sistema con mejor rendimiento para el crecimiento del sistema radicular de la planta *Justicia pectoralis* Jacq. En contraste, el uso de sistema NFT con inclinación de 2 o 1 % presenta problemas dado que las primeras plantas expuestas terminan secándose dado la falta de nutrientes. Por otro lado, el sistema de raíz flotante presenta rendimientos similares al NFT modificado, sin embargo, las raíces tienden a oscurecerse dado la falta de oxigenación en la disolución nutritiva.
- Se comprueba que el prototipo seleccionado es funcional a nivel mecánico y cumple tanto para el crecimiento de las plantas como para la remoción de arsénico en agua.
- *Justicia pectoralis* Jacq es capaz de disminuir la concentración de arsénico en agua a valores por debajo de 10 µg/L en un período de 12 a 18 días en el prototipo diseñado y construido, bajo el sistema hidropónico NFT modificado (inundación y drenaje).
- Para el diseño propuesto se concluye que para un tratamiento de 30 L de agua a concentraciones cercana a 15 µg/L, el costo de diseño, construcción y operación del prototipo es de ₡446 521,56 aproximadamente.
- La estimación de costos realizada por medio del escalamiento geométrico del prototipo diseñado permite determinar que por metro cúbico de agua a tratar, su tratamiento tendría un coste de ₡4 260 226,87 aproximadamente.

Recomendaciones

- Se deben realizar más estudios para mejorar los tiempos de crecimiento y remoción de arsénico mediante el uso de la planta *Justicia pectoralis* Jacq. La importancia a futuro de realizar muestreos y ensayos con agua contaminada *in situ* es sumamente vital para la determinación de la eficiencia de la remoción.

- Se debe comparar el comportamiento del prototipo en contraste a un sistema de tipo humedal para la remoción de arsénico y otros posibles contaminantes.
- Se debe considerar la inclusión de sistemas de control automático que permitan brindar la dosificación de nutrientes, agua y químicos necesarios para el óptimo crecimiento de las plantas. Este control resulta diferenciador a futuro para el proceso de remoción.
- Se debe considerar la implementación de sistemas de agitación en el contenedor que permitan maximizar y garantizar con total seguridad la homogenización del agua a tratar.
- Se debe de considerar el uso de pretratamientos que permitan la eliminación de interferencias u otros contaminantes ajenos al fin de este proceso y que colaboren a la disminución del tiempo de retención que posee actualmente el proceso (12 a 18 días).
- Se debe explorar el uso de sustrato como medio de fijación para la planta *Justicia pectoralis* Jacq, ya que el mismo podría brindar una mayor área de contacto y retención de nutrientes para la planta, obteniendo de esta forma mayor masa de raíz.
- Se debe explorar el uso de sistemas hidropónicos de configuración aérea ya que estos pueden brindar mejores rendimientos a nivel de crecimiento de las plantas al someterlas a un nivel de estrés mayor, no obstante, su uso como sistema de remoción de metales pesados es desconocido.

Nomenclatura

a:	Ancho del contenedor
D:	Diámetro de tubería
H:	Altura de bombeo
L:	Largo
η :	Eficiencia
N_{\min} :	Nivel mínimo
N_r :	Nivel requerido
P:	Potencia de bomba
Q:	Caudal
Re:	Número de Reynolds
t:	Tiempo
ν :	Viscosidad cinemática
v:	Velocidad de fluido
V_b :	Volumen bomba
V_c :	Volumen cubierto
V_L :	Volumen por llenar
V_{tc} :	Volumen total contenedor
V_{tot} :	Volumen total
X_p :	Total de tubos

Bibliografía

- Agudelo Betancur, C., Marcela, L., Mazo, M., Isabel, K., Mendoza, S., & José, A. (2005). Fitorremediación: La alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 57–60. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520110>
- Arias Barrantes, B. (2016). *Determinación de As (III) y As (V) en aguas de consumo humano mediante las técnicas de cromatografía de intercambio aniónico y espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/5884>
- Arias-Barrantes, B., Urbina, A., & Alvarado-Gómez, A. L. (2018). Determinación de As(III) y As(V) en los pozos de las plantas de remoción de arsénico de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(2), 136. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3631>
- Bello, A. O., Tawabini, B. S., Khalil, A. B., Boland, C. R., & Saleh, T. A. (2018). Phytoremediation of cadmium-, lead- and nickel-contaminated water by *Phragmites australis* in hydroponic systems. *Ecological Engineering*, 120, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.035>
- Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>
- Benamburg Vargas, M. (2018). *Determinación, por medio de la producción y evaluación de hidrogel de hidróxido de aluminio de la dosis que presente la mayor eficiencia en la remoción de Arsénico para su implementación en las plantas potabilizadoras de agua*. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/6537>
- Bittsánszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B., & Kómvés, T. (2016). Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*, 2(2). <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>
- Campoverde, S. (2021). *“Sistema Hidropónico Vertical de Flujo Laminar de Nutrientes Automatizado”* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11476>
- Carpena, R., & Bernal, P. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Journal of Human Evolution*, 19(6–7), 747–750. [https://doi.org/10.1016/0047-2484\(90\)90006-W](https://doi.org/10.1016/0047-2484(90)90006-W)
- Carrasco, G., Profesor, P. D., & Izquierdo, J. (1996). *La empresa Hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante (NFT)*.
- Castillo, R. (2019). *Costa Rica presenta concentraciones de arsénico en 40% de su territorio* • *Semanario Universidad*. Atlas Geoquímica Costa Rica. <https://semanariouniversidad.com/pais/costa-rica-presenta-concentraciones-de-arsenico-en-40-de-su-territorio/>
- Castro, E. (2006). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. *Tercer Seminario Internacional Sobre Evaluación y Manejo de Las Fuentes de Agua de*

Bebida Contaminadas Con Arsénico, 20-24 June, 20.

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf>

Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región, 13*(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>

Christie, E. (2014). Water and Nutrient Reuse within Closed Hydroponic Systems. *Electronic Thesis and Dissertations, 1096*, 1–102.

Colina Blanco, A. (2015). *Remoción de arsénico en aguas contaminadas utilizando fibras vegetales funcionalizadas con un polímero policatiónico como intercambiador iónico* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/2893>

de La Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A., Luz, S., Padilla-Bernal, E., Jesús Avelar-Mejía, J., & Patricia España-Luna, M. (2018). *Proporción de drenaje de la solución nutritiva en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía*. 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1003>

Escuderos, Y., Gálvez, L., Garrido, M., Muñoz, D., Romero, E., Joseph, J., Sevillano, F., & Sánchez, P. G. (2017). *Cultivo Hidropónico*.

Espinoza, E. (2018). *Análisis del uso potencial de la especie Justicia pectoralis L. para la remediación de fuentes naturales de agua contaminadas por arsénico (V)* [Tesis Programa de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica]. https://aleph.sibdi.ucr.ac.cr/F/5RLI7DSL7V1C43MBEP1GCUAY3GCLAU4622X512R3D8RXC6PS7A-59360?func=full-set-set&set_number=002312&set_entry=000001&format=999

Garzón, J. M., Rodríguez Miranda, J. P., & Hernández Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud, 19*(2), 309. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Goodin, R. E. (1995). *Utilitarianism as a public philosophy* (D. MacLean, Ed.; 1st ed.). Cambridge University Press.

Hernández Castro, D. (2018). *Evaluación de la dinámica del agua y los nutrientes en lechuga (Lactuca sativa) y culantro castilla (Coriandrum sativum L.), en dos condiciones de protección y dos niveles de nutrición en un sistema hidropónico bajo condiciones de verano, Alajuela, Costa Rica* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/4904>

Jerez, J. A. (2013). *Remoción de metales pesados en lixiviados mediante fitorremediación* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/1890>

Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Ali Chandio, F., Tunio, M. H., Ahmad, F., & Ali Solangi, K. (2020). Overview of the aeroponic agriculture – An emerging technology for global food security. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13*(1), 1–10. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.5156>

- Laura, I., Peralta, B., María, I., Morales, F. J., Eng, M., Coto, F. G., Mena, J., Álvaro, V., Guevara, S., Luis, I., & Campos Meléndez, F. (2014). *Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistema NFT*.
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotechnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/bsaa(14)145-153)
- López, A. E. D., Ramírez, C. A. G., García, F. P., Ibarra, J. R. V., & Sandoval, O. A. (2011). Fitorremediación: Una Alternativa para Eliminar la Contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), pg. 597-612.
- Magallón, M. (2011). *Medio Ambiente Y Contamianción. Principios Básicos María Dolores Encinas Malagón*. [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16784/Medio Ambiente y Contaminación. Principios básicos.pdf?sequence=6](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16784/Medio%20Ambiente%20y%20Contaminaci%C3%B3n.%20Principios%20b%C3%A1sicos.pdf?sequence=6)
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018a). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018b). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. In *Italian Journal of Agronomy* (Vol. 13, Issue 1, pp. 1–11). Page Press Publications. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018c). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. In *Italian Journal of Agronomy* (Vol. 13, Issue 1, pp. 1–11). Page Press Publications. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Melvix, L. (2014). *Design of Efficient Hydroponic Nutrient Solution Control System using Soft Computing based Solution Grading*. TCCPETC. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2014.6915356>
- Ministerio de Salud. (2002). Reglamento para la calidad del Agua Potable No 38924-S. *Sistema Costarricense de Información Jurídica*, 38924, 1–62. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
- Ministerio de Salud. (2013). Reglamento sobre valores guía en los suelos para la descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales y derrames N° 37757-S. *Sistema Costarricense de Información Jurídica*. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=75223&nValor3=93682¶m2=1&strTipM=TC&IR resultado=2&strSim=simp](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=75223&nValor3=93682¶m2=1&strTipM=TC&IRresultado=2&strSim=simp)
- Montero, V. (2019). *Sistemas de filtración de arsénico en Bagaces podrían empeorar contaminación • Semanario Universidad*. Semanario Universidad. <https://semanariouniversidad.com/pais/sistemas-de-filtracion-de-arsenico-en-bagaces-podrian-empeorar-contaminacion/>

- Montero-Campos, V., Quesada-Kimsey, J., Ledezma-Espinoza, A., Sandoval-Mora, J. A., & Campos Instituto, M. (2010). Arsenic Determination in Water Supplies for Human Consumption of the Province of Cartago, Costa Rica. *Acta Méd. Costarric*, 52(2), 1–6.
- Moreno, E., & Castillo, F. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XXI, 43–55. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh>.
- Nava, C. (2011). *Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio)*. 1–8.
- Núñez, R., Vong, Y., Ortega, R., & Olgún, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Fitorremediacion*, 4, 15. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Oasis, S. (2015). *Manual de hidroponia*. <https://www.oasisgrowersolutions.com/pdf/mx/manual-hidroponia.pdf>
- O'Bryant, S. E., Edwards, M., Menon, C., Gong, G., & Barber, R. (2011). Long-Term Low-Level Arsenic Exposure Is Associated with Poorer Neuropsychological Functioning: A Project FRONTIER Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(3), 861–874. <https://doi.org/10.3390/ijerph8030861>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Arsénico*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Pablo, J., & Alvarado, V. (2013). *Establecimiento de curvas de absorción para dos tipos de lechuga bajo el sistema hidropónico de NFT modificado*. <https://doi.org/oai:repositoriotec.tec.ac.cr:2238/2878>
- Peralta-Pérez, M. del R., & Volke-Sepúlveda, T. L. (2012). The antioxidant defense in plants: A key tool for phytoremediation. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 11(1), 75–88.
- René, R., & Julio, O. (2010). *Tratamientos de Bajo Costo para la Remoción de Arsénico en Aguas de Consumo Humano Low Cost Treatment for the Arsenic Removal in Human*. 5(1), 173–180.
- Rodríguez Martínez, H. L., Peña Manjarrez, M., Gutiérrez Reyes, A. V., González Trevizo, C. L., Montes Fonseca, S. L., & López Avalos, G. G. (2017). Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos genéticamente modificados. *Revista Terra Latinoamericana*, 35(4), 353. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i4.220>
- Sanz, B. (2015). *Ecotoxicología del arsénico: Movilización en suelos y aguas, relevancia clínica y métodos de eliminación* [Universidad Complutense]. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/FERNÁNDEZ SANZ, BEATRIZ.pdf>
- Sarmiento, P. (2001). Bioética y medio ambiente: Introducción a la problemática bioético-ambiental y sus perspectivas Persona y Bioética. *Persona Y Bioética: Universidad de La Sabana*, 5, 6–35. <https://doi.org/ISSN: 0123-3122>
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2019). Hydroponic systems. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition* (pp. 273–283). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0>

- Terceros, M. J., & Blanco Villacorta, W. (2019). Establishment of a hydroponic system with nutritional film technique (NFT) in Lettuce culture (*Lactuca sativa* L.) at the Patacamaya Experimental Station, La Paz. *Revista de La Carrera de Ingeniería Agronómica - UMSA*, 1–8.
- Villegas, N. (2014). *Análisis del riesgo de enfermar asociado a la exposición de arsénico en sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano* [Tesis de grado]. Universidad de Costa Rica.
- Walker, J. M. (2017). *Methods in Biotechnology: Phytoremediation, Methods and Reviews* (N. Willey, Ed.; Vol. 91). Humana Press.
- Wang, J. (2004). *Arsenic in Drinking Water - A Global Environmental Problem*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ed081p207>
- Williams, R., Tirao, J., Hidalgo, C., Forero, E., & Azofeifa, P. (2019). *Water Quality in the Americas Risks and Opportunities*. Interamerican Network of Academies of Sciences.
www.anc.cr
- Zárate, M. (2014). Manual de hidroponia. *Universidad Nacional Autónoma de México*, 1, 42.
<http://bvc.cea-atitlan.org.gt/id/eprint/321>

4. Apéndices

A. Resultados

Cuadro 10. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el primer ensayo de crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.

Día	Fecha Cultivo	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Límite pH	Límite EC
		pH	pH	pH	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)		
1	17/1/2021	5,8	5,8	5,8	0,805	0,805	0,805	5,5	0,624
3	20/1/2021	5,8	5,8	5,8	0,800	0,799	0,785	5,5	0,624
7	24/1/2021	5,8	5,8	5,7	0,796	0,794	0,772	5,5	0,624
10	27/1/2021	5,8	5,7	5,6	0,794	0,791	0,760	5,5	0,624
14	31/1/2021	5,7	5,7	5,5	0,789	0,789	0,738	5,5	0,624
17	3/2/2021	5,7	5,7	5,4	0,786	0,786	0,725	5,5	0,624
21	7/2/2021	5,7	5,6	5,3	0,783	0,782	0,716	5,5	0,624
24	10/2/2021	5,6	5,6	5,2	0,780	0,775	0,705	5,5	0,624
27	14/2/2021	5,6	5,5	5,1	0,778	0,772	0,696	5,5	0,624

Tubo A: NFT, **Tubo B:** NFT Modificado, **Tubo C:** Raíz Flotante.

Cuadro 11. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el segundo ensayo de crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.

Día	Fecha Cultivo	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Límite pH	Límite EC
		pH	pH	pH	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)		
1	14/2/2021	5,9	5,9	5,9	0,822	0,822	0,822	5,5	0,624
3	17/2/2021	5,9	5,9	5,9	0,821	0,819	0,817	5,5	0,624
7	21/2/2021	5,8	5,9	5,7	0,817	0,814	0,811	5,5	0,624
10	24/2/2021	5,8	5,8	5,6	0,816	0,807	0,800	5,5	0,624
14	28/2/2021	5,8	5,8	5,5	0,810	0,802	0,792	5,5	0,624
17	3/3/2021	5,7	5,8	5,5	0,807	0,797	0,786	5,5	0,624
21	7/3/2021	5,6	5,7	5,4	0,803	0,791	0,774	5,5	0,624
24	10/3/2021	5,5	5,6	5,3	0,799	0,786	0,760	5,5	0,624
27	14/3/2021	5,4	5,6	5,2	0,794	0,780	0,750	5,5	0,624

Tubo A: NFT, **Tubo B:** NFT Modificado, **Tubo C:** Raíz Flotante.

Cuadro 12. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el tercer ensayo de crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.

Días	Fecha Cultivo	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Límite pH	Límite EC
		pH	pH	pH	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)		
1	14/3/2021	5,7	5,7	5,7	0,722	0,722	0,722	5,5	0,624
3	17/3/2021	5,7	5,7	5,7	0,721	0,719	0,710	5,5	0,624
7	21/3/2021	5,6	5,7	5,6	0,713	0,714	0,700	5,5	0,624
10	24/3/2021	5,5	5,6	5,5	0,710	0,710	0,694	5,5	0,624
14	28/3/2021	5,4	5,4	5,3	0,707	0,704	0,686	5,5	0,624
17	31/3/2021	5,4	5,4	5,2	0,702	0,699	0,680	5,5	0,624
21	4/4/2021	5,3	5,2	5,1	0,697	0,693	0,672	5,5	0,624
24	7/4/2021	5,2	5,1	4,9	0,693	0,690	0,660	5,5	0,624
27	11/4/2021	5,1	5,1	4,8	0,688	0,682	0,652	5,5	0,624

Tubo A: NFT, **Tubo B:** NFT Modificado, **Tubo C:** Raíz Flotante.

Cuadro 13. Valores de pH y electroconductividad obtenidos en el cuarto ensayo de crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas.

Días	Fecha Cultivo	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Tubo A	Tubo B	Tubo C	Límite pH	Límite EC
		pH	pH	pH	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)	EC (mS/cm)		
1	25/4/2021	5,9	5,9	5,9	0,831	0,831	0,831	5,5	0,624
3	28/4/2021	5,9	5,9	5,8	0,831	0,830	0,827	5,5	0,624
7	2/5/2021	5,9	5,9	5,8	0,830	0,827	0,814	5,5	0,624
10	5/5/2021	5,8	5,9	5,7	0,827	0,825	0,808	5,5	0,624
14	9/5/2021	5,7	5,7	5,5	0,822	0,819	0,800	5,5	0,624
17	12/5/2021	5,7	5,7	5,4	0,819	0,813	0,791	5,5	0,624
21	16/5/2021	5,6	5,7	5,3	0,814	0,807	0,785	5,5	0,624
24	19/5/2021	5,5	5,6	5,1	0,807	0,802	0,778	5,5	0,624
27	23/5/2021	5,5	5,6	5,0	0,800	0,796	0,772	5,5	0,624

Tubo A: NFT, **Tubo B:** NFT Modificado, **Tubo C:** Raíz Flotante.

Cuadro 14. Valores óptimos de pH y electroconductividad a manejar para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq en sistemas hidropónicos (elaboración propia).

EC (ppm)	EC (mS/cm)	pH	Condiciones brindadas	Crecimiento
100	0,156	5,1	Falta de nutrientes	Nulo
200	0,312	5,3	Falta de nutrientes	Nulo
300	0,468	5,5	Nutrientes muy bajos	Muy malo
400	0,624	5,7	Nutrientes Bajos	Malo
450	0,702	5,9	Nutrientes Bajos	Malo

Cuadro 14. Valores óptimos de pH y electroconductividad a manejar para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq en sistemas hidropónicos (elaboración propia) (continuación).

EC (ppm)	EC (mS/cm)	pH	Condiciones brindadas	Crecimiento
500	0,780	6,1	Nutrientes óptimos	Excelente
600	0,936	6,3	Nutrientes óptimos	Muy Bueno
700	1,092	6,5	Nutrientes óptimos	Bueno
800	1,248	6,7	Exceso de nutrientes	Daño en plantas

Cuadro 15. Valores de masa de raíz obtenidos de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuración NFT en cada uno de los ensayos admisibles.

Posición	1er cultivo	2do cultivo	4to cultivo
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,3954	0,2518	0,3336
5	0,4467	0,3512	0,4087
6	0,9897	0,9290	0,9712
7	1,2063	1,1035	1,2126
8	0,1111	0,1023	0,1372
9	0,1494	0,1285	0,1264
10	0,1335	0,1239	0,1557

Cuadro 16. Valores de masa de raíz obtenidos de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuración NFT Modificado en cada uno de los ensayos admisibles.

Posición	1er cultivo	2do cultivo	4to cultivo
1	0,9963	0,8652	1,0513
2	0,6736	0,6049	0,8364
3	0,8763	0,6567	0,9832
4	0,5832	0,4792	0,6794
5	1,1029	0,8099	1,0548
6	1,4247	1,3162	1,5166
7	1,3074	1,2663	1,1682
8	0,6416	0,4206	0,9764
9	0,7493	0,5065	0,8121
10	0,2665	0,1391	0,3564

Cuadro 17. Valores de masa de raíz obtenidos de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuración Raíz Flotante en cada uno de los ensayos admisibles.

Posición	1er cultivo	2do cultivo	4to cultivo
1	0,4268	0,3647	0,4126
2	1,0384	0,8491	1,0547
3	1,0307	0,9512	0,9863
4	1,3566	1,3442	1,4392
5	1,1348	1,0779	1,2265
6	0,7712	0,5616	0,8428
7	0,9499	0,8535	1,1215
8	0,7079	0,6546	0,6579
9	1,6634	1,6053	1,5764
10	0,4435	0,3847	0,4563

Cuadro 18. Valores de masa de raíz obtenidos de *Justicia pectoralis* Jacq en el prototipo construido bajo configuraciones distintas en tercer ensayo (no admisible).

Posición	Peso raíz ($\pm 0,0001$) g		
	Tercer cultivo Tubo A	Tercer cultivo Tubo B	Tercer cultivo Tubo C
1	0,0000	0,1311	0,0621
2	0,0000	0,0687	0,2247
3	0,0000	0,2196	0,3795
4	0,0018	0,4792	0,0124
5	0,3512	0,2930	0,0569
6	0,0607	0,1085	0,1636
7	0,1028	0,0411	0,0964
8	0,1023	0,2206	0,0527
9	0,1285	0,2065	0,0581
10	0,1239	0,1391	0,0647

Cuadro 19. Valores promedio de masa de raíz de *Justicia pectoralis* Jacq obtenidos en el prototipo construido bajo configuraciones distintas de sistema hidropónico.

Posición	Promedio Peso raíz ($\pm 0,0001$) g		
	Tubo A (NFT)	Tubo B (NFT Modificado)	Tubo C (Raíz Flotante)
1	0,0000	0,9709	0,4014
2	0,0000	0,7050	0,9807
3	0,0000	0,8387	0,9894

Cuadro 19. Valores promedio de masa de raíz de *Justicia pectoralis* Jacq obtenidos en el prototipo construido bajo configuraciones distintas de sistema hidropónico (continuación).

Posición	Promedio Peso raíz ($\pm 0,0001$) g		
	Tubo A (NFT)	Tubo B (NFT Modificado)	Tubo C (Raíz Flotante)
4	0,3269	0,5806	1,3800
5	0,4022	0,9892	1,1464
6	0,9633	1,4192	0,7252
7	1,1741	1,2473	0,9750
8	0,1169	0,6795	0,6735
9	0,1348	0,6893	1,6150
10	0,1377	0,2540	0,4282

Cuadro 20. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 1.

Día	Cn As (mg/L)
0	0,0150
3	0,0110
6	0,0110
9	0,0100
12	0,0110
15	0,0110
18	0,0100

Cuadro 21. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 2.

Día	Cn As (mg/L)
0	0,0430
3	0,0390
6	0,0440
9	0,0520
12	0,0590
15	0,0510
18	0,0600

Cuadro 22. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 3.

Día	Cn As (mg/L)
0	0,0160
3	0,0150
6	0,0130
9	0,0110
12	0,0090
15	0,0070
18	0,0070

Cuadro 23. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 4.

Día	Cn As (mg/L)
0	0,0140
3	0,0130
6	0,0110
9	0,0100
12	0,0085
15	0,0070
18	0,0055

Cuadro 24. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, ensayo 5.

Día	Cn As (mg/L)
0	0,0120
3	0,0100
6	0,0110
9	0,0090
12	0,0075
15	0,0052
18	0,0050

Cuadro 25. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, promedio ensayos 3 al 5.

Día	Cn As (mg/L)
0	0,0140
3	0,0127
6	0,0117
9	0,0100
12	0,0083
15	0,0064
18	0,0058

Cuadro 26. Remoción de arsénico en agua mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq prototipo construido bajo configuración NFT modificado, cálculo por día bajo curva de adsorción-absorción.

Día	Concentración	Tasa de Remoción diaria
0	13,90	0,00
1	13,66	0,24
2	13,35	0,31
3	12,97	0,38
4	12,52	0,44
5	12,03	0,50
6	11,48	0,55
7	10,88	0,59
8	10,25	0,63
9	9,59	0,66
10	8,90	0,69
11	8,19	0,71
12	7,47	0,72
13	6,74	0,73
14	6,00	0,73
15	5,28	0,73
16	4,56	0,72
17	3,85	0,70
18	3,17	0,68

Cuadro 27. Datos obtenidos para la determinación de tipo de flujo en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq y remoción de arsénico.

Parámetro	Valor
Volumen de probeta, V (mL)	100
Tiempo, t (s)	4,2
Caudal puntual, Q (mL/s)	23,81
Caudal puntual, Q (m ³ /s)	0,000024
Diámetro tubería, d (m)	0,0254
Área del tubo, A (m ²)	0,00051
Velocidad del fluido, v (m/s)	0,05
Viscosidad cinemática, u (m ² /s)	0,000001
Número de Reynolds, Re (adim)	1193,51
Tipo de flujo	Laminar

Cuadro 28. Datos obtenidos para la selección de la bomba a utilizar en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq y remoción de arsénico.

Parámetro	Valor
Caudal de Bombeo, Q (L/s)	0,0238
Altura de bombeo, H (m)	0,8
Factor de Servicio, F _s (adim)	0,76
Eficiencia, η (%)	0,75
Potencia de la bomba, P (HP)	0,03
Potencia de la bomba, P (W)	24,91

Cuadro 29. Datos obtenidos para la selección del volumen de agua en el contenedor a utilizar en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq.

Parámetro	Valor
Volumen total tubo, V _{tot} (m ³)	0,0073
Volumen total tubo, V _{tot} (L)	7,33
Nivel mínimo de agua en el tubo, n _{min} (%)	0,33
Volumen cubierto, V _c (L)	2,42
Nivel de inundación requerido, n _r (%)	0,75
Volumen requerido por tubo, V _t (L)	5,50
Volumen total para llenar, V _L (m ³)	3,08

Cuadro 29. Datos obtenidos para la selección del volumen de agua en el contenedor a utilizar en el sistema hidropónico construido para el crecimiento de *Justicia pectoralis* Jacq (continuación).

Parámetro	Valor
Total de tubos del sistema, X_n (unidades)	3
Volumen total tubos, V_{total} (L)	16,50
Tiempo, t (días)	27
Volumen consumo diario plantas, V_p (L)	0,25
Volumen total de consumo, V_{tp} (L)	6,75
Altura mínima bomba, h (m)	0,03
Largo del contenedor, L (m)	0,78
Ancho del contenedor, a (m)	0,52
Volumen bomba, V_b (L)	12,17
Volumen total que usar en contenedor, V_{tc} (L)	35,42

Cuadro 30. Datos obtenidos para la selección del volumen de agua en el contenedor a utilizar en el sistema hidropónico construido para ensayos de remoción de arsénico mediante el uso de *Justicia pectoralis* Jacq.

Parámetro	Valor
Volumen total tubo, V_{tot} (m ³)	0,0073
Volumen total tubo, V_{tot} (L)	7,33
Nivel mínimo de agua en el tubo, n_{min} (%)	0,33
Volumen cubierto, V_c (L)	2,42
Nivel de inundación requerido, n_r (%)	0,75
Volumen requerido por tubo, V_t (L)	5,50
Volumen total para llenar, V_L (m ³)	3,08
Total de tubos del sistema, X_n (unidades)	3
Volumen total tubos, V_{total} (L)	16,50
Tiempo, t (días)	18
Volumen consumo diario plantas, V_p (L)	0,1
Volumen total de consumo, V_{tp} (L)	1,8
Altura mínima bomba (m)	0,03
Largo del contenedor, L (m)	0,78
Ancho del contenedor, a (m)	0,52
Volumen bomba, V_b (L)	12,17
Volumen total que usar en contenedor, V_{tc} (L)	30,47

Cuadro 31. Datos de tiempo de llenado y drenado sistema hidropónico acorde a nivel de película de nutrientes en tubos de crecimiento.

Nivel de partida para llegar a 3/4	Tiempo drenado	Tiempo llenado
0	1,15	3,85
1/5	2,18	2,82
1/4	2,43	2,57
1/3	2,86	2,14
1/2	4,14	0,86
3/5	4,23	0,77

Acomodador de parques (no chófer)	TONC	\$11.009,97	Contador privado*	Lic.	\$705.514,95	Joyer	TOC	\$12.289,59
Acompañante en buseta escolar	TONC	\$11.009,97	Copiloto (Primer Oficial de Aviación)	TES	\$22.318,26	Laboratorista civil	TOC	\$12.289,59
Agente de aduanas	TES	\$22.318,26	Cortador de piezas tela (patrones)	TOC	\$12.289,59	Laboratorista clínico	TOC	\$12.289,59
Agente de ventas *	TOCG	\$371.610,27	Cosedor (prendas a máquina)	TOC	\$12.289,59	Lavador y encerador de carros	TONC	\$11.009,97
Albañil	TOC	\$12.289,59	Costurera (Modista)	TOE	\$14.381,27	Limpiador de piscinas (sin químicos)	TONC	\$11.009,97
Alisador automatiz (lijador)	TOSC	\$11.972,54	Counter (Vendedor de pasajes) *	TOCG	\$371.610,27	Limpiador de tanques sépticos	TOC	\$12.289,59
Analista de crédito *	TOCG	\$371.610,27	Dealer (Distribuidor de cartas)	TONC	\$11.009,97	Llantero	TOSC	\$11.972,54
Animador de eventos	TOC	\$12.289,59	Discjockey (Pone discos)	TONC	\$11.009,97	Locutor de radioemisora	TOE	\$14.381,27
Aplanchador con equipo de vapor	TOC	\$12.289,59	Demostrador (display)	TONC	\$11.009,97	Locutor de televisión	TES	\$22.318,26
Aserrador (usa sierra de motor)	TOC	\$12.289,59	Costurera (Modista)	TOSC	\$11.972,54	Luminotécnico de televisión	TES	\$22.318,26
Asistente de abogacía *	TOEG	\$421.970,02	Dependiente	TOSC	\$11.972,54	Maestro de obras (Construcción)	TOE	\$14.381,27
Asistente de consultorio médico	TOC	\$12.289,59	Despachador de vuelo	TES	\$22.318,26	Maitre (jefe de meseros)	TOE	\$14.381,27
Asistente domicilio de ancianos (Cuidados especiales)	TOE	\$14.381,27	Diagramador en artes gráficas	TOE	\$14.381,27	Manicurista; Maquillador	TOC	\$12.289,59
Auxiliar agente de aduanas	TOE	\$14.381,27	Dibujante Ingeniería, Arquitectura *	TOCG	\$371.610,27	Masajista	TOC	\$12.289,59
Auxiliar de contabilidad *	TOCG	\$371.610,27	Digitador	TOC	\$12.289,59	Mantenimiento correctivo de cómputo	TOE	\$14.381,27
Auxiliar dental	TOE	\$14.381,27	Ebanista	TOE	\$14.381,27	Mantenimiento de edificios	TOC	\$12.289,59
Ayudante de cocina	TOSC	\$11.972,54	Educador aspirante sin título *	TOEG	\$421.970,02	Mantenimiento preventivo de cómputo	TOC	\$12.289,59
Ayudante en mecánica general	TOSC	\$11.972,54	Electricista	TOC	\$12.289,59	Mecánico de calderas (Mantenimiento)	TOE	\$14.381,27
Ayudante de operario, construcción	TOSC	\$11.972,54	Electromecánico	TOE	\$14.381,27	Mecánico general	TOC	\$12.289,59
Baqueano	TOSC	\$11.972,54	Empacador, etiquetador (manual)	TONC	\$11.009,97	Mecánico precisión	TOE	\$14.381,27
Barbero	TOC	\$12.289,59	Empleado de despacho	TOSC	\$11.972,54	Mecánico máquinas de coser industrial	TOE	\$14.381,27
Barista	TOC	\$12.289,59	Empleada doméstica *	\$216.887,24	Mensajero *	TONCG	\$330.299,11	
Bodeguero (Encargado) *	TOSCG	\$356.329,60	Encuestador *	TOSCG	\$356.329,60	Misceláneo *	TONCG	\$330.299,11
Bodeguero (Peón)	TOSCG	\$330.299,11	Enderezador automatiz	TOC	\$12.289,59	Misceláneo hogares de la tercera edad	TONC	\$11.009,97
Cajero *	TOCG	\$371.610,27	Escaneador inventarios (hand held) *	TOSCG	\$356.329,60	Monitorizador de cámaras de video *	TOSCG	\$356.329,60
Camarero	TONC	\$11.009,97	Esteticista	TOE	\$14.381,27	Montacarguista	TOSC	\$11.972,54
Camarógrafo de prensa	TES	\$22.318,26	Estibador por kilo frutas y vegetales	\$0,0756	Mucama	TONC	\$11.009,97	
Cantante	TOC	\$12.289,59	Estibador por movimiento	\$398,88	Niñera, excepto en el hogar del niño	TONC	\$11.009,97	
Cantiniero	TOSC	\$11.972,54	Estibador por tonelada	\$93,54	Niñera en el hogar del niño	\$216.887,24		
Capitán de embarcación	TOE	\$14.381,27	Estilista	TOC	\$12.289,59	(Servicio doméstico) *		
Cargador cilindros gas y extintores	TOSC	\$11.972,54	Estilista canino (Grommer)	TOSC	\$11.972,54	Oficinista (General) *	TOSCG	\$356.329,60
Carnicero empleado de despacho	TOSC	\$11.972,54	Florista	TOC	\$12.289,59	Operador de cabina de radioemisora	TOE	\$14.381,27
Carnicero destazador	TOC	\$12.289,59	Fontanero	TOC	\$12.289,59	Operador de "araña" (Serigrafía)	TOC	\$12.289,59
Carpintero	TOC	\$12.289,59	Fotocopiador (Centro fotocopiado)	TOSC	\$11.972,54	Operador de caldera	TOC	\$12.289,59
Catador	TOE	\$14.381,27	Fotógrafo de prensa	TOE	\$14.381,27	Operador de draga	TOE	\$14.381,27
Cerrajero	TOC	\$12.289,59	Fresador (Metalmecánica)	TOE	\$14.381,27	Operador de grúa estacionaria	TOE	\$14.381,27
Chapuliner	TOC	\$12.289,59	Fumigador en casas y edificios	TOSC	\$11.972,54	Operador de maquinaria pesada	TOC	\$12.289,59
Chef	TOE	\$14.381,27	Futbolista Primera División	TOE	\$14.381,27	Operador de radio-taxi	TOC	\$12.289,59
Chequeador de buses	TONC	\$11.009,97	Futbolista Segunda División	TOC	\$12.289,59	Operario en construcción	TOC	\$12.289,59
Cocinero	TOSCG	\$356.329,60	Gestor de redes sociales (Community Manager, diseña artes finales)	TOE	\$14.381,27	Operario de talleres dentales	TOC	\$12.289,59
Cocinero	TOC	\$12.289,59	Gestor de redes sociales (Community manager, monitorea y da respuesta) *	TOSCG	\$356.329,60	Orfeñador a mano	TONC	\$11.009,97
Cocotero (Bartender o Barwoman)	TOC	\$12.289,59	Gestor de redes sociales (Community manager, lleva datos y los interpreta).	TOC	\$12.289,59	Panadero	TOC	\$12.289,59
Conductor ambulancia (soccotismo)	TOC	\$12.289,59	Gondolero	TONC	\$11.009,97	Parrillero	TOSC	\$11.972,54
Conductor de bus (cobrador)	TOE	\$14.381,27	Guarda *	TOSCG	\$356.329,60	Pastelero	TOC	\$12.289,59
Conductor de tráiler	TOE	\$14.381,27	Guarda custodia valores y portavalores*	TOCG	\$371.610,27	Peñón agrícola (labores manuales)	TONC	\$11.009,97
Conductor de vehículo liviano	TOSC	\$11.972,54	Guía de turismo	TOC	\$12.289,59	Peñón agrícola (motoguadañas, etc.)	TOSC	\$11.972,54
Conductor de vehículo pesado	TOC	\$12.289,59	Hojalatero	TOC	\$12.289,59	Peñón de carga y descarga	TONC	\$11.009,97
Conductor microbús (menos 11 pasas)	TOSC	\$11.972,54	Instalador vidrios (corta, pone marcos)	TOC	\$12.289,59	Peñón de construcción	TONC	\$11.009,97
Consejer *	TONCG	\$330.299,11	Instructor de bailes	TOC	\$12.289,59	Peñón de jardín (labores manuales)	TONC	\$11.009,97
Contador privado *	TMED	\$389.421,08	Instructor de gimnasio (sin título)	TOC	\$12.289,59	Peñón de jardín (motoguadaña, etc.)	TOSC	\$11.972,54
Contador privado *	DES	\$518.330,07	Jardinero (diseña jardines)	TOC	\$12.289,59	Peñón de embarcación	TONC	\$11.009,97
Contador privado *	Bach.	\$587.908,98		TOC	\$12.289,59	Pilero (lavador de platos)	TONC	\$11.009,97
				TOC	\$12.289,59	Pintor automatiz	TOE	\$14.381,27

Figura 32. Lista de salarios mínimos por ocupación II Semestre 2022 (Ministerio de Trabajo de Costa Rica, 2022).



Novatec Industrial S.A.
Cédula Jurídica 3-101-280782
Radial Santa Ana - Belen Costa Rica.
Tel: (506) 2239 1111. WhatsApp: (506) 6383-6383
e-mail ventas@novatec.cr www.novatec.cr

CLIENTE: AMENTUM OPERACIONES COMERCIALES CR SOCIEDAD DE RESPONSABILIL

ATENCIÓN: Diego Umaña
Tel:

FECHA: 01/11/2022

Oferta de Venta
No. SAP 45754

#	CANT.	CODIGO	DESCRIPCION	U.M.	PRECIO UNIT	DESC	PRECIO	TOTAL
1	3	850-0009-GEN	Bomba sumergible KRT Drainer FI M 500, 0.5 HP, 110V/15/60Hz, 3450 rpm KSB		523,582.87		COL 523,582.87	COL 1,570,748.61

Cuentas Colonos
BNCR COL 100-01-037-004385-8
BAC San José 903042976
BCR COL 001-0294116-3
IBAN BNCR CR77015103710010043856

Cuentas Dolares
BNCR USD 100-02-037-600293-2
BAC USD 916885627
BCR USD 001-0263998-4
IBAN BNCR CR04015103710026002931

SUBTOTAL COL 1,570,748.61
DESC COL 0.00
IV VENTAS COL 0.00
TOTAL COL 1,570,748.61

Para pagos en efectivo no se aceptarían billetes de \$100 ni de \$50

Condiciones de la oferta	Contacto	Adrian Brenes
--------------------------	----------	---------------

Observaciones:
Entrega de 10 a 12 semanas.

Tiempo de Entrega: 10 a 12 semanas

Validez de la Oferta: 01/12/2022

Forma de Pago: Crédito 90 días

Figura 33. Cotización bomba sumergible modelo KRT Drainer FI 500 (Novatec, 2022).

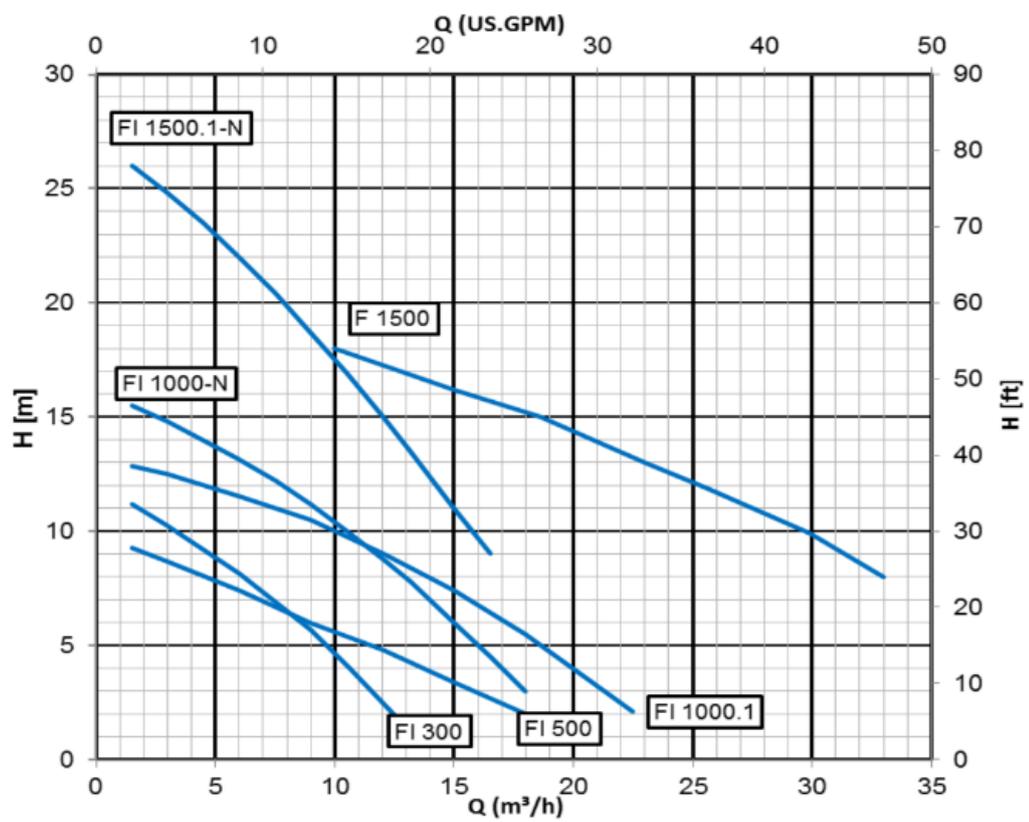


Figura 34. Curva de bombeo bomba sumergible KRT Drainer FI 500 (Novatec, 2022).

Tanque externo captacion agua tricapa 1100 litros azul Ecotank 01-001101
00124 / 13.00 kg / CABYS 3695001009900



€ 115,044.25 + 13%

€ 130,000.00 / unidad

1

Inventario disponible:

Escazú 2.00
Alajuela 2.00
CEDI Disponible

[Descargar Ficha Técnica](#)

Ideal para uso externo. Compuesto por tres capas distintas que alargan la vida útil del tanque. Posee una capa intermedia de color negro que impide el paso de la radiación solar y una capa interna color blanco que permite un mejor control visual de la calidad del líquido almacenado. Capa exterior disponible en color azul, esta combinación ofrece una doble protección contra los rayos UV.

Figura 35. Tanque 1.1 m³ tricapa marca Ecotank (Construplaza, Agosto 2022).

Acuario El Disco
Bayron Johel Rodríguez Martínez
Cédula N° 2-777-742
La Agonia, Alajuela
Cel.: 7109-4464

FACTURA CONTADO

DIA	MES	AÑO
6	8	2020

Nº 312

Acuario y Pet Shop El Disco

Señor: *Fundación de la Universidad de Costa Rica*
Cédula: *para la investigación 3-006-101-757* Tel.:
Correo:
Dirección:

CANT.	DESCRIPCION	VALOR
1	Bomba Boyu FP-1500	20300
1	Borra alrededor	4300

TOTAL € 24600

* Autorizado mediante oficio N° 02-012-97 del 01-10-97 de la D.G. de la T.D.
Acogida al Régimen de Tributación Simplificada.
De la 101 a la 400 • 6x2x50 • Imprenta y Litografía Hnos Ledezma S. A. Cédula Jur. 3-101-146604 Tel: 2453-3735
ORIGINAL Cliente / COPIA Contabilidad 23/09/19 (21 fac # 2n a cont 86)

Figura 36. Factura Bomba Boyu FP-1500.

0

Construplaza.com
 Construplaza S.A.
 Cédula Jurídica: 3-101-269562
 Tel: +506 2588-8898
 Escazú, 900 mts. Oeste de Multiplaza
 Alajuela, 300 mts. Oeste de Perimercados

FACTURA ELECTRONICA
 00300033010000010902

Fecha: 06/08/2020 11:43:08AM
 Vendedor: Ventas POS
 Cajero: ECARRANZA
 Cliente: 028134 - FUNDACION DE LA
 UNIVERSIDAD DE COSTA
 RICA PARA LA
 INVESTIGACION

3.00 PZA	Madera Pino Seco 3.20 metros cepillado 1x4 pulg (18x90mm) regla 09406 G 011	5,114.16
4.00 UND	Servicio de corte recto de metal/madera 90112 G 011	884.96
Subtotal:		6,999.12
Impto. Ventas:		909.88
Total:		7,909.00

Formas de Pago

EFFECTIVO	10,000.00
EFFECTIVO	-2,091.00

Autorizado mediante resolución N° GDT-R-033-2019 del 20/06/2019 de la DGTD v4.3

00300033010000010902

Figura 37. Factura madera para construcción de cuñas de soporte.

Construplaza.com		
Construplaza S.A. Cédula Jurídica: 3-101-289562 Tel: +506 2568-8988 Escazú, 800 mts. Oeste de Multiplaza Alajuela, 300 mts. Oeste de Perimercados		
FACTURA ELECTRONICA		
00300034010000017132		
Fecha:	06/06/2020 11:18:04AM	
Vendedor:	Ventas Web	
Cajero:	MECALVO	
Cliente:	028134 - FUNDACION DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA PARA LA INVESTIGACION	
10.00 PAC	Tornillo carroceria 1/4 x 2-1/2 pulgadas (5 por paquete) 12747 G 011	2,601.77
4.00 MTS	Cable THHN #12 blanco metro 24366 G 011	780.53
1.00 UND	Broca sierra para metal 1 pulgada Dewalt DW180018 18611 G 011	6,897.35
1.00 1/8	Pegamento PVC agua fria y caliente 16 onzas (1/8 galon) SM248-6 Lanco 04268 G 011	4,336.28
4.00 MTS	Cable THHN #12 rojo metro 24368 G 011	780.53
1.00 UND	Toma de hule con abrazadera 2 huecos para extension 2224 HS01 43651 G 011	650.44
12.00 UND	Gaza redonda para bajante PVC canal 3 pulg (75mm) 01099 G 011	2,532.96
4.00 UND	Llave de paso PVC 1 pulgada (25 mm) Amarillo 05737 G 011	7,353.08
6.00 UND	Tapon hembra PVC liso 3 pulgadas (75mm) 00912 G 011	10,716.99
1.00 UND	Toma corriente doble parche polarizado 15A 110V #78 F08 13558 G 011	520.35
2.00 UND	Tee PVC potable lisa 1 pulgada (25mm) 00938 G 011	956.54
4.00 UND	Codo PVC potable liso 90 grados 1 pulgada (25mm) 00874 G 011	1,539.00
1.00 UND	Extension electrica uso rudo 2x18 10 metros ER-10X16 Voltaok 12072 G 011	5,810.62
11.00 UND	Servicio de corte recto de metal/madera 80112 G 011	2,433.63
3.00 PZA	Madera Pino Seco 3.20 metros cepillado 1x12 pulg (19x290mm) tabla 04367 G 011	32,261.95
1.00 UND	Arbol para broca sierra 5/8 a 1-1/8 pulgada Dewalt DW1800 18613 G 011	2,601.77
1.00 UND	Broca sierra para metal 2 pulgadas Dewalt D180032 39862 G 011	6,938.05
Subtotal:		88,711.84

Figura 38. Factura insumos necesarios para construcción de sistema hidropónico.

B. Cálculos realizados

- a. Número de Reynolds

$$Re = \frac{v * D}{\nu} \quad (1)$$

$$Re = \frac{0,05 \frac{m}{s} * 0,0254 m}{0,000001 m^2/s}$$

$$Re = 1193,51$$

- b. Selección de potencia de la bomba para sistema hidropónico

$$P = \frac{Q_{bomba} * h}{F_s * \eta} \quad (2)$$

$$P = \frac{0,0238 \frac{L}{s} * 0,8 m}{0,76 * 0,75}$$

$$P = 0,03 \text{ HP} = 24,91 \text{ W}$$

- c. Volumen para utilizar en contenedor para crecimiento de planta *Justicia pectoralis* Jacq

Volumen tubos

$$V_{tubos} = 7,33 \text{ L} * 0,75 * 3 \quad (3)$$

$$V_{tubos} = V_{tubo} * L_{requerido} * n$$

$$V_{tubos} = 16,50 \text{ L}$$

Volumen requerido por plantas

$$V_{plantas} = V_{consumo} * t \quad (4)$$

$$V_{plantas} = 0,25 \text{ L} * 27 \text{ días}$$

$$V_{plantas} = 6,75 \text{ L}$$

Volumen requerido por bomba

$$V_{bomba} = L_{contenedor} * a_{contenedor} * h_{contenedor} \quad (5)$$

$$V_{bomba} = 0,78 \text{ m} * 0,52 \text{ m} * 0,03 \text{ m} * 1000$$

$$V_{tubos} = 12,17 \text{ L}$$

Volumen requerido en contenedor

$$V_{contenedor} = V_{tubos} + V_{plantas} + V_{bomba} \quad (6)$$

$$V_{contenedor} = 16,5 \text{ L} + 6,75 \text{ L} + 12,17 \text{ L}$$

$$V_{contenedor} = 35,42 \text{ L}$$

- d. Tiempo de llenado tubos

$$t_{llenado} = \frac{\frac{\pi * D^2}{4} * L * (N_{requerido} - N_{mínimo})}{Q} \quad (7)$$

$$t_{llenado} = \frac{\frac{\pi * (0,0762 \text{ m})^2}{4} * 1,608 \text{ m} * (0,75 - 0,33)}{0,000024 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$t_{llenado} = 128,33 \text{ s} = 2,14 \text{ min}$$

e. Tiempo de drenados tubos

$$t_{drenado} = t_{recirculación} - t_{llenado} \quad (8)$$

$$t_{drenado} = 5,00 \text{ min} - 2,14 \text{ min}$$

$$t_{llenado} = 2,86 \text{ min}$$

5. Anexos

1. Resultados de laboratorio externo

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC

Informe de resultados de Análisis

Código de muestra: 421021		Fecha de reporte: 19/10/2021	
Información general			
Interesado: Diego Andrés Umaña Arias		Teléfono: 8326-7677	
Solicitante: Diego Andrés Umaña Arias		Email: diegoumanaarias@gmail.com	
Datos muestras			
Tipo de muestra: Agua Residual		Fecha recepción: 07/10/2021	
Descripción de la muestra: consecutivo 1: Blanco		Fecha inicio análisis: 13/10/2021	
Datos muestreo			
Tipo de muestreo: Puntual.		Fecha muestreo: 07/10/2021	
Muestreado por: El Solicitante			
Dirección: No indica			
Muestra	Descripción	Arsénico (mg/L) (**)	Procedimiento
1	Blanco	(0,015 ± 0,002)	3113 - B
2	Día 3	(0,011 ± 0,001)	
3	Día 6	(0,011 ± 0,001)	
4	Día 9	(0,010 ± 0,001)	
5	Día 12	(0,011 ± 0,001)	
6	Día 15	(0,010 ± 0,001)	
7	Día 18	(0,011 ± 0,001)	

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

ND: No detectable

NA: No aplica

La Incertidumbre que se reporta es una Incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación, realizado por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC.

Metodología: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23^{ra} ed. 2017 APHA-AWWA-WEF.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este Informe. Concluido este periodo se desecharán.

DIANA
ROBLES
CHAVES
(FIRMA)

Firmado
digitalmente
por DIANA
ROBLES
CHAVES
(FIRMA)



Lic. Diana Robles Chaves
Regente Química

Figura 39. Primer ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQIATEC, 2021).

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC

Informe de resultados de Análisis

Código de muestra: 780222		Fecha de reporte: 11/02/2022	
Información general			
Interesado: Diego Andrés Umaña Arias		Teléfono: 8326-7677	
Solicitante: Diego Andrés Umaña Arias		Email: diegoumanaarias@gmail.com	
Datos muestras			
Tipo de muestra: Agua Residual	Fecha inicio análisis: 09/02/2022	Fecha recepción: 07/02/2022	
Datos muestreo			
Tipo de muestreo: Puntual.		Fecha muestreo: 07/02/2022	
Muestreado por: El Solicitante			
Dirección: No indica			
Muestra	Descripción	Arsénico (mg/L) **	Procedimiento
1	Blanco	(0,043 ± 0,005)	3113 – B
2	Día 3	(0,039 ± 0,005)	
3	Día 6	(0,044 ± 0,005)	
4	Día 9	(0,052 ± 0,006)	
5	Día 12	(0,059 ± 0,007)	
6	Día 15	(0,051 ± 0,006)	
7	Día 18	(0,080 ± 0,007)	

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

ND: No detectable

NA: No aplica

La incertidumbre que se reporta es una incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación, realizado por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió. Ver alcance en www.eca.or.cr

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC.

Metodología: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd ed. 2017 APHA-AWWA-WEF.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este Informe. Concluido este periodo se desecharán.

DIANA
ROBLES
CHAVES
(FIRMA)
Lic. Diana Robles Chaves
Regente Química

Firmado
digitalmente
por DIANA
ROBLES
CHAVES
(FIRMA)



Figura 40. Segundo ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotrémica acoplado a un horno de grafito (CEQIATEC, 2022).

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de Análisis

Código de muestra: 2600422		Fecha de reporte: 10/05/2022	
Información general			
Interesado: Diego Andrés Umaña Arias		Teléfono: 8326-7677	
Solicitante: Diego Andrés Umaña Arias		Email: diegoumanaarias@gmail.com	
Datos muestras			
Tipo de muestra: Agua Residual		Fecha recepción: 27/04/2022	
		Fecha inicio análisis: 03/05/2022	
Datos muestreo			
Tipo de muestreo: Puntual		Fecha muestreo: 27/04/2022	
Muestreado por: El Solicitante			
Dirección: No indica			
Muestra	Descripción	Arsénico (mg/L) (**)	Procedimiento
1	Blanco	(0,016 ± 0,001)	3113 – B
2	Día 3	(0,015 ± 0,001)	3113 – B
3	Día 6	(0,013 ± 0,001)	3113 – B
4	Día 9	(0,011 ± 0,001)	3113 – B
5	Día 12	(0,009 ± 0,001)	3113 – B
6	Día 15	(0,007 ± 0,001)	3113 – B
7	Día 18	(0,007 ± 0,001)	3113 – B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

ND: No detectable

NA: No aplica

La Incertidumbre que se reporta es una Incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación, realizado por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las Instalaciones del CEQIATEC.

Metodología: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd ed. 2017 APHA-AWWA-WEF.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 16 días naturales luego de la emisión de este Informe. Concluido este periodo se desecharán.

DIANA
ROBLES
CHAVES
(FIRMA)

Firmado digitalmente por DIANA ROBLES CHAVES (FIRMA)

M Sc. Diana Robles Chaves
Regente Química



Figura 41. Tercer ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQUIATEC, 2022)

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de Análisis

Código de muestra: 2680622		Fecha de reporte: 06/07/2022	
Información general			
Interesado: Diego Andrés Umaña Arias		Teléfono: 8326-7677	
Solicitante: Diego Andrés Umaña Arias		Email: diegoumanaarias@gmail.com	
Datos muestras			
Tipo de muestra: Agua Residual	Fecha inicio análisis: 29/06/2022	Fecha recepción: 23/06/2022	
Datos muestreo			
Tipo de muestreo: Puntual		Fecha muestreo: 23/06/2022	
Muestreado por: El Solicitante			
Dirección: No indica			

Muestra	Descripción	Arsénico (mg/L) (**)	Procedimiento
1	Blanco	(0,012 ± 0,001)	3113 - B
2	Día 3	(0,010 ± 0,001)	3113 - B
3	Día 6	(0,011 ± 0,001)	3113 - B
4	Día 9	(0,009 ± 0,001)	3113 - B
5	Día 12	(0,0075 ± 0,0008)	3113 - B
6	Día 15	(0,0052 ± 0,0006)	3113 - B
7	Día 18	< 0,005	3113 - B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

ND: No detectable

NA: No aplica

La Incertidumbre que se reporta es una Incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación, realizado por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.

Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC.

Metodología: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd ed. 2017 APHA-AWWA-WEF.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este Informe. Concluido este periodo se desecharán.

ADRIAN
RODRIGO FLORES
CANTILLO
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
ADRIAN RODRIGO
FLORES CANTILLO
(FIRMA)



Lic. Adrián Flores Cantillo
Regente Químico

Figura 42. Cuarto ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQIATEC, 2022).

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de Análisis

Código de muestra: 2700522		Fecha de reporte: 06/06/2022	
Información general			
Interesado: Diego Andrés Umaña Arias		Teléfono: 8326-7677	
Solicitante: Diego Andrés Umaña Arias		Email: diegoumanaarias@gmail.com	
Datos muestras			
Tipo de muestra: Agua Residual	Fecha inicio análisis: 02/06/2022	Fecha recepción: 25/05/2022	
Datos muestreo			
Tipo de muestreo: Puntual		Fecha muestreo: 25/05/2022	
Muestreado por: El Solicitante			
Dirección: provincia: No indica			
Muestra	Descripción	Arsénico (mg/L) (**)	Procedimiento
1	Blanco	(0,014 ± 0,002)	3113 - B
2	Día 3	(0,013 ± 0,001)	3113 - B
3	Día 6	(0,011 ± 0,001)	3113 - B
4	Día 9	(0,010 ± 0,001)	3113 - B
5	Día 12	(0,0085 ± 0,0009)	3113 - B
6	Día 15	(0,0070 ± 0,0008)	3113 - B
7	Día 18	(0,0056 ± 0,0006)	3113 - B

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

ND: No detectable

NA: No aplica

La Incertidumbre que se reporta es una Incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior.

Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación, realizado por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023.
Los análisis fueron realizados en las Instalaciones del CEQIATEC.

Metodología: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23^{ra} ed. 2017 APHA-AWWA-WEF.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este Informe. Concluido este periodo se desecharán.

DIANA
ROBLES
CHAVES
(FIRMA)

Firmado digitalmente por DIANA ROBLES CHAVES (FIRMA)

M Sc. Diana Robles Chaves
Regente Química



Figura 43. Quinto ensayo de remoción de arsénico mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQIATEC, 2022).

**Instituto Tecnológico de Costa Rica
Fundación Tecnológica de Costa Rica
Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CEQIATEC**

Informe de resultados de Análisis

Código de muestra: 2690622		Fecha de reporte: 06/07/2022
Información general		
Interesado: Diego Andrés Umaña Arias	Teléfono: 8326-7677	
Solicitante: Diego Andrés Umaña Arias	Email: diegoumanaarias@gmail.com	
Datos muestras		
Tipo de muestra: Planta	Fecha recepción: 23/06/2022	
Descripción de la muestra: consecutivo 1: Plantas (raíz + tallo + hojas)	Fecha inicio análisis: 27/06/2022	
Datos muestreo		
Tipo de muestreo: Puntual	Fecha muestreo: 23/06/2022	
Muestreado por: El Solicitante		
Dirección: No indica		
Replica	Masa de muestra homogenizada (g)	Arsénico (mg/kg) **
1	5,1943	0,0620
2	5,8682	0,0651
3	5,5739	0,0634

Observaciones

(*) Ensayos acreditados ante Ente Costarricense de Acreditación (ECA). Ver alcance en www.eca.or.cr

(**) Ensayos no acreditados.

ND: No detectable

NA: No aplica

La Incertidumbre que se reporta es una Incertidumbre expandida, calculada usando un factor de cobertura (k) de 2, lo cual da un nivel de confianza de aproximadamente un 95%.

Los resultados emitidos en este reporte sólo son válidos para la muestra tomada en el día y hora indicada en la parte superior. Se prohíbe la reproducción de este documento en forma total o parcial sin la autorización del laboratorio.

Muestreo fuera del alcance de acreditación, realizado por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

Permiso sanitario de funcionamiento del CEQIATEC: No. 2750-2018 emitido el 08-08-2018 vence 08-08-2023. Los análisis fueron realizados en las instalaciones del CEQIATEC.

Metodología: Procedimiento basado en absorción atómica con horno de grafito.

Las Muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 15 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este periodo se desecharán.

ADRIAN
RODRIGO FLORES
CANTILLO
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
ADRIAN RODRIGO
FLORES CANTILLO
(FIRMA)



Lic. Adrián Flores Cantillo
Regente Químico

Figura 44. Cuantificación de arsénico en planta mediante el uso de adsorción atómica electrotérmica acoplado a un horno de grafito (CEQIATEC, 2022).



Determinación de la masa total de la muestra

Descripción	Masa total inicial (g)
Hojas + tallo + raíces	186,54

Figura 45. Determinación de masa total de la muestra en estado sólido para cuantificación de arsénico removido por plantas en ensayo 5 (CEQUIATEC, 2022).



Pesada de réplicas en balanza analítica.



Réplicas calcinadas.

Figura 46. Calcinación de masa total de la muestra en estado sólido para cuantificación de arsénico removido por plantas en ensayo 5 (CEQUIATEC, 2022).



Filtración de las réplicas.



Equipo de absorción atómica.

Figura 47. Filtración de réplicas de las muestras en estado sólido calcinadas y digeridas cuantificación de arsénico removido por plantas en ensayo 5 (CEQUIATEC, 2022).