

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“PROPUESTA PARA MEJORAR LA CALIDAD DE AGUA PARA
RIEGO, IMPLEMENTANDO UNA UNIDAD DE TRATAMIENTO CON
IONES FERRATO (VI)”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

JUAN CARLOS VILCHEZ MELO

LIMA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

“PROPUESTA PARA MEJORAR LA CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO, IMPLEMENTANDO UNA UNIDAD DE TRATAMIENTO CON IONES FERRATO (VI)”

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

JUAN CARLOS VILCHEZ MELO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dra. LIA RAMOS FERNÁNDEZ

Presidente

Mg. Sc. ROSA MARÍA MIGLIO TOLEDO

Asesor

Dr. JOSÉ LUIS CALLE MARAVÍ

Miembro

Dr. JOSUÉ ELIEZER ALATA REY

Miembro

LIMA – PERÚ

2021

ÍNDICE GENERAL

I. PRESENTACIÓN	1
II. INTRODUCCIÓN	2
III. OBJETIVOS	4
3.1. OBJETIVO GENERAL	4
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1. LA AGRICULTURA Y EL AGUA DE RIEGO	5
4.2. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO	5
4.3. CONTAMINACIÓN POR METALES	6
4.4. PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE CULTIVOS POR METALES	6
4.4.1. Aguas para riego	6
4.4.2. Fertilizantes y pesticidas	7
4.4.3. Actividades industriales	7
4.4.4. Eliminación de residuos sólidos	9
4.4.5. Minería	9
4.5. ABSORCIÓN Y TRANSPORTE DE METALES EN PLANTAS	9
4.6. EFECTOS DE LOS METALES SOBRE LAS HORTALIZAS	10
4.7. EFECTOS DEL CONSUMO DE VEGETALES CONTAMINADOS CON METALES EN LA SALUD HUMANA	13
4.8. TRATAMIENTO DEL AGUA USANDO IONES FERRATO (VI)	15
4.8.1. Uso de iones ferrato en el tratamiento del agua	15
4.8.2. Iones Ferrato (VI)	15
4.8.3. Métodos de preparación de los iones ferrato (VI)	16
4.9. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO	16
4.9.1. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua para riego	16
4.9.2. Parámetros relevantes en la calidad del agua para riego	17
4.10. CULTIVO DE LA LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i> L.)	20
4.10.1. Origen	20
4.10.2. Clasificación Taxonómica	21
4.10.3. Morfología	21
4.10.4. Fenología del Cultivo	21

4.10.5. Variedades de lechuga.....	22
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
5.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO	24
5.2. IMPLEMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AGUA DE RIEGO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL LA MOLINA	24
5.2.1. Subsistema reactor de iones ferrato (VI).....	24
5.2.2. Subsistema de control de pH.....	29
5.2.3. Subsistema de remoción de sólidos.....	31
5.2.4. Subsistema de control de riego por goteo	32
5.3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE METALES Y ARSÉNICO EN EL AGUA TRATADA CON IONES FERRATO (VI).....	33
5.3.1. Diseño de experimento.....	33
5.3.2. Procedimiento de muestreo de agua y toma de datos.....	34
5.3.3. Análisis de muestras de agua	35
5.4. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL CULTIVO DE LECHUGA DESPUÉS DE SER REGADAS CON AGUAS TRATADAS Y SIN TRATAR	36
5.4.1. Campaña Agrícola del cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	36
5.4.2. Diseño experimental.....	36
5.4.3. Procedimiento de muestreo	38
5.4.4. Análisis de muestras de lechuga.....	38
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
6.1. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AGUA DE RIEGO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL LA MOLINA	39
6.1.1. Subsistema reactor de iones ferrato (VI).....	39
6.1.2. Subsistema de control de pH.....	40
6.1.3. Subsistema de remoción de sólidos.....	41
6.1.4. Subsistema de control de riego por goteo	42
6.2. TRATAMIENTO DEL AGUA PARA RIEGO.....	42
6.2.1. pH.....	42
6.2.2. Turbidez	44
6.2.3. Conductividad	45

6.2.4. Aluminio.....	46
6.2.5. Arsénico	47
6.2.6. Hierro	48
6.2.7. Plomo	49
6.2.8. Zinc.....	50
6.3. CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL CULTIVO DE LECHUGA CON AGUA TRATADA Y AGUA SIN TRATAR	51
6.3.1. Aluminio.....	51
6.3.2. Arsénico	52
6.3.3. Cadmio	53
6.3.4. Plomo	54
6.3.5. Zinc.....	55
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
7.1. CONCLUSIONES.....	57
7.2. RECOMENDACIONES	58
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
IX. ANEXOS.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ocurrencia de metales en efluentes de varias industrias	8
Tabla 2: Concentraciones de metales (mg.kg^{-1}) en la parte comestible de diferentes hortalizas	10
Tabla 3: Efectos adversos de la concentración de metales en vegetales	12
Tabla 4: Efectos adversos de vegetales contaminados con metales en la salud humana	14
Tabla 5: Valores de turbidez y pH en el agua para riego sin tratar y agua para riego tratada	30
Tabla 6: Dosificación de insumos químicos para el tratamiento de agua para riego	31
Tabla 7: Número de muestras por parámetro	35
Tabla 8: Volúmenes de riego aplicado al cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	36
Tabla 9: pH observado en agua de riego	43
Tabla 10: Turbidez observada en el agua de riego	44
Tabla 11: Conductividad observada en el agua para riego	46
Tabla 12: Concentración de aluminio (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego.....	47
Tabla 13: Concentración de arsénico (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego.....	48
Tabla 14: Concentración de hierro (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego	49
Tabla 15: Concentración de plomo (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego.....	50
Tabla 16: Concentración de zinc (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego	51
Tabla 17: Concentración de aluminio (mg.kg^{-1}) observado en las hojas del cultivo de lechuga	52
Tabla 18: Concentración de arsénico (mg.kg^{-1}) observado en las hojas del cultivo de lechuga	52
Tabla 19: Concentración de cadmio (mg.kg^{-1}) observado en las hojas del cultivo de lechuga	53
Tabla 20: Concentración de plomo (mg.kg) observado en las hojas del cultivo de lechuga	54
Tabla 21: Concentración de zinc (mg.kg^{-1}) observado en las hojas del cultivo de lechuga	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Reactor de iones ferrato (VI)	25
Figura 2: Tanque de hidróxido de sodio (NaOH) al 50%	26
Figura 3: Bombas peristálticas	26
Figura 4: Receptor de iones ferrato (VI)	27
Figura 5: Tablero de control automatizado.....	27
Figura 6: Diagrama de flujo del sistema de producción de ferrato (VI).....	28
Figura 7: Bombas de inyección de insumos químicos	29
Figura 8: Esquema del subsistema de remoción de sólidos	31
Figura 9: Bolsa geotubo en operación	32
Figura 10: Toma de muestras de bolsa Geotubo adaptada	35
Figura 11: Diseño experimental DCA para el cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	37
Figura 12: Sub sistema reactor de iones ferrato (VI)	40
Figura 13: Subsistema de control de pH.....	41
Figura 14: Subsistema de remoción de sólidos	41
Figura 15: Subsistema de control de riego por goteo	42
Figura 16: Efecto de los tratamientos en el pH del agua para riego	43
Figura 17: Efecto de los tratamientos en la turbidez del agua para riego.....	45
Figura 18: Efecto de los tratamientos en la conductividad del agua para riego	46
Figura 19: Efecto de los tratamientos en la concentración de aluminio en el agua para riego	47
Figura 20: Efecto de los tratamientos en la concentración de arsénico en el agua para riego.....	48
Figura 21: Efecto de los tratamientos en la concentración de hierro en el agua para riego	49
Figura 22: Efecto de los tratamientos en la concentración de plomo en el agua para riego	50
Figura 23: Efecto de los tratamientos en la concentración de zinc en el agua para riego	51
Figura 24: Efecto de los tratamientos en la concentración de aluminio en las hojas del cultivo de lechuga	52

Figura 25: Efecto de los tratamientos en la concentración de arsénico en las hojas del cultivo de lechuga	53
Figura 26: Efecto de los tratamientos en la concentración de cadmio en las hojas del cultivo de lechuga	54
Figura 27: Efecto de los tratamientos en la concentración de plomo en las hojas del cultivo de lechuga	55
Figura 28: Efecto de los tratamientos en la concentración de zinc en las hojas del cultivo de lechuga	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de varianza (ANVA) para la variable pH	66
Anexo 2: Análisis de varianza (ANVA) para la variable Turbidez (NTU).....	66
Anexo 3: Análisis de varianza (ANVA) para la variable conductividad (uS.cm^{-1})	66
Anexo 4: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de aluminio (mg.l^{-1})	67
Anexo 5: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de arsénico (mg.l^{-1})	67
Anexo 6: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de hierro (mg.l^{-1})	67
Anexo 7: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de plomo (mg.l^{-1})	67
Anexo 8: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de zinc (mg.l^{-1})	68
Anexo 9: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de aluminio (mg.kg^{-1}).....	68
Anexo 10: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de arsénico (mg.kg^{-1}).....	68
Anexo 11: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de cadmio (mg.kg^{-1}).....	68
Anexo 12: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de plomo (mg.kg^{-1}).....	69
Anexo 13: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de zinc (mg.kg^{-1}).....	69

I. PRESENTACIÓN

El presente proyecto de trabajo de suficiencia profesional muestra el trabajo realizado en el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) en el marco del proyecto de investigación: 093 PI en el Centro Experimental La Molina, financiado por el Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) entre mayo del 2016 y diciembre del 2019.

En el cumplimiento de las funciones propias como profesional de Ingeniería Agrícola, se realizaron las siguientes funciones relacionadas a la carrera, aspectos propios de la puesta en práctica de lo aprendido durante la formación universitaria en relación a las labores desempeñadas como asistente del proyecto 093.

Se desarrollaron actividades de recopilación de información hidrológica, muestreo de la calidad de aguas del riego en el río Rímac, muestreo de la calidad del suelo agrícola en la Estación Experimental Agraria La Molina, diseño, instalación de un sistema de riego por goteo para irrigar los cultivos con agua tratada con iones ferrato (VI). Se muestrearon puntos estratégicos en las cuencas de los ríos Rímac para la determinación de metales y parámetros de campo que permitan identificar las características del agua que se utiliza para riego agrícola. También se muestreó el suelo agrícola, para la línea base de las condiciones de contaminación en que se encuentran los suelos. Estas actividades se vinculan directamente con el área de riego y drenaje, hidrología, hidráulica y aguas residuales.

II. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria es un tema prioritario para el desarrollo sostenible de los países, en las últimas décadas la contaminación de recursos como el agua de riego y los suelos agrícolas han amenazado la seguridad alimentaria y la salud de las poblaciones.

La producción de alimentos en áreas contaminadas con metales aumenta los riesgos en la falta de inocuidad de los alimentos y en el desarrollo de los cultivos. Los cultivos absorben numerosos elementos del suelo, algunos de ellos llamados esenciales porque son necesarios para que la planta cumpla su ciclo de vida (Arnon y Stout, 1939). Se ha documentado que las plantas también absorben elementos que no tienen una función biológica conocida e incluso se sabe que son tóxicas en bajas concentraciones. Entre estos se encuentran el aluminio, el arsénico, el cadmio, el cobalto, el plomo y el zinc. Sin embargo; incluso los micronutrientes se vuelven tóxicos para las plantas cuando se absorben por encima de ciertos valores de umbral.

Las plantas toman elementos esenciales y no esenciales de los suelos en respuesta a los gradientes de concentración inducidos por la captación selectiva de iones por las raíces, o por la difusión de elementos en el suelo. El nivel de acumulación de elementos difiere entre las especies y dentro de ellas (Huang y Cunningham, 1996).

La absorción de metales pesados puede conducir a su acumulación en hortalizas y otros cultivos y su consecuente introducción en la cadena alimentaria, que es reconocida como una de las vías principales para la exposición humana a ellos. Esta exposición puede resultar en varios tipos de enfermedades (Cayetano, 2019).

Entre los años 2016 al 2019, se inició el proyecto de investigación “093 PI” bajo la alianza estratégica del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y la Universidad de Lima,

financiados por el Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) con el objetivo de mejorar la calidad de agua para riego a través de la implementación de una unidad automatizada que remueva sustancias contaminantes del agua, haciendo uso de los iones ferrato (VI). Por ello en el presente trabajo se desarrolla la implementación de una propuesta de tecnología de tratamiento de aguas para riego, mediante el uso de iones ferrato (VI) en el desarrollo del cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa* L.).

III. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la mejora de la calidad del agua de riego a través de la implementación de una unidad de tratamiento con iones ferrato (VI) en el Centro Experimental La Molina.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la implementación e instalación de una unidad de tratamiento de agua para riego en el Centro Experimental La Molina.
- Evaluación de la eficiencia de remoción de metales en el agua tratada con iones ferrato (VI).
- Evaluación de la concentración de metales en el cultivo de lechuga con agua tratada y agua sin tratar.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. LA AGRICULTURA Y EL AGUA DE RIEGO

La agricultura es una de las actividades económicas más importantes en el Perú que representan una contribución del 5,86% al PBI y 24.4% de los ocupados. Esta actividad utiliza el 80% del total de agua superficial empleada según datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2019). Por ello, el riego representa un factor determinante para el incremento de la seguridad alimentaria, el crecimiento agrícola y productivo.

Una amenaza existente del deterioro de la calidad del agua de riego son los vertimientos de efluentes municipales e industriales a las aguas superficiales. De estas, los ríos constituyen la fuente principal de agua de riego en el Perú.

4.2. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

La calidad del agua para riego, está determinada por la concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017). Asimismo, la calidad puede verse afectada por las condiciones de actividades humanas o naturales. Las humanas a consecuencia de los efluentes de las industrias, de las aguas residuales domésticas y la escorrentía superficial de los campos de cultivo principalmente y naturales por ejemplo en América Latina, la presencia de arsénico en aguas superficiales y subterráneas se relaciona principalmente al vulcanismo desarrollado en la Cordillera de Los Andes (Castro de Esparza, 2015).

El río Rímac, se encuentra contaminado con trazas de metales pesados provenientes de actividades mineras e industriales; donde el plomo, principal agente contaminante, ha excedido el límite máximo permisible de la normativa peruana DS N° 004-2017-MINAM (Estándares de calidad ambiental para agua categoría III), y se ha incrementado desde 1997 hasta el 2002 (Juárez, 2012); asimismo el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de

Lima Metropolitana (SEDAPAL) registró que en el mes de enero de 2017, la concentración máxima de plomo en el río Rímac alcanzó 1,949 mg.l⁻¹ cifra mayor en 6187,1% a lo registrado en enero de 2016 (0,031 mg.l⁻¹) (INEI, 2017). Por tanto, el río Rímac, se ha convertido en uno de los principales cursos de agua del Perú, donde se descargan aguas residuales sin tratamiento previo (INEI, 2015).

4.3. CONTAMINACIÓN POR METALES

Se define como contaminación, a la introducción directa o indirecta como consecuencia de la actividad humana de sustancias, vibraciones, calor o ruido en el aire, el agua o el suelo que pueden ser nocivos para la salud humana o la calidad del medio ambiente, causar daños a la propiedad material o perjudicar o entorpecer las actividades recreativas y otros usos legítimos de medio ambiente. Asimismo, las concentraciones anómalas de metales pesados en el agua pueden deberse básicamente a dos tipos de factores: causas naturales y causas antropogénicas (Juárez, 2012).

4.4. PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN DE CULTIVOS POR METALES

Las principales fuentes de contaminación son:

4.4.1. Aguas para riego

Las aguas superficiales contaminadas y las aguas residuales utilizadas para el riego son las fuentes principales de metales en el suelo. Los metales muestran una acumulación considerable mediante el riego continuo a largo plazo con estas aguas contaminadas y esto conduce a la acumulación de metales en los cultivos alimentarios (Arora et al., 2008; Mapanda et al., 2005) , mencionan que al evaluar el efecto del riego a largo plazo con aguas contaminadas con metales sobre suelos bajo cultivos de hortalizas, descubrieron que la concentración de cadmio, níquel, cromo y plomo variaba de 2.0 a 3.4 mg.kg⁻¹, de 9 a 19 mg.kg⁻¹, 33 a 225 mg.kg⁻¹ y 22 a 41 mg.kg⁻¹ respectivamente. Alghobar y Suresha (2017) manifiestan que un nivel muy alto de acumulación de metales en los tomates cuando se riega con aguas residuales, ratificando la considerable concentración de diferentes metales en el suelo y luego en las verduras.

4.4.2. Fertilizantes y pesticidas

Se considera que las prácticas agrícolas como la aplicación de fertilizantes, pesticidas, compost y estiércol elevan la concentración de metales en el suelo (Khan et al., 2008; Zhang et al., 2010). Asimismo, los fertilizantes y pesticidas se utilizan indiscriminadamente para aumentar el rendimiento del cultivo. El uso de fertilizantes a base de fosfato como el Triple Súper Fosfato y el Fosfato de Diamonio son más comunes entre los diferentes grupos de fertilizantes, porque el fósforo se considera un nutriente esencial para el crecimiento y el desarrollo del cultivo de plantas (Mortvedt, 1996 ; Grupta et al., 2019). De esta manera la demanda mundial de fertilizantes fosfatados aumentó de 41,7 millones de toneladas en 2013 a 42,7 millones de toneladas en 2014 con una tasa de crecimiento del 2,4%. Se espera que aumente a 46,6 millones de toneladas en 2018 con una tasa de crecimiento del 2,2% anual. Los metales como: cadmio, plomo, arsénico, cromo y zinc están contenidos en fertilizantes fosfáticos que se consideran peligrosos para la salud. Pero, la presencia de cadmio es una de las principales causas de preocupación, debido a su alta movilidad y tendencia a acumularse fácilmente en las verduras en grandes cantidades sin exhibir ningún efecto fitotóxico, por ello Chiroma et al. (2007) investigaron el efecto del pesticida DELVAP 1000EC en la concentración de cadmio, plomo y cobre en la espinaca, e informaron que la cantidad considerable de todos los oligoelementos se acumularon en las hojas de la espinaca.

4.4.3. Actividades industriales

Diversas actividades industriales contribuyen directa o indirectamente a través de la liberación de efluentes industriales como se aprecia en la Tabla 1. La tierra cercana al área industrial es vulnerable a la contaminación por metales debido a la descarga de efluentes no tratados o mal tratados, la eliminación de desechos sólidos en el área, los gases contaminados de las industrias también se emiten a la atmósfera, y posteriormente se depositan en el suelo y en los cultivos (Wu et al., 2011; Gabarron et al., 2017). Los metales se depositan en el suelo a distancias variables según la velocidad del viento y el tamaño de las partículas (Ogunkunle y Fatoba, 2014). Cada actividad industrial generalmente está asociada con algunos metales específicos, dependiendo de su producto o proceso de fabricación. Las industrias del cemento contribuyen al alto nivel de cadmio, cromo, cobre, plomo y zinc en la atmósfera, mientras que el níquel, cobalto, plomo y cobre se usan como catalizadores, modificadores y secadores (Jan et al., 2010). El cromo está relacionado con la actividad de la curtiembre y el zinc se usa para la producción de agroquímicos, como los fertilizantes. El

plomo está relacionado con la actividad de refinación de petróleo, mientras que el níquel está asociado con las emisiones petroquímicas (DuongTrang y Byeong-Kyu, 2009). Xiong et al., 2014 mostraron acumulación foliar de cadmio, antimonio, antimonio, zinc y plomo en espinacas y repollo cerca de una fundición. Asimismo, Naser et al., 2009 mencionan la alta concentración de plomo en tomates ($1,968 \text{ mg.kg}^{-1}$) y cadmio en espinacas ($1,40 \text{ mg.kg}^{-1}$) recolectados de un área industrial de Dhaka, Bangladesh.

Las fuentes relacionadas con la gasolina son los principales contribuyentes a los niveles elevados de plomo, cadmio, cobre, zinc y níquel en el suelo superior de los bordes de las carreteras (Pulles et al., 2012). El consumo de aceite del motor es responsable de la mayor emisión de cadmio, el desgaste de los neumáticos contribuye a la emisión más importante para el zinc, y el desgaste de los frenos es la fuente más importante de emisiones de cobre y plomo. Los materiales de relleno de betún y mineral en las superficies de las carreteras de asfalto también contienen metales, incluidos cobre, zinc, cadmio y plomo. Los metales pueden transportarse a los suelos de las carreteras por precipitación atmosférica o escorrentía de carreteras (Zhang et al., 2012).

Tabla 1: Ocurrencia de metales en efluentes de varias industrias

Industria	Al	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Ga	Hg	In	Mn	Mo	Os	Pb	Pd	Ni	Sb	Sn	Ta	Ti	Tl	U	V	W	Zn
Minería	x		x					x					x		x	x		x										x	x
Metalurgia y galvanoplastia		x	x			x	x	x		x			x	x				x		x								x	x
Industrias químicas	x		x		x			x	x	x	x	x					x	x				x	x	x		x			x
Tintes y pigmentos			x					x			x		x					x			x			x	x				
Fabricación de tintas		x							x		x									x									
Alfarería y porcelana										x				x						x						x			
Aleaciones						x						x					x		x				x						
Impresión					x					x							x	x					x						x
Fotografía		x		x				x		x						x				x	x					x			
Vidrio			x		x				x														x						x
Fábricas de papel	x		x							x			x							x		x	x	x					x
Procesamiento del cuero	x		x		x					x	x	x	x																x
Productos farmacéuticos	x		x								x	x	x				x						x						
Textiles	x		x		x			x			x	x	x				x			x	x								
Tecnología nuclear					x			x						x												x			
Fertilizantes	x		x					x		x	x	x	x		x					x	x								x
Producción de cloro-álcali	x		x					x		x	x	x	x		x					x	x		x						x
Refinación del petróleo	x		x					x		x	x	x	x																x

FUENTE: Nagajyoti et al., (2010)

4.4.4. Eliminación de residuos sólidos

La eliminación de residuos sólidos a través de vertederos a cielo abierto y rellenos sanitarios es una puerta importante de metales liberados en el suelo y agua mencionado por Ali et al. (2014). Los desechos sólidos incluyen desechos electrónicos, baterías usadas, desechos de pintura y desechos de galvanoplastia que aumentan el contenido de metales en los vertederos. El lixiviado se produce en asociación con la lluvia mediante la lixiviación lenta de elementos de los vertederos de desechos sólidos que se infiltran y normalmente resultan en el movimiento hacia las aguas subterráneas. Asimismo, debido a tal movimiento de lixiviados, los suelos se contaminan con metales, incluidos cadmio, cromo, cobre, hierro, plomo, manganeso, zinc entre otros. En muchos estudios se informó una concentración significativa de diferentes metales en diferentes hortalizas cultivadas en las proximidades del vertedero de desechos sólidos (Njagi et al., 2017).

4.4.5. Minería

La contaminación por la minería es una preocupación ambiental primaria a escala global, particularmente en los países en desarrollo. Algunos metales se dejan atrás como relaves durante el proceso de extracción y se dispersan en pozos abiertos y parcialmente cubiertos, algunos se transportan a través del viento, creando una serie de problemas ambientales, es por ello que Zhou et al. (2016) observaron la alta concentración de plomo y cadmio en las espinacas y el amaranto comestible cultivado en el área de la mina Shizhuyuan, China.

4.5. ABSORCIÓN Y TRANSPORTE DE METALES EN PLANTAS

La planta absorbe elementos esenciales y no esenciales del suelo en respuesta al gradiente de concentración y la absorción selectiva de iones o por difusión. Los cationes (Zn^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+}) están disponibles en la superficie de la raíz desde la disociación de sus formas complejas y se acumulan fuertemente en el apoplasto de la raíz, por ello, juega un papel importante en la absorción de iones metálicos. Los cationes se retienen en las células de la raíz o se translocan radialmente a la estela de la raíz y posteriormente se cargan en los tejidos del xilema y el floema de dos maneras conocidas como transporte apoplástico o pasivo y transporte simplástico o activo. De tal manera, que el transporte pasivo ocurre a través de los espacios intercelulares mediante la difusión de iones metálicos en la célula raíz a través de la solución del suelo, mientras que el transporte activo de iones metálicos se realiza a través de la membrana plasmática mediada por diferentes transportadores (Barberon

y Geldner, 2014).

La corriente de transpiración deriva la savia del xilema hacia arriba, donde los metales se distribuyen a los tejidos aéreos. Mientras, en el floema redistribuye los productos de la fotosíntesis y los nutrientes en todo el cuerpo de la planta entre las fuentes y el sumidero. Los metales pueden redistribuirse de hojas senescentes a través del floema a sumideros (por ejemplo, partes vegetativas en crecimiento y frutos en maduración). Los metales también pueden transferirse al floema antes de que la savia del xilema llegue a las células mesofílicas (Page y Feller, 2015).

4.6. EFECTOS DE LOS METALES SOBRE LAS HORTALIZAS

Los efectos directos de los metales incluyen la inhibición de la enzima citoplasmática y el daño estructural de la célula y sus orgánulos debido al estrés oxidativo. Indirectamente, afecta a la planta a través del reemplazo de nutrientes esenciales en los sitios de intercambio catiónico (Taiz y Zeiger, 2002).

Los metales se acumulan en la mayoría de las partes de vegetales, incluyendo hojas, raíces, tubérculos, tallos e incluso en todo el cuerpo de la planta como muestra la Tabla 2.

Tabla 2: Concentraciones de metales (mg.kg⁻¹) en la parte comestible de diferentes hortalizas

Nº	Vegetales	Fuentes de metales	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Referencia
1	<i>Solanum lycopersicum</i>	Riego de aguas	0.2	5.5	0.04	3.8	-	-	Mohod (2015)
2	<i>Daucus carota</i>	Riego de aguas residuales	<0.06	0.72	-	-	-	-	Jolly et al. (2013)
3	<i>Daucus carota</i>	Residuos industriales y urbanos	1.2	1.42	3.6	10.28	7.11	-	Ali & Al-Qahtani (2012)
4	<i>Solanum tuberosum</i>	Deposición atmosférica	0.03	0.012	0.98	8.9	-	-	Deribachew et al. (2015)
5	<i>Solanum lycopersicum</i>	Área industrial	0.9	2.2	8.2	-	-	-	Labhade (2013)
6	<i>Solanum lycopersicum</i>	Actividades agrícolas	14.17	-	54.56	61.13	-	-	Taghipour & Mosateri (2013)
7	<i>Allium cepa</i>	Deposición atmosférica	0.029	0.16	1.98	11.9	-	-	Demirezen & Aksoy (2006)
8	<i>Brassica oleracea</i>	Riego de aguas residuales	-	-	12.08	173.21	28.4	-	Mohamed et al. (2003)
9	<i>Daucus carota</i>	Actividades agrícolas	0.085	0.92	27.12	-	-	-	Intawongse & Dean (2006)

«continuación»

10	<i>Solanum lycopersicum</i>	Efluentes industriales	0.41	9.7	32.6	3.56	-	3.1	Liu et al. (2006)
11	<i>Solanum lycopersicum</i>	Actividades urbanas e industriales	0.77	2.59	4.47	14.4	7.39	14.64	Demirezen & Aksoy (2006)
12	<i>Raphanus sativus</i>	Actividades agrícolas	0.08	0.47	8.65	-	-	-	Demirezen & Aksoy (2006)
13	<i>Raphanus sativus</i>	Riego de aguas residuales	-	-	7.76	49.56	18.25	-	Sinha et al. (2005)
14	<i>Solanum melongena</i>	Actividades agrícolas	0.16	1.3	-	41.37	-	-	Demirezen & Aksoy (2006)
15	<i>Solanum melongena</i>	Riego de aguas residuales	-	-	11.8	46.53	8.85	-	Liu et al. (2006)
16	<i>Abelmoschus esculentus</i>	Área industrial	3.87	8.54	8.36	9.56	-	4.83	Mohamed et al. (2003)
17	<i>Solanum melongena</i>	Área industrial	5.83	4.93	11.23	12.83	-	5.24	Soloman et al. (2017)
18	<i>Solanum tuberosum</i>	Residuos industriales y urbanos	0.99	6.19	6.08	14.97	8.8	-	Soloman et al. (2017)
19	<i>Brassica oleracea</i>	Área Empresa de Almacenes y Centros	0.12	1.66	-	-	-	0.54	Guerra et al. (2012)
20	<i>Cucurbita maxima</i>	Área industrial	0.01	0.25	11.44	46.1	-	5.82	Islam and Hoque (2014)
21	<i>Spinacea oleracea</i>	Riego de aguas residuales	0.3	5.5	0.03	2.5	-	-	Mohod (2015)
22	<i>Coriandrum sativum</i>	Riego de aguas residuales	3.8	30	3.8	400	-	-	Anwar et al. (2016)
23	<i>Brassica oleracea</i>	Efluentes industriales	0.8	3.82	4.10	0.75	29.43	0.75	Gebrekidan et al. (2013)
24	<i>Spinacea oleracea</i>	Área industrial	1.46	4.7	62	98	676	1406	Ramteke et al. (2016)
25	<i>Coriandrum sativum</i>	Área industrial	0.75	1.8	71	121	59	1618	Ramteke et al. (2016)

FUENTE: Neha Gupta et al. (2019)

Los metales pueden ser fácilmente absorbidos por las raíces de las plantas y transferidos a la parte comestible. Por lo tanto, la alta concentración de metales en el suelo causa varios efectos adversos en los vegetales y en última instancia, en la salud humana. Es así que en Hong Kong descubrieron la contaminación de plomo, cadmio y cromo en los vegetales comercializados era de 16%, 26% y 0.56%, respectivamente. Los metales como cadmio y plomo son elementos no esenciales para las verduras y cuando una gran cantidad de estos elementos no esenciales se acumulan en el cuerpo de la planta, esto interfiere en la absorción y transporte de otros elementos esenciales, fotosíntesis, respiración, altera el metabolismo, la actividad enzimática, el crecimiento y la reproducción (Xu y Shi, 2015). Los efectos adversos de los metales en los vegetales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Efectos adversos de la concentración de metales en vegetales

Metales	Cultivos	Categoría	Efectos
Cd	• Patata	• No frondoso	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio en la morfología y el crecimiento de las raíces (Finger-Teixeira et al., 2010) • Aumento de la concentración de radicales libres (Singh y Tewari, 2003; Singh y Agrawal, 2007). • Disminución del contenido de proteínas foliares (Sharma et al., 2010b) • Reducción de la biomasa (Pandey y Sharma, 2002) • Pardeamiento de las puntas de las raíces (Mohanpuria et al., 2007) • Reducción del rendimiento de materia seca de los brotes (Rizwan et al., 2017) • Disminución de la actividad de superóxido dismutasa y catalasa I (Islam et al., 2009) • Disminución del área foliar y de la biomasa seca foliar (León et al., 2002) • Reducción de la eficiencia y el rendimiento fotosintéticos (Hasan et al., 2011) • Reducción de pigmentos fotosintéticos en zanahoria (Sharma et al., 2010b) • Reducción de la absorción de nitrato y transporte desde las raíces a los brotes, inhibiendo la actividad de la nitrato reductasa en los brotes (Hernandez et al., 1996)
	• Mostaza	• No frondoso	
	• Zanahoria	• No frondoso	
	• Zanahoria	• No frondoso	
	• Repollo	• No frondoso	
	• Pepino	• No frondoso	
	• Ajo	• No frondoso	
	• Pimienta	• No frondoso	
	• Tomate	• No frondoso	
	• Zanahoria	• No frondoso	
• Guisante	• No frondoso		
Co	• Repollo	• No frondoso	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración púrpura rojiza a lo largo de los márgenes de las hojas cloróticas (Pandey y Sharma, 2002) • Reducción de la biomasa (Pandey y Sharma, 2002) • Disminución del crecimiento de los brotes y la biomasa (Li et al., 2009) • Reducción del contenido de nutrientes (Jayakumar et al., 2013) • Reducción del crecimiento de los brotes y la biomasa (Li et al., 2009) • Reducción de las actividades de las enzimas antioxidantes, disminución del contenido de azúcar, aminoácidos y proteínas de las plantas (Jayakumar et al., 2008) • Reducción de la longitud de los brotes, la longitud de las raíces y el área foliar total (Jayakumar et al., 2007) • Disminución del contenido de azúcar, aminoácidos y proteínas vegetales en el rábano (Jayakumar et al., 2007) • Disminución del potencial hídrico y la tasa de transpiración (Chatterjee y Chatterjee, 2000) • Disminución de la concentración de Fe, clorofila, proteína y actividad catalasa en hojas (Li et al., 2009)
	• Colza	• No frondoso	
	• Tomate	• No frondoso	
	• Frijol	• No frondoso	
	• Rábano	• No frondoso	
	• Coliflor	• No frondoso	
As	• Tomate	• No frondoso	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de las concentraciones de clorofila ayb (Chatterjee y Chatterjee, 2000) • Reducción del rendimiento de frutos, peso de hojas frescas (Barrachina et al., 1995) • Crecimiento atrofiado, clorosis y marchitamiento en canola (Cox et al., 1996) • Disminución del crecimiento y de los pigmentos fotosintéticos (Bergqvist et al., 2014) • Disminución del crecimiento y de los pigmentos fotosintéticos (Bergqvist et al., 2014) • Afecta el crecimiento y los pigmentos fotosintéticos (Bergqvist et al., 2014)
	• Canola	• No frondoso	
	• Zanahoria	• No frondoso	
	• Lechuga	• No frondoso	
	• espinacas	• No frondoso	
Cr	• Tomate	• No frondoso	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la adquisición de nutrientes vegetales en tomate (Moral et al., 1995) • Inhibición del proceso de germinación y biomasa vegetal (Nematshahi et al., 2012) • Marchitez de las puntas y daño de las raíces (Scoccianti et al., 2006). • Interrumpe la actividad metabólica y la translocación de nutrientes (Tiwari et al., 2013)
	• Apio	• No frondoso	
	• Rábano	• No frondoso	
Hg	• En la mayoría de las verduras	• Tanto frondosos	<ul style="list-style-type: none"> • Fuertemente fitotóxico para las células vegetales (Yadav, 2010)
Pb	• Frijol	• No frondoso	<ul style="list-style-type: none"> • Induce lesiones visibles y trastornos fisiológicos en las plantas (Zhou et al., 2007) • Aumento de los niveles de acetato de plomo (Hamid et al., 2010) • Disminución del contenido de clorofila (Hamid et al., 2010) • Disminución del contenido de clorofila (Sorail y Abd El-Fattah, 2001)
	• Guisante	• No frondoso	
	• Frijol	• No frondoso	
Cu	• Frijol	• No frondoso	<ul style="list-style-type: none"> • Acumulación en las raíces de las plantas y malformación de las raíces Phaseolus vulgaris (Cook et al., 1997) • Reducción de la absorción de micronutrientes (Chatterjee y Chatterjee, 2000) • Reducción del contenido de clorofila, crecimiento de las plantas, alteración de la estructura del cloroplasto y reducción de la actividad del fotosistema II (Doncheva et al., 2001)
	• Coliflor	• No frondoso Zn	
	• Guisante	• No frondoso	

FUENTE: Neha Gupta et al (2019).

4.7. EFECTOS DEL CONSUMO DE VEGETALES CONTAMINADOS CON METALES EN LA SALUD HUMANA

La contaminación de los alimentos por metales tiene una serie de efectos adversos en la salud humana debido a su naturaleza ubicua y recalcitrante. Los metales no esenciales pueden escapar de los mecanismos de control, como la unión a componentes celulares específicos, la homeostasis, el mal funcionamiento de los procesos celulares, el deterioro oxidativo y el transporte y, por lo tanto, tienen efectos tóxicos y letales. Los síntomas importantes de la toxicidad de metales en humanos son discapacidad intelectual en niños, demencia y depresión en adultos, insomnio, enfermedades renales y hepáticas, inestabilidad emocional y trastornos de la visión, aumentando la tasa de morbilidad y mortalidad (Huang y Cunningham, 1996).

Si bien la toxicidad que surge de la exposición repentina u ocupacional a cantidades sustanciales de metales generalmente afecta los sistemas orgánicos, la gravedad de la toxicidad depende del tipo y la forma de los metales, la ruta de exposición y la duración, y también de la susceptibilidad del individuo. La ingesta dietética de metales a través de vegetales contaminados puede causar varias enfermedades crónicas. El consumo de alimentos contaminados con metales puede agotar severamente algunos nutrientes esenciales en el cuerpo. Este agotamiento es aún más responsable de la disminución de las discapacidades de desnutrición, las defensas inmunológicas, las facultades psicosociales deterioradas, el retraso del crecimiento intrauterino y el alto riesgo de tasas altas de cáncer gastrointestinal (Jan et al., 2010).

En la Tabla 4 se puede observar algunos efectos adversos de vegetales contaminados con metales en la salud humana.

Tabla 4: Efectos adversos de vegetales contaminados con metales en la salud humana

Metales	Forma tóxica	Efectos agudos y crónicos de metales en fetos, recién nacidos y adultos
Pb	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Puede causar daño cerebral, anemia, parálisis y problemas gastrointestinales (Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda, 2009) • La exposición prolongada puede dañar los riñones y la reproducción (Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda, 2009) • Neurotóxico y venenoso para el desarrollo fetal (Odongo et al., 2015) • Afecta el sistema nervioso (Jones, 2009) • Afecta el desarrollo del Sistema Nervioso Central en el recién nacido (Manton et al., 2003) • Aumenta la incidencia de abortos espontáneos (Hertz-Picciotto, 2000) • La exposición de bajo nivel afecta el desarrollo intelectual de los niños pequeños (Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda, 2009) • En los niños, inteligencia reducida y disminución del cociente intelectual (CI) (USEPA, 2002) • Deterioro del desarrollo neuroconductual y disminución de la agudeza auditiva (Kaul et al., 1999) • Retraso en el crecimiento y comportamientos antisociales (Litvak et al., 1998; Amodio-Cocchieri et al., 1996) • La exposición crónica causa efectos adversos en el Sistema Nervioso Central, los riñones y el metabolismo de la vitamina D (ATSDR, 1999b)
Cd	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Tóxico para los riñones, causa daño pulmonar y cambios en la formación del esqueleto (Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda, 2009) • La deficiencia de hierro (Fe) durante el embarazo como resultado una alta absorción de Cd (Vaiserman, 2016) • Alteración endocrina (Rahman et al., 2016) • Redujo la transcripción del ARNm del receptor de LDL (Iavicoli et al., 2009) • Irritante pulmonar y gastrointestinal severo, sensación de ardor, náuseas y vómitos (Baselty Cravey, 1995) • La toxicidad aguda causa erosión del tracto gastrointestinal, lesión pulmonar, renal y coma (Baselt y Cravey, 1995; Baselt y Cravey, 2000) • La exposición crónica causa un efecto negativo en los niveles de serotonina y acetilcolina (Singhal et al., 1976)
As	As3+	<ul style="list-style-type: none"> • Cáncer (Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda, 2009). • Relacionado con anomalías cutáneas, vasculares y del sistema nervioso (Autoridad de Seguridad Alimentaria de Irlanda, 2009). • Aborto, hipertensión durante el embarazo y muerte neonatal (Milton et al., 2005) • Alteración endocrina (Rahman et al., 2016) • Reducción de la reparación del ADN e induce aberraciones cromosómicas (Hartmann y Speit, 1994)
Cr	Cr+6	<ul style="list-style-type: none"> • El Cr (VI) ingresa fácilmente a las células a través del canal aniónico específico de la citomembrana (Yang et al., 2013) • Produce especies reactivas de oxígeno (ROS) (Hamilton et al., 1998) • Aumenta el riesgo de aborto o aborto espontáneo (Yang et al., 2013) • Anomalías cromosómicas (Wise et al., 2004) • Roturas en la hebra de ADN (Xie et al., 2005)
Ni	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta el sistema pulmonar y la piel, potencial carcinógeno para los pulmones y causa alergias cutáneas (Kasprzak et al., 2003)
Sn	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Afecta el Sistema Nerviosos Central, defectos visuales, neumoconiosis (Argun et al., 2007)
Mn	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Neuropatías centrales y periféricas (Duruibe et al., 2007) • Disminución de la presión arterial sistólica (Athar y Vohora, 1995)
Zn	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Disfunción del sistema, insuficiencia hepática, insuficiencia renal y diarrea, orina con sangre e ictericia (Duruibe et al., 2007) • El Zn tiene los mismos signos de enfermedad que el plomo y se puede diagnosticar erróneamente como envenenamiento por plomo (McCluggage, 1991)
Cu	Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación y corrosión severas de las mucosas y cambios necróticos en el hígado y el riñón (Argun et al., 2007)

FUENTE: Neha Gupta et al (2019).

4.8. TRATAMIENTO DEL AGUA USANDO IONES FERRATO (VI)

4.8.1. Uso de iones ferrato en el tratamiento del agua

Debido a su fuerte propiedad oxidante, el ferrato (VI) o iones ferrato (VI) es relativamente inestable en presencia del agua. Durante el proceso de oxidación, los iones ferrato (VI) se reducen a iones férricos o hidróxidos férricos. Estos subproductos son recursos básicos para el proceso de coagulación. Asimismo, el Fe (III) producido luego de la reducción del ferrato (VI) es un buen coagulante/floculante, lo que convierte al ferrato (VI) en un producto químico de tratamiento de aguas multipropósito para la oxidación, coagulación y desinfección del agua. La propiedad coagulante del ferrato (VI) también ha demostrado remoción eficiente de algunos metales tóxicos, nutrientes, radionúclidos y materia orgánica natural. Por lo que el ferrato puede ser aplicado en un proceso de pre-oxidación así como en el proceso de coagulación. En este sentido, se ha estudiado y demostrado la efectividad del ferrato (VI) para oxidar y remover metales pesados tales como el arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio y zinc; así como una pluralidad de compuestos orgánicos e inorgánicos como amoníaco, cianuros, tiocianatos, sulfuros, alcoholes, toluenos, cicloalcanos, cetonas, carbohidratos, aminobencenos, entre otros. Además, el ferrato (VI) es efectivo para la inactivación de microorganismos y para la remoción de partículas coloidales y sólidos en suspensión en el agua (Jiang y Lloyd, 2002).

A pesar de su efectividad, el uso de ferrato (VI) para el tratamiento de agua presenta grandes retos como la dificultad para almacenar y transportar efectivamente las sales que contienen este anión, así como la necesidad de lograr un método de producción eficiente y competitivo en cuanto a costos frente a otras tecnologías disponibles. Ante esto, han surgido soluciones basadas en la producción in situ del ferrato (VI) para ser aplicado directamente sobre el cuerpo de agua, siendo la más aplicada la configuración on line en la que el ferrato (VI) se produce en un flujo paralelo al del agua a tratar para luego dosificarse en la cantidad necesaria para desinfectar el efluente (Licht y Yu, 2005).

4.8.2. Iones Ferrato (VI)

El ferrato es una molécula de hierro sobrecargado en la que el hierro está en el estado de oxidación +6; es mejor conocido como Hierro (VI). El Ferrato es extremadamente potente, puede ofrecer múltiples tratamientos de una sola aplicación, no crea subproductos de la

desinfección, es amigable con el medio ambiente, y resuelve los retos de tratamiento difíciles que otros oxidantes no pueden tocar. Lo más importante, el ferrato es a menudo la opción de tratamiento menos cara y más eficaz. Por otro lado el hierro es un elemento muy común presente en la naturaleza principalmente como hierro elemental Fe (0) al lado de los iones ferroso (Fe (II)) y férrico (Fe (III)). Los minerales de óxidos ferrosos y férricos incluyen además la wustita, hematita, magnetita, goethita, akaganeita etc. Adicionalmente a los tres estados de oxidación estables del hierro 0, +2, y +3, en un ambiente de fuerte oxidación causa la aparición de altos estados de oxidación +4, +5, +6, +8 etc. Estos estados de oxidación del hierro son comúnmente conocidos como ferratos (Maghraoui, 2015).

4.8.3. Métodos de preparación de los iones ferrato (VI)

Existen tres métodos de preparación de los iones ferrato (VI) en el laboratorio (Jiang y Lloyd, 2002). Estos son: (A) oxidación en seco, por calentamiento/fusión de varios minerales que contiene hierro-óxido-en condiciones de fuerte alcalina y el flujo de oxígeno. (B) método de electro- química, por oxidación anódica utilizando hierro o aleación como ánodo y NaOH o KOH como electrólito. Además, el principio de la síntesis implica la oxidación de sales de hierro en soluciones alcalinas usando concentraciones de NaCl como un estabilizador y (C) oxidación en húmedo, mediante la oxidación de una sal de Fe (III) a una condición alcalina fuerte y el uso de hipoclorito o cloro como oxidante.

4.9. CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO

4.9.1. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua para riego

La importancia de la calidad del agua para riego se debe a su impacto directo en los suelos y, por ende, en los cultivos que se desarrollen en este. Ello se debe a que el suelo recibe aporte de sales durante el riego, cuya concentración en el suelo puede variar cuando el cultivo absorbe el agua y ocurre la evapotranspiración. Los efectos de la calidad de agua empleada pueden variar de acuerdo a las características del suelo y del cultivo a regar, de las condiciones climáticas, de la intensidad y frecuencia del riego, del manejo de suelo y del cultivo; y del sistema de riego utilizado (Sharma & Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society, 2008).

4.9.2. Parámetros relevantes en la calidad del agua para riego

- **Potencial de Hidrógeno (pH)**

La prueba de pH mide el equilibrio entre los iones de hidrógeno positivos (H^+) y los iones hidroxilo negativos (OH^-). Esto indica si el agua es alcalina ($pH > 7$), neutra (7) o ácida (< 7) (DPI Agriculture Water and Irrigation Unit). Así mismo, indica que la medición del pH es una de las pruebas más importantes y de uso frecuente en la química del agua. Esto se debe a que prácticamente todas las fases del suministro de agua y el tratamiento de aguas residuales dependen del pH, por ejemplo, la neutralización ácido-base, el ablandamiento del agua, la precipitación, la coagulación, la desinfección y el control de la corrosión. Para el caso de riego con un pH de 5,5 a 8,5 es adecuado para el riego de cultivos (ECA agua categoría 3, 2017). Si el pH es mayor a 8, el calcio en el suelo puede precipitar y puede bloquear los equipos. Si el pH es menor a 6, puede comenzar la corrosión de las tuberías y accesorios de metal. Y si el pH es menor a 4, el agua puede contribuir a la acidez del suelo (Sharma & Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society, 2008).

- **Conductividad**

La conductividad es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. El principal efecto de una elevada conductividad eléctrica del agua en la productividad de los cultivos es la incapacidad de la planta para competir por el agua con los iones en la solución del suelo. Cuanto más alta es la conductividad eléctrica, menos agua hay disponible para las plantas, aunque el suelo pueda parecer húmedo, debido a que las plantas solo pueden transpirar agua "pura", el agua que las plantas pueden utilizar de la solución del suelo disminuye dramáticamente a medida que aumenta la conductividad eléctrica (Bauder et al., 2007).

- **Turbidez**

La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse sin cambios en la dirección a través de la muestra (American Public Health Association). La turbidez en el agua es causada por materia suspendida y coloidal, como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. La unidad de medida de la

turbidez es la unidad nefelométrica de turbidez o NTU por sus siglas en inglés (Nephelometric Turbidity Unit). Un alto grado de turbidez podría afectar los equipos de riego e incrementar su costo de tratamiento. Un valor aceptable para el agua de riego en la agricultura es de 10 NTU (Real Decreto 1620/2007) (Sharma, V. K. y Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society, 2008).

- **Aluminio**

El aluminio es el elemento metálico más abundante en el planeta, pero nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza. Se halla ampliamente distribuido en las plantas y en casi todas las rocas, sobre todo en las ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de aluminio silicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de aluminio o ambos. Asimismo, la toxicidad por aluminio reduce la profundidad de las raíces, aumenta la susceptibilidad a la sequía y decrece la utilización de los nutrientes del subsuelo. El aluminio afecta el alargamiento de las raíces reduciendo la actividad mitótica. El aluminio interfiere con la absorción, transporte y uso de varios elementos esenciales incluyendo cobre, zinc, calcio, magnesio, manganeso, potasio, fósforo y hierro (Cayetano, 2019).

- **Arsénico**

El arsénico está ampliamente distribuido en la corteza terrestre, sus formas más comunes son el sulfuro de arsénico o los arsenatos de metales. El arsénico llega al agua a través de la disolución de minerales, desde efluentes industriales y vía deposición atmosférica. En aguas superficiales bien oxigenadas, el arsénico (V) es generalmente la especie más común; bajo condiciones de reducción tales como las que se presentan en sedimentos de lagos profundos o aguas subterráneas, la forma más predominante es el arsénico (III). Un incremento del pH puede incrementar la concentración de arsénico disuelto en el agua. Debido a su toxicidad, el arsénico es también un importante contaminador de cultivos, aunque es absorbido por las plantas en concentraciones menores a la de sus suelos. Además la captación de arsénico es mayor en las raíces, que las semillas y los frutos. La concentración recomendada para las aguas de riego no debería superar los 0.1 mg.l^{-1} (Estándares de calidad ambiental para agua categoría III) (O'Neill, 1990).

- **Cadmio**

El cadmio es un metal pesado, de color plateado, con propiedades parecidas a las del cinc, con el cual se encuentra asociado en diversos minerales. Es utilizado en la industria para proteger contra la corrosión el fierro y el acero (galvanizado con cadmio), para aleaciones especiales.

Es uno de los metales traza del suelo más solubles y peligrosos debido a su alta movilidad y que en pequeñas concentraciones tiene efectos nocivos en las plantas por lo cual interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales como el calcio, magnesio, fósforo y potasio además de agua provocando desequilibrios nutricionales e hídricos. Uno de los síntomas principales es la clorosis producida por una deficiencia de hierro, fósforos o por la reducción del transporte de magnesio.

Concentraciones altas de este elemento produce alteraciones en la funcionalidad de la membrana plasmática y desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto, inhibiendo la síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación de CO₂ (Das et al., 1998; Rodríguez Serrano et al., 2008).

- **Hierro**

El hierro (Fe) es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. Se encuentra en hematitas, magnetita y limonita; así como en componentes importantes para los seres vivos, como la hemoglobina. El hierro es ampliamente utilizado para la elaboración del acero y otras aleaciones. Generalmente, en las aguas subterráneas el oxígeno disuelto está agotado, por ello cualquier hierro soluble se encuentra en estado ferroso; cuando es expuesto al aire o con la adición de oxidantes, el hierro ferroso se oxida al estado férrico (Fe³⁺) y puede hidrolizarse para formar un óxido férrico hidratado, insoluble, rojo. Asimismo, la concentración recomendada para las aguas de riego de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura es de 5 mg.l⁻¹ (American Public Health Association) (Sharma y Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society, 2008).

- **Plomo**

Sus fuentes naturales son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de los minerales de plomo y las emanaciones volcánicas. La galena es la principal fuente de producción de plomo y se encuentra generalmente asociada con diversos minerales zinc y en pequeñas cantidades con el cobre, cadmio, fierro, etc. Cuando el plomo se libera al ambiente tiene un largo tiempo de residencia en comparación con la mayoría de los contaminantes. Como resultado tiende a acumularse en tierra y sedimentos. El plomo puede inhibir el crecimiento celular de plantas a concentraciones muy altas de lo establecido. La concentración recomendada para las aguas de riego no debería superar los 0,05 mg.l⁻¹ (Estándares de calidad ambiental para agua categoría III) (Cayetano, 2019).

- **Zinc**

El mineral principal que sirve como fuente de obtención de Zinc es la Escalerita (ZnS). La masa fundamental de los yacimientos de escalerita, lo mismo que la Galena (PbS), a la que va asociada casi siempre, es de origen hidrotermal. Los estudios en plantas han demostrado que aunque sea un elemento esencial para las plantas en altas concentraciones el zinc puede ser considerado como fitotóxico, afectando directamente la producción de cultivos y fertilidad del suelo. Las concentraciones en los suelos que varían entre 70 - 400 mg.kg⁻¹ se clasifican como críticas, arriba de las cuales la toxicidad es considerada como probable (Alloway, 1990). La concentración recomendada para las aguas de riego no debería superar los 2 mg.l⁻¹ (Estándares de calidad ambiental para agua categoría III) (Cayetano, 2019).

4.10. CULTIVO DE LA LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)

4.10.1. Origen

Para muchos autores el origen de la lechuga como tal no está muy claro, pero suelen afirmar que procede de la India. Es así que el cultivo de la lechuga se remonta a una antigüedad de 2500 años, siendo conocida por griegos y romanos. Las primeras lechugas de las que se tiene referencia son las de hoja suelta, aunque las acogolladas eran conocidas en Europa en el siglo XVI (Aranceta y Pérez, 2006).

4.10.2. Clasificación Taxonómica

Según la Dirección de Agricultura (2002), la lechuga presenta la siguiente clasificación taxonómica:

Reino: Vegetal

Clase: Angiosperma

Subclase: Dicotiledoneae Orden: Campanulales

Familia: Compositae

Género: *Lactuca*

Especie: *sativa* L.

4.10.3. Morfología

Es una planta bianual, con hojas más o menos redondas y semillas provistas de vilano plumoso. Su capacidad de germinación es de 4 a 5 días según Biblioteca de la Agricultura (2000). Según LNFOAGRO (2000), menciona que la lechuga presenta:

- Raíz.- Que no llega nunca a sobrepasar los 0,25 m de profundidad.
- Hojas.-Estas están colocadas en roseta, desplegadas al principio; en unos casos siguen así durante todo su desarrollo (variedades romanas), y en otros se acogollan más tarde. El borde de los limbos puede ser liso, ondulado o aserrado.
- Tallo.- Es cilíndrico y ramificado, es comprimido y en este se ubican las hojas muy próximas entre sí, generando el hábito de roseta típico de la familia.
- Inflorescencia: Son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos.
- Semillas: Están provistas de un vilano plumoso.

4.10.4. Fenología del Cultivo

El cultivo de la lechuga se divide en cuatro fases (Universidad de Valladolid, 2012):

- **Fase de plántula:** Se da la aparición de la radícula y la emergencia de los cotiledones, seguidamente un crecimiento radicular en profundidad y luego la aparición de 3 a 4 hojas verdaderas, esta fase comprende una duración entre 3 a 4 semanas.
- **Fase de roseta:** Se da la aparición de nuevas hojas y una disminución en la relación largo- ancho de folíolos, se produce un acortamiento de los pecíolos y finalmente la

formación de una roseta con 12 a 14 hojas, la duración de esta fase varía de 3 a 4 semanas.

- **Fase de formación de la cabeza:** Las hojas se vuelven más anchas que largas y toman cierta curvatura por el eje de la nervadura central, con lo que las nuevas hojas quedan envueltas por las formadas anteriormente, la duración de esta fase va de las 2 a las 3 semanas de duración.
- **Fase de floración:** La cabeza pierde calidad, las hojas se toman un sabor amargo, se alargan y el tallo comienza a elongarse y posteriormente se da la emisión de las inflorescencias.

4.10.5. Variedades de lechuga

Angulo (2008), menciona que las lechugas se pueden clasificar en los siguientes grupos botánicos:

- **Parris Island Cos (Romana):** Destaca especialmente por sus hojas crujientes y de sabor dulce, con una atractiva cabeza uniforme y grande y con un altura de 10 pulgadas, presenta hojas de color verde profundo exterior que protege el corazón de color blanco cremoso. El tipo de hoja es lisa, verde amarillenta. La madurez fisiológica se produce a los 70 - 75 días.
- **White Boston:** Tiene un porte de pequeño a mediano y las hojas son de un color verde mantecosa. La cosecha se realiza a los 70 - 80 días.
- **Alface veneranda (Orgánica):** Sus hojas son de un color verde claro, tolerante a la pudrición y temperaturas elevadas. La cosecha se produce a los 60 - 65 días.
- **Grand rapid:** De porte grande, no forma cogollo con hojas sueltas, tipo de planta recostada arrugada, la forma de la hoja es crespada, de un color verde claro. La cosecha se produce a los 70 - 80 días.

- **Great Lakes 659:** De tamaño mediano y cobertura foliar externa compacta, es tolerante a quemaduras de punta. con hojas atractivas y borde ligeramente rizados. La cosecha se produce a los 75 - 85 días dependiendo de las condiciones de crecimiento. Buen comportamiento de templado a templado cálido

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto se llevó a cabo en el Centro Experimental La Molina, perteneciente a el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), que es un organismo técnico especializado del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). Así mismo, el diseño y desarrollo de los reactores de iones ferrato (VI) se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad de Lima.

5.2. IMPLEMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AGUA DE RIEGO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL LA MOLINA

Se realizó la implementación de una unidad de tratamiento de agua para riego con iones ferrato (VI) en la parcela experimental del Centro Experimental La Molina, la cual estuvo conformada por cuatro sub sistemas:(i) reactor de iones ferrato (VI), (ii) subsistema de control de pH, (iii) subsistema de remoción de sólidos y, (iv) subsistema de control de riego por goteo.

Esta unidad se diseñó para tratar el agua de riego necesaria para atender un área de cultivo de hasta 4240 m². La unidad se construyó en el marco del proyecto “093 PI” en alianza estratégica entre el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y la Universidad de Lima.

5.2.1. Subsistema reactor de iones ferrato (VI)

Los sub sistemas fueron diseñados y ensamblados en los laboratorios de la Universidad de Lima para posteriormente ser trasladados hasta los campos experimentales del Centro Experimental La Molina.

Este sub sistema fue diseñado para producir iones ferrato (VI) para el tratamiento de hasta 14 mil litros por día de agua de riego. Para lo cual se estimó un consumo de 50 microlitros de solución de ferrato (VI) para cada litro de agua cruda o sin tratar.

Para llegar a esta concentración el reactor de iones ferrato (VI) funcionó a una densidad de corriente de 80 A.m^{-2} durante 5 horas, luego el producto se recolectaba y almacenaba en un recipiente para su uso inmediato. El ión ferrato (VI) se produce por un proceso electroquímico en un reactor con celda dividida, una es la cámara anódica con un electrodo de hierro y la otra es una cámara catódica con un electrodo de grafito, separadas por una membrana de intercambio catiónico (CTIEM-1 Zibo Cantian, China 2.3 W.cm^2) con un diámetro de poro menor que 100 nm. Las partes de este sub sistema son:

- **Reactor de iones ferrato (VI)**

Se construyó utilizando placas de acrílico, placas de fierro y acero, sensores de nivel, válvulas, pernos y conectores industriales para su óptimo funcionamiento como se aprecia en la Figura 1.



Figura 1: Reactor de iones ferrato (VI)

- **Tanque de hidróxido de sodio (NaOH)**

Se almacenó la materia prima en un tanque de una capacidad de 30 litros, equipado con sensores de nivel para el funcionamiento automático como se aprecia en la Figura 2. El hidróxido de sodio (NaOH) líquido al 50% era bombeado desde este tanque a los reactores de iones ferrato (VI).



Figura 2: Tanque de hidróxido de sodio (NaOH) al 50%

- **Bombas peristálticas**

Se utilizaron bombas peristálticas de 12 VDC para llenar las recamaras de los reactores de iones ferrato (VI) con hidróxido de sodio como se ve en la Figura 3, para luego vaciar las recamaras con los iones ferrato (VI) hasta un receptor de almacenamiento de donde se dispondría para su dosificación en las aguas para riego.



Figura 3: Bombas peristálticas

- **Receptor de almacenamiento de iones ferrato (VI)**

La recuperación de la producción se almacenó en un receptor de 1 litro de capacidad, el cual está instalado con sensores de nivel para poder controlar el nivel de producción como se muestra en la Figura 4.

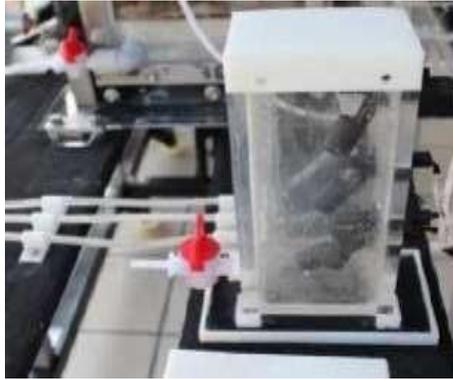


Figura 4: Receptor de iones ferrato (VI)

- **Tablero de control automatizado**

Para el funcionamiento del sistema de producción automatizada se construyó un tablero de control automatizado compuesto por: un controlador lógico programable (PLC Siemens S7 - 1200), tres fuentes de poder, una pantalla táctil o panel PC, reles de contacto seco, un swicht ethernet de 5 puertos, una fuente auxiliar de 12 VDC, una fuente auxiliar Siemes de 24 VDC, un interruptor termomagnético de 20 A, un interruptor diferencial de 25 A, ventiladores y demás componentes electrónicos como se ve en la Figura 5.



Figura 5: Tablero de control automatizado

- **Proceso de producción**

Etapa 1: Llenado; se realizó en un tanque que almacenó el hidróxido de sodio al 50% diluido (insumo químico), que luego se dosificó en cada uno de los reactores, para su llenado, por medio de bombas peristálticas que fueron encendidas y apagadas por el controlador del sistema (PLC).

Etapa 2: Producción; se realizó con el funcionamiento de tres reactores que produjeron de forma electroquímica los iones ferrato (VI), haciendo uso de sensores de nivel de líquido (para no sobrecargar al reactor de insumos), y un flujo de corriente regulado por el controlador del sistema (PLC) por 5 horas.

Etapa 3: Recuperación; en esta etapa se recuperó los iones ferrato (VI) producidos, haciendo uso de las bombas peristálticas, llevando el líquido producido al recipiente receptor, estas bombas peristálticas también fueron encendidas y reguladas por el controlador del sistema (PLC). Las etapas se muestran en la Figura 6.

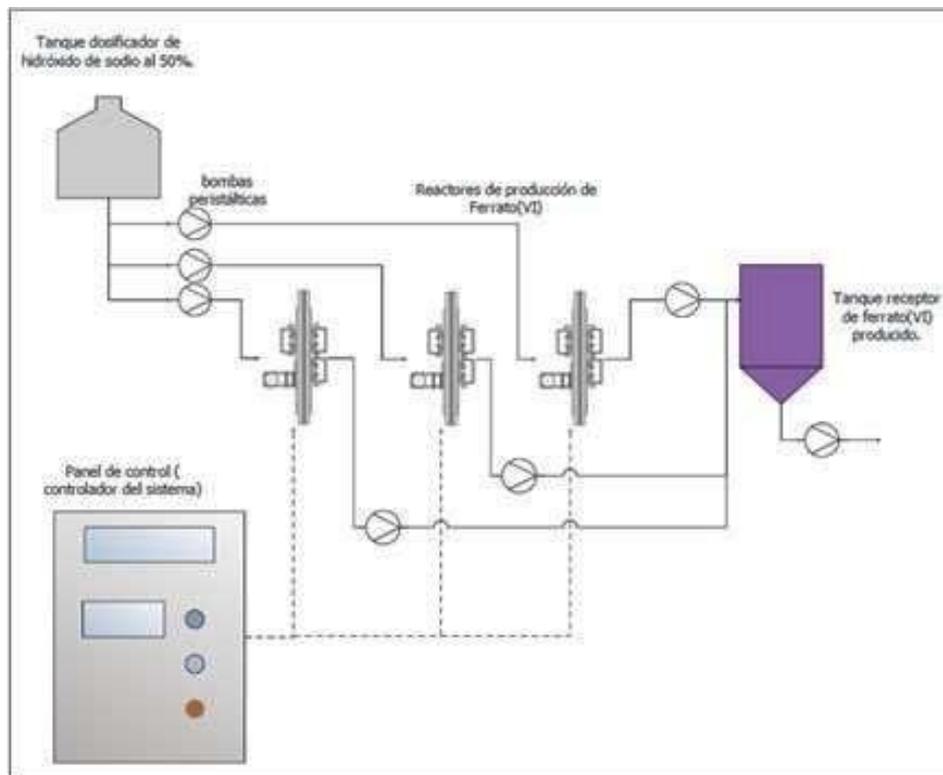


Figura 6: Diagrama de flujo del sistema de producción de ferrato (VI)

5.2.2. Subsistema de control de pH

Está constituido por una bomba centrífuga de 1 HP de potencia que succionó el agua de riego del reservorio y la impulsa para su tratamiento; además cuenta con un filtro de pie al inicio de la succión que permite filtrar el agua de solidos grandes. A esto se suman un par de filtros de anillas de 120 mesh instalados en paralelo para retener partículas mayores a 0,125 mm; un medidor de caudal para contabilizar el caudal de agua tratada y controlar el caudal de tratamiento ($0,4 \text{ l.s}^{-1}$); un mezclador construido con tuberías de $1\frac{1}{2}$ pulgadas de PVC de forma zigzagueante verticalmente, para mantener el flujo en un estado turbulento (Número de Reynold mayor a 4000) y lograr una buena mezcla de los iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico a lo largo de sus 22 metros de recorrido, para finalmente depositar el agua tratada a la bolsa geotubo.



Figura 7: Bombas de inyección de insumos químicos

Al inicio del mezclador se dosificó cloruro férrico a razón de $0,06 \text{ ml.s}^{-1}$ con una bomba peristáltica; un par de metros más adelante se dosificaron los iones ferrato (VI) a razón de excel con una bomba peristáltica; y dos metros más adelante se inyectó el floculante catiónico SIFLOC 13980 con una bomba tipo diafragma a razón de $0,4 \text{ ml.s}^{-1}$ como se aprecia en la Figura 7. De esta forma, los floc se formaron durante el resto del recorrido del agua en el mezclador, hasta llegar a la bolsa geotubo.

Partes que componen el Sub sistema de Control de pH

- 1 Válvula check canastilla de $1\frac{1}{2}$ pulgadas.
- 3 metros de tubería de succion de pvc de $1\frac{1}{2}$ pulgadas.

- 1 Bomba centrífuga de 1 HP de potencia.
- 2 Filtros de anillas 120 mesh.
- 1 Caudalímetro.
- 22 metros Tubería de impulsión de pvc de 1 ½ pulgadas.
- 1 Bomba peristáltica para la inyección de los iones ferrato (VI).
- 1 Bomba peristáltica para la inyección del cloruro férrico.
- 1 Bomba de diafragma para la inyección del floculante catiónico.

- **Prueba de jarras**

Se realizó la prueba de jarras para determinar la dosificación de los iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico para la coagulación- floculación. Considerando que todas las pruebas se realizaron con la misma agua de riego y las mismas condiciones experimentales. Para la prueba de jarras se empleó un agitador múltiple con variación continua de velocidad. Las paletas de agitación fueron de un material resistente a la corrosión y todas tenían la misma configuración y tamaño. La base iluminada fue útil para observar la formación de flocs. Todas las jarras fueron de la misma forma y tamaño (American Society for Testing and Materials, 2013).

Estas pruebas se realizaron en un equipo Test de Jarras de 1 litro de capacidad, en cada ensayo se adicionaron diferentes dosis de iones ferrato (VI) cloruro férrico ($FeCl_3$) y floculante catiónico SIFLOC 13980. Las muestras se agitaron a 200 RPM por 1 minuto y 60 RPM por 20 minutos. Después del periodo de agitación lenta, se midió la turbidez y el pH y se comparó con los valores del agua de riego sin tratar como se aprecia en la Tabla 5.

Tabla 5: Valores de turbidez y pH en el agua para riego sin tratar y agua para riego tratada

	Agua de riego sin tratar	Agua para riego con cloruro férrico, floculante catiónico y iones ferrato (VI)
Turbidez	41	5
pH	9,5	7,1

La dosificación de los insumos químicos se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Dosificación de insumos químicos para el tratamiento de agua para riego

	Caudal de dosificación (ml.minuto ⁻¹)	Tipo de bomba	Marca de la bomba
Iones ferrato (VI)	1	Peristáltica	Marca EMEC, modelo VCO 1502.
Cloruro férrico	3,6	Peristáltica	Marca Stenner, modelo 45MJJ1B3S
Floculante catiónico	24	Diafragma	Marca Stenner, modelo E10

5.2.3. Subsistema de remoción de sólidos

Conformado principalmente por una bolsa geomalla o geotubo modelo GT 500 de la marca TENCATE que recibió el agua proveniente del mezclador y cuyo tamaño de poro de 0,425 milímetros deja pasar el agua que filtra a través de sus paredes, dejándolo dentro de la bolsa los “flocs”. El agua de riego tratada se recolecta en un pequeño reservorio como se aprecia en las figuras 8 y 9. Finalmente el agua se almacenó en dos tanques de 5 m³ de capacidad cada uno y bombeado a las parcelas experimentales.

Partes del Subsistema de remoción de sólidos

- 1 Bolsa geomalla modelo GT 500 de 7 m³ de capacidad.
- 1 reservorio de recolección de agua tratada.

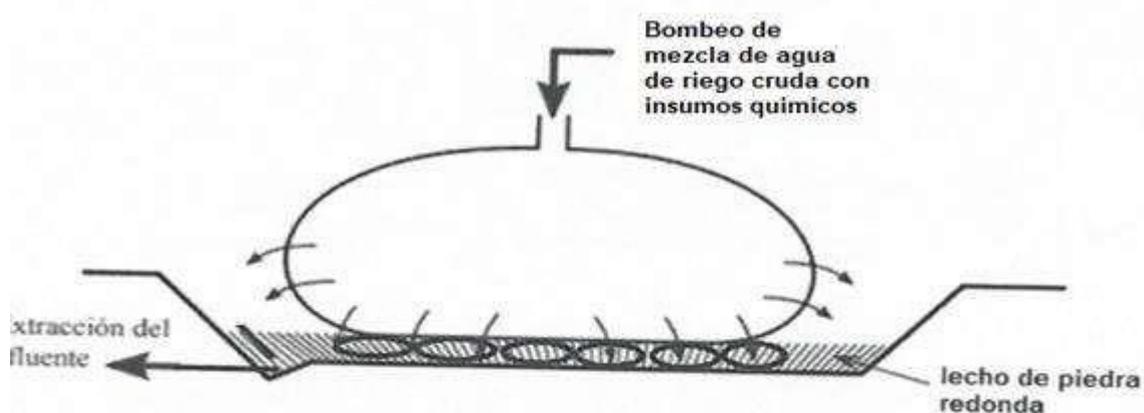


Figura 8: Esquema del subsistema de remoción de sólidos



Figura 9: Bolsa geotubo en operación

5.2.4. Subsistema de control de riego por goteo

Se diseñó e instaló un sistema de riego por goteo que llevaba agua tratada con iones ferrato (VI) desde la unidad de tratamiento al campo de cultivo, y otro que bombeaba agua de riego sin tratar desde el reservorio hasta el campo de cultivo.

Los componentes del sistema de riego se detallan a continuación:

- **Cabezal de riego**

Se entiende por cabezal de riego o centro de control al conjunto de equipos y elementos de riego utilizados para darle energía al agua, filtrarla, fertilizar y controlar presiones y caudales.

El cabezal de riego que llevaba agua tratada estaba conformado por una bomba centrífuga de 1 HP de potencia monofásica marca Pedrollo modelo HFm51A y un medidor de caudal, no necesitaba filtros ya que el agua provenía de la filtración en la bolsa geotubo.

El cabezal de riego que llevaba agua sin tratar estaba conformada por una bomba centrífuga de 1 HP de potencia monofásica marca Pedrollo modelo HFm51A, dos filtros de anillas instaladas en paralelo de 120 mesh de capacidad de filtrado y un medidor de caudal.

- **Red de distribución**

La red de distribución es la encargada de conducir el agua desde el cabezal a las plantas. Para ambas redes que conducían agua tratada con iones ferrato (VI) y aguas sin tratar, partían desde el cabezal con un diámetro de 2 pulgadas hasta llegar al arco de riego de cada subunidad, a partir de ahí se reducía a una tubería de PVC de 1,5 pulgadas. La red de distribución iba bajo tierra a una profundidad de 1 metro. Cada arco de riego correspondiente a cada sub unidad estaba conformada por una válvula angular Plasson de 1,5 pulgadas y un punto azul de toma de presión.

- **Goterros**

Para el riego de la lechuga (*Lactuca sativa*) se utilizaron cintas de riego de la marca Rivulis modelo Ro-Drip, con goteros distanciados a 20 cm, diámetro de la cinta de 16 mm de la clase 8 mil. Se eligió este gotero porque ya había sido probadas en el Centro Experimental La Molina y tenían una alta resistencia al taponamiento por algas.

5.3. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE METALES Y ARSÉNICO EN EL AGUA TRATADA CON IONES FERRATO (VI)

5.3.1. Diseño de experimento

Una vez instalada la unidad de tratamiento se planteó un experimento para evaluar la remoción de metales (aluminio, hierro, plomo y zinc) y arsénico en el agua de riego, además de los parámetros físico – químico como: el pH, la conductividad y la turbidez. Para ello se recogieron muestras en 3 situaciones distintas las cuales se explican a continuación:

- **Agua para riego sin tratar (M1)**

Se recogieron muestras de agua para riego sin tratar del reservorio que tiene el Centro Experimental La Molina para irrigar sus cultivos. Dicho reservorio tiene una capacidad de almacenamiento de 10 000 m³ que provienen del río Rímac por canalización.

- **Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico (M2)**

Se recogieron muestras de agua tratada sin la dosificación de los iones ferrato (VI), es decir, para este caso, sólo se dosificó cloruro férrico y floculante catiónico al

tratamiento de agua para riego, esto con el fin de comparar si los iones ferrato (VI) tienen un efecto significativo en el tratamiento del agua para riego. La dosificación de los insumos químicos fueron: $0,06 \text{ ml.s}^{-1}$ y $0,4 \text{ ml.s}^{-1}$ de cloruro férrico y floculante catiónico respectivamente; para un caudal de tratamiento de agua para riego de $0,4 \text{ l.s}^{-1}$.

- **Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico (M3)**

Se recogieron muestras de agua tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico con las dosificaciones: $0,017 \text{ ml.s}^{-1}$, $0,06 \text{ ml.s}^{-1}$ y $0,4 \text{ ml.s}^{-1}$ respectivamente; para un caudal de tratamiento de agua para riego de $0,4 \text{ l.s}^{-1}$.

5.3.2. Procedimiento de muestreo de agua y toma de datos

Las muestras se tomaron siguiendo el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N 010-2016-ANA). Se tomaron muestras simples para los parámetros de metales y turbidez. Los parámetros de campo como pH y conductividad se midieron en el mismo sitio de muestreo.

Para recolectar las muestras de agua tratada se tuvo que acoplar una bolsa geotubo pequeña al final de tubería zigzagueante de mezcla para que las muestras se puedan recoger con mayor facilidad como se aprecia en la Figura 10.

Las muestras para análisis de metales fueron recogidas en frascos de vidrio, a los que se añadió ácido nítrico (HNO_3) para su conservación. El transporte se realizó en un cooler con hielo y conservantes hasta los laboratorios de la empresa TYPESA, ubicado en la Provincia Constitucional del Callao.

Las muestras para análisis de turbidez fueron recogidas en frascos de polietileno, no necesitaban conservantes. El transporte se realizó en un cooler con hielo y conservantes hasta los laboratorios de la Universidad de Lima, ubicado en el distrito de Santiago de Surco.

Las muestras se recogieron los días martes y jueves, que eran los días en que se llenaba el

reservorio, entre los meses de octubre a diciembre del año 2019. El número de muestras tomadas se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7: Número de muestras por parámetro

Parámetros	Total de días muestreados	Número muestras de agua para riego sin tratar(m1)	Número muestras de agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante (m2)	Número muestras de agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante (m3)	Sub Total
Metales (se incluye el Arsénico)	14	14	14	14	42
pH	13	13	13	13	39
Conductividad	13	13	13	13	39
Turbidez	13	13	13	13	39
Total de muestras tomadas					159



Figura 10: Toma de muestras de bolsa Geotubo adaptada

5.3.3. Análisis de muestras de agua

La concentración de metales pesados y arsénico en las muestras de agua se evaluó por la técnica de espectroscopía de masa con plasma acoplado inductivamente (ICPMS) en los laboratorios de la empresa TYPASA.

La turbidez se midió en un turbidímetro Hach modelo 2100Q en los laboratorios de la Universidad de Lima.

El pH y la conductividad eléctrica se midieron en un equipo multiparámetro Hach modelo HQ40d en el mismo punto de muestreo.

5.4. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL CULTIVO DE LECHUGA DESPUÉS DE SER REGADAS CON AGUAS TRATADAS Y SIN TRATAR

5.4.1. Campaña Agrícola del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Para la campaña agrícola se utilizó la lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivar Great Lake 659, que fue almacigada en bandejas de 72 celdas en invernadero por 20 días, y luego trasplantadas a campo definitivo. Las lechugas fueron cosechadas para su análisis en laboratorio 75 días después; la campaña duró desde agosto hasta octubre del 2019.

Los plantines de lechuga fueron regados con agua potable reposada y cultivadas en un sustrato comercial PROMIX durante su tiempo de permanencia en el invernadero.

El cultivo estuvo sometido a un manejo integral de plagas, enfermedades y de riego diario para los dos tratamientos.

Tabla 8: Volúmenes de riego aplicado al cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

	Volumen Aplicado Mes Agosto (m³)	Volumen Aplicado Mes Setiembre (m³)	Volumen Aplicado Mes Octubre (m³)	Total (m³)
Agua de riego tratada	54,5	57,4	58,5	170,3
Agua de riego sin tratar	53,2	55,6	56,9	165,7

5.4.2. Diseño experimental

Se realizó el análisis estadístico para los dos tratamientos de agua de riego en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivar Great Lake 659, basado en un diseño completo al azar (DCA) con cuatro repeticiones; se tomaron 5 muestras por cada parcela experimental, haciendo un total de 40 muestras tomadas de las 8 parcelas con los dos tratamientos. Para el análisis de la información se utilizó el análisis de varianza, previa comprobación de

supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas en los resultados de las variables de respuesta. Posteriormente se realizó la prueba de Tukey, para contrastar la diferencia entre tratamientos con un nivel de significancia de 0,05.

Se evaluó la concentración de metales (aluminio, hierro, plomo y zinc) y arsénico en las partes comestibles del cultivo de lechuga después de aplicar el riego con agua tratada con iones ferrato (VI) y agua de riego sin tratar. Es importante aclarar que el tratamiento T1 no corresponde a un método de tratamiento de agua de riego, sino que es el testigo.

Los tratamientos se distribuyeron de forma aleatoria como muestra la Figura 11:

- T1 = Riego con agua sin tratamiento.
- T2 = Riego con agua tratada con iones ferrato (VI).

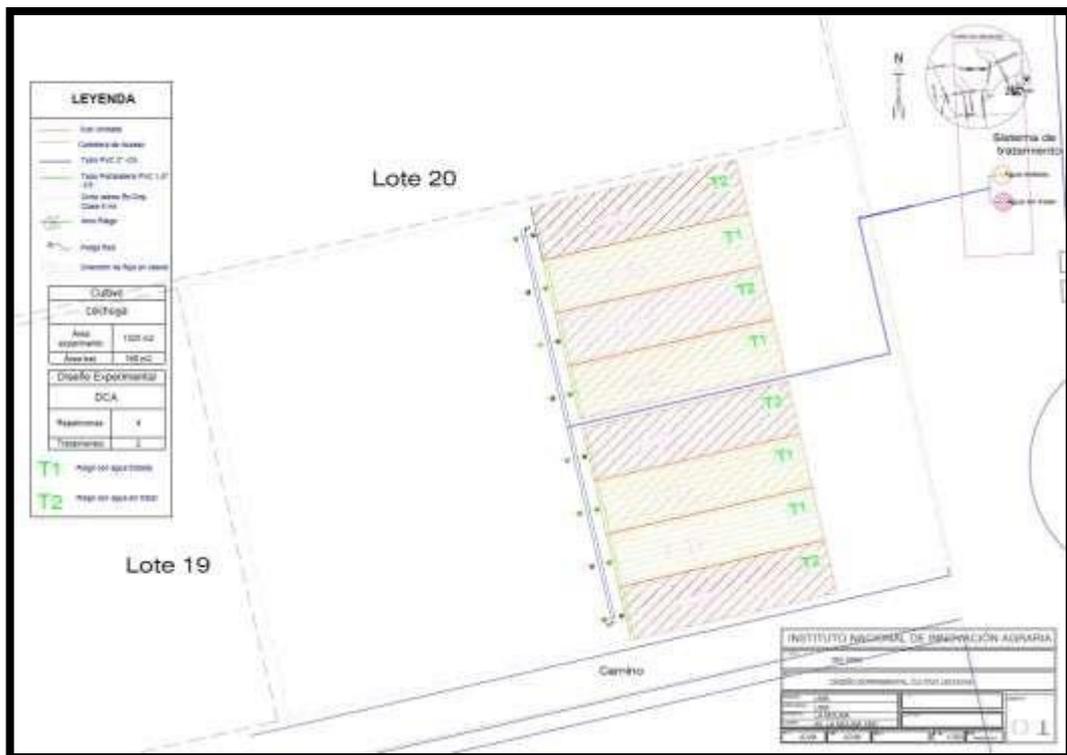


Figura 11: Diseño experimental DCA para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

5.4.3. Procedimiento de muestreo

Las plantas de lechuga se escogieron al azar, tomadas de la parte central de la parcela, evitando los extremos. Las plantas se encontraban en el estadio de cosecha. El producto a analizar consistió entre 5 a 8 hojas de lechuga por cada planta, se escogieron hojas internas sanas. El producto se colocó en bolsas de primer uso de manera individual y se trasladaron en coolers con hielo hasta los laboratorios de la empresa TYPASA ubicados en la provincia constitucional del Callao.

5.4.4. Análisis de muestras de lechuga

La concentración de metales pesados y arsénico se evaluaron por la técnica de espectroscopía de masa con plasma acoplado inductivamente (ICPMS) en los laboratorios de la empresa TYPASA.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN E INSTALACIÓN DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AGUA DE RIEGO EN EL CENTRO EXPERIMENTAL LA MOLINA

Se instaló una unidad de tratamiento de aguas para riego haciendo uso de iones ferrato (VI), conformada por 4 sub sistemas.

6.1.1. Subsistema reactor de iones ferrato (VI)

Se instaló un sistema con capacidad de producción de iones ferrato (VI) de 429 ml en promedio, frente a la estimación de 700 ml en el diseño, esto debido a que después de cada producción, no se lograba sacar el 100% de los iones ferrato (VI) de la recámara de producción, parte de los iones ferrato (VI) se adherían en las paredes y en la base disminuyendo la capacidad de la siguiente producción. El mantenimiento que se les daba consistía en la limpieza de las recamaras con agua potable después de cada producción y ocasionalmente si lo requería un desmontaje y desarmado total del reactor. En la Figura 12 se aprecia el Sub sistema de reactor de iones ferrato (VI).

La concentración molar se mantuvo constante a 0,25 M en todo el tiempo de producción porque se mantuvieron constantes los parámetros de funcionamiento como la densidad de corriente a 80 A.m^{-2} durante 5 horas.



Figura 12: Sub sistema reactor de iones ferrato (VI)

6.1.2. Subsistema de control de pH

Se instaló un sistema que mezcla el agua para riego con los insumos químicos a un caudal de $0,4 \text{ l.s}^{-1}$. Con la dosificación constante durante el tratamiento de $0,017 \text{ ml.s}^{-1}$, $0,06 \text{ ml.s}^{-1}$ y $0,4 \text{ ml.s}^{-1}$ de iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico respectivamente. Reduciendo el pH en promedio de 10,48 encontrado en el reservorio a 6,85 después de la dosificación de los insumos químicos.

Este sistema también necesito de limpieza y mantenimiento después de cada ciclo de producción de agua tratada, y una limpieza cada 15 días con dosificación de cloro para remover algas de las tuberías de mezcla. En la Figura 13 se aprecia el sub sistema de control de pH.



Figura 13: Subsistema de control de pH

6.1.3. Subsistema de remoción de sólidos

Se instaló un sistema que removía los flocs del agua tratada con iones ferrato (VI) provenientes del sub sistema de control de pH, filtrando el agua tratada a través de las paredes del geotubo. Se observó después de un tiempo de funcionamiento que los poros de las paredes del geotubo se obstruían con los flocs, haciendo que la bolsa se inflara y debido a la presión de la bomba, los sólidos dentro de la bolsa sobrepasaban la pared del geotubo; añadiendo sólidos indeseables en la estructura de recolección de agua tratada como se aprecia en la Figura 14.



Figura 14: Subsistema de remoción de sólidos

6.1.4. Subsistema de control de riego por goteo

Se instaló un sistema de riego por goteo como muestra la Figura 15 capaz de proveer a los campos de cultivo el agua tratada producida por la unidad de tratamiento con iones ferrato (VI) y el agua sin tratar del reservorio proveniente del río Rímac. Se comprobaron las presiones de operación en los arcos de riego, estos estaban entre los 5,6 a 6,5 metros de columna de agua necesarios para formar el bulbo húmedo requerido por la lechuga.

Las purgas a las cintas de riego se hacían una vez por semana, necesarios para evitar el taponamiento por algas.



Figura 15: Subsistema de control de riego por goteo

6.2. TRATAMIENTO DEL AGUA PARA RIEGO

6.2.1. pH

En la Tabla 9, se observan los promedios del pH, este varió entre 10,48 a 6,4. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 5,21%.

Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0.05 (Tabla 9 y Figura 16), indica que existen diferencias significativas entre sí entre las medias de los 3 tratamientos.

Las diferencias significativas entre los tratamientos M1 (agua para riego sin tratar) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico], se explica por el efecto que tiene el cloruro férrico en el agua, los iones metálicos hidratados actúan como ácidos fuertes, por lo cual causan un consumo de alcalinidad y un descenso del pH (Arboleda, 2000).

Las diferencias significativas entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico], se explica porque durante el proceso de oxidación de los iones ferrato (VI) estos se reducirán a iones férricos o hidróxidos férricos (Jian & Lloyd, 2002), es decir, los iones ferrato (VI) aumentaran el contenido de OH, en su proceso de oxidación, aumentado el pH de la solución.

Para M1 (Testigo) se encuentra fuera de los valores recomendados para el riego de vegetales (Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1) a diferencia de los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] que sí se encuentran dentro del rango de 6,5 a 8,5, valores recomendados para el riego de vegetales (Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1).

Tabla 9: pH observado en agua de riego

	Tratamientos	pH	
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	10,48	A
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	6,85	B
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	6,4	C

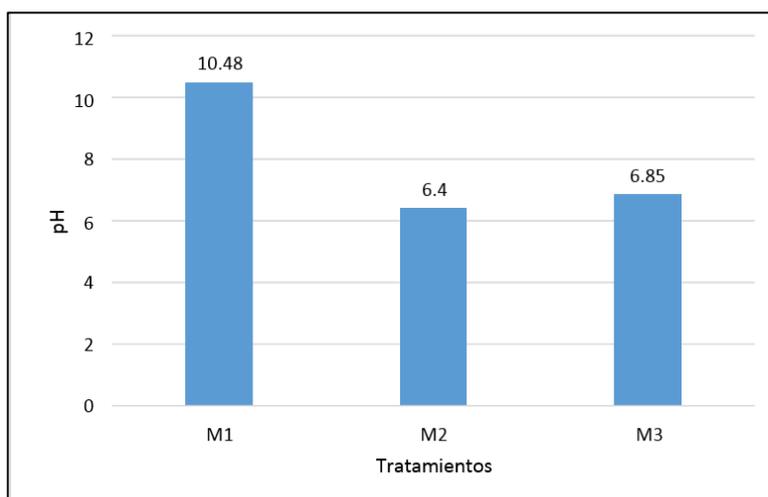


Figura 16: Efecto de los tratamientos en el pH del agua para riego

6.2.2. Turbidez

En la Tabla 10, se observan los promedios del parámetro turbidez, este varió entre 37,07 a 6,52 NTU. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 18,55%.

Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 10 y Figura 17), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M1 (Testigo) y los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] no muestran diferencias significativas.

La adición de los insumos químicos en los tratamientos M2 y M3 ayudó a disminuir la turbidez del agua para riego por sus propiedades coagulantes y floculantes. Sin embargo entre los tratamientos M2 y M3 debería haber una diferencia significativa, ya que los subproductos de la oxidación de los iones ferrato (VI) son iones férricos o hidróxidos férricos que son recursos coagulantes básicos. Por lo tanto, los iones ferrato (VI) también desempeñan coagulación después de degradar la sustancias contenidas en el agua (Jiang et al., 2014).

Para los tratamientos M2 y M3, como comparación se puede tomar en cuenta el valor aceptable para el Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 1, uso poblacional que debe ser inferior a 5 NTU.

Tabla 10: Turbidez observada en el agua de riego

	Tratamientos	Turbidez	
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	37,07	A
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	6,54	B
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	6,52	B

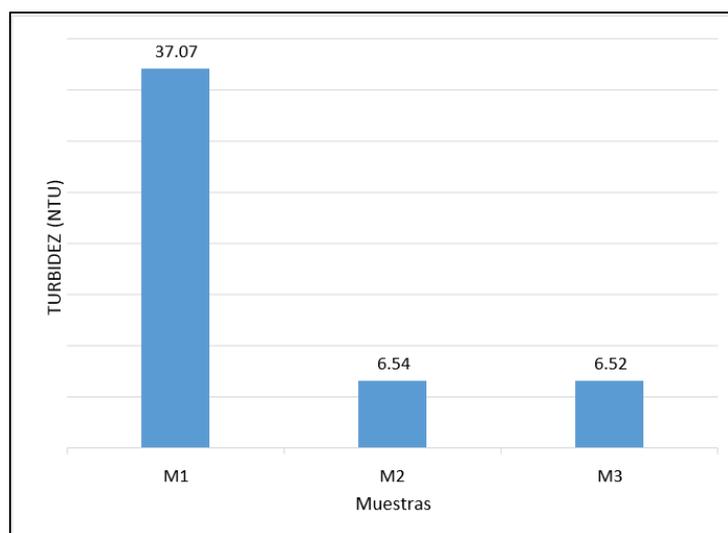


Figura 17: Efecto de los tratamientos en la turbidez del agua para riego

6.2.3. Conductividad

En la Tabla 11, se observan los promedios del parámetro de conductividad, este varió entre 801,62 a 730 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 5,65%.

Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 11 y Figura 18), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M1 (Testigo) y los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] no muestran diferencias significativas.

Los ferratos y el cloruro férrico son considerados sales de hierro, estos puede elevar la conductividad en los procesos de tratamiento de agua (Kelderman & Kruis, 2001).

Para los tres tipos de agua las medias se encuentran dentro de los valores permitidos para el riego de vegetales (Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1).

Tabla 11: Conductividad observada en el agua para riego

	Tratamientos	Conductividad	
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (IV), con cloruro férrico y floculante catiónico	801,62	A
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	752,23	B
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	730	B

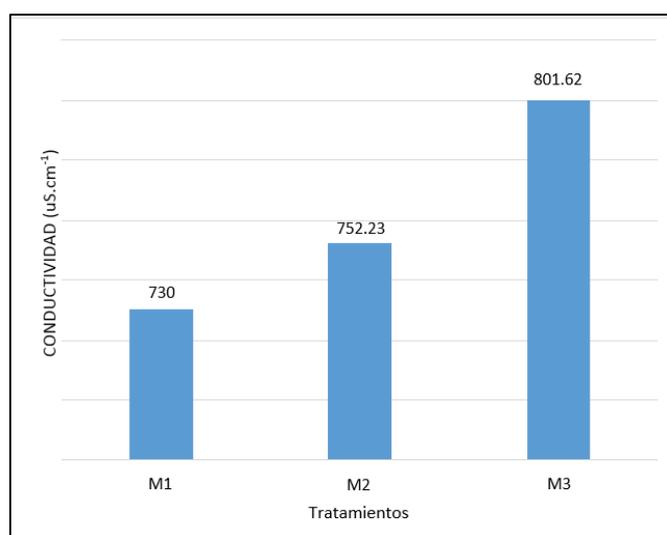


Figura 18: Efecto de los tratamientos en la conductividad del agua para riego

6.2.4. Aluminio

En la Tabla 12, se observan los promedios de concentración de aluminio, este varió entre 0,1012 a 0,00244 mg.l⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 94,2%.

Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 12 y Figura 19), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M1 (Testigo) y los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] no muestran diferencias significativas.

La eficiencia de remoción para la concentración de aluminio es de 75,8%, estos resultados son similares a los encontrados por Prucek et al. (2015) que pudo remover más del 70% de aluminio haciendo uso de iones ferrato (VI).

Tabla 12: Concentración de aluminio (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego

Tratamientos		Aluminio	
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	0,1012	A
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	0,0424	B
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	0,0244	B

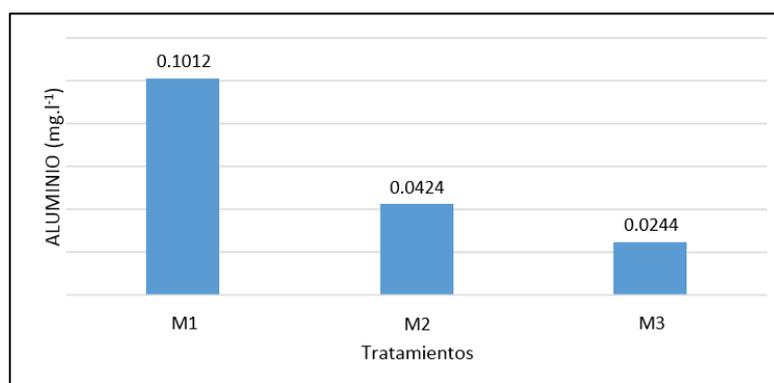


Figura 19: Efecto de los tratamientos en la concentración de aluminio en el agua para riego

6.2.5. Arsénico

En la Tabla 13, se observan los promedios de concentración de arsénico, este varió entre 0,02286 a 0,00297 mg.l^{-1} . Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 17,4%.

Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 13 y Figura 20), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M1 (Testigo) y los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] no muestran diferencias significativas.

Se observa que la remoción de arsénico se debe principalmente por el cloruro férrico y no al efecto de los iones ferrato (VI), esto difiere de los resultados encontrados por Pucek et al. (2013) que en condiciones similares pudo remover arsénico con eficiencia de 99% en un agua con contenido de arsénico de 0,5117 mg.l^{-1} aplicando pre oxidación con ferrato (VI) (1,8 mg.l^{-1}), coagulación con cloruro férrico (4 mg.l^{-1}).

Tabla 13: Concentración de arsénico (mg.l⁻¹) observado en el agua para riego

	Tratamientos	Arsénico	
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	0,02286	A
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	0,00308	B
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	0,00297	B

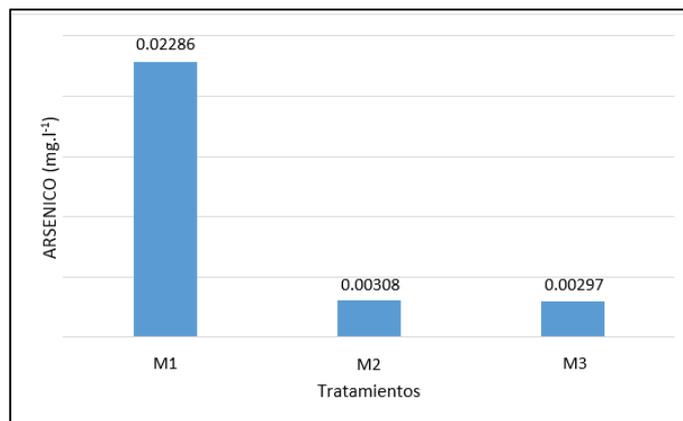


Figura 20: Efecto de los tratamientos en la concentración de arsénico en el agua para riego

6.2.6. Hierro

En la Tabla 14, se observan los promedios de concentración de hierro, este varió entre 1,4312 a 0,0656 mg.l⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 43,82%. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 14 y Figura 21), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M1 (Testigo) y los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] no muestran diferencias significativas.

Liu y Liu (2004) reporta remoción de hierro de 95,2% aplicando dosis de iones ferrato (VI) (2 mg.l⁻¹) en la etapa de pre oxidación pero aplicando aluminio (50 mg.l⁻¹) como coagulante. Las mayores cantidades de hierro en el agua tratada tanto para M2 y M3 es consecuencia del cloruro férrico, hace que el hierro se mantenga en el agua después de tratarlas.

Tabla 14: Concentración de hierro (mg.l⁻¹) observado en el agua para riego

	Tratamientos	Hierro	
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	1,4312	A
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	1,3921	A
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	0,0656	B

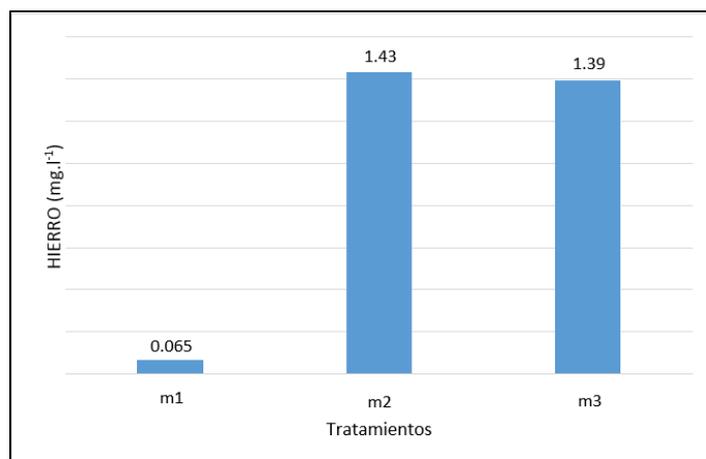


Figura 21: Efecto de los tratamientos en la concentración de hierro en el agua para riego

6.2.7. Plomo

En la Tabla 15, se observan los promedios de concentración de plomo, este varió entre 0,003143 a 0,00079 mg.l⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 82,94%. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 14 y Figura 21), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M1 (Testigo) y los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] no muestran diferencias significativas.

La eficiencia de remoción encontrada según las medias para el plomo es de 74,8%, Ma et al. (2008) reporta un remoción de 88,6% de plomo aplicando 1 mg.l⁻¹ de iones ferrato (VI), aunque hay una disminución de la concentración de plomo en M3 respecto a M2, no podemos decir que este sea consecuencia de los iones ferrato (VI) sino al efecto combinado

de cloruro férrico y iones ferrato (VI).

Tabla 15: Concentración de plomo (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego

	Tratamientos	Plomo	
M1	Agua para riego sin tratar (Testigo)	0,003143	A
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	0,001335	B
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	0,00079	B

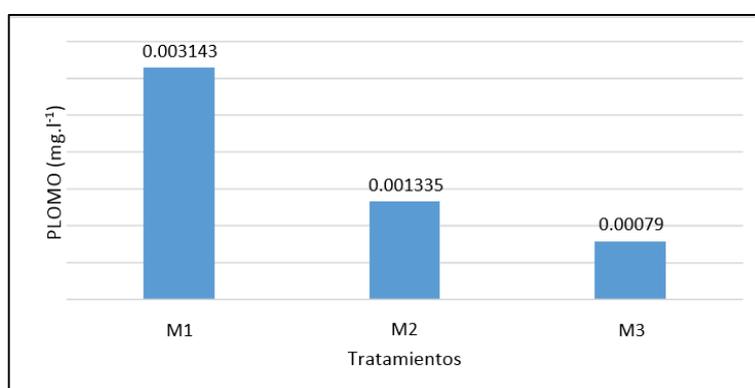


Figura 22: Efecto de los tratamientos en la concentración de plomo en el agua para riego

6.2.8. Zinc

En la Tabla 16, se observa la concentración de zinc. El coeficiente de variabilidad es de 69,01 %. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 16 y Figura 23), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y los tratamientos M1 (testigo) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico]. Y entre los tratamientos M2 (tratamiento con cloruro férrico y floculante catiónico) y M3 [tratamiento con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico] sí hay diferencias significativas.

El aumento de la concentración en M2 respecto a M1 puede deberse a datos extremos. La eficiencia de remoción de zinc con iones ferrato (VI) es de 55,4%, Gui et al. (2009) reportó haber encontrado una eficiencia de remoción del 74,8% haciendo uso de ferratos en aguas con condiciones iniciales de $4,2 \text{ mg.l}^{-1}$ de contenido de zinc.

Tabla 16: Concentración de zinc (mg.l^{-1}) observado en el agua para riego

	Tratamientos	Zinc	
M2	Agua para riego tratada con cloruro férrico y floculante catiónico	0,0401	A
M1	Agua para riego sin tratar	0,0238	B
M3	Agua para riego tratada con iones ferrato (VI), cloruro férrico y floculante catiónico	0,0106	B

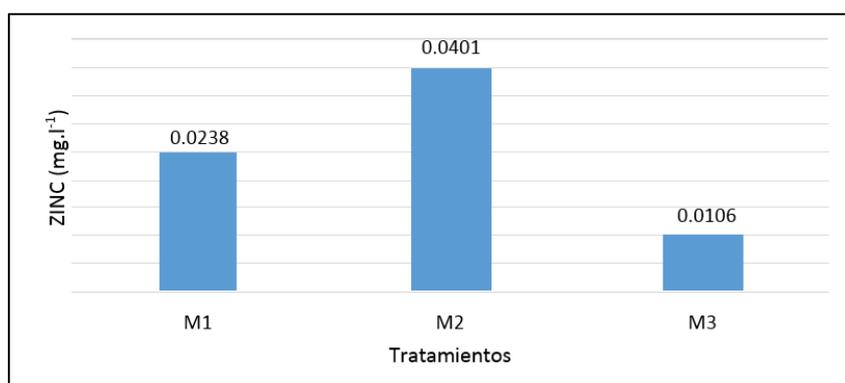


Figura 23: Efecto de los tratamientos en la concentración de zinc en el agua para riego

6.3. CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL CULTIVO DE LECHUGA CON AGUA TRATADA Y AGUA SIN TRATAR

6.3.1. Aluminio

En la Tabla 17, se observan los promedios de concentración de aluminio, este varío entre 2,3265 a 1,6158 mg.kg^{-1} . Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 18,85%. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 17 y Figura 24), indica que existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 (Riego con agua sin tratamiento) y el tratamiento T2 [Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)]. La concentración de aluminio es mayor con el tratamiento T1 (2,3265 mg.kg^{-1}) y menor con el tratamiento T2 (1,6158 mg.kg^{-1}).

La eficiencia de remoción de la concentración de aluminio en el agua de riego tratada con iones ferrato (VI) fue de 75,88%, esto explicaría la diferencia significativa encontrada en las hojas de lechuga después de ser regadas con los dos tipos de agua ya que el cultivo tomará

el aluminio mientras tenga una fuente disponible de ella, Mossor (2001) y Weatherford et al. (1997) reportan que la lechuga (*Lactuca sativa*) es una especie vegetal acumuladora de este metal.

Tabla 17: Concentración de aluminio (mg.kg^{-1}) observado en las hojas del cultivo de lechuga

Tratamientos		Aluminio	
T1	Riego con agua sin tratamiento (Testigo)	2,3265	A
T2	Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)	1,6158	B

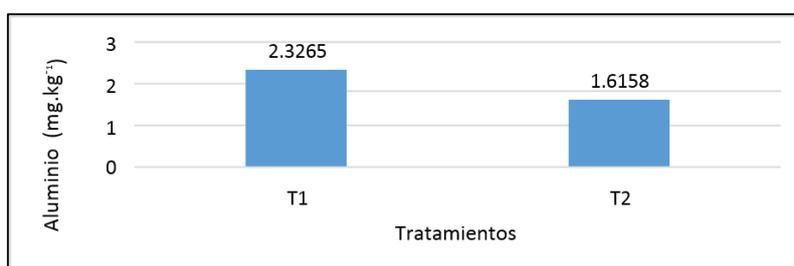


Figura 24: Efecto de los tratamientos en la concentración de aluminio en las hojas del cultivo de lechuga

6.3.2. Arsénico

En la Tabla 18, se observan los promedios de concentración de aluminio, este varío entre 0,0495 a 0,043 mg.kg^{-1} . Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 19,75%. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 18 y Figura 25), indica que no existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 (Riego con agua sin tratamiento) y el tratamiento T2 [Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)]. La concentración de arsénico es mayor con el tratamiento T1 (0,0495 mg.kg^{-1}) y menor con el tratamiento T2 (0,043 mg.kg^{-1}). Los valores encontrados están por debajo de los límites permitidos a 0,1 mg.kg^{-1} para la concentración de arsénico en lechuga (Llopart, 2017).

Tabla 18: Concentración de arsénico (mg.kg^{-1}) observado en las hojas del cultivo de lechuga

Tratamientos		Arsénico	
T1	Riego con agua sin tratamiento (Testigo)	0,0495	A
T2	Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)	0,043	A

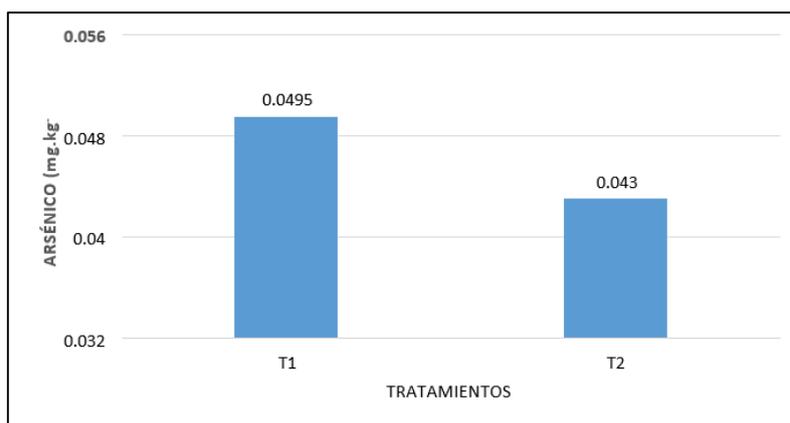


Figura 25: Efecto de los tratamientos en la concentración de arsénico en las hojas del cultivo de lechuga

6.3.3. Cadmio

En la Tabla 19, se observan los promedios de concentración de cadmio, este varío entre 0,0485 a 0,051 mg.kg⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 19,36%.

Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 19 y Figura 26), indica que no existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 (Riego con agua sin tratamiento) y el tratamiento T2 [Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)]. La concentración de cadmio es mayor con el tratamiento con T2 (0,051 mg.kg⁻¹) y menor con el tratamiento T1 (0,0485 mg.kg⁻¹).

Los valores medios de las concentraciones de cadmio encontradas las hojas de lechuga se encuentran por debajo de los 0,2 mg.kg⁻¹ de los límites permitidos para el consumo de hojas de hortalizas regulados por la FAO y OMS (2018).

Tabla 19: Concentración de cadmio (mg.kg⁻¹) observado en las hojas del cultivo de lechuga

Tratamientos		Cadmio	
T1	Riego con agua sin tratamiento (Testigo)	0,0485	A
T2	Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)	0,0513	A

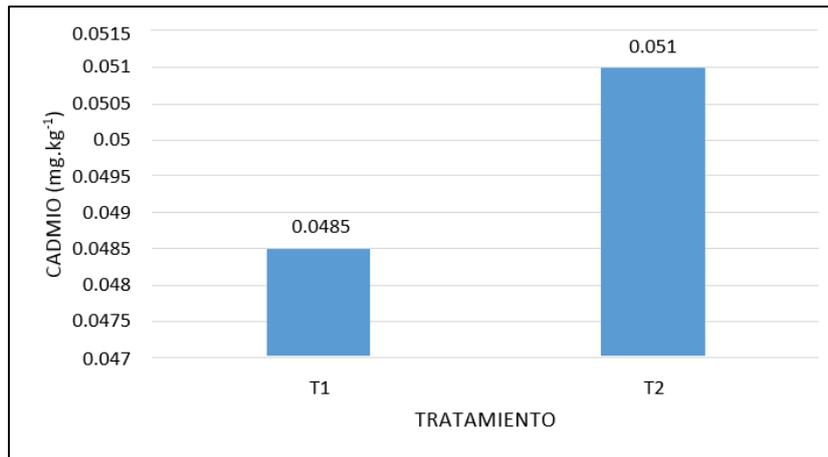


Figura 26: Efecto de los tratamientos en la concentración de cadmio en las hojas del cultivo de lechuga

6.3.4. Plomo

En la Tabla 20, se observan los promedios de concentración de plomo, este vario entre 0,03957 a 0,03607 mg.kg⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 21,30%. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 20 y Figura 27), indica que no existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 (Riego con agua sin tratamiento) y el tratamiento T2 [Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)]. La concentración de plomo es mayor con el tratamiento con T1 (0,03957 mg.kg⁻¹) y menor con el tratamiento T1 (0,03607 mg.kg⁻¹).

Los valores medios de concentraciones de plomo encontradas en las hojas de lechuga se encuentran por debajo de los 0,3 mg.kg⁻¹ de los límites permitidos para el consumo de hojas de hortalizas regulados por la FAO y OMS (2018).

Tabla 20: Concentración de plomo (mg.kg) observado en las hojas del cultivo de lechuga

Tratamientos		Plomo	
T1	Riego con agua sin tratamiento (Testigo)	0,03957	A
T2	Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)	0,03607	A

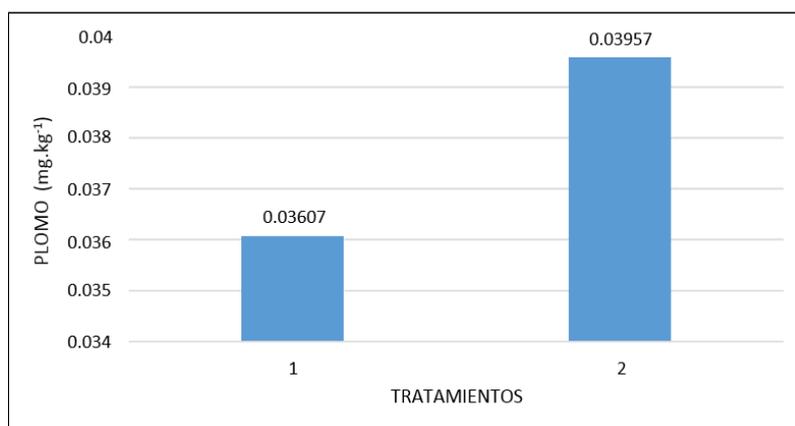


Figura 27: Efecto de los tratamientos en la concentración de plomo en las hojas del cultivo de lechuga

6.3.5. Zinc

En la Tabla 21, se observan los promedios de concentración de zinc, este vario entre 2,462 a 2,432 mg.kg⁻¹. Se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 22,86%. Al realizarse la prueba de comparación de Tukey al 0,05 (Tabla 21 y Figura 28), indica que no existen diferencias significativas entre el tratamiento T1 (Riego con agua sin tratamiento) y el tratamiento T2 [Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)]. La concentración de plomo es mayor con el tratamiento con T1 (2,462 mg.kg⁻¹) y menor con el tratamiento T2 (2,432 mg.kg⁻¹).

Los concentraciones de zinc encontradas en el cultivo de lechuga se encuentran por debajo de los 0,3 mg.kg⁻¹ de los límites permitidos para el consumo de hojas de hortalizas regulados por la Unión Europea (2006).

Tabla 21: Concentración de zinc (mg.kg⁻¹) observado en las hojas del cultivo de lechuga

Tratamientos		Zinc	
T1	Riego con agua sin tratamiento (Testigo)	2,462	A
T2	Riego con agua tratada con iones ferrato (VI)	2,432	A

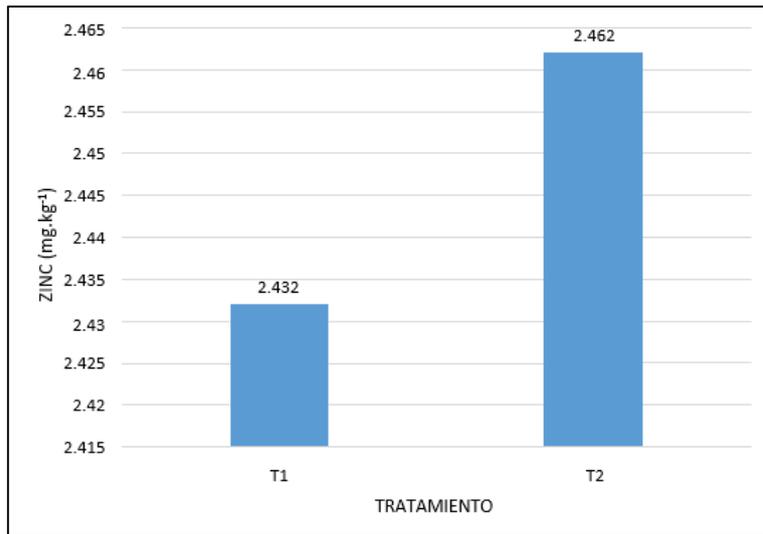


Figura 28: Efecto de los tratamientos en la concentración de zinc en las hojas del cultivo de lechuga

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Se instaló una unidad de tratamiento para el agua de riego en el Centro Experimental La Molina que produce iones ferrato (VI) con capacidad de tratamiento de 0,4 l.s-1 de aguas de riego.
- Se encontró que la aplicación de iones ferrato (VI) en el tratamiento del agua para riego tiene efecto significativo para el pH y conductividad. Mejora el pH del agua tratada para riego acercando su valor entre 6,5 – 8,5, valor recomendado por el Estándar Nacional de Calidad Ambiental-ECA para Agua, categoría 3, subcategoría D1, en cuanto a la conductividad aumenta sus valores pero estos están dentro de los valores normales que recomendados por la FAO para el agua de riego.
- Estadísticamente no se encontraron variaciones significativas en los parámetros de turbidez, concentración de aluminio, arsénico, hierro y plomo cuando se aplicaron los tratamientos con ion ferrato (VI), con cloruro férrico y floculante catiónico.
- En la evaluación del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) se encontró que la concentración de aluminio es significativamente menor cuando se riega con agua tratada con iones ferrato (VI) frente a las aguas sin tratar. Para los demás elementos (Ar, B, Cd, Cr, Fe, Pb y Zn) no hay diferencias significativas entre los dos tratamientos de riego aplicados. El riego con aguas tratadas con iones ferrato (VI) sirve para disminuir la concentración de Aluminio en hojas de lechuga.

7.2. RECOMENDACIONES

- Probar diferentes concentraciones molares de iones ferrato (VI) en el tratamiento de agua para riego, repetir el experimento en lugares en la cual las aguas superficiales se ven afectadas por el vulcanismo de la zona.
- Probar la eficiencia de remoción de otros contaminantes emergentes como los plaguicidas, productos farmacéuticos y sus metabolitos, que se descargan por efluentes industriales y de hospitales.
- Evaluar la concentración de metales en el suelo después de aplicar los tratamientos con iones ferrato (VI).

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alghobar y Suresha. (2017). Evaluación de la acumulación de metales en el suelo y tomates regados con aguas residuales de la ciudad de Mysore. India. Boletín de la Sociedad Ciencia y Agricultura. 16, 49-59.
- Ali, S.M.; Pervaiz, A.; Afzal, B.; Hamid, N.; Yasmin, A. (2014). Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. J. King Saud Univ. Sci. 26, 59–65.
- ANA (Autoridad nacional del Agua). (2019). Huella hídrica del Perú. Sector agropecuario.
- ANA (Autoridad nacional del Agua). (2016). Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas. Ministerio de agricultura y riego, 230.
- Angulo, M.C.M. (2008). Producción de Lechuga. Recuperado de www.monografias.com/.../producción-lechuga/produccion-lechuga2.shtml.
- Aranceta, J. y Pérez, C. (2006). Frutas, verduras y salud. Recuperado de www.uylibros.com/verlibro.asp?xprod.
- Arnon, D.I. y Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiol. 14(2):371–375.
- Arora, M.; Kiran, B.; Rani, S.; Rani, A.; Kaur, B. y Mittal, N. (2008). Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. Food Chemistry 111(4), 811-815.

- Aviñón, J.P.N. & Alonso, I.A. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas.
- Barberon, M. & Geldner, N. (2014). Radial Transport of Nutrients: The Plant Root as a Polarized Epithelium. *Plant Physiology* 166(2): 528-537.
- Bauder, T.A.; Waskom, R.M. & Davis, J.G. (2007) Irrigation Water Quality Criteria, Crop Series Irrigation, Number. 0.506.
- Biblioteca de la Agricultura. (2000). Horticultura. Barcelona: Edit. LEXUS.
- Castro de Esparza, M.L. (2015). El arsénico en los recursos hídricos del Perú. En *Aguas y arsénico natural en Perú*. Lima.
- Cayetano Terrel, P. (2019). Tecnologías para la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico.
- Chiroma, T.M.; Abdulkarim, B.I.; Kefas, H.M. (2007). The impact of pesticide application on heavy metal (Cd, Pb and Cu) levels in spinach. *Leonardo El. J. Pract. Technol.* 11, 117– 122.
- Dirección de Agricultura. (2002). Cultivo de la Lechuga (*Lactuca sativa*). Ministerio de Asuntos campesinos y Agropecuarios "MACA" - Colombia.
- DuongTrang, T.T.; Byeong-Kyu, L. (2009). Partitioning and mobility behavior of metals in road dusts from national-scale industrial areas in Korea. *Atmos. Environ.* 43, 3502– 3509.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura); OMS, (Organización Mundial de la Salud). 2018. Norma General para los Contaminantes y las Toxinas presentes en los Alimentos y Piensos. 75.

- Gabarron, M.; Faz, A.; Acosta, J.A. (2017). Effect of different industrial activities on heavy metal concentrations and chemical distribution in topsoil and road dust. *Environ. Earth Sci.* 76, 129.
- Gupta, N.; Yadav, K.K.; Kumar, V.; Kumar, S.; Chadd, R.P. & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2927–2942.
- Huang, J.W. y Cunningham, S.D. (1996). Fitoextracción de plomo: variación de especies en la absorción y translocación de plomo. *New Phytologist*, 1996, vol. 134, p. 75-84.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2015). Lima y Callao Compendio Estadístico. . Dirección Nacional de Estadística e Informática Departamental, Lima.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2017). Lima y Callao Compendio Estadístico. . Dirección Nacional de Estadística e Informática Departamental, Lima.
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2015). Perú: anuario de estadísticas ambientales 2014. Recuperado de www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1197/libro.pdf
- INFOAGRO. (2000). Cultivo de la Lechuga.
- Jan, F.A.; Ishaq, M.; Ihsanullah, I.; Asim, S.M. (2010). Multivariate statistical analysis of heavy metals pollution in industrial area and its comparison with relatively less polluted area: a case study from the City of Peshawar and district Dir Lower. *J. Hazard. Mater.* 176, 609–616.
- Jiang, J.-Q. y Lloyd, B. (2002). Progress in the development and use of ferrate (VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment. *Water Research*, 36(6),

1397– 1408.

Juárez, H. (2012). Contaminación del Río Rímac por metales pesados y efecto en la agricultura en el Cono Este de Lima Metropolitana. Lima – Perú.

Khan, S.; Cao, Q.; Zheng, Y.; Huang, Y.; y Zhu, Y. (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987), 152(3): 686- 92.

Kumar, P.; Soo, S.; Zhang, M.; Fai, Y. & Kim, K. (2019). Heavy metals in food crops : Health risks, fate, mechanisms and management. *Environment International*, 125(January), 365–385. 6/j.envint.2019.01.067.

Licht, S. y Yu, X. (2005). Electrochemical Alkaline Fe (VI) Water Purification and Remediation. *Environmental Science & Technology*, 39(20), 8071–8076.

Maghraoui, A. El, Zerouale, A. & Ijjaali, M. (2015). Process for the Synthesis of Ferrate (VI) Alkali Metal Dry. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 05(01), 10– 15.

Mapanda, F.; Mangwayana, E.N.; Nyamangara, J. & Giller, K.E. (2005). The effect of longterm irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 107:151-165.

Ministerio de Economía y Finanzas. (2011). Análisis funcional: Inversión pública en agricultura - riego. Recuperado de www.snip.gob.pe/contenidos/politicas/difusion/boletin/boletin4/analisis_funcional.pdf

Ministerio del Ambiente (2017). DS N° 004-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.

- Mortvedt, J.J. (1996). Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. *Fert. Res.* 43, 55–61.
- Naser, H.M.; Shil, N.C.; Mahmud, N.U.; Rashid, M.H. & Hossain, K.M. (2009). Lead, cadmium, and nickel contents of vegetables grown in industrially polluted non-polluted areas of Bangladesh. *Bangladesh J. Agric. Res.* 34 (4), 545–554.
- Njagi, J.M.; Akunga, D.N.; Njagi, M.M.; Ngugi, M.P.; Njagi, E.M.N. (2017). Heavy metal concentration in vegetables grown around dumpsites in Nairobi city county, Kenya. *World Environ.* 7 (2), 49–56.
- Nagajyoti, P.C.; Lee, K.D. & Sreekanth, T.V.M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.* 8, 199–216.
- Ogunkunle, C.O. & Fatoba, P.O. (2014). Contamination and spatial distribution of heavy metals in topsoil surrounding a mega cement factory. *Atmos. Pollut. Res.* 5, 270–282.
- O’neil , (1990). Arsenic. Heavy metals in soils. Part. B. Alloway, London: Blackie Press.
- Page, V. & Feller, U. (2015) Heavy Metals in Crop Plants Transport and Redistribution Processes on the Whole Plant Level. *Agron*, 5, 447-463.
- Pulles, T.; Denier van der Gon, H.; Appelman, W. & Verheul, M. (2012). Emission factors for heavy metals from diesel and petrol used in European vehicles. *Atmos. Environ.* 61, 641– 651.
- Sharma, V. K. & Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society. (2008). Ferrates : synthesis, properties, and applications in water and wastewater treatment.
- Shi, T.; Ma, J.; Wu, X.; Ju, T.; Lin, X.; Zhang, Y. & Li, X. (2018). Ecotoxicology and

Environmental Safety Inventories of heavy metal inputs and outputs to and from agricultural soils : A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164(July), 118–124.

Taiz, L. & Zeiger, E. (2002). *Plant physiology*. 3rd ed. *Ann. Bot.* 91, 750–751.

Universidad de Valladolid (UVA). (2013). El cultivo de la lechuga (en línea). Recuperado de https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/446/42109/1/Documento2.pdf

Wu, S.; Zhou, S. & Li, X. (2011). Determining the anthropogenic contribution of heavy metal accumulations around a typical industrial town: Xushe, China. *J. Geochem. Explor.* 110, 92– 97.

Xiong, T.T.; Leveque, T.; Austruy, A.; Goix, S.; Schreck, E.; Dappe, V.; Sobanska, S.; Foucault, Y. & Dumat, C. (2014). Foliar uptake and metal (loid) bioaccessibility in vegetables exposed to particulate matter. *Environ. Geochem. Health* 36, 897–909.

Xu, C.U.; Xulei, S.U.N.; Pengjie, H.U.; Cheng, Y.; Yongming, L.U.O.; Longhua, W.U. & Christie, P. (2015). Concentrations of Heavy Metals in Suburban Horticultural Soils and Their Uptake by *Artemisia selengensis*. *Pedosphere: An International Journal*, 25(6), 878– 887.

Yang, Q.; Li, Z.; Lu, X.; Duan, Q.; Huang, L. & Bi, J. (2018). Science of the Total Environment A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China : Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 642, 690–700.

Zhang, M.K.; Liu, Z.Y. & Wang, H. (2010). Use of single extraction methods to predict bioavailability of heavy metals in polluted soils to rice. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41 (7), 820–831.

Zhang, F.; Yan, X.; Zeng, C.; Zhang, M.; Shrestha, S.; Devkota, L.P. & Yao, T. (2012). Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 9, 1715–1731.

Zhou, H.; Yang, W.; Zhou, X.; Liu, L.; Gu, J.; Wang, W.; Zou, J.; Tian, T.; Peng, P. & Liao, B. (2016). Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 289.

IX. ANEXOS

Anexo 1: Análisis de varianza (ANVA) para la variable pH

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	129.851851	64.9259256	380.84	3.26	*
Error	36	6.1373231	0.1704812			
Total	38	135.989174				
CV	5.21					
Promedio	7.915128					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 2: Análisis de varianza (ANVA) para la variable Turbidez (NTU)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	8084.96224	4042.48112	420.13	3.26	*
Error	36	346.393938	9.622054			
Total	38	8431.35617				
CV	18.55					
Promedio	16.71487					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 3: Análisis de varianza (ANVA) para la variable conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	34934.5128	17467.2564	9.44	3.26	*
Error	36	66633.3846	18550.9274			
Total	38	101567.897				
CV	5.65					
Promedio	761.28					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 4: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de aluminio (mg.l⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	0.04512852	0.02256426	8.09	3.23	*
Error	39	0.10872238	0.00278775			
Total	41	0.1538509				
CV	94.23					
Promedio	0.056					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 5: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de arsénico (mg.l⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	0.00367075	0.02256426	648.44	3.23	*
Error	39	0.00011039	0.00278775			
Total	41	0.00378114				
CV	17.44					
Promedio	0.0096					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 6: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de hierro (mg.l⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	16.9195048	8.45975239	75.23	3.23	*
Error	39	4.38561288	0.11245161			
Total	41	21.3051177				
CV	34.82					
Promedio	0.962955					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 7: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de plomo (mg.l⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	0.00004249	0.00002125	10.01	3.23	*
Error	39	0.00008279	0.00000212			
Total	41	0.00012528				
CV	82.94					
Promedio	0.001756					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 8: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de zinc (mg.l⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	2	0.00610502	0.00002125	10.35	3.23	*
Error	39	0.01150078	0.00000212			
Total	41	0.0176058				
CV	69.01					
Promedio	0.024883					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 9: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de aluminio (mg.kg⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	1	1.01033113	1.01033113	7.32	3.23	*
Error	6	0.82865375	0.13810896			
Total	7	1.83898488				
CV	18.85					
Promedio	1.9711					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 10: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de arsénico (mg.kg⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	1	0.0000845	0.0000845	1.01	5.99	*
Error	6	0.000501	0.0000835			
Total	7	0.0005855				
CV	18.85					
Promedio	1.9711					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 11: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de cadmio (mg.kg⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	1	0.0000125	0.0000125	0.13	5.99	*
Error	6	0.000557	0.00009283			
Total	7	0.0005695				
CV	19.36					
Promedio	0.04975					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 12: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de plomo (mg.kg⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	1	0.00002457	0.00002457	0.38	5.99	*
Error	6	0.00038954	0.00006492			
Total	7	0.00041411				
CV	21.3					
Promedio	0.0378					

NS: no significativo

*: significativo

Anexo 13: Análisis de varianza (ANVA) para la variable concentración de zinc (mg.kg⁻¹)

Fuente de variación	GL	SC	CM	Fc	Ft	Sig. Tukey 0.05
Tratamiento	1	0.00177548	0.00177548	0.01	5.99	NS
Error	6	1.88015391	0.31335899			
Total	7	1.8819294				
CV	22.86					
Promedio	2.44					

NS: no significativo

*: significativo