



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**"Revisión sistemática: Técnicas para la remoción de  
metales pesados en humedales artificiales"**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL

**AUTORAS:**

Limaymanta Povis, Carol Joana (ORCID: 0000-0003-0726-1724)

Ochoa Espinoza, Karen Ruth (ORCID: 0000-0002-9746-9061)

**ASESOR:**

Dr. Sernaqué Auccahuasi, Fernando Antonio (ORCID: 0000-0003-1485-5854)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y gestión de los recursos naturales

LIMA - PERÚ

2020

### **Dedicatoria**

Este trabajo de investigación está dedicado a nuestros padres que nos han dado su apoyo incondicional en todo este proceso formativo; a nuestros hijos Adrián y Aryam que han sido la fuente de nuestro esfuerzo y de todas las energías requeridas para el cumplimiento de nuestros objetivos, que este logro sirva de herramienta para guiar cada uno de sus pasos.

## **Agradecimiento**

Agradecemos a todas las personas que han sido partícipe ya sea de manera directa o indirecta en el desarrollo de éste trabajo de investigación, a nuestros formadores, personas que han compartido sus conocimientos con nosotras a lo largo del camino universitario ,en especial a nuestro asesor por su continua guía y apoyo durante el desarrollo de la investigación.

## Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. MÉTODO.....	10
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	10
3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística.....	12
3.3 Escenario de estudio.....	13
3.4 Participantes.....	13
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	14
3.6 Procedimientos.....	15
3.7 Rigor científico.....	15
3.8 Método de análisis de información.....	16
3.9 Aspectos éticos.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS.....	32
ANEXOS.....	42

## RESUMEN

El objetivo de la investigación fue analizar los tipos de humedales artificiales, la aplicación de recursos que se usan en las técnicas de remoción de metales pesados y los factores que intervienen en las técnicas de remoción de metales pesados. Los metales pesados en los cuerpos de agua es uno de los principales problemas medioambientales que el planeta enfrenta, debido a vertidos industriales o drenajes mineros. Los humedales artificiales son un medio eficaz para el tratamiento de estas aguas contaminadas; sin embargo, puede mejorar la eficacia en cuanto a remoción de metales pesados, para ello se debe conocer los tipos de humedales artificiales existentes, los factores que intervienen en las técnicas de remoción de los mismos y las nuevas aplicaciones de recursos que se puedan utilizar. Los resultados indican que los tipos de humedales artificiales son: caudales superficiales, caudales subsuperficiales y sistemas híbridos; clasificados según la dirección de su flujo, los factores que intervienen son: los tipos de planta y el tipo de sustrato teniendo en cuenta el tipo de material y su capacidad de eliminación; y las nuevas aplicaciones de recursos son: la aireación artificial, “la asociación biochar - bacterias removedoras de metales pesados, así mismo sistemas con carrizo y bacterias metatolerantes, planta-bacteria (*P. australis*), planta-bacteria (*Brachia mutica*).

**Palabras clave:** Técnicas, humedales artificiales, metales pesados, remoción, tipos de caudales

## ABSTRACT

The objective of the research was to analyze the types of constructed wetlands, the application of resources used in heavy metal removal techniques and the factors involved in heavy metal removal techniques. Heavy metals in water bodies and one of the main environmental problems that the planet faces, due to industrial spills or mining drains. Constructed wetlands are an effective means of treating these polluted waters; However, it can improve the efficiency in terms of removing heavy metals, for this it is necessary to know the types of existing constructed wetlands, the factors that intervene in the removal techniques of the same and the new applications of resources that can be used. The results indicate that the types of constructed wetlands are: surface flows, subsurface flows and hybrid systems; Classified according to the direction of its flow, the factors involved are: the types of plant and the type of substrate, taking into account the type of material and its elimination capacity; and the new applications of resources are: artificial aeration, “the association of biochar - heavy metal remodeling bacteria, as well as systems with reed and metaltolerant bacteria, plant-bacteria (*P. australis*), plant-bacteria (*Brachia mutica*).

**Keywords:** Techniques, constructed wetlands, heavy metals, removal, types of flows

## I. INTRODUCCIÓN

Según Muñoz, Contreras y Molero (2018) uno de los problemas medioambientales es la presencia de metales pesados en los suelos y cuerpos de agua ya que se caracterizan por ser altamente tóxicos y de presencia prolongada en el ambiente dando origen a la degradación de suelos y contaminación de cuerpos de agua (p. 38). Las altas concentraciones de metales pesados como el cadmio y níquel pueden ser las causantes de enfermedades graves como el cáncer y otros problemas respiratorios, hoy en día estos problemas de suelos contaminados pueden ser remediados a través de diferentes métodos químicos, físicos y biológicos y hasta usando la combinación entre estos (Wang, Y. [et al] (2020, p.1).

Según Kilaru, H., Ponnusamy, S. y Rames, C. “los metales pesados son tóxicos por naturaleza, lo que causan graves enfermedades a los seres humanos y animales, inclusive en concentraciones bajas, dichos contaminantes ingresan a los cuerpos de agua a través de esorrentías agrícolas y descargas industriales. Se cuentan con diferentes métodos de tratamiento para eliminarlos que se diferencian en costo de operación y mantenimiento, por lo que es vital contar con un método viable para la remoción de metales pesados y así salvaguardar el ambiente” (2019, p.1).

Zhang [et al] (2020, p.2) “Los efectos tóxicos de los metales pesados sobre los microorganismos y las plantas puede inhibir la remoción, la degradación de contaminantes, ya que la eliminación de contaminantes está dada por la interacción que va desde la retención en los sustratos por medio de la precipitación, el metabolismo microbiano, entre otros. Estos procesos se ven alterados por muchos factores como el tipo de sustrato, pH, composición de las aguas, especies vegetales”.

Ran, B. [et al], nos dicen que “la calidad del agua está disminuyendo en todo el mundo y cada vez es mayor el número de cuerpos de agua que pierden su función ecológica, esto debido al incremento poblacional y al cambio climático. En el caso de la construcción de humedales, son considerados una herramienta de ingeniería ecológica que favorece a la restauración de cuerpos de agua. La funcionalidad de estos humedales se ha estudiado in situ, en los meso cosmos y en el laboratorio,

sin embargo, hasta la fecha no se ha realizado una revisión sistemática del éxito de dichas aplicaciones in situ para poder mejorar la salud de los ecosistemas” (2019, p.1).

Luke, T., Walker, C. y Beecham, S. nos señalan que “la revisión evaluada a identificado varias lagunas en base a la comprensión de los humedales construidos y se busca determinar cómo se pueden utilizar las diferentes configuraciones de estos, para atacar determinados contaminantes y cuantificar cómo el mantenimiento y la cosecha de plantas afectan al rendimiento del tratamiento de los sistemas de los humedales flotantes construidos” (2019, p.9).

Según Ran, B. [et al] “se debe evaluar los estudios in situ en base a su estabilidad y fiabilidad de rendimiento en condiciones de cambio constante, esto principalmente para la reducción de metales pesados, herbicidas y pesticidas. Estos estudios también son fundamentales para permitir la estimación del valor de los servicios eco sistémicos de los humedales construidos, si bien existen pruebas de que estos podrían ser capaces de hacer frente e incluso aumentar su tasa de éxito bajo el cambio climático futuro, hay varias incógnitas. Por lo tanto, se requiere más estudios experimentales para aumentar nuestra comprensión de cómo esta tecnología se adaptará a los cambios futuros” (2019, p.15).

Gustavo, S. [et al] nos señalan que “el uso de humedales flotantes se convierte en una opción interesante al ser integrado con humedales de construcción tradicional. Sin embargo, no hay muchas investigaciones realizadas que combina ambas tecnologías, se debe realizar más interés en ello, más aún cuando el fin es la reutilización del agua. Además, son pocas investigaciones los que se aplicaron a una escala real, siendo la más grande realización a nivel laboratorio o piloto. Por lo tanto, es de suma importancia explorar con mayor detalle las relaciones entre las condiciones del tratamiento de agua (DO, pH, toxicidad) y el desarrollo de la planta para cada especie con el fin de maximizar el rendimiento” (2020, p.31).

Mohammed y Babatunde nos dicen que “no hay información sobre los procesos biológicos y físico-químicos que ocurren en los sistemas humedales construidos. El modelado de la eliminación de metales pesados en el sistema de los humedales construidos es importante con respecto a comprender el comportamiento de los



metales pesados en los procesos de tratamientos integrados” (2017, p.2).

Sobre la base de la realidad problemática presentada se planteó el problema general y los problemas específicos de la investigación.

El problema general de la investigación fue ¿Cuáles son las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales? Los problemas específicos de la investigación fueron los siguientes:

- ¿Cuáles son los tipos de humedales artificiales que se usan para la remoción de metales pesados?
- ¿Qué factores intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales?
- ¿Qué aplicación de recursos se pueden usar para una mejor remoción de metales pesados en humedales artificiales?

Este trabajo de investigación se justifica, según Ingrao, C., Sabina, F. y Acridiacono, C. manifiestan en base a los hallazgos de los estudios que realizaron que “se puede afirmar que a pesar que existan algunas limitaciones, los sistemas de los humedales construidos causan menos emisiones de gases de efecto invernadero y menos impactos ambientales que las plantas de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la mejora de la sostenibilidad del transporte ecológico, capacidad global de residuos. Además, cuenta con ventajas en términos de eficiencia de eliminación de contaminantes, sostenibilidad ambiental y conveniencia económica” (2019, p. 15).

Existen distintas técnicas para la remoción de metales pesados, sin embargo, se quiere lograr con esta revisión analizar que carencias pueden tener dichas investigaciones para comprender cómo mejorar los sistemas en cuanto a la construcción de humedales, es por ello la importancia de este trabajo de investigación, para analizar cómo podría optimizarse las técnicas a utilizar para la remoción de los metales pesados en cuanto a la actividad que se realice y dependiendo del ecosistema que se encuentre en dicho lugar.

El objetivo general de la presente investigación fue analizar las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales, además tenemos como

objetivos específicos:

- Indicar los tipos de humedales artificiales que se usan para la remoción de metales pesados.
- Mencionar los factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales.
- Mencionar cuales son las nuevas aplicaciones de recursos para la remoción de metales pesados en humedales artificiales.

## II. MARCO TEÓRICO

(Wang, Liuwei [et al], 2020) tuvo como objetivo examinar las tecnologías innovadoras para la remediación de aire, suelo y agua contaminados con mercurio (Wang, Liuwei [et al]. 2020) esta revisión tuvo como metodología examinar sobre los mecanismos de remediación como adsorción, reducción, oxidación, estabilización; los materiales de remediación emergentes, así como las tecnologías usadas como reducción y volatilización microbiana, eliminación electrocinética, humedales construidos (Wang, Liuwei [et al], 2020) concluyeron que algunas de las tecnologías carecen de aplicaciones a gran escala como son la reducción microbiana y tecnologías, los humedales artificiales son eficientes siempre y cuando las concentraciones de mercurio no sean tóxicas para los organismos (Wang, Liuwei [et al], 2020) recomendaron la combinación de tecnologías como la fitorremediación y la reducción microbiana para dar a lugar a plantas que sean modificadas genéticamente y puedan reducir el mercurio.

(Rous, Vymazal y Hnátková 2019) examinaron la eficiencia de la aireación activa (EA) de los humedales artificiales teniendo en cuenta los sustratos que éstas usen. (Rous, Vymazal y Hnátková 2019) el objetivo de esta revisión fue señalar que la eficiencia de los sistemas utilizados no será expresa sólo por la disminución de los contaminantes sino también tomando otros indicadores que puedan influir en consumo de energía y por ende en los costos de operación de estos sistemas. Para esto tomaron datos como DQO, DBO5, tiempo de retención hidráulica, superficie del lecho filtrante, caudal diario, de 21 trabajos de investigación los cuales calcularon y procesaron en programas estadísticos, dando como resultado la eficiencia de la

aireación de los humedales es baja debido a la mezcla limitada de agua como al tipo de sustrato o filtro que se use, el tipo de aireadores que se utilizan y a la disposición de éstos. No se encontró una correlación con los parámetros del humedal y la eficiencia de aireación. (Rous, Vymazal y Hnátková 2019) Así mismo recomendaron que las investigaciones deben de incluir información sobre el sistema de aireación, el tiempo y la tasa de flujo y el consumo de energía del soplador.

(Li [et al], 2018) analizaron los parámetros de diseño, la eficiencia en la remoción de contaminantes y la relación de éstos en los humedales construidos en China. (Li [et al], 2018) utilizaron literatura de los años 1988 hasta 2016 sobre información de humedales construidos en diferentes regiones de China, para analizarlos y ver la correlación entre los parámetros de diseño y los datos de eliminación de contaminantes, así mismo tomó datos de la carga hidráulica, el tiempo de retención hidráulica, la carga de contaminantes, la concentración del influente y la tasa de eliminación de contaminantes, mediante la prueba de diferencia del ANOVA analizaron la relación de los parámetros de diseño y eliminación entre los diferentes tipos de humedales artificiales. (Li [et al], 2018) concluyeron que los parámetros de diseño del humedal artificial y la eficiencia de la remoción de contaminantes tienen una vasta variación, no se podría contar con una especificación uniforme para los diseños de humedales artificiales ya que estos varían de acuerdo a la geografía, clima etc. (Li [et al], 2018) recomendó que debe de tomarse en cuenta carga hidráulica (HL) y tiempo de retención (HRT) por los diseñadores de humedales artificiales a fin de obtener un sistema mejorado si queremos emplearlo para una situación específica.

(Bakhshoodeh et al. 2020) examinaron las generalidades de prácticas y aplicaciones sobre el uso de sistemas que se utilizan para la eliminación de contaminantes de lixiviados en vertederos usando humedales artificiales (Bakhshoodeh et al. 2020) para esto recopilaron información de 85 trabajos en 20 países y se focalizó en los rendimientos del sistema de humedales artificiales tomando características como tipo de humedales, temperatura, tiempo de retención hidráulica, el tipo de vegetación que se emplea, y comparó los datos de estudios entre sí (Bakhshoodeh et al. 2020) concluyeron que se deben especificar el diseño

de los humedales a construir caso por caso, y para garantizar una eficiencia en la remoción de metales se necesita tomar en cuenta el uso de aireación, así mismo se pueden modificar y combinarse con otros métodos.

(Wang, Yanting et al. 2020) elaboraron un modelo de puntuación donde se evaluaron 22 tipos de sustratos para una mejor elección al momento de construir un humedal tomando en cuenta el costo, la disponibilidad, la reutilización y la capacidad de eliminación de contaminantes (Wang, Yanting et al. 2020), la metodología que emplearon fue el de puntuación basado en las propiedades y características de cada sustrato como, baja, medio y alto, la sumatoria total de los puntajes obtenidos de cada característica del sustrato fue evaluado entre ellos, llegando así a la conclusión (Wang, Yanting et al. 2020), que los materiales naturales obtuvieron el puntaje más alto en lo que se refiere costo y disponibilidad del sustrato. Los humedales artificiales es un tipo de tratamiento que puede solucionar problemas de contaminación en cuerpos de agua por lo tanto dichos hallazgos sirven como base para conocer y mejorar en las técnicas de su aplicación teniendo en cuenta los diferentes factores que intervienen en el sistema.

Uno de los ecosistemas considerados como los más importantes son los humedales "los riñones del paisaje", ya que cumplen con una función de suma importancia en la prestación de servicios de los ecosistemas, como controlar inundaciones, reponer aguas subterráneas, aplacar el cambio climático (Yan y Zhang 2019, p.1) mantienen el equilibrio del medio ambiente y los encontramos de manera diversa, cuentan con una característica única por el cual es posible identificarlos pues son áreas cubiertas por agua que cuentan con vegetación (Ingrao, Faila y Arcidiacono, 2019).

Los humedales naturales poseen un sistema que permite purificar y mejorar la calidad del agua ya que son como filtros del mismo ecosistema, así mismo los humedales artificiales están diseñados para utilizar esos procesos naturales para realizar la misma tarea, pero en un espacio más controlado (Ingrao, Faila y Arcidiacono, 2019.p.4). En la última década se han visto progresos reveladores con respecto a tecnologías para la construcción de humedales artificiales por parte de los investigadores, y han sido largamente tomados alrededor del mundo. (Wang, Y. [et al], (2019.p5).

Según Ingraio, Faila y Arcidiacono, indican que ambos sistemas de humedales naturales y artificiales son alternativas viables en cuanto a tratamientos de aguas residuales, sin embargo, se registró que los humedales naturales presentan una baja eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación de los humedales artificiales esto debido al poco tiempo de retención (2019,p.4), al respecto, Gill [et al] nos menciona que “Los metales pesados son no biodegradables esencialmente y por lo tanto perduran en el medio ambiente, dentro de los humedales artificiales se lleva a cabo tratamientos físicos de los contaminantes esto dado por una disminución de las velocidades del flujo y esto conlleva a la sedimentación, evaporación. Moraleda y Llanos nos dice que “evaporación es el proceso por medio el cual la superficie de un cuerpo líquido va cambiando a estado gaseoso” (2018, p.132), adsorción y filtración Gallego, A. [et al] nos manifiesta que “la filtración es un método físico que se utiliza para la separación de componentes de una mezcla homogénea (2018, p. 63). La descomposición, la absorción por parte de las plantas y la eliminación de nutrientes, así como la transformación y la degradación biológicas son parte de los procesos biológicos” (2017, p).

Según Chen y Wong (2016, p.5), El humedal artificial puede realizar las funciones naturales de las plantas, el suelo y microorganismos para llevar a cabo tratamientos de aguas a nivel industrial o domésticas; así como lixiviados de vertederos que según Rani [et al ] son una mezcla de diversos contaminantes, compuestos orgánicos e inorgánicos, naturales y sintéticos, organismos biológicos, tóxicos y metales pesados (2020,p.3) y la escorrentía de las aguas pluviales, visto actualmente como un método que cada vez está tomando mayor presencia a nivel mundial debido a su rentabilidad. Los humedales artificiales están bien diseñados y poseen sistemas apropiados de pre tratamiento mostrando buenos resultados, Úsuga [et al.] (2018 p.4), vista la capacidad que poseen las plantas acuáticas (*Ebrahimbabaie, Meeinkuirt y Pichtel*) indican que representan la base de la red alimentaria acuática y son responsables de la mayor parte de la productividad primaria en su entorno. Muchos tienen la capacidad de producir rápidamente grandes cantidades de biomasa (2020, p.2).

Los humedales artificiales poseen un costo menor en su construcción y mantenimiento dando lugar a que sean los más utilizados con respecto al

tratamiento de aguas residuales, así mismo pueden ser variables los volúmenes a tratar en estos sistemas y los procesos químicos, biológicos y físicos se combinan facilitando la eliminación de contaminantes en diferentes tipos de aguas residuales. Kiiza [et al] (2020, p.2).

William A. nos dice que “la hidrología es la disciplina de las ciencias naturales que estudia las aguas continentales, tanto sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como también sus movimientos y ciclos” (2018, p.31). Los humedales artificiales se clasifican en tres tipos, según la, de la hidrología de los humedales: caudales superficiales, caudales sub superficiales y sistemas híbridos, Wang, Y [et al.] nos menciona que los humedales con caudales superficiales se parecen a los humedales naturales, los caudales sub superficiales a la vez se clasifican en dos depende al tipo de dirección de su flujo que poseen pueden ser horizontal o vertical y los sistemas híbrido viene a ser la combinación de los mismos (2020, p.6).

(Vymazal 2014, p.2) Los humedales con flujo o caudal superficial son cuencas con suelo u otro medio (sustrato) adecuado para poder sostener la vegetación enraizada (si es que está presente) y con agua con poca profundidad que fluye a través de esta, este humedal suele tener zonas aireadas cerca de la superficie, y zonas anaeróbicas en los sedimentos y cerca de ellos. En los humedales sub superficiales con flujo horizontal, las aguas contaminadas entran al sistema y fluyen a través del medio poroso bajo la superficie de un lecho en una trayectoria horizontal hasta que llega a la salida, durante este tiempo las aguas entran en contacto con zonas aeróbicas, y anaeróbicas.

Vymazal y Brezinová. Los humedales de flujo vertical (VF CW) se alimentan irregularmente y el proceso aquí es que cada lote de agua se lleva a la superficie siempre y cuando el lote anterior se haya terminado de filtrar completamente. Así en un periodo de tiempo, el sustrato filtrante está vacío, el oxígeno puede propagarse allí desde la atmosfera y, por lo tanto, los VF CW son aeróbicos. “(2016, p.4). Los humedales construidos híbridos es la combinación de los dos tipos de humedales sub superficiales para lograr un efecto mayor en el tratamiento. (Vymazal 2014, p.2).

El tiempo que necesitan los diferentes tipos de sustratos para poder completar las reacciones que se lleven a cabo en este sistema de tratamiento es llamado tiempo de retención hidráulica, que básicamente dependerá de las tecnologías que se use y las características del sustrato, Hernández, F (2015, p.18) .San Miguel, G y Gutiérrez, F. mencionan que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es el tiempo que demora un flujo de agua en pasar por todo el sistema, en este caso el humedal artificial. El tiempo de retención hidráulica se obtiene al dividir el volumen y el caudal, (2015, p.324).

Un factor importante para que un humedal artificial cumpla sus funciones eficientemente, es tomar en cuenta el tipo de sustrato que se va a utilizar, es muy común el uso de sustratos con materiales sintéticos que cuenten con una porosidad, (Sylla, A. 2018, p.2) el tamaño de los poros del sustrato de 1-3  $\mu\text{m}$  ayudan a promover el crecimiento de biopelículas y así mejorar el efecto del tratamiento de las aguas Fu [et al ](2020, p.3) y permitan la aireación correcta, como en el caso de los humedales artificiales con flujos horizontales el transporte de oxígeno es limitado. Liu, H [et al.] La importancia del sustrato en un humedal superficial no solo es el soporte físico que le brinda sino también es una superficie para la fijación de contaminantes, la capacidad de adsorción, la actividad microbiana y la diversidad es variable dependiendo el tipo del sustrato. (2016, p .17)

Kizito, [et al.] dice que “un material multifuncional con una amplia variedad de aplicaciones ambientales, como eliminar contaminantes de aguas residuales o suelos que estén contaminados aplicando humedales artificiales con una eficiencia basada en su porosidad es el biocarbón (2017, p.2) que es el producto final de conversiones termoquímicas de la biomasa (plantas, animales y microorganismos) en un ambiente con un oxígeno limitado y a temperatura baja a moderada, tiene propiedades físicoquímicas ricas y afinables, creciendo así su utilización en la ingeniería de la adsorción. Do Minh [et al.] (2020, p.2)

Otro factor importante son los tipos de plantas (Xin et al. 2019) mencionaron que “las plantas son un componente esencial de los ecosistemas de humedales, las plantas pueden reducir los metales pesados en aguas y los sedimentos a través de su fijación física. Algunas plantas macrófitas varían en su eficiencia de eliminación como son *Scripus grossus*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis* y *Spartina*

*alterniflora*, se han aplicado para restaurar el agua contaminadas por metales pesados como el Cu y el Cd. El oxígeno (O<sub>2</sub>) producido por la fotosíntesis se difunde en la raíz a través de aerénquimas bien desarrollados en las plantas de los humedales, y esto es el principal responsable de la adaptación de la hipoxia de estas plantas durante los estados de encharcamiento. Entre el 30% y el 40% del O<sub>2</sub> de las raíces se libera en la rizósfera a través de la secreción de oxígeno radial en un proceso conocido como liberación de oxígeno radial. Las propiedades químicas en la rizósfera, es decir, la disponibilidad de nutrientes, sustancia tóxica reductora la oxidación y la precipitación, y la oxidación de azufre pueden ser alterado por la liberación de oxígeno radial, lo que generalmente mejora la adaptabilidad de las plantas a los humedales. En condiciones de anegamiento, el O<sub>2</sub> en las raíces puede oxidar el hierro ferroso en hidróxido de hierro, que es entonces depositada en la superficie de la raíz para formar una placa de hierro, una típica placa radial característica de pérdida de oxígeno que inmoviliza el cadmio (Cd), el plomo (Pb) y el níquel (Ni) en las superficies de las raíces, disminuyendo efectivamente su movilidad” (p.2).

Según Sylla, A (2018, p.3) existen varios métodos de aireación en los humedales artificiales como el flujo de corriente, la circulación de efluentes y la aireación artificial, en el flujo de corriente se basa en llenado y el drenaje de las aguas residuales en la cuenca, en la circulación de efluentes implica una interacción exhaustiva de los contaminantes, mientras que la aireación artificial se basa en una bomba de aire. John, Y [ et al ] nos dice que existen nuevas estrategias en el modo de operación de los humedales, avances en el diseño como la aireación artificial, ya sea intermitente o continua para garantizar que exista una disponibilidad de oxígeno disuelto en los humedales de flujo subterráneo y así aumentar la eficiencia de la remoción de los contaminantes (2020, p.5).

### **III. MÉTODO**

#### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

El presente trabajo corresponde al tipo de investigación aplicada, según Namakforoosh (2005) nos dice que “la investigación aplicada sirve para tomar acciones y establecer políticas y estrategias, teniendo hincapié sobre la resolución



de problemas, sin embargo, tiene un mayor énfasis en la toma de decisiones relevantes y a largo plazo” (p.44). Lo que va acorde con nuestro trabajo de investigación ya que se analizó las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales, indicando lo tipos de humedales existentes, identificando las carencias de las mismas y mencionando los factores que intervienen en dichas técnicas; para así, lograr comprender como mejorar los sistemas de humedales, fijando planes para la construcción de humedales teniendo en cuenta los problemas identificados y de esta manera tomar decisiones en cómo podría optimizarse las técnicas a utilizar para la remoción de metales pesados en humedales artificiales. Según Baena, G menciona que la investigación aplicada si es correctamente proyectada puede aportar sucesos nuevos haciendo que se pueda confiar en estos hechos descubiertos, incluso la nueva información obtenida resultaría aprovechable y valorada para la teoría” (2014, p.11).

El diseño de la presente investigación es cualitativo narrativo de tópico, Creswell (2005) señala que el diseño narrativo en varias ocasiones es un esquema de investigación, así mismo es una forma de inferencia, ya que al relatar los sucesos conlleva a entender puntos que no estaban del todo claros. Mertens (2005) divide a los estudios narrativos el cual menciona que de tópicos se enfoca en una temática, suceso o fenómeno. Según Salgado (2007) nos dice que “en este diseño el investigador recolecta información sobre experiencias determinadas para poder escribirlas y examinarlas; en diversas situaciones es un esquema de investigación, pero a la vez es una manera de intervención, debido a que al relatar un suceso ayuda a procesar dudas existentes. Está enfocado en una temática, suceso o fenómeno” (p. 3). De acuerdo al trabajo de investigación se realizó la recolección de información sobre el tema de técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales para luego poder analizarlas, describiendo de esta manera las falencias existentes que manifestaron algunos autores citados con respecto al tema procesando y plasmando la información adquirida, cumpliendo con los objetivos establecidos.

### 3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

Título: Técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales

Objetivo General: Analizar las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales

Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categorías	Subcategorías	Criterio 1	Criterio 2
Indicar los tipos de humedales artificiales que se usan para la remoción de metales pesados.	¿Cuáles son los tipos de humedales artificiales que se usan para la remoción de metales pesados?	Tipos de humedales artificiales	Caudales superficiales  Caudales sub superficiales  Sistemas híbridos	De acuerdo a la dirección del flujo. (Wang. Y., [et al], 2020, p.6)	De acuerdo a la profundidad del agua. (Vymazal, 2014, p.2)
Detallar las aplicaciones de recursos que se usan para las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales.	¿Cuáles son las aplicaciones de recursos que se usan en las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales?	Aplicación de recursos	Uso de nuevas tecnologías  Método de aireación artificial	De acuerdo a la combinación de técnicas. (Wang, Liuwei [et al], 2020)	De acuerdo al nivel de realización de estudio (Gustavo, S. [et al] (2020, p.31)
Mencionar los factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales.	¿Cuáles son los factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales?	Factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados	Tipos de sustrato  Tipos de plantas	De acuerdo al material (Wang, Y. [et al], 2020)	De acuerdo a la capacidad de eliminación. (Wang, Y. [et al], 2020)

### **3.3 Escenario de Estudio**

Uno de los escenarios de estudios fueron los humedales artificiales que son sistemas diseñados para utilizar los mismos procesos de filtración y purificación del agua que los humedales naturales, pero en un espacio más controlado (Ingrao, Faila y Arcidiacono, 2019.p.4), y teniendo en cuenta algunos factores que pueden aumentar la cantidad de remoción de estos contaminantes Zhang [et al] (2020, p.2). Existen tres tipos: humedales con flujo horizontal, con flujo vertical y los híbridos. (Vymazal 2014, p.2)

En el caso de los metales pesados son altamente tóxicos y dañinos para la salud humana, están presentes en el ambiente por medio de descargas industriales y escorrentías agrícolas contaminando cuerpos de agua. Kilaru, H., Ponnusamy, S. y Rames, C (2019, p.1)

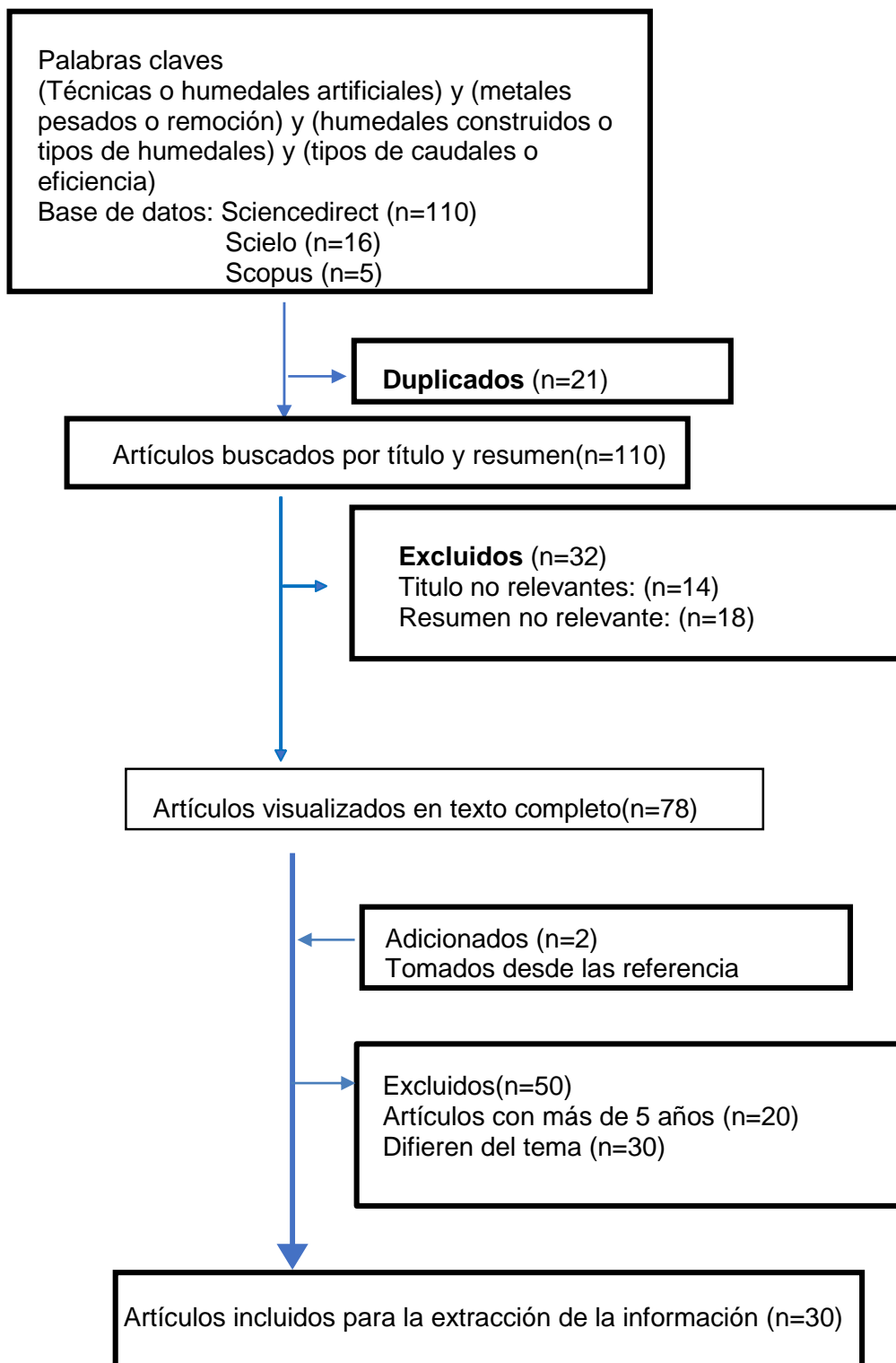
### **3.4 Participantes**

Para la realización de esta investigación se trabajó con fuentes de información tales como base de datos como Sciencedirect una de las mayores fuentes de información para la investigación científica , técnica y médica, brinda textos completos de las revistas científicas que publica Elsevier con más de 2.500 revistas(Universidad de las Palmas de Gran Canaria , 2019) , Scielo una biblioteca virtual que cuenta con revistas científicas para responder las necesidades de comunicación científica en los países en desarrollo , esencialmente en América Latina y el Caribe (BIREME Centro Latinoamericano y del Caribe de información en ciencias de la salud ) y EBSCO es una herramienta que integra todas las bases de datos que y libros electrónicos(Universidad Cesar Vallejo ), también se trabajó con el libro de Metodología de la investigación que sirvió como una guía para la buena realización de la investigación así como también el libro de ingeniería del medio ambiente del cual se extrajeron conceptos necesarios para la investigación .

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para esta investigación se aplicó la técnica análisis de documentos, Vásquez, L. [et al] (2006) nos dice que el análisis documental consiste en que toda la información que se tiene registrada en materiales designado documentos, debe ser analizado. Existen dos tipos básicos de documentos: escritos y visuales. En el análisis cualitativo de documentos, se puede llevar a cabo un análisis de contenido y se caracteriza por la clasificación sistemática, descripción e interpretación de los contenidos de dicho documento” (p.74). Por consiguiente, se usó la ficha de recolección de datos (véase en anexos) de los artículos revisados en el cual hemos incluidos ítems como tipo de investigación, autor, palabras claves, tipo de humedal artificial, tipos de sustratos, metodología, efectividad de remoción, conclusiones y recomendaciones esto facilitará el análisis con respecto de las categorías y subcategorías del presente estudio.

### **3.6 PROCEDIMIENTO**



Elaboración: Fuente propia

Para la extracción de información que se utilizó en la investigación del proyecto se procedió a realizar una secuencia de actividades partiendo desde las palabras claves que se usaron como filtro de búsqueda en las tres bases de datos como Sciencedirect, Scielo y Scopus, descartando los artículos duplicados, luego se buscaron artículos por título y resumen, descartando los no relevantes y se consideraron criterios de exclusión como artículos con más de cinco años de antigüedad, y artículos que diferían del tema a investigar, se aumentaron artículos que fueron revisados completamente en su contenido, y se agregaron artículos tomados de las referencias de los anteriores, y bajo todos estos criterios de inclusión y exclusión se llegaron al total de artículos que sirvieron para la extracción de información .

### **3.7 RIGOR CIENTÍFICO**

Sampieri y Mendoza (2008) mencionan que en la investigación cualitativa se aspira a desarrollar un trabajo notable que cumpla con el rigor de la metodología, para este propósito los estudiosos especialistas en este tema han desarrollado ciertos criterios para tomar en cuenta como dependencia, credibilidad, transferencia y confirmación. (p, 253).

La dependencia es “el grado en que distintos investigadores que recogen datos parecidos en el campo y realicen los mismos análisis, produzcan resultados similares”. Franklin y Ballau. (2005). Citado por Hernández-Sampieri y Mendoza. México (2008 p. 455).

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2008) menciona que la dependencia “implica que diferentes investigadores deben de revisar los datos y estos deben tener conclusiones similares” (p.454). En esta investigación se cumplió con este criterio ya que se recaudó información de diferentes autores que abordaron el tema de estudio y llegaron a tener análisis congruentes.

La credibilidad según Hernández-Sampieri y Mendoza (2008) hace referencia al grado de entendimiento del investigador de las experiencias de los participantes sobre todo las que están conectadas con el planteamiento del problema (p, 456).

Según Castillo & Vásquez (2003) la credibilidad se produce cuando el investigador

llega a recolectar datos con los participantes del estudio y esto produce hallazgos que son reconocidos por estas fuentes de información porque se aproxima a lo que ellos piensan y sienten respecto al tema de investigación (p.165). Esta investigación cumple con este criterio ya que en todo el proceso de recolección de datos se entendió la problemática planteada por los autores.

Por otro lado, Según Castillo & Vásquez (2003) nos dice que “transferencia se refiere a una probabilidad de que los resultados del estudio puedan ser extendidos a otras poblaciones. En la investigación cualitativa los lectores del informe son los que deciden si pueden trasladar los descubrimientos a un marco distinto del estudio. Para ello es necesario que se realice una descripción sólida del lugar y las características de las personas donde el fenómeno fue estudiado.” (p, 166)

Según Hernández-Sampieri y Mendoza. (2008) mencionan que en una investigación cualitativa es difícil que los hallazgos se puedan transferir a otro contexto, pero algunas veces los resultados pueden servir como puntos de partida para obtener una idea general del problema que se está estudiando y con esto la posibilidad de adaptar ciertas soluciones en otro espacio (p, 458). La presente investigación cumple con este criterio porque explica de manera clara el problema y brinda algunos factores a tomar en cuenta para la remoción de metales en humedales artificiales.

Según Castillo y Vásquez (2003) Confirmación hace referencia a la capacidad que tiene el investigador para captar las ideas, pistas o rutas que han realizado los investigadores originales. Para hacer posible esto el investigador debe contar con una documentación y registros donde plasme las ideas y todo referente al estudio a realizarse (p, 165).

Según Hernández-Sampieri y Mendoza. (2008) Involucra indagar los datos en su origen y la explicitación de la lógica utilizada para interpretarlos. En esta investigación se tomarán en cuenta los datos primarios dados por los autores, así como las recomendaciones e ideas para el presente estudio.

### **3.8 MÉTODO DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN**

En este trabajo de investigación se analizaron las categorías, como son los tipos de humedales, aplicación de recursos que se usan en las técnicas de remoción de metales pesados y los factores que intervienen en las técnicas de remoción de metales pesados. En los tipos de humedales se hallan tres subcategorías, caudales superficiales, caudales sub superficiales y sistemas híbridos, y a su vez se encuentran relacionados con dos criterios; de acuerdo a la dirección de flujo, el autor Wang, Y. [et al] indican que los humedales con caudales sub superficiales dependerán por la dirección de su flujo, puede ser verticales, horizontales o ambos (2020, p.6); de acuerdo a la profundidad del agua, Vymazal (2014) menciona que los humedales con caudales superficiales se caracterizan por tener agua con poca profundidad (2014, p.2). En la aplicación de recursos que se usan en las técnicas de remoción de metales pesados se encuentran dos subcategorías, uso de nuevas tecnologías y métodos de aireación artificial, que a su vez tienen relación con los siguientes dos criterios; de acuerdo a la combinación de técnicas, debido a la necesidad de investigaciones Wang, L. [et al] recomiendan la combinación de tecnologías para mejorar la remoción de los metales, como la fitorremediación con la reducción microbiana, dando lugar a plantas modificadas genéticamente y con ello poder reducir el mercurio; de acuerdo al nivel de realización de estudios, Gustavo, S. [et al] (2020) nos menciona que son pocas las investigaciones que se realizaron a una escala real, siendo la más grande a nivel de laboratorio o piloto. (p. 31). En los factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados se hallan 2 subcategorías, tipos de sustrato y tipos de plantas, estos se encuentran relacionados a los siguientes criterios; de acuerdo al material y de acuerdo a la capacidad de eliminación, Wang, Y. [et al] (2020) nos mencionan que al momento de realizar la construcción de un humedal artificial debemos tener en cuenta dichos factores mencionados, para lograr la optimización de las técnicas.

### **3.9 ASPECTOS ÉTICOS**

La presente investigación cumple en su totalidad con los máximos estándares establecidos en la norma por el Código de Ética cuya resolución de Consejo Universitario N° 0126-2017 / UCV desarrollada con responsabilidad y honestidad



en todo lo que se refiere con la información que se extrajo para la investigación. Así mismo se respetó la autoría de las fuentes de información en este caso bajo el estilo internacional ISO 690.

#### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Según la bibliografía revisada, se clasifica a los humedales artificiales en tres tipos, esto establecido según la dirección de flujo: humedales con caudal superficial, humedales con caudal subsuperficial, y humedal híbrido; observando una variación en la profundidad de los mismos, teniendo en cuenta que pueden ser empleados para cualquier tipo de efluente que ingrese al sistema.

Steidl, Kalettka y Bauwe nos mencionan que los humedales con caudal superficial son “sistemas llamados también como agua superficial libre” (2019, p.2), son ambientes inundados con espejo de agua expuestos hacia el ambiente, los cuales están acompañados de una amplia vegetación hidrófila” (Pabello y Castañeda, 2014, p. 3), suele tener zonas aireadas cerca de la superficie, y zonas anaeróbicas en los sedimentos (Vymazal 2014, p.2). “En este tipo de humedal la profundidad del agua es uno de los principales aspectos para ser considerado. A fin de maximizar el desarrollo de las raíces y el tiempo de contacto con los contaminantes, la profundidad del agua debe ser de al menos 0,8 - 1,0 m.” (Colares et al. 2020, p.8 De la Mora [et al] en su investigación la profundidad del agua fue 100 cm, la investigación se realizó a una escala real, y el tipo de efluente que trato fue el escurrimiento agrícola (2020, p.5), Sin embargo (Arteaga [et al], menciona que su profundidad oscila de entre 30 y 40 cm, están diseñados para cargas superficiales bajas y está constituido por zanjas de 3 m de ancho y 100 m de largo, con la profundidad mencionada” 2019, p.8), en su investigación trato aguas residuales que pasaron por un primer tratamiento .

“Los humedales artificiales con caudales subsuperficiales se dividen a su vez en dos categorías principales: Sistema de humedales con flujo vertical y sistema de humedales con flujo horizontal”. (Hamed [et al], 2020, p.2). Según Schierano [et al] nos dice que “un tipo particular de los humedales construidos son los humedales de flujo subsuperficial horizontal. Las aguas residuales en estos sistemas fluyen en una trayectoria horizontal desde la zona de entrada a la zona de salida, pasando

por un lecho donde se encuentran macrófitas enraizadas”. (2020, p.2) “El flujo de agua en el sistema subsuperficial en contacto con las raíces y los sustratos y la profundidad del humedal es de 0,3 – 0,9 m. Este sistema proporciona un entorno para la proliferación de biofilm y para la eliminación de contaminantes”, su investigación fue realizada a escala piloto con efluente de agua residual (Batoool y Tawfik, 2019, p.3). Con un estudio semejante de Singh y Chakraborty donde mencionan que un sistema de flujo subsuperficial horizontal a escala de laboratorio fue diseñado para el tratamiento de drenaje ácido de la mina, donde utilizó una profundidad de 0,55 m (2020, p.2). Sin embargo, Mohammed y Babatunde, en su investigación a escala real, implementó una profundidad de 150 cm en este tipo de humedal, debido a que esa profundidad dependió del tamaño y alcance de las raíces de las plantas, tratando como afluente agua residual (2017, p.1), por lo que el nivel de la profundidad también varío de acuerdo al tipo de investigaciones de los autores siendo la escala real una profundidad mayor.

“Un sistema híbrido tiene la combinación de flujo vertical con flujo horizontal” (Hamed [et al], 2020, p.2). Marzec [et al] nos dice que “el sistema híbrido consiste en al menos dos lechos con diferentes flujos de aguas residuales (vertical y horizontal). La eliminación de contaminantes en este sistema está relacionada con el funcionamiento de la membrana biológica formada durante el flujo de aguas residuales a través del material que llena los lechos” (2019, p.2). “La mayor eficiencia de este sistema se atribuye al hecho de que añade sinérgicamente las ventajas de ambos tipos de humedales. Los sistemas híbridos utilizan a menudo un flujo subsuperficial vertical y horizontal que actúa de diferentes maneras posibles, creando un equilibrio en su funcionamiento “(Shingare et al. 2019, p.449). Este sistema puede mejorar la eficiencia de eliminación de contaminantes debido a la presencia de procesos aeróbicos y anaeróbicos (Hamed [et al], 2020, p.2). Por lo tanto, los sistemas híbridos pueden presentar una variación de 80 cm a 120 cm de profundidad según nos menciona (Marzec [et al], 2019, p.2), en su investigación basada en una escala real, sin embargo, el autor (Hamed [et al], 2020, p.2), diseñó su investigación a una escala piloto empleando 100 cm de profundidad en el sistema, ambos autores usaron como tipo de afluente el agua residual doméstica.

**TABLA 01: Tipos de humedales artificiales que se usan para la remoción de metales pesados**

Tipo de humedal artificial	Dirección de flujo	Profundidad del agua	Tipos de efluente	Nivel de estudio	Referencia
<b>Caudales superficiales</b>	<i>Flujo superficial</i>	80 - 100 cm	Agua residual textil	Es revisión	Colares et al. 2020, p.8
	<i>Flujo superficial</i>	100 cm	Escurrimiento agrícola	Escala real	De la Mora [et al], 2020, p.5
	<i>Flujo superficial</i>	70 – 110 cm	Drenaje agrícola	Escala real	Steidl, Kalettka y Bauwe, 2019, p.2
	<i>Flujo superficial</i>	30-40 cm	Agua residual	Escala real	Arteaga [et al], 2019, p.8
<b>Caudales subsuperficiales</b>	<i>Flujo horizontal</i>	60 cm	Agua residual	Nivel piloto	Toledo [et al], 2020, p.1
	<i>Flujo vertical</i>	150 cm	Agua residual	Escala real	Mohammed y Babatunde, 2017, p.1
	<i>Flujo vertical</i>	100 cm	Agua residual municipal	Escala Piloto	Liu [et al], 2020, p. 2
	<i>Flujo vertical</i>	30 – 90 cm	Agua residual	Escala piloto	Batool y Tawfik, 2019, p.3
	<i>Flujo horizontal</i>	55 cm	Agua de drenaje de la mina	Nivel laboratorio	Singh y Chakraborty, 2020, p.2
	<i>Flujo horizontal</i>	77 cm	Aguas residuales lácteas	Escala piloto	Schierano [et al], 2020, p.2
<b>Caudales híbridos</b>	<i>Flujo vertical y flujo horizontal</i>	80 cm / 120 cm	Agua residual domestica	Escala real	Marzec [et al], 2019, p.2
	<i>Flujo vertical y flujo horizontal</i>	100 cm	Agua residual domestica	Escala piloto	Hamed [et al], 2020, p.2

Elaboración: Fuente propia

## **Aplicación de recursos se pueden usar para una mejor remoción de metales pesados en humedales artificiales**

En estos sistemas de humedales artificiales se pueden aplicar nuevos recursos para mejorar la técnica de remoción de metales pesados, detallando las posibles combinaciones de técnicas y teniendo en cuenta el nivel de realización de estudios. El rendimiento del sistema en el tratamiento del agua mediante humedales artificiales puede mejorarse mediante la adición de suplementos y/o la combinación de otras tecnologías, como los portadores de biopelícula, almejas de agua dulce y organismos inmovilizados (Colares. G [et al] 2020, p.4); para Harindintwali [et al] “La asociación biochar - bacterias removedoras de metales pesados - planta podría proporcionar un nuevo enfoque en eficiencia a la remoción de metales pesados [...] muestra la posibilidad de un mayor desarrollo de nuevas tecnologías verdes. (2020 p.2); de acuerdo a ello, Amabilis, L. [et al] menciona que los sistemas con carrizo y bacterias metatolerantes, removieron el 73% del mercurio total, con valores similares, los sistemas con la vegetación, pero sin las bacterias tolerantes, removieron 66% del metal (2016, p.1). Los sistemas de humedales artificiales que usaron bacterias tolerantes presentaron estabilidad en el porcentaje de remoción alrededor de 50% de Hg, 57% de Pb y 45 % de Cr, estos resultados vistos a partir de los cien días, por otra parte, los sistemas de humedales artificiales con bacterias convencionales, a pesar de remover cierto porcentaje de metales pesados estos fueron reduciendo en su eficiencia en función a los días de operación, además que no se llegaron a presentar valores estables (Amabilis, L. [et al] 2015, p. 21). Para resolver los problemas de la escasa capacidad de adsorción y baja estabilidad en el tratamiento de metales pesados en aguas residuales con rellenos de humedales construidos, un nuevo tipo de relleno, zeolita artificial de esferas cargadas con óxido bimetálico nano, se preparó para la eliminación del Cr (VI) de las aguas residuales. Los resultados indicaron que el óxido bimetálico nano fue un material efectivo para la remoción del Cr (VI) con una eficiencia máxima de remoción del 84,9% en el Cr (VI) (Kong, F. [et al.], p. 1); de igual manera, Shahid, M. [et al], nos dice que en su investigación se aplicó el inóculo bacteriano a la *Phragmites australis*, aumentó suficientemente la biomasa de la planta, consiguiendo la máxima remoción (90% de eliminación). De la misma forma, consiguió un 80% de eliminación al combinarse la inoculación de bacterias con *Brachia mutica* (2019, 0.3).

Numerosos estudios han tratado de combinar el humedal construido flotante con otros equipos, como la difusión activa del aire, con el fin de reducir los olores y promover un aumento del desarrollo de las raíces de las esteras flotantes, lo que dio lugar a una mayor superficie para el crecimiento de biopelículas, airear artificialmente un sistema de humedal construido flotante demandará menos área debido al mayor rendimiento del tratamiento; además, el costo adicional es relativamente pequeño (Colares. G [et al] 2020, p.8); por lo expuesto, la hipótesis es que la estrategia de aireación intermitente traería más ventajas para el tratamiento de aguas residuales de alta resistencia debido al adecuado suministro de oxígeno (Wu, H. [et al] 2015, p.2); con respecto a esto, John,Y [ et al ] nos menciona que existen nuevas estrategias en el modo de operación de los humedales, avances en el diseño como la aireación artificial, ya sea intermitente o continua para garantizar que exista una disponibilidad de oxígeno disuelto en los humedales de flujo subterráneo y así aumentar la eficiencia de la remoción de los contaminantes (2020, p.5). La definición de aireación se da en los artículos mínimamente lo que hace imposible o limitado su uso a escala real. La falta de información sobre el sistema de aireación es bastante común en los artículos de investigación” (Rous, V., Vymazal, J. y Hnátková, T., 2019 p.4). “La recirculación, optimización del diseño de los humedales construidos y la aireación artificial sigue proponiéndose como el método más efectivo para asegurar el suministro de oxígeno y mejorar significativamente el rendimiento de eliminación de contaminantes en los humedales artificiales (Li. X [et al] 2020, p.2). En base a esto Arteaga menciona que el sistema de humedal subsuperficial horizontal puede contar con condiciones aerobias durante periodos secos y que su eficiencia depende de la aireación del sustrato, además de utilizar el sistema en forma rotatoria, así se logra oxigenar el lecho” (Arteaga [et al], 2019, p.10). No obstante, Colares, G. [et al] menciona que la aireación artificial aumenta el funcionamiento del sistema de un enfoque pasivo a uno más complejo que requiere electricidad para operar. Además, los difusores de aire pueden aumentar la turbulencia en el flujo de agua, lo que puede reducir la sedimentación y conducir a la re suspensión de los sedimentos (2020, p.8). La aireación intermitente podría ser una estrategia apropiada para lograr un alto rendimiento de eliminación en los contaminantes,

especialmente para el tratamiento in situ. La aplicación de la aireación intermitente en los humedales artificiales de flujo vertical no sólo aumentó significativamente la concentración de DO, sino que también logró crear condiciones aeróbicas y anaeróbicas alternas, teniendo así excelente eficiencia de remoción a comparación de un sistema sin aireación artificial. (H. Wu [et al], 2019, p.168) “Se ha investigado la contribución de las plantas al suministro de oxígeno, la aireación artificial del sistema proporciona una mayor tasa de suministro de oxígeno que la propia planta, teniendo una mayor eficiencia de eliminación como sistemas secundarios y terciarios de tratamiento de las aguas residuales domésticas” (Hamed [et al], 2020, p.2).

Se debe de incluir información sobre el sistema de aireación como la tasa de flujo de aire, el tiempo de retención y consumo de energía del soplante (Rous, V., Vymazal, J. y Hnátková, T., 2019, p.4). “Aunque se encontraron numerosos artículos de investigación que usaban humedales flotantes, muy pocos aplicaron o supervisaron estos sistemas a escala real, en cambio se enfocaron más a escala de laboratorio o piloto” (Colares. G [et al], 2020, p.16); en concordancia con ello, McQueena [et al] nos dice que “se necesitan estudios a mayor escala” (2017, p.2); sin embargo, Colares. G [et al] nos mencionan que los humedales construidos a escala piloto ofrecen la capacidad de probar hipótesis experimentalmente en una variedad de condiciones antes de invertir en humedales construidos a gran escala, y así determinar parámetros críticos de diseño” (2020, p.16).

**TABLA 02: Aplicación de recursos se pueden usar para una mejor remoción de metales pesados en humedales artificiales**

	<b>Recursos</b>	<b>Capacidad de eliminación</b>	<b>Referencia</b>
<b>Combinación de recursos</b>	<i>planta-bacteria (P. australis)</i>	90%	Shahid, M. [et al], 2019, p.3
	<i>planta-bacteria (Brachia mutica)</i>	80%	Shahid, M. [et al], 2019, p.3
	<i>Zeolita-óxido bimetálico nano</i>	84,9%	Kong, F. [et al.],2020 p. 1
	<i>sistemas con carrizo y bacterias metalotolerantes</i>	73%	Amabilis, L. [et al]

**Elaboración: Fuente propia**

**TABLA 03: Factores intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales**

Factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados	De acuerdo al material	De acuerdo a la capacidad de eliminación	Referencias
<b>Tipos de sustrato</b>	<i>La grava</i>	65%	Whan. Y [et al], 2019, p.5)
	<i>La biocerámica</i>	60%	Zhang, X. [et al]. 2020, p.2
	<i>Arena</i>	92%	Whan. Y [et al], 2019, p.7)
	<i>tierra</i>	89%-91%	Mohammed, A y Babatunde,AO (2017 p. 9)
	<i>La roca de lava</i>	55%	Zhang, X. [et al]. 2020, p.2
	<i>Alumbre</i>	30%	Whan. Y [et al], 2019, p.7
	<i>Fibra sintética</i>	75%	Chen [et al]. (2013)
	<i>Biocarbón</i>	68%-79%	Kizito, [et al.], p 2
<b>Tipos de plantas</b>	<i>P. australis</i>	85%	Mingde Ji [et al],2020, p.11
	<i>Typha orientalis</i>	70%-75%	Mingde Ji [et al],2020, p.11
	<i>Jacinto de agua</i>	85%	Kumar, 2019, p.5



Factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados	De acuerdo al material	De acuerdo a la capacidad de eliminación	Referencias
	<i>Cálamo de Acorus</i>	76%.	Mingde Ji [et al],2020, p.11
	<i>Cyperus papyrus</i>	85,5% -86%	Hamad. M., 2020, p.8
	<i>Typha latifolia</i>	72% - 84%	Hamad. M., 2020, p.8
	<i>Pistia stratiotes</i>	65%	Kumar, 2019, p.5
	<i>Spirodela polyrhiza</i>	50%	Kumar, 2019, p.5

Elaboración: Fuente propia

Las técnicas de humedales artificiales presentan distintos factores que intervienen para la remoción de metales pesados como son: Tipos de sustrato y tipos de planta, para ello se debe tomar en cuenta la capacidad de eliminación que puedan poseer (TABLA 03).

Whan. Y [et al] nos dice que “los suelos con grava están ampliamente distribuidos en el mundo, y son relativamente fácil de obtener, teniendo 65% de capacidad de eliminación” (2019, p.5). Así mismo, asemejándose a la capacidad de eliminación con 60%, está la biocerámica, este sustrato puede eliminar el cadmio y cobre efectivamente, y las rocas volcánicas (poseen 55% de capacidad de eliminación) también han recibido un considerable interés de investigación para la eliminación de metales pesados debido a su alta capacidad de absorción” (X. Zhang, [et al]. 2020, p.2); Sin embargo, el biocarbón posee características diversas como una gran superficie específica y una estructura muy porosa demostrando ser eficaz en la adsorción y, por lo tanto, inmoviliza los contaminantes presentes en las aguas contaminadas (Zhou. X et al, 2017 p .4), tiene una capacidad de eliminación de 68% a 79% (Kizito, [et al.], 2019, p. 2), así mismo los sustratos como la arena como lo mencionan Whan. Y [et al], 2019, p.7) y la tierra con una capacidad de eliminación de 92% y de 89% a 91% respectivamente, notándose que el material natural tiene una mayor capacidad de eliminación (Mohammed, A y Babatunde, AO (2017 p. 9). Por otro lado en la actualidad, según la eficiencia de remoción que poseen las macrófitas, las plantas más comunes usadas en humedales artificiales incluían *Phragmites australis*, *Typha orientalis*, *Jacinto de agua*, *cálamo de Acorus*, etc. (Mingde Ji [et al], 2020, p.11). Los humedales suelen contener plantas emergentes, como la aplicación de macrófitos como *P. australis*, *T. latifolia*, *S. littoralis* en humedales construidos es una solución prometedora para la eliminación de contaminantes de diferentes tipos de aguas residuales / efluentes. La *Phragmites australis* (caña común), se ha aplicado ampliamente en la rehabilitación de humedales contaminados con metales y otros contaminantes (Tayebeh Abedi y Amin Mojiri, 2019, p.2), es una planta perenne rizomatosa, posee 85% de capacidad de eliminación, con una alta tolerancia a varias condiciones ambientales (Tayebeh Abedi y Amin Mojiri 2019, p.2); de la misma forma, el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) es un macrófito de flotación libre, que es conocida como la hierba más nociva del mundo que muestra características de rápido crecimiento,

adaptabilidad a una amplia gama de condiciones ambientales y una gran capacidad de absorción de nutrientes (Tan y Wahab, 2018, p.1) teniendo una capacidad de eliminación de 85% (Kumar, 2019, p.5), los macrófitos con mayor producción de biomasa acumulan una cantidad significativa de metales en sus raíces, brotes y flores (Batoool y Tawfik, 2019, p.7); por otra parte, las plantas *Cyperus papyrus* y *Typha latifolia*, tienen la capacidad de eliminar sólidos suspendidos, nutrientes, metales pesados, DBO<sub>5</sub> y bacterias patógenas, teniendo una capacidad de eliminación de 85% y 84% respectivamente (Hamad. M 2020 p.8). Singh y Chakraborty nos menciona que el tratamiento del drenaje ácido de la mina sintética utiliza en el sistema la *T. latifolia* y ha demostrado con éxito que el sistema de humedales fue bastante eficaz para elevar el pH, por lo tanto, la eliminación simultánea de metales (2020, p.11)

## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la investigación fueron las siguientes:

- Los tipos de humedales artificiales que se usan para la remoción de metales pesados son tres siendo clasificados según la dirección de su flujo en: humedales superficiales, humedales subsuperficiales, humedales híbridos, presentando una variación en su profundidad entre ellos.
- Los factores que intervienen en las técnicas para la remoción de metales pesados en humedales artificiales son: los tipos de planta y el tipo de sustrato teniendo en cuenta el tipo de material y su capacidad de eliminación, siendo los sustratos de origen natural como la tierra, la arena y el biocarbon con un porcentaje más alto en eliminación de metales pesados y macrófitas como las *Phragmites australis* y la *Cyperus papyrus* como las más usadas y con un 85 % de capacidad de eliminación de metales pesados .
- Las nuevas aplicaciones de recursos para la remoción de metales pesados en humedales artificiales son la aireación artificial al sistema ya que proporciona una mayor tasa de suministro de oxígeno, “La asociación biochar - bacterias remediadoras de metales pesados, así mismo sistemas con carrizo y bacterias metalotolerantes, planta-bacteria (*P. australis*), planta-bacteria (*Brachia mutica*).
- Se analizaron las técnicas de remoción de metales pesados en humedales artificiales, son sistemas viables y más amigables con el ambiente que otros sistemas para el tratamiento de aguas, se deben incluir información detallada de todos los factores que intervienen en estas técnicas.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar más revisiones sistemáticas sobre humedales artificiales que se hallan desarrollado a cualquier escala, para poder contar con un mayor número de material bibliográfico sobre el tema.
- Se recomienda realizar estudios específicos sobre los sustratos que se utilizan en humedales artificiales, de la misma manera especificar las características particulares de los macrófitos usados para cada sistema.
- Se sugiere realizar más estudios a escala piloto o laboratorio sobre las nuevas combinaciones de tecnologías que se mencionaron a lo largo de la presente investigación con el objetivo de plasmar los resultados obtenidos y que sirva de punto partida hacia la mejora de estos sistemas.
- Se recomienda indicar en los trabajos de investigación experimental los parámetros de los humedales artificiales, como el tiempo de retención, el caudal, la carga hidráulica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABEDI, T. y MOJIRI, A., 2019. Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment. *Environmental Technology and Innovation* [en línea], vol. 16, pp. 100472. ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2019.100472. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472>.
2. AMABIILIS, L. [et al]. Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. *Revisión internacional de contaminación ambiental*. Vol 32, 2016. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992016000100047&lang=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992016000100047&lang=es)
3. ARTEAGA-CORTEZ, V.M., QUEVEDO-NOLASCO, A., DEL VALLE-PANIAGUA, D.H., CASTRO-POPOCA, M., BRAVO-VINAJA, Á. Y RAMÍREZ-ZIEROLD, J.A., 2019. State of art: A current review of the mechanisms that make the artificial wetlands for the removal of nitrogen and phosphorus. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 10, no. 5, pp. 319-342. ISSN 20072422. DOI 10.24850/j-tyca-2019-05-12.
4. BAENA PAZ Guillermina, *Metodología de la investigación*. México: Grupo Editorial Patria S.A, 2014. 144 pp. ISBN: 978607744003-1.
5. BAKHSHOODEH, R., ALAVI, N., iiOLDHAM, C., SANTOS, R.M., BABAEI, A.A., VYMAZAL, J. y PAYDARY, P., 2020. Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, vol. 146, no. December 2019. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2020.105725.
6. BATOOL, A. Y TAWFIK, A. Removal of toxic metals from wastewater in constructed wetland as a green technology; catalyst role of substrates and chelators. Vol. 189, 2019, 10pp. ISSN: 01476513. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109924>.
7. COLARES, G.S., DELL'OSBEL, N., WIESEL, P.G., OLIVEIRA, G.A., LEMOS, P.H.Z., DA SILVA, F.P., LUTTERBECK, C.A., KIST, L.T. y MACHADO, Ê.L., 2020. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 714, pp. 136776. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136776. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776>.
8. CHEN, R.Z. y WONG, M.H., 2016. Integrated wetlands for food production. *Environmental Research* [en línea], vol. 148, pp. 429-442. ISSN 10960953. DOI 10.1016/j.envres.2016.01.007. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2016.01.007>.

9. CASTILLO, E. & VÁSQUEZ, M. (2003). El rigor metodológico en la investigación cualitativa. *Revista Colombia Médica*, Vol. 34, No. 3, pp. 164-167.
10. CRESWELL, J. (2005). *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research*. Upper Saddle River: Pearson Education.
11. DEBUSK I, T.A., LAUGHLIN, R.B. y SCHWARTZ, L.N., 1996. ~ Pergamon retention and compartmentalization of lead and cadmium in wetland microcosms. *War. res. s.l.:*
12. DE LA MORA, C. [et al], Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. Vol.11, ISSN 2448-6698, 2020. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S200711242020000500002&lang=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200711242020000500002&lang=es).
13. CHEN, Y CHENG, J SIPING NIU & YOUNGCHUL KIM (2013) The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresource*, 51: 19-21, 4097-4106, DOI: 10.1080 / 19443994.2013.781106.
14. DO MINH, T., SONG, J., DEB, A., CHA, L., SRIVASTAVA, V. y SILLANPÄÄ, M., 2020. Biochar based catalysts for the abatement of emerging pollutants: A review. *Chemical Engineering Journal* [en línea], vol. 394, pp. 124856. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2020.124856. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124856>.
15. EBRAHIMBABAIE, P., MEEINKUIRT, W. y PICHTEL, J., 2020. Phytoremediation of engineered nanoparticles using aquatic plants: Mechanisms and practical feasibility. *Journal of Environmental Sciences* [en línea], no. xxxx, pp. 1-14. ISSN 10010742. DOI 10.1016/j.jes.2020.03.034. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.034>.
16. FU, G., WU, J., HAN, J., ZHAO, L., CHAN, G. y LEONG, K., 2020. Effects of substrate type on denitrification efficiency and microbial community structure in constructed wetlands. *Bioresource Technology*, vol. 307, no. March. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2020.12322.
17. GARCÍA-HERNÁNDEZ, J., VALDÉS-CASILLAS, C., CADENA-CÁRDENAS, L., ROMERO-HERNÁNDEZ, S., SILVA-MENDIZABAL, S., GONZÁLEZ-PÉREZ, G., LEYVA-GARCÍA, G. y AGUILERA-MÁRQUEZ, D., 2011. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas\* artificial wetlands as a viable treatment method for agricultural drains. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 2, no. Spetial Issue 1, pp. 97-111.

18. GILL, L.W., RING, P., CASEY, B., HIGGINS, N.M.P. y JOHNSTON, P.M., 2017. Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 601-602, pp. 32-44. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.05.182. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.182>.
19. GORGOGLIONE, A. y TORRETTA, V., 2018. Sustainable management and successful application of constructed wetlands: A critical review. 27 October 2018. S.I.: MDPI AG.
20. GUSTAVO, S. [et al]. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. [En línea] Vol. 714, 20 April 2020 [Fecha de consulta: 03 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://sci-hub.tw/10.1016/j.scitotenv.2020.136776> ISSN: S0048969720302862.
21. Hamed, O. [et al]. Performance of pilot hybrid reed bed constructed wetland with aeration system on nutrient removal for domestic wastewater treatment. 2020, ISSN; 23521864. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100891>.
22. HAMAD, M.T.M.H., 2020. Comparative study on the performance of *Typha latifolia* and *Cyperus Papyrus* on the removal of heavy metals and enteric bacteria from wastewater by surface constructed wetlands. *Chemosphere* [en línea], vol. 260, pp. 127551. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.127551. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127551>.
23. HERNANDEZ, Biogás en el sector industrial .Argentina. 2015. pp 45 disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=1TiBAAAQBAJ&pg=PA18&dq=tiempo+retencion+hidraulico&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiO2ZDsnb7pAhVyhOAKHeg9CjUQ6AEIXTAH#v=onepage&q=tiempo%20retencion%20hidraulico&f=false>
24. ILYAS, H. y VAN HULLEBUSCH, E.D., 2020. A review on the occurrence, fate and removal of steroidal hormones during treatment with different types of constructed wetlands. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 103793. ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2020.103793.
25. INGRAO, C., SABINA, F. y ACRIDIACONO C. A comprehensive review of environmental and operational issues of constructed wetland systems. [En línea] Vol. 13, Febrero 2020. [Fecha de consulta: 02 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584419300613> ISSN: S24685844(19)300613.
26. INGRAO, C., FAILLA, S. y ACRIDIACONO, C., 2020a. A comprehensive



- review of environmental and operational issues of constructed wetland systems. *Current Opinion in Environmental Science & Health* [en línea], vol. 13, pp. 35-45. ISSN 24685844. DOI 10.1016/j.coesh.2019.10.007. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468584419300613>.
27. INGRAO, C., FAILLA, S. y ARCIDIACONO, C., 2020b. A comprehensive review of environmental and operational issues of constructed wetland systems. 1 febrero 2020. S.l.: Elsevier B.V.
28. JI, M., HU, Z., HOU, C., LIU, H., NGO, H.H., GUO, W., LU, S. y ZHANG, J., 2020. New insights for enhancing the performance of constructed wetlands at low temperatures. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 301, no. 72, pp. 122722. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2019.122722. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122722>.
29. JIZHENG, P., HOUHU, Z., XUEJUN, L., YONG, L., MIN, Z. y HONGLING, X., 2019. Enhanced nitrogen removal by the integrated constructed wetlands with artificial aeration. *Environmental Technology and Innovation*, vol. 14. ISSN 23521864. DOI 10.1016/j.eti.2019.100362.
30. JOHN, Y., LANGERGRABER, G., ADYEL, T.M. Y EMERY DAVID, V., 2020. Aeration intensity simulation in a saturated vertical up-flow constructed wetland. *Science of the Total Environment* [en línea], vol. 708, pp. 134793. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.134793. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134793>.
31. KHALIFA, M.E., EL-REASH, Y.G.A., AHMED, M.I. y RIZK, F.W., 2020. Effect of media variation on the removal efficiency of pollutants from domestic wastewater in constructed wetland systems. *Ecological Engineering*, vol. 143. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2019.105668.
32. KIIZA, C., PAN, S. qj, BOCKELMANN-EVANS, B. y BABATUNDE, A., 2020. Predicting pollutant removal in constructed wetlands using artificial neural networks (ANNs). *Water Science and Engineering*, ISSN 24058106. DOI 10.1016/j.wse.2020.03.005.
33. KILARU, H., PONNUSAMY, S. y RAMES, C.. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. [En línea]. Vol 290, 15 Septiembre 2019. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://scihub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732219317684> ISSN: 111197.
34. KIZITO, S., LV, T., WU, S., AJMAL, Z., LUO, H. y DONG, R., 2017. Treatment of anaerobic digested effluent in biochar-packed vertical flow constructed wetland columns: Role of media and tidal operation. *Science of*

- the Total Environment [en línea], vol. 592, pp. 197-205. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.03.125. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.125>.
35. KONG, F., ZHANG, Y., WANG, H., TANG, J., LI, Y. y WANG, S., 2020. Removal of Cr(VI) from wastewater by artificial zeolite spheres loaded with nano Fe–Al bimetallic oxide in constructed wetland. *Chemosphere* [en línea], vol. 257, pp. 127224. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2020.127224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127224>.
36. LI, X., ZHU, W., MENG, G., ZHANG, C. y GUO, R., 2020. Efficiency and kinetics of conventional pollutants and tetracyclines removal in integrated vertical-flow constructed wetlands enhanced by aeration. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 273, no. July, pp. 111120. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2020.111120. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111120>.
37. LI, X., DING, A., ZHENG, L., ANDERSON, B.C., KONG, L., WU, A. y XING, L., 2018. Relationship between design parameters and removal efficiency for constructed wetlands in China. *Ecological Engineering* [en línea], vol. 123, no. November 2017, pp. 135-140. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2018.08.005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.005>.
38. LIU, H., HU, Z., ZHANG, J., NGO, H.H., GUO, W., LIANG, S., FAN, J., LU, S. y WU, H., 2016. Optimizations on supply and distribution of dissolved oxygen in constructed wetlands: A review. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 214, pp. 797-805. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2016.05.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.003>.
39. LU, S., GAO, X., WU, P., LI, W., BAI, X., SUN, M. y WANG, A., 2019. Assessment of the treatment of domestic sewage by a vertical-flow artificial wetland at different operating water levels. *Journal of Cleaner Production*, vol. 208, pp. 649-655. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.10.111.
40. LUCKE, T., WALKER, C. y BEECHAM, S., 2019. Experimental designs of field- based constructed floating wetland studies: A review. 10 abril 2019. S.l.: Elsevier B.V.
41. NAMAUFOROOS, M.. Metodología de la investigación. México: Editorial Limusa, 2005. 528 pp. ISBN: 9681855178

42. MARZEC, M., GIZIŃSKA-GÓRNA, M., JÓŹWIAKOWSKI, K., PYTKA WOSZCZYŁO, A., KOWALCZYK-JUŚKO, A. y GAJEWSKA, M., 2019. The efficiency and reliability of pollutant removal in a hybrid constructed wetland with giant miscanthus and Jerusalem artichoke in Poland. *Ecological Engineering*, vol. 127, pp. 23-35. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2018.11.008.
43. McQueen, A. [et al]. Performance of a hybrid pilot-scale constructed wetland system for treating oil sands process-affected water from the Athabasca oil sands. 2017, 14 pp. ISSN: 09258574. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.024>
44. Mertens, D. (2005). *Research and evaluation in Education and Psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods*. Thousand Oaks: Sage.
45. MOHAMMED, A. y BABATUNDE, A.. Modelling heavy metals transformation in vertical flow constructed wetlands. [En línea]. Vol 354, 24 June 2017 [Fecha de consulta 11 de mayo de 2019]. Disponible en <https://sci-hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438001730042> ISSN: 3546271
46. MUÑOZ, E., CONTRERAS, A. y MOLERO, M. *Ingeniería del medio ambiente*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2018. 546 pp. ISBN: 9788436274899
47. ODINGA, C.A., SWALAHA, F.M., OTIENO, F.A.O., RANJITH, K.R. y BUX, F., 2013 Investigating the efficiency of constructed wetlands in the removal of heavy metals and enteric pathogens from wastewater. *Environmental Technology Reviews*, vol. 2, no. 1, pp. 1-16. ISSN 21622523. DOI 10.1080/21622515.2013.865086.
48. PABELLO, L. Y CASTAÑEDA, A. Sistema de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del bosque de San Juan de Aragón. Vol 17, 2014. ISSN: 3255. Disponible en: doi:10.1016/s1405-888x(14)70318-3
49. RAN, B. [et al]. Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands. [en línea]. Vol 238, 15 May 2019. [Fecha de consulta: 02 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719302154> ISSN: 484498

50. RANI, A., NEGI, S., HUSSAIN, A. y KUMAR, S., 2020. Treatment of urban municipal landfill leachate utilizing garbage enzyme. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 297, pp. 122437. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2019.122437.  
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122437>.
51. ROUS, V., VYMAZAL, J. y HNÁTKOVÁ, T., 2019. Treatment wetlands aeration efficiency: A review. *Ecological Engineering* [en línea], vol. 136, no. June, pp. 62-67. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2019.06.006.  
Disponible en: [sci-hub.tw/10.1016/j.ecoleng.2019.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.006).
52. SALGADO, A.. Investigación cualitativa: diseño, evaluación del rigor metodológico y retos. Lima: Liberabit [En línea], vol. 13, n. 13 [Fecha de consulta 01 de junio de 2020].  
Disponible en:  
[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1729-48272007000100009](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-48272007000100009) ISSN: 17294827
53. Schierano, María [et al]. Horizontal subsurface Flow constructed wetland for tertiary treatment of dairy wastewater removal efficiencies and plant uptake. 2020, 7pp. ISSN: 0301-4797. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111094>
54. SHAHID, M. [et al]. Comparing the performance of four macrophytes in bacterial assisted floating treatment wetlands for the removal of trace metals (Fe, Mn, Ni, Pb, and Cr) from polluted river water. Vol 243, 2019. ISSN: 125353. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125353
55. SHINGARE, R.P., THAWALE, P.R., RAGHUNATHAN, K., MISHRA, A. Y KUMAR, S. 2019. Constructed wetland for wastewater reuse: Role and efficiency in removing enteric pathogens. *Journal of Environmental Management*, vol. 246, no. August 2018, pp. 444-461. ISSN 10958630. DOI 10.1016/j.jenvman.2019.05.157.
56. Saeed, T., Haque, I., Khan, T. Organic matter and nutrients removal in hybrid constructed wetland: Influence of saturation. Vol 371, 2019, ISSN: 13858947. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.030>
57. Steidl, J., Kalettka, A. y Bauwe, A. Nitrogen retention efficiency of a Surface-flow constructed wetland receiving tile drainage water: A case study from north-eastern Germany. 2019. ISSN: 01678809. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106577>

58. SAN MIGUEL, G Y GUTIÉRREZ, Tecnologías para el uso y transformación de biomasa: Ediciones Mundi Prensa, 2015, pp ISBN: 978-84-8476-674-2  
STRATFORD, M., 2018. Welcome to Mendeley: Quick Start Guide. ,
59. SYLLA, A., 2020. Domestic wastewater treatment using vertical flow constructed wetlands planted with *Arundo donax*, and the intermittent sand filters impact. *Ecohydrology and Hydrobiology*, vol. 20, no. 1, pp. 48-58. ISSN 20803397. DOI 10.1016/j.ecohyd.2018.11.004.
60. SINGH, S. Y CHAKRABORTY, S. Performance of organic substrate amended constructed wetland treating acid mine drainage (AMD) of North-Eastern India. Vol. 397, 2020, pp.12. ISSN: 03043894. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122719>
61. TAN, I Y WAHAB, S. Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. Vol. 22, ISSN: 22147144, 2018. Disponible en: <https://sci-hub.st/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714417306669>
62. TOLEDO, S. [ET AL]. Efficiency of horizontal subsurface Flow-constructed wetlands considering different support materials and the cultivation positions of plant species. Vol 15, ISSN:1980993, 2020. Disponible en: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-993X2020000200307&lang=es](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2020000200307&lang=es)
63. ÚSUGA, F.A., PATIÑO, A.F., RODRÍGUEZ, D.C. y PEÑUELA, G.A., 2018. Kinetic study and removal of contaminants in the leachate treatment using subsurface wetlands at pilot scale. *Revista Ion, Investigación, Optimización y nuevos procesos en Ingeniería [en línea]*, vol. 30, no. 2, pp. 55-63. ISSN 0120100X. DOI 10.18273/revion.v30n2-2017005. Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/8213/8211>.
64. VÁSQUEZ, L. [et al]. Introducción a las técnicas cualitativas de investigación aplicadas en salud. Barcelona: Servei, 2006. p.133. ISBN: 844902420X
65. VYMAZAL, J., 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering [en línea]*, vol. 73, pp. 724-751. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2014.09.034. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>.

66. VYMAZAL, J. y BŘEZINOVÁ, T., 2016. Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. 2016. S.l.: s.n.
67. WANG, H., XU, J. y SHENG, L., 2020. Purification mechanism of sewage from constructed wetlands with zeolite substrates: A review. 10 junio 2020. S.l.: Elsevier Ltd.
68. WANG, Liuwei, HOU, D., CAO, Y., OK, Y.S., TACK, F.M.G., RINKLEBE, J. y O'CONNOR, D., 2020. Remediation of mercury contaminated soil, water, and air: A review of emerging materials and innovative technologies. *Environment International* [en línea], vol. 134, no. July 2019, pp. 105281. ISSN 18736750. DOI 10.1016/j.envint.2019.105281. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105281>.
69. WANG, Yanting, CAI, Z., SHENG, S., PAN, F., CHEN, F. y FU, J., 2020. Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. *Science of The Total Environment* [en línea], vol. 701, pp. 134736. ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.134736. Disponible en: [sci-hub.tw/10.1016/j.scitotenv.2019.134736](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736).
70. WANG, Ying, LUO, Y., ZENG, G., WU, X., WU, B., LI, X. y XU, H., 2020. Characteristics and in situ remediation effects of heavy metal immobilizing bacteria on cadmium and nickel co-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [en línea], vol. 192, no. August 2019, pp. 110294. ISSN 10902414. DOI 10.1016/j.ecoenv.2020.110294. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110294>.
71. XIN, J., TANG, J., LIU, Y., ZHANG, Y. y TIAN, R., 2019. Pre-aeration of the rhizosphere offers potential for phytoremediation of heavy metal-contaminated wetlands. *Journal of Hazardous Materials* [en línea], vol. 374, no. March, pp. 437-446. ISSN 18733336. DOI 10.1016/j.jhazmat.2019.04.010. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.010>.
72. YAN, F. y ZHANG, S., 2019. Ecosystem service decline in response to wetland loss in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Ecological Engineering*, vol. 130, no. January, pp. 117-121. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2019.02.009.
73. ZHANG, X., WANG, T., XU, Z., ZHANG, L., DAI, Y., TANG, X., TAO, R., LI, R., YANG, Y. y TAI, Y., 2020. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal. *Chemical Engineering*

Journal [en línea], vol. 379, no. May 2019, pp. 122363. ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2019.122363. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122363>.

74. ZHAO, Q., HUANG, J.C., HE, S. y ZHOU, W., 2020. Enhancement of a constructed wetland water treatment system for selenium removal. *Science of the Total Environment*, vol. 714. ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.136741.

75. ZHOU, X., LIANG, C., JIA, L., FENG, L., WANG, R. y WU, H., 2018. An innovative biochar-amended substrate vertical flow constructed wetland for low C/N wastewater treatment: Impact of influent strengths. *Bioresour. Technol.* [en línea], vol. 247, pp. 844-850. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2017.09.044. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.044>.

## ANEXOS

### FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO



## FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO

**TITULO: TÉCNICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES**

<b>PAGINAS UTILIZADAS</b>	<b>AÑO DE PUBLICACION</b> <input type="text"/>	<b>LUGAR DE PUBLICACION</b> <input type="text"/>
---------------------------	---	---

<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b>	<b>AUTOR (ES):</b>
-------------------------------	--------------------

<b>CODIGO</b> :	
<b>PALABRAS CLAVES</b> :	
<b>Tipo de humedal artificial</b>	
<b>Tipos de sustratos</b> :	
<b>Metodología</b>	
<b>Efectividad de remoción de metales pesados</b>	
<b>conclusiones</b>	
<b>recomendaciones</b>	





**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

### **Declaratoria de Originalidad de los Autores**

Nosotros, LIMAYMANTA POVIS CAROL JOANA, OCHOA ESPINOZA KAREN RUTH estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "REVISIÓN SISTEMÁTICA: TÉCNICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

<b>Nombres y Apellidos</b>	<b>Firma</b>
LIMAYMANTA POVIS CAROL JOANA <b>DNI:</b> 41588950 <b>ORCID</b> ORCID: 0000-0003-0726-1724	Firmado digitalmente por: CLIMAYMANTAPO29 el 28-12-2020 22:24:42
OCHOA ESPINOZA KAREN RUTH <b>DNI:</b> 70021788 <b>ORCID</b> 0000-0002-9746-9061	Firmado digitalmente por: OKAREN el 28-12-2020 22:21:06

Código documento Trilce: INV - 0154611