

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



“Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales”

Tesis para optar el título de Ingeniero de Minas, que presentan los Bachilleres:

Jorge Rolando Pulcha Villalobos

Michael Prince Valencia Narva

Asesora: Dra. Maribel Giovana Guzmán Córdova

Lima, Junio, 2019

RESUMEN

El Perú es un país con gran potencial minero, teniendo 1159557 ha en producción, donde la minería utiliza aproximadamente 207 MMC/año de agua ($6,6 \text{ m}^3/\text{s}$) donde de esta el 22 % de agua residual es tratada.

Según políticas estatales vigentes actualmente, el Perú adopta nuevas medidas para prevenir la contaminación de los recursos hídricos, flora y fauna, y que estos contaminantes se encuentren dentro del rango de límites máximos permisibles según la ley nacional e internacional, para que así el proceso extractivo llevado a cabo en determinada región sea ambientalmente amigable.

Nuestra tesis investiga los humedales artificiales con la intención de evaluar la disminución de los niveles concentración de contaminantes eco-tóxicos (nitratos, amonio y competidores como iones metálicos cobre o plomo) de aguas residuales de una operación minera.

La investigación evalúa el tratamiento de aguas residuales a disposición, para lo cual se realizó un análisis de los parámetros necesarios para el diseño y, con ello, construir un sistema artificial de flujo sub superficial. Además, se probaron especies vegetales *Schoenoplectus californicus* (totora) y *Schoenoplectus lacustris* (carrizo), como parte de los componentes de un humedal artificial. En este sentido se construyó un humedal piloto con materiales filtrantes (piedra, arena, grava y tierra) y las especies vegetales antes mencionadas.

Luego que las aguas residuales conteniendo cobre, cinc y plomo fueran tratadas en nuestros humedales artificiales pilotos, los niveles de concentración disminuyeron en un tanto por ciento y se evaluó si el agua tratada estaba dentro de los límites permisibles para la descarga, según lo demanda las normas vigentes.

Finalmente, se elaboró un flujo de costos con un factor de escala para la implementación de esta alternativa de tratamiento para llevarlo a pequeña y mediana minería, además de comunidades aledañas a las minas que puedan mantener aguas con un grado de calidad.

ABSTRACT

Peru is a country with a great potential in the mining industry where the production is about 1159557 ha. Mining in Peru uses approximately 207 MMC/year of water (6, 6 m³/s), where only 22% of residual waters are treated. According to actual state policies, Peru has adopted new measures for preventing pollution of hydric resources, flora and fauna and also to maintain the pollutants between the range of the maximum permissible limits according to national and international laws. Following this policies, extraction activity in the regions becomes eco-friendly.

Our thesis investigates artificial wetlands with the intention of evaluating the decreasing of the concentration levels of eco-toxic pollutants (nitrates, ammonium and metallic ions of copper or lead) of residual waters of mining operations.

The investigation evaluates the treatment of residual waters. To accomplish this, an analysis of necessary parameters for the design was performed. With this information, an artificial system with sub superficial flow was created. In addition, *Schoenoplectus californicus* (totora) and *Schoenoplectus lacustris* (carrizo) were used as the vegetable species for the artificial wetland. The pilot of the artificial wetland was constructed using filtrating materials (rocks, sand, gravel and soil) and the vegetal species mentioned before.

After the residual waters were treated in our artificial wetlands, the levels of concentration of copper, zinc and lead diminished and we evaluated if the treated water was inside the permissible limits of discharge according to the demands in actual laws.

Finally, we elaborated a flow of costs as a scale factor for the implementation of this alternative as a treatment in small and medium mining and also in communities near mines so the quality of their water can be maintained.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora de tesis, Dra. Maribel Guzmán por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación ha logrado en nosotros la culminación de nuestros estudios con éxito; además, de sus consejos y visión crítica para nuestra formación como investigadores.

De igual manera agradecemos a la empresa Buenaventura, Minera La Zanja por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación, el cual muestra una iniciativa para continuar trabajando en bien de las causas sociales, económicas y ambientales.

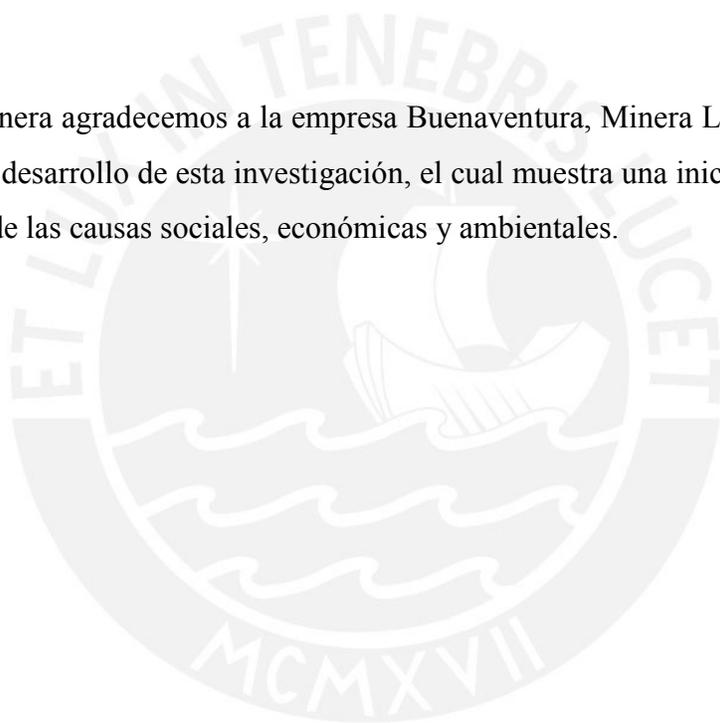


TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 3 |
| 1.1.1. Nacionales | 3 |
| 1.1.2 Internacionales..... | 4 |
| 1.2. Justificación..... | 5 |
| 1.3. Hipótesis..... | 5 |
| 1.4. Objetivos | 6 |
| 1.4.1. General | 6 |
| 1.4.2 Específicos..... | 6 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. Aguas Residuales | 7 |
| 2.1.1. Fuentes Potenciales de Generación de Aguas Residuales | 8 |
| 2.1.2 Instituciones que conforman el sistema estatal para la gestión del recurso hídrico | 11 |
| 2.1.3. Autorización para el vertimiento de aguas residuales | 11 |
| 2.2. Legislación Ambiental | 12 |
| 2.3. Norma Legales del Ambiente: Calidad Ambiental | 15 |
| 2.4. Tratamiento de aguas residuales | 19 |
| 2.4.1. Tratamiento activo..... | 19 |
| 2.4.2. Tratamiento pasivo | 20 |
| 2.5. Humedales artificiales | 21 |
| 2.5.1. Tipos de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas | 23 |
| 2.5.2. Componentes del Humedal Artificial de flujo superficial..... | 26 |
| 2.5.3. Especies vegetales de humedales en Lima | 29 |
| 2.5.4. Especies vegetales seleccionadas | 31 |
| 2.5.5. Toxicidad de metales pesados | 34 |
| 2.5.6. Mecanismos de absorción de las plantas y proceso de depuración | 35 |
| 3. PARTE EXPERIMENTAL | 42 |
| 3.1. Diseño y Construcción de los humedales..... | 42 |
| 3.1.1. Construcción de las celdas | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2. Instalación de red de tuberías para el flujo y tubos de aireación/piezómetros | 43 |
| 3.1.3. Impermeabilización y colocación de las capas filtrantes | 44 |
| 3.1.4. Determinación de parámetros hidráulicos | 45 |
| 3.1.5. Sustrato | 46 |
| 3.1.6. Vegetación | 46 |
| 3.2. Registro de condiciones experimentales | 47 |
| 3.2.1. Caracterización de las condiciones iniciales de capa filtrante y especies vegetales ... | 47 |
| 3.3. Diseño experimental..... | 48 |
| 3.3.1. Parámetros para evaluar niveles de contaminación del agua residual | 49 |
| 3.3.2. Metodología de recolección de muestras para análisis | 49 |
| 3.3.2.1. Ubicación de puntos de muestro..... | 50 |
| 3.3.2.2. Descripción de procedimiento experimental | 51 |
| 3.3.2.3. Procedimiento previo a la toma de muestras | 54 |
| 3.3.2.4. Procedimiento de toma de muestras | 55 |
| 3.3.2.5. Análisis de campo..... | 55 |
| 3.4. Presentación de resultados | 57 |
| 3.4.1. Parámetros físico químicos | 57 |
| 3.4.2. Aniones..... | 63 |
| 3.4.3. Metales Pesados..... | 66 |
| 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 71 |
| 4.1. Parámetros físico químicos | 71 |
| 4.2. Aniones..... | 74 |
| 4.2. Metales pesados..... | 77 |
| 5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN WETLAND ARTIFICIAL..... | 81 |
| 5.1. Presupuesto a nivel de laboratorio | 81 |
| 5.2. Valorización económica a escala | 82 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 83 |
| 7. RECOMENDACIONES | 86 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 89 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1: Principales fuentes potenciales de aguas residuales | 1 |
| Tabla 2: Parámetros para la caracterización de las aguas residuales | 2 |
| Tabla 3: Instituciones que conforman el sistema del estado para la gestión del recurso hídrico | 11 |
| Tabla 4: Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM | 17 |
| Tabla 5: Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM | 18 |
| Tabla 6: Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM | 18 |
| Tabla 7: Reactivos químicos utilizados en los tratamientos activos..... | 20 |
| Tabla 8: Tecnologías pasivas para el tratamiento de efluentes..... | 20 |
| Tabla 9: Contaminantes presentes en aguas residuales | 27 |
| Tabla 10: Listado de Familias y especies reportadas para los seis humedales estudiados | 30 |
| Tabla 11: Taxonomía totora | 33 |
| Tabla 12: Taxonomía carrizo | 33 |
| Tabla 13: Dimensiones de las subceldas preparadas | 43 |
| Tabla 14: Parámetros Hidráulicos de las celdas | 45 |
| Tabla 15: Condiciones experimentales | 47 |
| Tabla 16: Evaluación de la capacidad depuradora de las especies vegetales para concentraciones de nitrato y amonio. | 48 |
| Tabla 17: Parámetros físico-químicos | 49 |
| Tabla 18: Cantidades utilizadas de contaminantes | 53 |
| Tabla 19: Valores de temperatura durante el experimento | 57 |
| Tabla 20: Resultados del pH de las aguas residuales para los ensayos con totora y carrizo | 58 |
| Tabla 21: Valores de BOD para carrizo y totora | 59 |
| Tabla 22: Valores de turbidez para carrizo y totora en unidades nefelométricas (NTU). | 60 |
| Tabla 23: Valores de conductividad para carrizo y totora | 61 |
| Tabla 24: Sólidos en suspensión para Carrizo y Totora. | 63 |
| Tabla 25: Evaluación del nitrato durante el periodo de investigación | 64 |
| Tabla 26: Evaluación del amonio durante el periodo de investigación | 65 |
| Tabla 27: Análisis de absorción atómica AAS de cobre en el humedal artificial | 67 |
| Tabla 28: Grado de depuración por estación y por especie vegetal en el día 7 del experimento. 67 | |

| | |
|---|-----------|
| Tabla 29: Concentración del cobre once días después (día 18)..... | 68 |
| Tabla 30: Análisis de adsorción atómica AAS de zinc en el humedal artificial | 68 |
| Tabla 31: Grado de depuración por estación y por especie vegetal en el día 7 del experimento | 69 |
| Tabla 32: Concentración de cinc once días después | 69 |
| Tabla 33: Análisis de adsorción atómica AAS de plomo en el humedal artificial | 69 |
| Tabla 34: Grado de depuración por estación y por especie vegetal en el día 7 del experimento | 70 |
| Tabla 35: Concentración de plomo once días después | 70 |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----------|
| Figura 1: Diagrama de humedal artificial de flujo superficial | 24 |
| Figura 2: Diagrama de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal | 25 |
| Figura 3: Diagrama de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical | 26 |
| Figura 4: Mapa de distribución de los seis humedales en Lima..... | 29 |
| Figura 5: Reacciones realizadas por microorganismo en el ciclo del nitrógeno | 39 |
| Figura 6: Cálculo del índice de eliminación | 40 |
| Figura 7: Distribución de las cuatro celdas y especies vegetales | 41 |
| Figura 8: Distribución de rizomas a lo largo de la subcelda; relación de ancho, alto y largo para cada subcelda | 43 |
| Figura 9: Distribución de piezómetros, los cuales servirán como puntos de control y fuentes de aeración..... | 44 |
| Figura 10: Utilización de bombas peristálticas para extracción de muestras | 44 |
| Figura 11: Capa filtrante | 45 |
| Figura 12: Distribución de especies vegetales para las celdas | 46 |
| Figura 13: Aclimatación de especies vegetales | 47 |
| Figura 14: Distribución de puntos de muestreo y especies vegetales | 51 |
| Figura 15: Adaptación de especies vegetales en agua reposada | 52 |
| Figura 16: Preparación de contaminantes a usar | 53 |
| Figura 17: Uso de limpiador ultrasónico | 54 |
| Figura 18: Vaciado de contaminantes en las celdas | 54 |
| Figura 19: Rotulado de envases con codificación | 55 |
| Figura 20: Toma de muestras | 55 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 21: Conservación de muestra | 56 |
| Figura 22: Análisis de muestras (parámetros físico-químicos) | 56 |
| Figura 23: Variación de temperatura en días de evaluación | 57 |
| Figura 24: Medición de pH Carrizo y Totora | 58 |
| Figura 25: Medición de BOD Carrizo y Totora | 60 |
| Figura 26: Medición de Turbidez Carrizo y Totora | 61 |
| Figura 27: Medición de Conductividad Carrizo y Totora | 62 |
| Figura 28: Medición de Sólidos en suspensión Carrizo y Totora..... | 63 |
| Figura 29: Comportamiento de la remoción de nitrato en las cuatro celdas. | 65 |
| Figura 30: Comportamiento de la remoción de amonio en las cuatro celdas..... | 66 |
| Figura 31: Evaluación del competidor metálico cobre | 78 |
| Figura 32: Evaluación del competidor metálico zinc | 79 |
| Figura 33: Evaluación del competidor metálico plomo | 80 |



1. Introducción

La actividad minera a través de la producción de aguas residuales puede producir alteraciones en el área de trabajo, que pueden llevar a impactos ambientales negativos, tanto para las comunidades aledañas como para la misma operación, especialmente en los cuerpos de agua.

Para evitar que esto suceda, los estados implementan normas y establecen estándares de calidad de los efluentes, los cuales deben ser cumplidos para poder ser vertidos al ambiente. La problemática para las distintas empresas mineras es la del alto costo que tiene el tratamiento de las aguas antes mencionadas.

Se elaboró la siguiente tabla con las principales fuentes potenciales de generación de las aguas residuales en la industria minero-metalúrgica.

Tabla 1:

Principales fuentes potenciales de aguas residuales

| Principales fuentes potenciales de generación de las aguas residuales en la industria minero-metalúrgica | |
|--|--|
| 1 | Aguas de minas |
| 2 | Drenajes ácidos de minas (DAM) |
| 3 | Relaves: efluentes metalúrgicos de plantas concentradoras |
| 4 | Drenaje Ácido de Relaves (ARD) |
| 5 | Aguas residuales de plantas concentradoras fundiciones y/o refinerías, o tratamiento de cualquier mineral, concentrado, metal, o subproducto |
| 6 | Aguas ácidas de depósitos de desmontes |
| 7 | Aguas residuales domésticas |

En la industria minero-metalúrgica de los metales básicos y metales preciosos, las regulaciones están dirigidas a mantener bajo control las variables que más fácilmente pueden sobrepasar los límites, entre los cuales se ha considerado:

Se elaboró la siguiente tabla con parámetros para la caracterización de aguas residuales.

Tabla 2:

Parámetros para la caracterización de las aguas residuales

| Parámetros para la caracterización de las aguas residuales |
|---|
| pH |
| Sólidos suspendidos |
| Aceites y grasas |
| Cianuros: libre, WAD y total |
| Metales pesados: plomo, cobre, zinc, hierro, manganeso, mercurio, selenio, níquel, cadmio |
| Arsénico |
| Coliformes termo tolerantes |
| Demanda bioquímica de oxígeno |
| Demanda química de oxígeno |
| Temperatura |

La implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, en los cuales se aplica el agua de forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación de la misma se ha convertido en una interesante opción de reducción o eliminación de metales en estos efluentes. Los humedales artificiales, consisten en una tecnología natural de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. La depuración se consigue gracias a varios fenómenos físicos, químicos y biológicos producidos por las plantas. Los humedales son utilizados para el tratamiento de a agua a nivel:

- Doméstico
- Industrial
- Drenaje de extracción minera
- Escorrentía superficial agrícola y urbana

1.1. Antecedentes

1.1.1. Nacionales

Con respecto a los antecedentes de la investigación, a nivel nacional se encontraron los siguientes trabajos: La compañía minera Antamina posee el humedal Tucush se encuentra a 4100 msnm, en la quebrada del mismo nombre. Tiene una capacidad de tratamiento de diseño de 115 L/s. En este humedal se sembraron dos especies vegetales: *Scirpus californicus* y *juncus acrticus*.

Entre las funciones del humedal en primer lugar se buscó el tratamiento de las aguas de escorrentía provenientes del botadero de material C de la Quebrada Tucush. Asimismo, otra función fue el asegurar la buena calidad de las descargas de esa Quebrada que son afluentes del río Ayash. También tiene como objetivo ser una alternativa innovadora, mediante el uso de métodos pasivos, para el plan de cierre de mina. Los resultados de este método fueron la remoción de nitrato y remoción de amonio.

Por otro lado, en el año 2006 Wilmer Alberto Llagas Chafloque y Enrique Guadalupe Gómez diseñaron un sistema de humedales artificiales tipo sistema de agua superficial libre (SASL) para el tratamiento de aguas residuales en la Ciudad Universitaria de la UNMSM, donde se describió la formulación matemática de los procesos biológicos en el humedal artificial. Además, las aguas residuales a tratar fueron provenientes de la red de alcantarillado de la Ciudad Universitaria. Finalmente, en este experimento se concluyó que los modelos matemáticos analizados para los sistemas de agua superficial libre (SASL) requieren ser comprobados con datos de campo ya que son sensibles a los cambios de temperatura en los lugares donde se van a llevar a cabo. (Llagas y Guadalupe, 2006).

1.1.2. Internacionales

Con respecto a las investigaciones internacionales, la Dra. Kathe Seidel perteneciente al Instituto Max Panck de Alemania, elaboró en el año 1965 el primer reporte científico en donde se estableció el potencial de plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales. A través de empleo de junco se demostró que era posible la remoción de una serie de sustancias orgánicas, inorgánicas, y la desaparición de bacterias como por ejemplo los coliformes, la salmonella y el terococos presentes en las aguas residuales (Seidel,1965).

Por otro lado, en el año 2005 Álvarez García realizó la investigación titulada Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de proceso de cianuración en minería de oro en la Universidad de Oviedo en España. El objetivo de la investigación fue evaluar las posibilidades que este tipo de tratamiento (tratamientos pasivos) ofrecen para la depuración los compuestos derivados del cianuro presentes en los efluentes durante el proceso de cianuración. Se trabajó mediante humedales recreados en laboratorio lo cual permitió recrear el tratamiento in-situ a escala piloto. Mediante el tratamiento con tecnologías pasivas con condiciones de aireación y circulación a través de sustratos combinando con condiciones aerobias y anaerobias, metales que existen en solución, así como los iones nitrato y nitrito, son eliminados de manera eficaz. Se estableció que de 10% a 15% de la eliminación de cianuro de la solución se debe a mecanismo de degradación natural (Álvarez, 2005).

1.2. Justificación

El presente trabajo evaluará la implementación de humedales artificiales como un método alternativo de tratamiento para la reducción de contaminantes ecotóxicos de las distintas aguas residuales producidas por la industria minera.

Estudios previos han estimado que del uso de humedales para la remoción de contaminantes es más económico que otros métodos de tratamiento por no necesitar mantenimiento ni consumir energía eléctrica. En este sentido los humedales artificiales cuestan menos que la cuarta parte de un sistema de tratamiento tradicional. Asimismo, los humedales se construyen utilizando diferentes especies de plantas que abundan en la zona, por lo que contribuye a las empresas con un ahorro considerable en costos operativos.

Por otro lado, el impacto comunitario que se tendría con la implementación de un humedal artificial, sería muy alentador, ya que visualmente es un sistema eco-amigable y a la vez la comunidad aledaña a la operación minera sería testigo del tratamiento correspondiente de las aguas residuales. Incentivando de esta manera un monitoreo participativo.

Dado que es una investigación a escala de laboratorio, podría ser de gran aporte teórico para futuras implementaciones de humedales a una mayor escala y con todos los beneficios antes mencionados.

1.3. Hipótesis

Especies vegetales como la totora y el carrizo bajo condiciones de diseño de wetlands artificiales adsorben contaminantes ecotóxicos (amonio, nitrato y competidores adicionales como el cobre y el plomo) de las aguas residuales de la industria minera en determinada proporción y en un tiempo determinado.

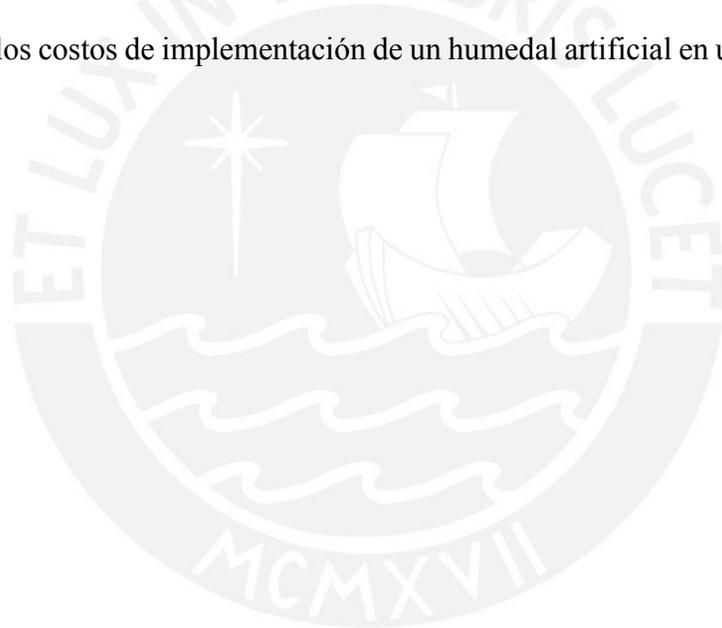
1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales por medio de humedales artificiales.

1.4.2. Objetivos específicos

- Proponer un diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales.
- Evaluar la disminución de la concentración de contaminantes en las aguas residuales.
- Verificar el cumplimiento de los estándares medioambientales de descarga.
- Estimar los costos de implementación de un humedal artificial en una operación minera



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas residuales

Existen varias definiciones de agua residual, las cuales detallamos a continuación:

- Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado. (OEFA, 2014).
- Aquellas aguas que debido a la intervención humana contienen gran cantidad de contaminantes y que representan peligro (Espigares García, 1985)

Dentro de este concepto se incluyen aguas con diversos orígenes:

- Aguas residuales domésticas Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente (OEFA, 2014)
- Aguas residuales domésticas o aguas negras: proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas. (Espigares García, 1985)
- Aguas residuales municipales Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado. (OEFA, 2014).
- Aguas residuales industriales: proceden de los procesamientos realizados en establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas

y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales. (Espigares García, 1985)

- Aguas residuales agrícolas: procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo. (Espigares García, 1985)

2.1.1. Fuentes potenciales de generación de aguas residuales

Las aguas residuales de la industria minera dependen de cada empresa de este rubro, ya que varían de acuerdo a la actividad productiva que realiza cada una (naturaleza del mineral que extrae, hidrología de la región, tipo de operación, procesos de beneficio, etc), y su generación puede ocurrir durante la exploración, operación o cierre de una mina.

El Efluente líquido de actividades minero-metalúrgico, no es más que un flujo regular o estacional de sustancia líquida en contacto con cuerpos receptores y provienen de:

- Labores de excavación o movimiento de tierras efectuado en el terreno (exploración, explotación, beneficio, transporte o cierre de minas, así como campamentos, sistemas de abastecimiento de aguas o energía, talleres, almacenes, vías de acceso de uso industrial y otros)
- Planta de procesamiento de minerales (Chancado molienda, flotación, separación gravimétrica, separación magnética, fundición, refinación, lixiviación, extracción por solventes y otros)
- Sistema de tratamiento de aguas residuales asociadas con actividades mineras
- Depósito de residuos mineros (depósitos de relaves, desmontes, escorias y otros)

- Infraestructura auxiliar relacionada con el desarrollo de actividades mineras

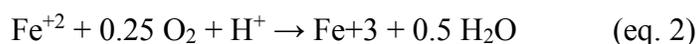
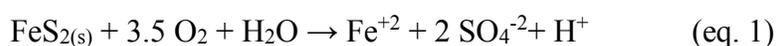
❖ Aguas de minas

Generan aguas residuales cuando contienen concentraciones de sólidos suspendidos mayores a lo que demanda la norma, pH fuera del rango de la norma, altas concentraciones de metales disueltos y/o totales, como plomo, cobre, zinc, hierro, manganeso, arsénico, mercurio, selenio, níquel, cadmio y otros.

❖ Drenajes ácidos de minas

Se da cuando los minerales que contienen formas de azufre se oxidan a través de la exposición al oxígeno y agua durante las perturbaciones de tierra. grandes cantidades de H⁺ son liberados causando el bajo pH del agua dando lugar a la formación de ácido sulfúrico. En general, la acidez extrema se moviliza (produce formas solubles que son transportadas por aguas de drenaje) metales que se liberan de los minerales sulfuros que Oxidar y de los minerales asociados. Esta movilización ocurre porque una serie de metales (Al, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Zn) se vuelven más solubles en agua ya que el pH disminuye y se dice que son "solubles en ácido" (Skousen, 2011)

El mineral más común generador de DAM es la Pirita (FeS₂). Representación de formación de DAM con pirita.



❖ Relaves

Desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo, provenientes de los procesos de concentración, producidos, transportados y depositados en forma de lodo, provenientes del

tratamiento en las plantas concentradoras en forma de pulpa (mezcla de agua y sólidos) compuestos de sólidos suspendidos, metales en solución, reactivos usados en el proceso agentes químicos empleados en la flotación o modificadores del pH.

Los relaves del punto de descarga pasan a la poza de decantación, donde el agua remanente de la pulpa se acumula para ser recirculada o bien a la planta concentradora o ser vertida a un cuerpo receptor (una quebrada, un río o una laguna), esta segunda opción es la fuente potencial de generación de aguas residuales (Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros, MINEM, 2013).

❖ **Aguas ácidas de depósitos de desmontes**

Las aguas en contacto con los desmontes poseen potencial de generación de producir drenaje ácido. La producción de aguas ácidas en los depósitos de desmontes tiene el mismo mecanismo que la producción de drenaje ácido de mina. Efluentes metalúrgicos de plantas concentradoras, fundiciones y/o refinerías, o tratamiento de cualquier mineral, concentrado, metal, o subproducto:

En todas las etapas del tratamiento metalúrgico para la obtención de metales, se pueden producir aguas residuales metalúrgicas, las cuales pueden tener: alto contenido de sólidos en suspensión, alta acidez y/o alta concentración de metales disueltos. (Guía Ambiental para el Manejo de Agua en Operaciones Minero-Metalúrgicas, MINEM, 2013).

❖ **Aguas residuales domésticas**

Aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente. Pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado. (OEFA, 2014).

2.1.2. Instituciones del estado que gestionan los recursos hídricos

El marco institucional del manejo de los recursos hídricos a nivel nacional está fragmentado. El principal organismo responsable del manejo de los recursos hídricos a nivel nacional es el Ministerio de Agricultura (MINAG). En 2008, el gobierno peruano creó la Autoridad Nacional del Agua, organismo adscrito al MINAG, absorbiendo la Intendencia de Recursos Hídricos, que se encontraba previamente bajo el control del INRENA. La Autoridad Nacional del Agua (ANA) es responsable del diseño y puesta en marcha a escala nacional de las políticas sobre recursos hídricos sostenibles y riego. Se elaboró la siguiente tabla con un resumen de las instituciones del estado que se encargan de gestionar los recursos hídricos en el Perú.

Tabla 3:

Instituciones que conforman el sistema del estado para la gestión del recurso hídrico (OEFA, 2014)

| Instituciones que regulan y gestionan el Recurso Hídrico |
|--|
| Autoridad Nacional del Agua (ANA) |
| MINAM, MINAGRI, MVCS, MINSA, MINPRO, MINEM |
| Gobiernos regionales y locales, a través de sus órganos competentes |
| Organizaciones de usuarios agrarios y no agrarios |
| Las entidades operadoras de los sectores hidráulicos, de carácter sectorial y multisectorial |
| Comunidades campesinas y comunidades nativas |
| Entidades públicas vinculadas a la gestión de los recursos hídricos |
| Proyectos especiales, proyectos especiales hidráulicos e hidroenergéticos regionales, nacionales y binacionales |
| Autoridades ambientales competentes, las entidades prestadoras de servicios de saneamiento, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y la Autoridad Marítima del Perú |
| Todas aquellas entidades del sector público cuyas actividades o acciones estén vinculadas con la gestión de los recursos hídricos. |

2.1.3. Autorización para el vertimiento de aguas residuales

En lo que respecta al vertimiento de aguas residuales en cualquier cuerpo natural de agua continental o marina, con la nueva normativa la competencia de autorización de cualquier vertimiento ha quedado en manos de la ANA.

Para ello, debe contarse con la opinión previa favorable de:

- a. La autoridad ambiental, para lo cual mediante resolución jefatural 0291-2009-ANA se establece que se trata de la autoridad ambiental sectorial o regional correspondiente
- b. La autoridad de salud, el Ministerio de Salud (MINSA), con relación al cumplimiento de los estándares de calidad ambiental del agua (ECA para agua) y los límites máximos permisibles (LMP).

Como requisito para obtener la autorización, el reglamento dispone que se debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva (se entiende, hasta la fecha, la autoridad sectorial encargada de la actividad que se realiza), un documento que debe considerar al menos los siguientes aspectos relacionados con las emisiones:

- a. Someter los residuos a los necesarios tratamientos previos.
- b. Comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación.

2.2. Legislación ambiental

2.2.1. LEY N° 28611.- LEY GENERAL DEL AMBIENTE

“**Artículo 31°.-** Del Estándar de Calidad Ambiental. 31.1 El Estándar de Calidad Ambiental - ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (...)”.

“**Artículo 121°.-** Del vertimiento de aguas residuales. El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas

naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes.”

Artículo 122°.- Del tratamiento de residuos líquidos.

Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.”

2.2.2. LEY N° 29338.- LEY DE RECURSOS HÍDRICOS

“**Artículo 76°.-** Vigilancia y fiscalización del agua. La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.”

“Artículo 79°.- Vertimiento de agua residual. La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización. En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

“Artículo 80°.- Autorización de vertimiento. Todo vertimiento de agua residual en una fuente natural de agua requiere de autorización de vertimiento, para cuyo efecto debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva

“Artículo 81°.- Evaluación de impacto ambiental. Sin perjuicio de lo establecido en la Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, para la aprobación de los estudios de impacto ambiental relacionados con el recurso hídrico se debe contar con la opinión favorable de la Autoridad Nacional.”

2.2.3. REGLAMENTO DE LA LEY N° 29338 - LEY DE RECURSOS HÍDRICOS, APROBADO POR DECRETO SUPREMO N° 001-2010-AG

“**Artículo 131°.-** Aguas residuales y vertimientos. Para efectos del Título V de la Ley se entiende por:

- a. Aguas residuales, aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo.
- b. Vertimiento de aguas residuales, es la descarga de aguas residuales previamente tratadas, en un cuerpo natural de agua continental o marítima. Se excluye las provenientes de naves y artefactos navales.”

“**Artículo 137°.-** Otorgamiento de autorizaciones de vertimientos de aguas residuales tratadas. 137.1 La Autoridad Nacional del Agua otorga autorizaciones de vertimientos de aguas residuales tratadas con las opiniones previas técnicas favorables de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud y de la autoridad ambiental sectorial competente de acuerdo al procedimiento que, para tal efecto, establece dicha Autoridad. (...)”

“**Artículo 145°.-** Control de vertimientos autorizados. El control de los vertimientos que ejecuta la Autoridad Administrativa del Agua incluye visitas inopinadas a los titulares de las autorizaciones de vertimientos, a fin de cautelar la protección de la calidad de las aguas y verificar el cumplimiento de las condiciones establecidas en la autorización de vertimiento.”

2.3. NORMAS LEGALES DEL AMBIENTE: CALIDAD AMBIENTAL

Se puede defender el concepto calidad ambiental como el conjunto de características del ambiente, en función a la disponibilidad y facilidad de acceso a los recursos naturales y a la ausencia o presencia de agentes nocivos. Todo esto necesario para el mantenimiento y crecimiento de la calidad de vida de los seres humanos. Asociados a este concepto, se encuentran los términos “estándar de calidad ambiental” y “límite máximo permisible”, instrumentos de gestión ambiental

que buscan regular y proteger la salud pública y la calidad ambiental, permitiéndole a la autoridad ambiental desarrollar acciones de control, seguimiento y fiscalización de los efectos causados por las actividades humanas. (Compendio de la legislación ambiental peruana, 2010).

❖ **Límites Máximos Permisibles (LMP)**

Los LMP miden la concentración de ciertos elementos, sustancias y/o aspectos físicos, químicos y/o biológicos que se encuentran en las emisiones, efluentes o descargas generadas por una actividad productiva en particular, pues son a través de ellos que se puede afectar el aire, el agua o el suelo.

La fijación de dichos límites tiene como finalidad proteger al ambiente y la salud humana de ciertos elementos y/o sustancias que puedan representar un riesgo para ellas, pero a diferencia de los ECA los LMP establecen un límite aplicable a las emisiones, efluentes o descargas al ambiente, individualizando los límites por actividad productiva. Así, los LMP son exigibles y su cumplimiento es obligatorio para cada una de las personas o empresas de cada sector.

Por ese motivo, cada una de las personas o empresas debe realizar las acciones necesarias para que su accionar no implique sobrepasar los LMP establecidos. Entre los sectores para los que se han establecido LMP tenemos: transportes y comunicaciones, minería, hidrocarburos, electricidad, construcción y saneamiento, industria cementera, de curtiembres y papel, así como la industria pesquera, entre otros.

Tabla 4:*Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM*

| Parámetro | Unidad | Límite en cualquier momento | Límite para el Promedio anual |
|-------------------------------|--------|-----------------------------|-------------------------------|
| pH | | 6 - 9 | 6 - 9 |
| Sólidos Totales en Suspensión | mg/L | 50 | 25 |
| Aceites y Grasas | mg/L | 20 | 16 |
| Cianuro Total | mg/L | 1 | 0,8 |
| Arsénico Total | mg/L | 0,1 | 0,08 |
| Cadmio Total | mg/L | 0,05 | 0,04 |
| Cromo Hexavalente(*) | mg/L | 0,1 | 0,08 |
| Cobre Total | mg/L | 0,5 | 0,4 |
| Hierro (Disuelto) | mg/L | 2 | 1,6 |
| Plomo Total | mg/L | 0,2 | 0,16 |
| Mercurio Total | mg/L | 0,002 | 0,0016 |
| Zinc Total | mg/L | 1,5 | 1,2 |

Nota. Tomado del Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM

❖ Estándares de calidad Ambiental (ECA)

Los ECA son indicadores de calidad ambiental. Miden la concentración de elementos, sustancias u otros en el aire, agua o suelo. Su finalidad es fijar metas que representan el nivel a partir del cual se puede afectar significativamente el ambiente y la salud humana. No son de exigencia legal sino son usados para el establecimiento de políticas ambientales públicas. En la medida en que son estándares generales, se deben aplicar a la sociedad en su conjunto. Es decir, no miden las emisiones de alguien en particular, sino que buscan establecer un nivel aceptable de calidad para las emisiones realizadas por todos nosotros. La medición se realiza directamente en el aire, agua o suelo (conocidos como cuerpos receptores), dependiendo del caso. Así los ECA indican, por ejemplo, que en el aire solo puede existir una determinada concentración de partículas por millón (ppm) de CO₂ (dióxido de carbono), sin importar qué industria, municipio o persona es la que generó la emisión. Se asume que todos somos responsables de dichas emisiones.

Tabla 5:

Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM

| Parámetros | Unidad de Medida | Riego de vegetales y bebida de animales | | |
|-----------------------------|------------------|---|----------------------|-------------------------------------|
| | | Subcategoría D1: Riego de vegetales | | Subcategoría D2: Bebida de animales |
| | | Riego restringido | Riego no restringido | Bebida de animales |
| Potencial de Hidrógeno (pH) | Unidad de pH | 6,5 – 8,5 | | 6,5 – 8,4 |
| Sulfatos | mg/L | 1000 | | 1000 |
| Temperatura | °C | Δ 3 | | Δ 3 |
| INORGÁNICOS | | | | |
| Aluminio | mg/L | 5 | | 5 |
| Arsénico | mg/L | 0,1 | | 0,2 |
| Bario | mg/L | 0,7 | | ** |
| Berilio | mg/L | 0,1 | | 0,1 |
| Boro | mg/L | 1 | | 5 |
| Cadmio | mg/L | 0,01 | | 0,05 |
| Cobre | mg/L | 0,2 | | 0,5 |
| Cobalto | mg/L | 0,05 | | 1 |
| Cromo Total | mg/L | 0,1 | | 1 |
| Hierro | mg/L | 5 | | ** |
| Litio | mg/L | 2,5 | | 2,5 |
| Magnesio | mg/L | ** | | 250 |
| Manganeso | mg/L | 0,2 | | 0,2 |
| Mercurio | mg/L | 0,001 | | 0,01 |
| Níquel | mg/L | 0,2 | | 1 |
| Plomo | mg/L | 0,05 | | 0,05 |
| Selenio | mg/L | 0,02 | | 0,05 |
| Zinc | mg/L | 2 | | 24 |

Nota. Tomado de la Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM

Tabla 6:

Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM

| Parámetros | Unidad de Medida | Riego de vegetales y bebida de animales | | |
|---|------------------------------|---|----------------------|-------------------------------------|
| | | Subcategoría D1: Riego de vegetales | | Subcategoría D2: Bebida de animales |
| | | Riego restringido | Riego no restringido | Bebida de animales |
| FÍSICOS- QUÍMICOS | | | | |
| Aceites y grasas | mg/L | 5 | | 10 |
| Bicarbonatos | mg/L | 518 | | ** |
| Cianuro Wad | mg/L | 0,1 | | 0,1 |
| Cloruros | mg/L | 500 | | ** |
| Color (b) | Color verdadero escala Pt/Co | 100 (a) | | 100 (a) |
| Conductividad | (μS/cm) | 2 500 | | 5 000 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L | 15 | | 15 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L | 40 | | 40 |
| Detergentes (SAAM) | mg/L | 0,2 | | 0,5 |
| Fenoles | mg/L | 0,002 | | 0,01 |
| Fluoruros | mg/L | 1 | | ** |
| Nitratos (NO ₃ ⁻ -N) + Nitritos (NO ₂ ⁻ -N) | mg/L | 100 | | 100 |
| Nitritos (NO ₂ ⁻ -N) | mg/L | 10 | | 10 |

Nota. Tomado de la Resolución Ministerial N° 072-2017-MINAM

2.4. Tratamiento de aguas residuales

En los últimos años se ha venido desarrollando una práctica conocida como tratamiento pasivo con la posibilidad de que procesos naturales de depuración de aguas contaminadas pudieran resultar útiles cuando se aplican a aguas de mina. La denominación pasiva, nace para distinguirlo del tratamiento convencional, del tratamiento activo, que aplica la ingeniería de aguas residuales aplicado a las aguas de esta industria. El desarrollo de esta práctica ha generado muchos atractivos tanto desde el punto de vista económico con un análisis costo/beneficio como el medio ambiental. (Álvarez, 2005)

Entonces se definen dos tipos de tratamientos para las aguas residuales de la industria minero metalúrgico: Los métodos de tratamiento se dividen Activo, lo que significa depender de la adición de sustancias químicas para neutralizar la acidez, o pasiva que depende de factores biológicos, geoquímicos y gravitatorios, pues no requiere un cuidado constante, (Skousen, 2000)

2.4.1. Tratamiento activo

El tratamiento activo requiere de la participación de energía artificial externa para mejorar la calidad de agua a tratar (Younger, 2002).

El método más utilizado para mitigar los efluentes ácidos es un proceso de tratamiento activo que implica la adición de un agente neutralizante químico (Coulton et al., 2003).

El tratamiento activo mejora la calidad del agua mediante métodos que requieren de la participación de fuentes de energía artificial o reactivos químicos (Álvarez, 2005).

La energía artificial se puede suministrar de distintas formas: energía eléctrica, energía calorífica, en forma de presión entre otros. Y los reactivos químicos son compuestos generadores de alcalinidad para elevar el pH, acelerar la velocidad de oxidación química junto con aireación

activa o adición de un agente oxidante químico y causa que muchos de los metales presente en solución precipiten en hidróxidos y carbonatos (Álvarez, 2005; Johnson.2005). Se elaboró la siguiente tabla con los reactivos químicos de tratamientos activos.

Tabla 7:

Reactivos químicos utilizados en los tratamientos activos

| Tratamiento Químico |
|---------------------|
| pedra caliza |
| cal viva |
| cal hidratada |
| soda caustica |
| soda ash |
| Amoniaco |

2.4.2. Tratamiento pasivo

En los últimos años, se han desarrollado una variedad de sistemas de tratamiento de este tipo, que no requieren insumos químicos continuos y que aprovechan las ventajas naturales químico- biológicas para limpiar las aguas de las minas contaminadas. En relación con el tratamiento químico, los sistemas pasivos requieren tiempos de retención más largos y mayor espacio, proporcionan una eficiencia de tratamiento menos segura por estar sujetos a fallos a largo plazo. Sin embargo, reducen sustancialmente los costos de tratamiento de agua en muchas de las minas, además de reducir la contaminación y proteger al medio ambiente (Faulkner y Skousen, 1994). Se elaboró la siguiente tabla con las tecnologías pasivas para el tratamiento de efluentes.

Tabla 8:

Tecnologías pasivas para el tratamiento de efluentes

| Tratamientos Pasivos |
|---|
| Canales abiertos de piedra caliza |
| Estanques de piedra caliza |
| Sistemas sucesivos de producción de alcalinidad |
| Drenajes de piedra caliza anóxicos |
| anaerobias Humedales |
| Humedales aeróbicos |
| Humedales Construidos |

2.5. Humedales artificiales

Los humedales naturales son caracterizados por suelos o sedimentos saturados de agua, con vegetación de apoyo adaptada reduciendo las condiciones en su rizosfera. Los humedales construidos son ecosistemas artificiales que imitan a sus homólogos naturales. A menudo consisten en excavaciones superficiales llenas de una grava, suelo y materia orgánica para apoyar las plantas de humedales, como *Typha*, *Juncus* y *Scirpus* sp. El tratamiento depende de las interacciones biogeoquímicas dinámicas como el agua contaminada viaja a través del humedal construido. (Skousen, 2000)

Los humedales son zonas de transición entre tierra y agua. Todos los humedales, ya sean, naturales o construidos, tienen una característica en común: presencia de superficies de agua, al menos periódicamente. En la mayoría de los humedales, las condiciones hidrológicas son tales que el sustrato está saturado el tiempo suficiente para crear condiciones de escasez de oxígeno.

La falta de oxígeno crea una reducción dentro del sustrato y limita a la vegetación a las especies que son adaptadas a ambientes con bajo contenido de oxígeno. La hidrología de los humedales es generalmente de flujos lentos (proporcionan tiempos de contacto prolongados) y aguas poco profundas para permitir sedimentación de elementos contaminantes. Entre el agua y las superficies dentro de la Humedal existe una masa compleja de materiales inorgánicos, se dan diversas oportunidades para los intercambios gas y agua fomentando una comunidad diversa de microorganismos que se descomponen o transforman en una variedad de sustancias. La mayoría de los humedales apoyan el crecimiento de plantas vasculares adaptadas a condiciones saturadas.

Esta vegetación ralentiza el agua, crea microambientes dentro de la columna de agua, y sitios de unión para la comunidad microbiana, y proporciona una fuente de carbono, nitrógeno y fósforo para alimentar procesos microbianos (Handbook of constructed wetland, 1994).

Asimismo, los humedales artificiales se definen como zonas construidas por el hombre en las que de manera controlada se reproducen procesos de eliminación de contaminantes (Alianza por el agua, 2004).

El sistema de tratamiento de agua residuales se realiza a través de tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación en el lugar de restitución según como lo menciona Fernández *et. al* (2004) citado por Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade (2010). Los humedales que han sido construidos se han utilizado para el tratamiento de distintas aguas residuales provenientes del ámbito doméstico, urbano, industrial, drenaje de extracciones mineras, escorrentía y de fangos de depuradoras convencionales.

Según Stearman et al (2003) citado por Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade (2010, p.7). Los humedales eliminan contaminantes a través de varios procesos que van a incluir la sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas y la absorción de reacciones químicas y volatilización. De esta manera reemplaza el tratamiento secundario e inclusive bajo condiciones especiales puede reemplazar el primario y terciario.

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos:

- a) Actividad bioquímica de los microorganismos
- b) Aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día
- c) Apoyo físico de un lecho inerte que funciona como soporte para el enrizamiento de los vegetales además de que sirve como material filtrante.

En conjunto estos tres elementos descritos permiten la eliminación del material disuelto y que se encuentran suspendidos en el agua residual. Según Lara (1999) citado por Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade (2010), las funciones básicas de los humedales son las siguientes:

- a) Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica

- b) Utilizar y transformar los elementos por medio de microorganismos
- c) Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento requerido.

La tecnología de los humedales artificiales puede ser considerada como un ecosistema complejo en donde destacan los siguientes elementos (Alianza por el agua, 2004):

- Sustrato: sirve de soporte de la vegetación, permite la fijación de la población microbiana que va a participar en la mayoría de procesos de eliminación de los contaminantes en el agua.
- Vegetación o macrófitas: contribuyen a la oxigenación del sustrato, la eliminación de los nutrientes y también el lugar donde se desarrolla la biopelícula.
- Agua a tratar: esta circula a través del sustrato y la vegetación.

2.5.1. Tipos de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales

La clasificación de los humedales artificiales está en función de si el agua fluye a través de los sustratos de forma superficial (es decir por encima del sustrato) o de manera subterránea (a través del sustrato). Es así que surge la siguiente clasificación (Alianza por el agua, 2004, p.224):

❖ Humedales artificiales de flujo superficial (HAFS)

En este tipo de humedales, el agua está directamente expuesta a la atmósfera y circula a través de los tallos de las plantas. Estos humedales pueden ser considerados como una serie de lagunas clásicas con la diferencia que se opera con menores profundidades de la lámina de agua y de que las balsas están colonizadas por plantas acuáticas emergentes. Suelen ser instalaciones de varias hectáreas que principalmente tienen efluentes procedentes de tratamientos secundarios y que también pueden ser empleados para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.

La alimentación de este tipo de humedales se efectúa de manera constante y la depuración tiene como lugar el tránsito de las aguas a través de los tallos y las raíces de la vegetación emergente plantada. Los tallos, las raíces y las hojas funcionan como soporte para la fijación de la película bacteriana que es responsable de los procesos de biodegradación mientras que las hojas que se ubican por encima de la superficie del agua brindan sombra a la masa de agua y así se evita el crecimiento de micro algas.

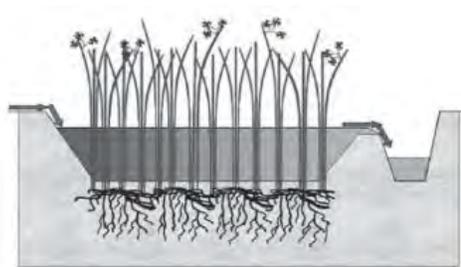


Figura 1. Diagrama de humedal artificial de flujo superficial (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010)

En estos humedales, la superficie más cercana es aeróbica mientras que las aguas más profundas y el substrato es anaeróbico. La construcción de este tipo de humedal representa un costo bajo al igual que su operación y mantenimiento (Davis, 1994).

Con respecto al paisaje, este tipo de humedales artificiales es recomendable ya que permite albergar a distintas especies de peces, aves y puede ser construido en lugares turísticos y sitios de estudio ya que ofrecen un escenario para el estudio de las diversas interacciones biológicas que se producen.

❖ **Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS)**

Los humedales de flujo subsuperficial se caracteriza por el hecho de que el agua circula a través de un material granular (arena, grava, gravilla) cuya permeabilidad es suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación que

en su mayoría suele ser carrizo. Este tipo de humedales son instalaciones de menor tamaño que los de flujo superficial y se emplea en el tratamiento de aguas residuales generadas en poblaciones cuyo núcleo sea menor a 2000 habitantes.

La vegetación es plantada en este medio granular y el agua está en contacto con rizomas y las raíces de las plantas. Este tipo de humedales se dividen en dos categorías en función a la forma de aplicación del agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical.

Es importante mencionar que el agua residual no ingresa de manera directa al medio granular principal, sino que existe una zona de amortiguación formada por grava de mayor tamaño. El sistema de recogida consiste de los siguientes elementos: un tubo de drenaje cribado el cual es rodeado con grava de igual tamaño que la que fue utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y de salida oscila entre 50mm y 100mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro que puede ser entre 3 mm a 32 mm (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010,). Por otro lado, los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados de manera intermitente. De esta manera, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz vienen seguidas por períodos de insaturación que estimulan el suministro de oxígeno.

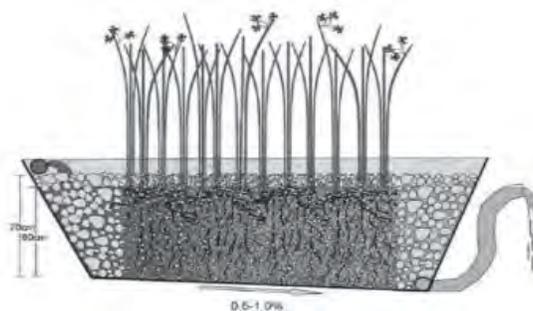


Figura2. Diagrama de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010)

Para favorecer las condiciones aerobias del medio se suele incluir un sistema de aeración chimeneas que son tuberías cribadas con salidas al exterior. Se diferencia del humedal subsuperficial horizontal ya que el sustrato está constituido por varias capas, las más finas se hallan en la parte superior aumentando el diámetro de grava conforme desciende. Este tipo de humedal presenta una serie de ventajas frente al de flujo superficial ya que necesita menos superficie de terreno para su ubicación y evita la aparición de mosquitos y olores que surgen cuando el agua fluye de manera superficial. Asimismo, presentan una mejor respuesta al descenso de temperatura en el ambiente. Entre sus desventajas se encuentra el costo de la construcción del sustrato y el riesgo de colmatación del sustrato.

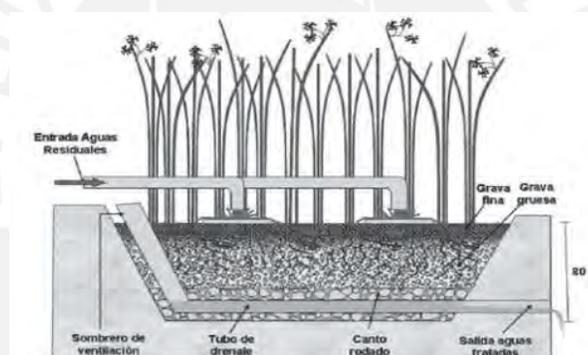


Figura3. Diagrama de humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010)

2.5.2. Componentes del humedal artificial de flujo subsuperficial

Según Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade (2010), los humedales de flujo subsuperficial están constituidos por los siguientes elementos:

a) Agua residual:

Estas provienen del sistema de abastecimiento de agua de una determinada población. Luego de ser modificadas por diversos usos ya sea en actividades domésticas, industriales y comunitarias son recogidas por una red de alcantarillado que las conduce hacia el humedal. Según su uso

procedente, estas aguas son el resultado de la combinación de líquidos y residuos sólidos que surgen de distintas fuentes.

b) Contaminantes eco tóxicos

Sustancias que liberadas en el ambiente pueden tener efectos adversos inmediatos o a largo plazo debido a la bio acumulación o efectos tóxicos en los sistemas biológicos. La eco toxicidad es la resultante del estrés de los tóxicos que actúan en el ambiente.

En la siguiente tabla se muestran los principales contaminantes presentes en las aguas residuales.

Tabla 9:

Contaminantes presentes en aguas residuales

| Contaminantes | Importancia |
|--------------------------------|--|
| Sólidos suspendidos | Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático. |
| Materia orgánica biodegradable | Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general, se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas. |
| Microorganismos patógenos | Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades. |
| Nutrientes | Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, pueden contaminar también el agua subterránea. |
| Compuestos tóxicos | Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales. |
| Materia orgánica refractaria | Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas. |
| Metales pesados | Los metales pesados son normalmente adicionados mediante actividades humanas. Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad. |
| Sólidos inorgánicos disueltos | Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual, por ser potenciales degradadores del suelo. |

Nota. Tomado de “Metcalf y Eddy en Rolim, 2000”

c) Sustrato o medio granular:

El sustrato está conformado por el suelo que puede ser arena, grava, roca, sedimentos y restos vegetales que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. Es importante que el medio posee la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular principalmente grava con un diámetro de 5 mm.. El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias que contaminan y esto se logra a través de interacciones físicas y químicas. De forma indirecta, el medio granular contribuye a eliminar contaminantes ya que sirve de soporte para el crecimiento de plantas y colonia de microorganismo que llevan a cabo la acción biodegradadora.

d) Vegetación:

El papel de la vegetación está determinado por las raíces y los rizomas enterrados. Las plantas son organismos que utilizan la energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Las plantas tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallo hasta el medio en donde se hallan las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno que está disponible para llevar a cabo una serie de reacciones de degradación de la materia orgánica y la nitrificación.

Según Lara (1999) citado por Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, (2010, p.13), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento de las aguas residuales de varias formas:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo
- Generan velocidades de agua baja lo cual permite la sedimentación y que los materiales que se encuentren suspendido se depositen
- Toman el carbono, nutrientes y otros elementos y los incorporan a la planta
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos

- El tallo y los sistemas de la raíz se convierten en sitios en donde se fijan los microorganismos

e) **Microorganismos:**

Estos son los encargados de realizar el tratamiento biológico. En la parte superior del humedal en donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno de la atmósfera, se van a desarrollar colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho del humedal van a predominar los microorganismos anaerobios.

2.5.3. Especies vegetales de humedales en la zona de Lima

Del estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú) de Aponte & Cano (2013), donde realizaron un compendio de la flora que albergan seis humedales de la costa del departamento de Lima (los humedales de Puerto Viejo, los pantanos de Villa, los humedales de Ventanilla, los humedales de Santa Rosa, la laguna El Paraíso y las albuferas de Medio Mundo), se reportaron un total de 123 especies (foco importante de diversidad florística en el desierto costero de Lima).

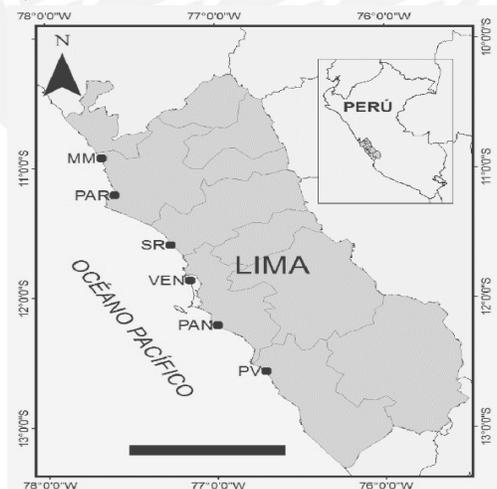


Figura 4. Mapa de distribución de los seis humedales en Lima. MM=albufera de Medio Mundo, PAR=laguna El Paraíso; SR=humedales de Santa Rosa; VEN=humedales de Ventanilla; PAN=pantanos de Villa; PV=humedales de Puerto Viejo. Escala=100 km.

Tabla 10: Listado de Familias y especies reportadas para los seis humedales estudiados, indicando su forma de crecimiento (FC), procedencia (PR), usos (U); (según la USDA et al. (2012) y León et al. (1998)) y su presencia en los humedales evaluados (X).

| FAMILIA / ESPECIE | FC | PR | U | USDA et al. (2012) | León et al. (1998) | PV ³ | PAN ⁴ | VEN ⁵ | SR ² | PAR ¹ | MM ¹ |
|--|--------|----|---|--------------------|--------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| AIZOACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Sesuvium portulacastrum</i> (L.) L. | H | N | X | OR/RV | | X | X | X ^o | X | X | X |
| <i>Trianthema portulacastrum</i> L. | H | I | X | MD | | | | | X | | |
| ALISMATACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Sagittaria montevidensis</i> Cham. & Schltdl. | H | In | | | | | X | | | | |
| AMARANTHACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Alternanthera halimifolia</i> (Lam.) Standl. ex Pittier | H | I | | | | X | X ^(h) | X ^o | | | |
| <i>Alternanthera pubiflora</i> (Benth.) Kuntze | H | I | | | | X | X ^(h) | | | | |
| <i>Chenopodium ambrosioides</i> L. | H | I | | | | X | | X ^b | X | | |
| <i>Chenopodium macrospermum</i> Hook. f. | H | I | | | | | X | X ^o | | X | X |
| <i>Chenopodium murale</i> L. | H | IP | X | MD | | X | | | X | | |
| <i>Sarcocornia neei</i> (Lag.) M.A. Alonso & M.B. Crespo. | H | N | | | | X | X | X ^o | X | X | X |
| APIACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Apium graveolens</i> L. | H | In | X | MD | A | | X | | | | |
| <i>Cyclospermum laciniatum</i> (DC.) Constance | H | I | | | | | | | X | | |
| ARALIACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Hydrocotyle bonariensis</i> Lam. | H (EE) | N | | | | | X | | X | * | * |
| <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L.f. | H (EE) | IP | | | | | X | | X | | |
| ARACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Colocasia esculenta</i> (L.) Schott | H | I | X | OR/AF/A/MD | | | X ^(h) | | X | | |
| <i>Lemna gibba</i> L. | H (FL) | IP | X | A/F | F/I/MP | | X | | X | | |
| <i>Lemna minuta</i> Kunth | H (FL) | N | | | F/I/MP | | X | | X | | |
| <i>Pistia stratiotes</i> L. | H (FL) | IP | X | OR/F/CB | MP/I/OR | | X | | X | | |
| <i>Spirodela intermedia</i> W. Koch | H (FL) | N | | | MP | | X | | | | |
| <i>Wolffia columbiana</i> H. Karst. | H (FL) | N | | | | | X | | X | | |
| ASTERACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Acmella oleracea</i> (L.) R.K. Jansen | H | I | X | A/MD/PL | | X | | | | | |
| <i>Baccharis salicifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers. | A | N | | | | | | X ^o | | | |
| <i>Bidens pilosa</i> L. | H | I | X | MP/A/MD | | | | X ^b | | | |
| <i>Ambrosia artemisiifolia</i> L. | H | I | X | MD | | | | | X | | |
| <i>Cichorium intybus</i> L. | H | I | X | A/MD | | | | X ^o | | | |
| <i>Conyza bonariensis</i> (L.) Cronquist | H | I | | | | | | | X | | |
| <i>Eclipta prostrata</i> (L.) L. | H | I | X | MD | | | X | X ^o | X | | |
| <i>Encelia canescens</i> Lam. | A | N | | | | X | | | | X | * |
| <i>Enydra sessilifolia</i> (Ruiz & Pav.) Cabrera | H | N | | | | | X | X ^o | X | X | |
| <i>Erigeron leptorhizon</i> DC. | H | N | | | | | X | | | * | |
| <i>Tessaria integrifolia</i> Ruiz & Pav. | A | N | | | | | | X ^o | X | * | |
| <i>Picrosia longifolia</i> D. Don | H | I | | | | | X | | | | |
| <i>Pluchea chingoyo</i> (Kunth) DC. | A | N | | | | X | | | | | |
| <i>Spilanthes leiocarpa</i> DC. | H | I | | | | X | X | | | X | |
| <i>Spilanthes urens</i> Jacq. | H | N | | | | | | X ^o | | | |
| <i>Symphytichum subulatum</i> (Michx.) G.L. Nesom | H | I | | | | | | | X | | |
| BATACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Batis maritima</i> L. | H | N | | | | X | | | | | |
| BORAGINACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Heliotropium curassavicum</i> L. | H | N | X | MD | | X | X | X ^o | X | X | X |
| BRASSICACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Nasturtium officinale</i> W.T. Aiton | H | In | | | | | X | | X | | |
| CERATOPHYLLACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Ceratophyllum demersum</i> L. | H (S) | I | X | OR | I | | X | | | | |
| CONNELINACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Commelina fasciculata</i> Ruiz & Pav. | H | I | | | | | | X ^b | X | | |
| <i>Schoenoplectus californicus</i> (C.A. Mey.) Soják | | | | | | | | | | | |
| | H (EE) | N | X | ER/FB | FB | X | X | | X | X | |
| POACEAE | | | | | | | | | | | |
| <i>Arundo donax</i> L. | A | I | X | OR/CB/C/MD | C/I/OR | X | | X | * | * | |

Forma de crecimiento: A= arbusto, H= hierba (H), y dentro de las hierbas las acuáticas emergentes (EE), acuáticas flotantes (FL) y acuáticas sumergidas (S).

Procedencia In=Introducidas, I=Invasoras, IP=Invasora Potencial, N=Nativa.

Usos OR=ornamental, A=Alimento para humanos, C=material de construcción, I=indicador de contaminación, MP=remoción de metales pesados, F=forraje, ER=control de la erosión, MD=medicinal, RV=para revegetación, CB=combustibles, AG=agroforestal, PL=control de plagas, FB=fibra, B=abono, AC=Aceites esenciales, REL=religioso, M=para obtención de miel, MT=para madera y taninos, CE=para su uso como césped, GEN=fuente de genes.

2.5.4. Especies vegetales seleccionadas

a) *SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS (TOTORA)*

La totora es una planta que crece, tanto de manera silvestre como cultivada, en lagunas, zonas pantanosas, huachaquos y balsares de la costa y sierra del Perú, desde el nivel del mar hasta los 4,000 m de altitud. Los ecosistemas conformados por los totorales se caracterizan por albergar una importante diversidad de vida silvestre, donde se aprecian aves residentes y migratorias, peces de agua dulce, numerosos anfibios como sapos y ranas, y gran cantidad de plantas acuáticas como el jacinto de agua, repollo de agua y el lirio flotante, entre otros. Especie perenne, rizomatosa, que en su hábitat natural se comporta principalmente como acuática helófito. Los tallos son simples, erectos, pueden alcanzar 3 m de altura.

Plantas de climas templados, que prosperan en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pHs (4-9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo 16-27°C. En cuanto a su tolerancia a la contaminación, se puede indicar que en general soportan bien los niveles normales de contaminación orgánica de las aguas residuales domésticas. en un determinado contexto experimental que es más eficiente que la enea en la remoción de N y P. se utilizan principalmente en humedales artificiales de flujo sub-superficial (lecho de grava/arena),

ya que su tolerancia a la inundación permanente cuando la capa de agua es profunda, es limitada, aunque otras especies pueden tolerar profundidades mayores. Su productividad es baja en relación con las eneas o los carrizos; aproximadamente es de 5-12 t ms/ha/año, repartida prácticamente a partes iguales entre la biomasa aérea y la subterránea. Los contenidos en N y P de parte aérea y parte subterránea son, respectivamente del orden de 1.6% N y 0.12% P, y 1.2% N y 0.18% P. Más que la remoción de nutrientes, el papel principal en los humedales es el de actuar de filtro, potenciando los mecanismos de sedimentación-separación. (Curt, 2009)

b) *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CARRIZO)

Planta acuática perteneciente a la familia de las gramíneas (Poaceae), cuyas características morfológicas recuerdan a la caña común *Arundo donax*, que es una planta terrestre muy conocida. Crece en zonas inundadas con el sistema radicular arraigado en fango o fondo del humedal, y desarrolla una estructura vegetativa emergente por encima de la lámina de agua. Según algunos autores el carrizo es la especie vegetal de mayor distribución conocida a nivel mundial de entre todas las plantas superiores. Se encuentra en todos los continentes, excepto en la Antártida. Siendo muy común en cursos de agua, formando típicamente cinturones continuos a lo largo del cauce; también es muy corriente en humedales, y otros espacios inundados, pudiendo vivir en medios muy alterados, tanto alcalinos como ácidos. (Curt, 2009)

Se desarrolla tanto en aguas no contaminadas como en aguas alteradas de naturaleza orgánica, alcalina o salina. Su expansión se relaciona con el incremento en la contaminación mineral de las aguas (especialmente, nitratos), y el aumento de su salinidad. Tolerancia a distintos parámetros de contaminación muy amplia, pudiendo además relacionarse con las características particulares del ecotipo. Hay estudios que refieren valores para el influente del orden de 500 mg O₂/l de DBO₅, 60 mg/l de N total, 20 mg/l de N-NH₄ y 14 mg/l de fósforo. Con respecto a la tolerancia

a la salinidad, se citan valores de tolerancia máxima del orden de 2% de concentración de sales, pero puede crecer con la influencia de aguas marinas (3.5% sal) si el medio en que está la parte subterránea (raíces y rizomas) tiene <2% sal. El carrizo se utiliza como helófito en los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial de manera prácticamente generalizada, porque es una planta muy rústica, polimorfa, con amplia variabilidad entre ecotipos. Añade un efecto oxigenador por liberación de oxígeno desde los rizomas. La capacidad de extracción de nutrientes puede estimarse en función de la composición de sus tejidos; la biomasa aérea contiene aproximadamente 1.1% de nitrógeno y 0.12% de fósforo, y la subterránea 1.0% N y 0.15% fósforo. (Curt, 2009). Se elaboraron las siguientes tablas con la taxonomía de las especies vegetales seleccionadas.

❖ Taxonomía de las especies vegetales seleccionadas

Tabla 11: Taxonomía de la totora

| TAXONOMÍA | |  |
|--------------|------------------|--|
| Reino | vegetal | |
| División | fanerógamas | |
| Subdivisión | angiospermas | |
| Clase | monocotiledóneas | |
| Superorden | glumiflorales | |
| Orden | cyperales | |
| Familia | cyperaceas | |
| Género | Schoenoplectus | |
| Especie | totora | |
| Nombre común | totora | |

Tabla 12: Taxonomía del carrizo

| TAXONOMÍA | |  |
|--------------|----------------------|--|
| Reino | vegetal | |
| División | Magnoliophyta | |
| Subdivisión | angiospermas | |
| Clase | Liliopsida | |
| Orden | Poales | |
| Familia | Poaceae | |
| Subfamilia: | Arundinoideae | |
| Género | Phragmites | |
| Especie | Phragmites australis | |
| Nombre común | carrizo | |

2.5.5. Toxicidad de metales pesados

❖ Cobre

El cobre se presenta en la naturaleza como metal nativo, y también en forma de minerales sulfurados como calcopirita (CuFeS_2), calcosita (Cu_2S) y óxido cuproso (Cu_2O).

El cobre es uno de los micronutrientes esenciales para las plantas, se conocen al menos treinta enzimas que contienen cobre, cuyas funciones son catálisis redox o transportadores de oxígeno. Sin embargo, a niveles elevados resulta tóxico, por lo que los niveles de cobre en los ecosistemas naturales y su disponibilidad biológica son importantes. La forma que toma este metal (iónica, compuesta o precipitada), y por tanto su disponibilidad dependen de factores ambientales como el pH, el potencial redox, el suelo y tipo de sedimento, la dureza del agua y el contenido orgánico, factores que varían dependiendo del ecosistema (Flemming & Trevor, 1989).

En concentraciones altas el cobre es tóxico para los organismos, y su efecto es fuerte en plantas y peces. En plantas produce lesiones en las raíces, inhibe el crecimiento radicular y promueve la formación de raicillas secundarias cortas y de color pardo. También produce clorosis.

❖ Zinc

El Zn es usado extensivamente en capas protectoras y galvanizados para prevenir corrosión y en aleaciones. Es menos tóxico que el Cr y Ni. En los ambientes acuáticos se encuentra como Zn(II). También puede encontrarse en los suelos, y es un nutriente requerido por las plantas para su desarrollo.

El Zn interviene en una variedad de funciones críticas relacionadas con el control de genes, el transporte de oxígeno, proceso fotosintético y el metabolismo enzimático. Sin embargo, cuando

su concentración alcanza un valor umbral, este metal se vuelve primero inhibitorio y luego tóxico causando daños en la producción de clorofila.

❖ **Plomo**

El plomo es un metal escaso, se calcula en un 0.00002 % de la corteza terrestre, tiene un punto normal de fusión de 327.4 °C, un punto normal de ebullición de 1770 °C y una densidad de 11.35 g/mL. Forma compuestos con los estados de oxidación de Pb^{+2} y Pb^{+4} . Es anfótero por lo que forma sales plumbosas y plúmbicas, así como plumbitos y plumbatos. Se encuentra en minerales como la galena (sulfuro de plomo, PbS) que se utiliza como fuente de obtención del plomo, la anglosita (sulfato de plomo II, $PbSO_4$) y la cerusita (carbonato de plomo, $PbCO_3$).

Desde hace mucho tiempo se sabe que el plomo es venenoso, tiene efectos tóxicos para las plantas, el plancton y demás organismos acuáticos.

2.5.6. Mecanismo de absorción de las plantas y procesos de depuración.

Para cumplir con el propósito de la presente investigación que es depurar contaminantes como nitrato y amonio, es necesario conocer los procesos naturales que se dan dentro del sistema llamado humedal. A continuación, se detallan los siguientes conceptos:

- **Proceso de absorción**

Dado a la carga positiva, algunos iones amonio serán adsorbidos mediante un intercambio catiónico, ya sea con el sustrato formado o las capas filtrantes utilizadas en el humedal artificial. Además, dicho proceso es reversible, bajo condiciones químicas presentes en el agua, por lo que solo se dará a corto plazo. (Vymazal y col., 1998).

Para el caso de los detritos y el sustrato, los lugares de adsorción serán limitados, por lo que la adsorción del amonio se dará a una determinada concentración del mismo, en el agua

residual. Cuando la concentración de amonio se reduzca en la columna de agua, los iones se liberarán incrementando la concentración en el agua y manteniendo el equilibrio de intercambio (Vymazal, 2007). Así mismo, el contacto del sustrato con el oxígeno atmosférico, permitirán la oxidación del amonio adsorbido a nitrato. (Kadlec y Knight, 1996).

- **Asimilación**

El término asimilación hace referencia a los procesos biológicos empleados por macrófitos, microorganismos y algas para incorporar el nitrógeno inorgánico en biomasa (Vymazal, 2007). Dicho nitrógeno se encontrará en forma de amonio y nitrato; además, el ión amonio será mayormente seleccionado por los organismos, ya que se les encuentra más energéticos (Kadlec y Knight, 1996).

El nitrógeno puede ser asimilado directamente de la columna de agua o de los sedimentos por el sistema radicular de los macrófitos. Dependiendo del clima, esta asimilación será más efectiva: en climas templados, la captación de nitrógeno por macrófitos emergentes herbáceos es un fenómeno estacional, alcanza su máximo con el crecimiento de nuevos brotes en primavera y comienzos del verano, mientras que a finales de verano se reduce, ya que la planta habrá alcanzado su máximo crecimiento y habrá llegado a la senescencia. (Kadlec y Knight, 1996).

- **Senescencia**

La senescencia se dará cuando la cantidad de nutrientes disminuye, lo que llevará a que la cantidad de nitrógeno, en casi 50%, pasará de la parte aérea hacia el rizoma (Vymazal, 1995). Si la parte aérea no es retirada del humedal artificial, su descomposición devolverá el nitrógeno de nuevo al sistema.

También se tiene que considerar las bacterias como medio de depuración, ya que éstas ayudarán a la eliminación de compuestos nitrogenados en forma de nitrógeno atmosférico, en los procesos biológicos de nitrificación/desnitrificación y anammox.

- **Nitrificación**

La nitrificación se da cuando el amonio se oxida biológicamente en nitrato, teniendo al nitrito como intermediario. La nitrificación se asocia típicamente con las bacterias quimioautótrofas, aunque también puede ser llevada a cabo por bacterias heterótrofas (Paul y Clark, 1996).

El proceso tiene lugar en condiciones estrictamente aerobias, y se produce a través de dos etapas oxidativas secuenciales denominadas nitritación y nitratación. La primera, consiste en la oxidación de amonio a nitrito, teniendo al hidrógeno y agua como subproductos; la segunda, consiste en la oxidación del nitrito resultante de la fase anterior en nitrato, las cuales se llevarán a cabo bajo diferentes grupos de bacterias que utilizan el nitrato y el amonio como fuentes de energía; además, se tendrá el oxígeno molecular como aceptor de electrones.

- **Amonificación**

La amonificación es el proceso biológico por el cual el nitrógeno orgánico pasará a ser amonio. Dicho proceso será, principalmente, un catabolismo de aminoácidos, donde se encontrarán varios tipos de reacciones de deaminación (Vymazal, 2007); además, se encontrarán otros compuestos orgánicos como purinas, aminas, pirimidinas y urea.

Así mismo, cinéticamente, la amonificación es más rápida que la nitrificación (Kadlec y Knight, 1996), y es más rápida en condiciones aerobias que anaerobias (Reddy y Patrick, 1984).

El rango óptimo de pH para el proceso de amonificación está entre 6,5 y 8,5, mientras que para el proceso de nitrificación el rango de pH óptimo se encuentra entre 6,6 y 8 (Vymazal, 2007).

Los géneros de bacterias que participan en los procesos de amonificación son Bacillus, Clostridium, Proteus, Pseudomonas y Streptomyces entre otros .

- **Desnitrificación**

La desnitrificación será el proceso mediante el cual el nitrato es reducido a nitrógeno atmosférico, teniendo como intermediarios nitrito, óxido nítrico (NO) y óxido nitroso (N₂O). Esta reacción es irreversible, y requiere de la presencia de materia orgánica como donador de electrones, los cuales serán transportados a formas oxidadas de nitrógeno en condiciones anóxicas o anaerobias (Reddy y col., 2000; Vymazal, 2007), donde el nitrógeno será utilizado como aceptor de electrones. La reacción estará acompañada por agua y dióxido de carbono.

La desnitrificación será óptima cuando la temperatura del ambiente se encuentre entre 60 y 75 °C, sin embargo, también es posible encontrarse a temperaturas menores a los 5 °C (Bremner y Shaw, 1958). El rango óptimo de pH se encuentra entre 6 y 8, y el proceso se ralentiza por debajo de 5 (Paul y Clark, 1996).

- **Desasimilación**

La desasimilación reductora del nitrato es el proceso de reducción de nitrato en amonio. Este proceso se dará con la ayuda de las bacterias presentes en el humedal, estas serán fermentativas, las cuales no dependen de la presencia de nitrato para su crecimiento en condiciones anaerobias.

- **Anammox (Anaerobic Ammonium Oxidation)**

Es la oxidación anaerobia del amonio en nitrógeno atmosférico con la utilización de nitrito como aceptor de electrones (Vymazal, 2007). Se trata de un proceso autotrófico que no requiere carbono (Kadlec y Wallace, 2009), y que necesita 1,9 g O₂ por g de amonio, lo que incluye el oxígeno necesario para convertir amonio a nitrito. Un punto en contra de este proceso es la baja tasa de crecimiento de las bacterias dentro del humedal, ya que se necesita alrededor de 2 semanas para doblar la población. Se ha detectado metabolismo anammox tanto en HFS como en HFSH (Austin y col., 2006).

Según registros pasados, se tienen bacterias anammox dentro del filo Planctomycetes pertenecientes a los géneros bacterianos Brocadia, Kuenenia, Scalindua, Anammoxoglobus y Jettenia (Hu y col., 2012).

- **La fijación de nitrógeno**

Es el proceso de conversión de nitrógeno atmosférico a amonio. La realizan géneros de actinomicetos simbióticos (Frankia), bacterias heterotróficas (Bacillus, Klebsiella, Clostridium) y cianobacterias (Nostoc, Anabaena). La fijación en sistemas saturados de agua es mayor en condiciones de reducción que en condiciones de oxidación.

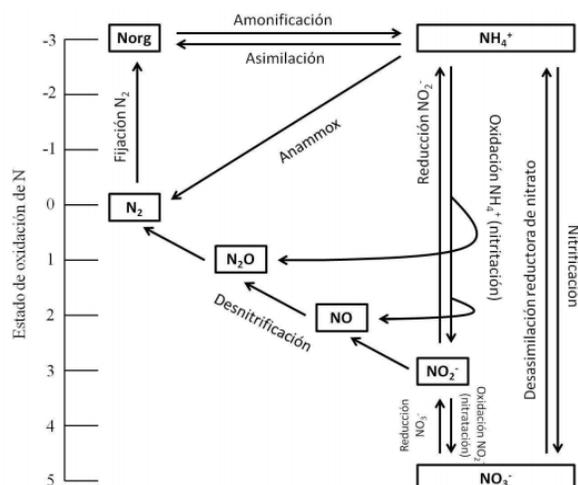


Figura 5: Reacciones realizadas por microorganismo en el ciclo del nitrógeno

Para determinar la eficiencia en la eliminación de contaminantes del agua residual se ha definido el índice de eliminación:

$$\text{Índice de eliminación} = [(C_e - C_s) / C_e] \times 100$$

donde

C_e = concentración de entrada en el sistema o etapa, mg L⁻¹

C_s = concentración de salida del sistema o etapa, mg L⁻¹

Figura 6: Cálculo del índice de eliminación

- **Eliminación de sólidos en suspensión:** Donde los sólidos van a ser eliminados por filtración, sedimentación y degradación, ya que las plantas con sus raíces y rizomas formaran un sustrato que permitirá todo lo anterior.
- **Eliminación de materia orgánica:** Esta se dará gracias a los microorganismos que viven en las plantas, las cuales, a su vez, reciben oxígeno a través de un sistema de aireación propio de cada planta. También parte de la materia orgánica será eliminada por un proceso de sedimentación.
- **Eliminación de nitrógeno:** Este se da por fenómenos de nitrificación y amonificación, son realizados por bacterias.
- **Trazas de metales:** Las plantas tienen una capacidad de adsorción y complejación con materia orgánica; la raíz atrapa y fija entre sus tejidos concentraciones de hasta cien mil veces a la concentración del agua que las rodea.
- **Fitoextracción:** Este sistema nos muestra que la toma del contaminante por parte de la planta es específicamente por sus raíces, debido a la capacidad que algunas especies tienen para acumular compuestos incorporándolos a sus tejidos

- **Fitodegradación:** Este sistema permitirá que los compuestos contaminantes se transformen en moléculas más simples, de modo que después sean incorporados a los tejidos y puedan ayudar al crecimiento de las plantas. En este proceso las enzimas y proteínas de las plantas dan paso a reacciones químicas que generan un rompimiento de las moléculas de los contaminantes
- **Fitovolatilización:** Las plantas necesitan agua y algunos compuestos orgánicos para su crecimiento, por lo que utilizan el contaminante y lo evaporan mediante las estomas de las hojas, de manera que se libera el compuesto en una forma modificada.

Podríamos resumir la forma de trabajar de los humedales artificiales con tres principios básicos:

a) La actividad bioquímica de microorganismos, juega un papel fundamental en la depuración de contaminantes ecotóxicos. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios.

b) El aporte de oxígeno a través de las especies vegetales (tatora y carrizo) durante el día. Con el oxígeno en nuestro sistema se logró la oxidación de la materia orgánica y su transformación en dióxido de carbono. La cual, se lleva a cabo a través de micro-organismos que respiran oxígeno y metabolizan el carbono en CO_2 . Por lo tanto, es necesario inyectar oxígeno en las aguas residuales y crear una biomasa oxigenada, que puede transformar la materia orgánica en gas.

c) El apoyo físico de un lecho inerte (piedra chancada), sirve como soporte para el enraizamiento de las especies vegetales, además de servir como material filtrante. El sustrato o material filtrante afecta directamente el flujo hidráulico del humedal (el caudal). Al tener grava como material granular la capacidad de filtración es menor comparado con un material de menor diámetro (limo, arcilla) pero aumenta la conductividad hidráulica.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. Diseño y Construcción de los Humedales

Para la investigación se diseñaron cuatro celdas, cada una de ellas con dos subceldas; todas estas tienen un sistema hidráulico que permitirá la distribución de la solución a tratar de manera uniforme. Así mismo, se cuenta con una capa filtrante en cada una de las subceldas, las cuales permitirán la adaptación de las especies vegetales como el drenaje del fluido. Finalmente, se fijó una especie vegetal para cada una de estas y, así, comparar la efectividad entre cada especie (Ver Figura 7).



Figura 7: Distribución de las cuatro celdas y especies vegetales

3.1.1. Construcción de celdas

Dado que la experimentación se realizó bajo un régimen estático, se tuvieron dos criterios principales para el dimensionamiento de las subceldas.

El diseño de cada una de las celdas, fue planteado teniendo en cuenta la separación necesaria entre cada almacigo de especie vegetal con una distancia entre rizomas de 20cm, de modo que puedan interactuar de manera eficiente con el sistema (los rizomas logren entretrejerse en el material filtrante, de modo que puedan ocupar el mayor espacio posible dentro de la subcelda). Otra consideración importante en el diseño fueron las medidas de cada una de las celdas: ancho, 20cm; altura, 40cm y largo, 80cm (Ver Figura 8).

Tabla 13:*Dimensiones de las subceldas preparadas*

| Dimensiones de subcelda | | |
|-------------------------|-----|---|
| Ancho(B) | 0.2 | m |
| Altura(H) | 0.4 | m |
| Largo(L) | 0.8 | m |

La relación larga – ancho tiene gran influencia en el régimen hidráulico como en la resistencia de flujo del sistema; la relación de humedales artificiales dinámicos, según el método de Reed (1995), es de 4:1. Por ello, que el dimensionamiento de las subceldas tuvo como referencia dichas dimensiones, pese a que no se cuenta con un flujo continuo del agua en este caso. Finalmente, se utilizó acrílico transparente para visualizar la interacción de las plantas con las capas filtrantes y la solución a tratar.



Figura 8: a) *Distribución de rizomas a lo largo de la subcelda* b) *Relación de ancho, alto y largo para cada subcelda*

3.1.2. Instalación de red de tuberías para el flujo y tubos de aireación/piezómetros.

La red utilizada para el flujo en nuestro sistema hidráulico consta de conexiones “T” en la parte inicial de cada subcelda, cada una de estas está centrada y ajustada con pinza metálica;

además, cada “T” estará conectada a la manguera de la bomba digital, la cual servirá para verter la solución a tratar. Para el sistema de aireación se colocaron tres tuberías verticales de 40cm distribuidas proporcionalmente a lo largo de cada subcelda, las cuales servirán como piezómetros (puntos de control) y respiraderos.

3.1.3. Impermeabilización y colocación de las capas filtrantes

Para conseguir condiciones de impermeabilización las celdas fueron construidas en material acrílico con 5 mm de espesor. Para el experimento se colocó piedra chancada como capa filtrante a una altura de 30 cm desde lo más bajo de cada subcelda, de modo que se tenga un drenaje fluido. El material filtrante tiene como diámetro entre 30mm y 40mm.



Figura 9: Distribución de piezómetros, los cuales servirán como puntos de control y fuentes de aeración



Figura 10: Utilización de bombas peristálticas para extracción de muestras



Figura 11: Capa filtrante

3.1.4. Determinación de parámetros hidráulicos

En el experimento, el tiempo de retención hidráulica (TRH) para alcanzar los niveles de contaminación aceptables para descargas se consigue mediante la siguiente fórmula:

$$TRH = \frac{As \cdot y \cdot n}{Q}$$

Donde:

- TRH = tiempo de retención hidráulica en días
- As = Área superficial
- y = profundidad del humedal
- n = porosidad del medio
- Q = Caudal medio del humedal en ml/min
- El tiempo de retención hidráulica con el que se trabajo fue de 7 días

Tabla 14:

Parámetros Hidráulicos de las celdas

| Parámetros Hidráulicos | | |
|------------------------|-----|-----------------|
| TRH | 7 | días |
| As | 16 | dm ² |
| y | 3 | dm |
| n | 45% | % |
| Q | 3 | ml/min |

- **Profundidad del humedal**

La profundidad de nuestra subcelda fue de 40 cm. El agua fluye a través de nuestro medio poroso y atraviesa nuestras tuberías de drenaje en el fondo de la subcelda.

- **Pendiente**

La pendiente de nuestra subcelda fue de 5%, pero se hizo una distribución del material poroso en la superficie de tal manera que se vea completamente horizontal y así evitar que el fluido líquido se asome en superficie.

3.1.5. Sustrato

También llamado material poroso en la presente investigación, sirve de trampa y ayuda en la depuración de contaminantes. Se utilizó Piedra chancada 30 mm a 40 mm.

3.1.6. Vegetación

Por cada celda se utilizó dos especies vegetales (una especie vegetal en cada subcelda); cuatro almácigos de cada especie fueron distribuidos uniformemente a lo largo de la subcelda. Además, cada especie vegetal fue sembrada a una profundidad de 15cm desde el nivel superior de la capa filtrante. Finalmente, el ambiente para las especies vegetales fue abierto y tuvo entrada de luz, de modo que las éstas puedan seguir con sus procesos físico-biológicos normalmente, tanto para el momento de la experimentación y la conservación de éstas antes de sembrarlas.



Figura 12: Distribución de especies vegetales para las celdas



Figura 13: Aclimatación de especies vegetales

3.2. Registro de condiciones experimentales

Las condiciones en las cuales se llevó a cabo el experimento de humedales artificiales fueron registradas previamente, ya que son vitales para la adaptación de cada especie vegetal, así como el control del nivel freático de cada subcelda. Se elaboró la siguiente tabla con las condiciones experimentales a trabajar.

Tabla 15:

Condiciones experimentales

| Condiciones experimentales | |
|----------------------------|------------|
| Temperatura | 18° C |
| Presión | 1012.10 mb |
| Altitud | 45 msnm |
| Humedad Relativa | 64% |

3.2.1. Caracterización de las condiciones iniciales de capa filtrante y especies vegetales

Para las capas filtrantes se tomaron muestras aleatorias del material filtrante de cada subcelda hasta obtener 1kg, para luego lavarlas en agua destilada y analizar la solución obtenida (AAS, turbidez, pH). Todo esto se hace de manera que ningún contaminante o metal pueda alterar los resultados de la experimentales. Finalmente, se registraron las condiciones iniciales.

Las especies vegetales por naturaleza tienen contenido metálico distribuido en todo su cuerpo vegetal, por lo que se realizó un extracto con cada una de las partes de estas y se las llevó a un análisis, donde se registraron las condiciones iniciales. Se elaboró la siguiente tabla para la evaluación de la capacidad depuradora de las especies vegetales.

Tabla 16:

Evaluación de la capacidad depuradora de las especies vegetales para concentraciones de nitrato y amonio.

| Distribución de contaminantes | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|--------------------------|--------|---------|-------|-------|---------|
| Celda | Subcelda | Especies | Amonio | Nitrato | Cobre | Zinc | Plomo |
| 1 | S1.1 | Scirpus spp(totora) | 10 ppm | 10 ppm | | | |
| | S1.2 | Phragmites spp (carrizo) | 10 ppm | 10 ppm | | | |
| 2 | S2.1 | Scirpus spp(totora) | 10 ppm | 10 ppm | 4 ppm | | |
| | S2.2 | Phragmites spp (carrizo) | 10 ppm | 10 ppm | 4 ppm | | |
| 3 | S3.1 | Scirpus spp(totora) | 10 ppm | 10 ppm | | 4 ppm | |
| | S3.2 | Phragmites spp (carrizo) | 10 ppm | 10 ppm | | 4 ppm | |
| 4 | S4.1 | Scirpus spp(totora) | 10 ppm | 10 ppm | | | 6.8 ppm |
| | S4.2 | Phragmites spp (carrizo) | 10 ppm | 10 ppm | | | 6.8 ppm |

3.3. Diseño experimental

La evaluación depuradora de las especies vegetales se llevó a cabo en cuatro celdas, cada una de estas con dos subceldas (una especie vegetal en cada una), donde se preparó una solución específica para cada celda (Ver Tabla 16). Las concentraciones de los metales, nitratos y amonio

fueron registradas en una etapa inicial, de modo que se puedan comparar con los resultados obtenidos luego de su tratamiento bajo condiciones de humedales artificiales.

3.3.1. Parámetros para evaluar niveles de contaminación del Agua Residual

Se muestreo la solución a tratar (efluente) en envases desinfectados en todas las unidades experimentales, mediante las pruebas físicas químicas de laboratorio de Medio Ambiente realizadas en la Facultad de Ingeniería y Minas de la PUCP. Los parámetros a controlar fueron principalmente físicos y químicos (Ver tabla 18).

Tabla 17:

Parámetros físico-químicos

| Parámetros Físicoquímicos | Aniones | Metales Pesados |
|---------------------------|---------|-----------------|
| Temperatura | Nitrato | Cobre |
| pH | Amonio | Zinc |
| BOD | | Plomo |
| Turbidez | | |
| Conductividad eléctrica | | |
| Sólidos disueltos | | |
| Sólidos totales | | |

3.3.2.- Metodología de recolección de muestras

Se busca obtener una parte representativa del material bajo estudio (agua residual de nuestros humedales artificiales de laboratorio), para lo cual se analizarán las variables físicoquímicas de interés.

Los parámetros a evaluar en nuestras subceldas, son la temperatura (°C), turbidez (NTU) pH, conductividad eléctrica (S/cm), solidos disueltos y totales (mg/L), y oxígeno disuelto (mg/L), demanda bioquímica de oxígeno (mg/L), y AAS o espectroscopia de adsorción atómica (mg/L)

El volumen de material captado (50 mL) se transporta hasta el lugar de almacenamiento dentro del laboratorio para el respectivo análisis, el cual se llevaba a cabo minutos después de

recolectar todas las muestras de cada una de las subceldas de cada día, para que así las muestra conserven las características del material original.

Previo al trabajo de campo y como parte del plan se determinaron los puntos de muestreo y parámetros de análisis según los siguientes criterios.

Se colectaron muestras en el ingreso y salida de cada subcelda, a fin de verificar la eficiencia de tratamiento.

3.3.2.1 Ubicación de puntos de muestreo

Para dicha recolección se instaló un sistema de tuberías que permitía recoger el agua residual de nuestra subcelda en 3 puntos distintos acordes a la disposición de las especies vegetales para así realizar un análisis sobre el efecto fito degradador. La ubicación de dichos puntos de muestreo cumple con condiciones de:

- **Accesibilidad.** - el punto de muestreo debe estar en un lugar fácilmente accesible, de tal manera que faciliten obtener las muestras y transportar la carga que implican los equipos y materiales de muestreo.
- **Representatividad.** - el punto de recolección de las muestras debe ser lo más representativo posible de las características totales del cuerpo de agua, esto significa que el cuerpo de agua debe estar mezclado totalmente en el lugar de muestreo, relacionado específicamente con la turbulencia, velocidad y apariencia física del mismo, adquiriendo que la muestra sea lo más homogénea posible.
- **Seguridad.** - el punto de muestreo, sus alrededores y las condiciones meteorológicas deben garantizar la seguridad de las personas responsables del muestreo, minimizando los riesgos de accidentes y de lesiones personales, es por esto que es recomendable tomar

siempre todas las precauciones y utilizar los equipos de seguridad y de protección personal necesarios.

| | carrizo | totora |
|-----------------|---------|--------|
| | PARED | |
| punto3 | o | o |
| especie vegetal | v | / |
| punto2 | o | o |
| especie vegetal | v | / |
| especie vegetal | v | / |
| punto1 | o | o |
| especie vegetal | v | / |

Figura 14: Distribución de puntos de muestreo y especies vegetales

3.3.2.2. Descripción del procedimiento experimental

Ya con nuestras celdas construidas y con un plan establecido para la toma de muestras, se dio inicio a la experimentación:

El primer paso para el experimento se dio con la adaptación de las especies vegetales a utilizar en nuestras celdas. La especie vegetal totora (*schoenoplectus californicus*) fue obtenida en los pantanos de villa a 20 km del sur de Lima en Chorrillos, con previa solicitud de permiso para retirar rizomas ya que se trata de una zona de conservación de flora y fauna silvestre.

Por otro lado, se obtuvo rizomas de la especie vegetal carrizo (*phragmites australis*) del distrito de mancos, provincia de Yungay, departamento de Huaraz ya que un contacto poseía dicha especie en su propiedad.

Ambas especies se adaptaron en agua reposada por el periodo de dos semanas para permitir el traspaso de hábitat.



Figura 15: Adaptación de especies vegetales en agua reposada.

Después de tener la celda armada ya está casi lista para operar, pues aún falta un segundo tiempo de adaptación de las especies vegetales dentro de las celdas, esto para que cada rizoma pueda desarrollarse y entretenerse dentro del material filtrante. El tiempo dado para este periodo fue de una semana más, de igual manera cada subcelda fue llenada con 15 L de agua reposada. Luego de dicha semana todas las celdas fueron vaciadas con ayuda de una bomba peristáltica.

El paso a seguir es la preparación de los contaminantes de cada una de las 8 subceldas. El objetivo de la presente investigación es depurar el nitrato y el amonio de nuestras celdas mediante la interacción con el sistema humedal, y de manera complementaria observar el comportamiento de estas celdas cuando además de los contaminantes en mención se adicionan competidores metálicos, llámese cobre, plomo y zinc (elegidos por ser los más representativos de minas polimetálicas de Perú). Con las dimensiones de nuestra subcelda se hizo un cálculo simple de la capacidad en litros que esta puede soportar, suponiendo que nuestro fluido contaminante tiene una densidad similar al agua, esto debido a que se iba a trabajar con concentraciones del orden de 4, 6 y 10 ppm para cada contaminante. Dicha capacidad calculada fue de 15 litros. La distribución de los contaminantes por subcelda fueron detallados en la Tabla 18.

De acuerdo a nuestra capacidad calculada y a la concentración con la que se quería trabajar se determinó que la cantidad en gramos de cada contaminante a usar era de 150 mg

$$\text{Masa de contaminante (mg)} = \text{Concentración del contaminante (mg/L)} \times \text{Volumen (L)}$$

Se utilizó en total la siguiente cantidad de reactivos químicos

Tabla 18:

Cantidades utilizadas de contaminantes.

| Celdas | Contaminante | Solución | Unidades |
|--------|------------------------------|----------|----------|
| 1 | NO ₃ ⁻ | 1200 | mg |
| 1 | NH ₄ ⁺ | 1200 | mg |
| 2 | CuSO ₄ | 300 | mg |
| 3 | PbSO ₄ | 300 | mg |
| 4 | ZnSO ₄ | 300 | mg |



Figura 16: Preparación de contaminantes a usar.

Se procedió con el pesaje de cada uno de los contaminantes y posteriormente cada uno fue disuelto dentro de un vaso de precipitado de 100mL con ayuda del limpiador ultrasónico para obtener un producto completamente homogéneo. Finalmente, cada vaso de precipitado con los respectivos contaminantes fue vertidos en baldes con 15 L de agua cada uno donde se continuó removiendo con ayuda de una bagueta de vidrio por un plazo de 5 minutos.



Figura 17: *Uso de limpiador ultrasónico.*

Con ayuda de 2 bombas peristálticas y el caudal calculado, se procedió con el llenado celda a celda comenzando primero por la celda n°1 que contenía solo nitrato y amonio, se continuó luego con la celda n°2 de contaminantes iniciales iguales, pero con la adición de cobre, luego la celda n°3 de igual forma con los mismos contaminantes iniciales, pero con la adición de zinc, y por último la celda n°4 de igual forma con los mismos contaminantes iniciales, pero con la adición de Plomo. Al final cada subcelda trabajaba con 15L.



Figura 18: *Vaciado de contaminantes en las celdas.*

3.3.2.3. Procedimiento previo a la toma de muestras (Preparación)

Los envases para la toma de muestras deben estar limpios y secos.

Se hace el rotulado de envases con la codificación número de celda, especie vegetal, número de día. Por ejemplo, el envase 1C5 (Celda 1, especie Carrizo, día 5 del experimento).

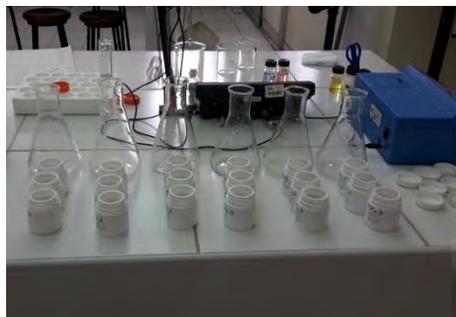


Figura 19: Rotulado de envases con codificación.

Todas las muestras fueron tomadas a la misma hora: mediodía, durante 7 días seguidos.

3.3.2.4. Procedimiento de toma de muestras:

- Se identifica la subcelda en la cual se procederá a realizar la toma de muestra.
- Se lavan los frascos por dentro con agua residual de la respectiva subcelda.
- Se llena el recipiente de muestreo con 50 mL de agua residual extraída de la subcelda con ayuda de la bomba peristáltica desde el tercer y último punto de muestreo o punto de salida.



Figura 20: Toma de muestras.

3.3.2.5. Análisis de campo

Después de tomadas las muestras en el cuerpo de agua, se miden los parámetros “*in situ*” establecidos en el plan de muestreo.

Se conservó herméticamente cada recipiente rotulado con la identificación de la muestra, fecha de muestreo, persona responsable, parámetros a analizar, laboratorio encargado. Sellado de recipientes.

Después de que las muestras han sido envasadas, son transportadas hacia el laboratorio para realizar los análisis correspondientes.

Se colectaron las muestras de las 8 subceldas durante los 7 días de la semana que duró el experimento.



Figura 21: Conservación de muestra.

Para recabar información adicional nuestros humedales siguieron trabajando 10 días más.

De esta manera se recolectaron muestras en el día 18.

Luego de la primera semana de recolección de muestras se procedió con el análisis de cada uno de los parámetros mostrados en la Tabla 17.



Figura 22: Análisis de muestras (parámetros físico-químicos).

3.4. Presentación de resultados

Las distintas mediciones de los parámetros físico-químicos se hicieron a lo largo de siete días, que es lo que duró la investigación. Cabe resaltar que dicho lapso de tiempo se calculó según criterios antes expuestos. Así mismo, las sub-celdas, estuvieron bajo las mismas condiciones ambientales para reducir variables.

Durante la fase experimental se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se relacionan de forma directa con los objetivos planteados para la presente investigación.

3.4.1. Parámetros fisicoquímicos:

❖ Temperatura

Se midió directamente la temperatura en los envases con ayuda de un termómetro en grados centígrados (°C). Esta medida tiene influencia sobre la solubilidad del oxígeno (en consecuencia, en reacciones químicas), por lo tanto, este indicador afecta la cantidad de oxígeno disuelto.

Tabla 19:

Valores de temperatura durante el experimento.

| Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|----|------|------|------|----|----|
| Temperatura (°C) | 19 | 19.2 | 19.2 | 19.1 | 19 | 19 |

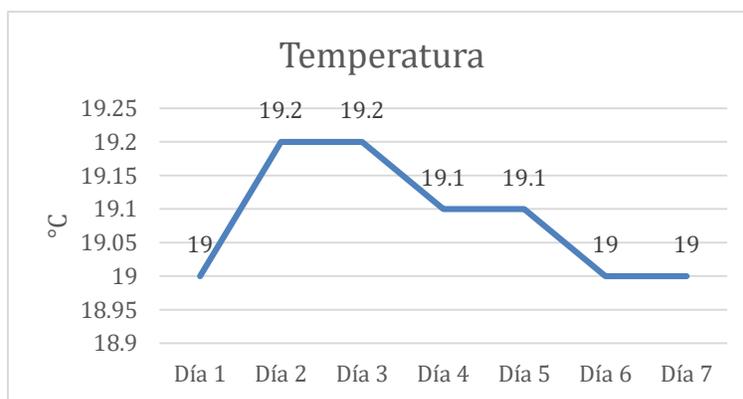


Figura 23: Variación de temperatura en días de evaluación

❖ pH

Se realizó la medida de la acidez de las aguas residuales para identificar cómo se comportaba este indicador en el tiempo de experimentación. Se utilizó un potenciómetro para la medida del parámetro en mención.

A continuación, la siguiente tabla ilustra los resultados obtenidos para su posterior interpretación,

Tabla 20:

Resultados del pH de las aguas residuales para los ensayos con totora y carrizo.

| pH | carrizo | | | | | | |
|------------|---------|------|-------------|------|-------------|------|------|
| Celda/Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 7.45 | 7.2 | 7.6 | 7.26 | 7.78 | 7.12 | 7.22 |
| CELDA2 | 7.64 | 7.45 | 7.91 | 7.39 | 7.9 | 7.24 | 7.21 |
| CELDA3 | 7.57 | 7.41 | 7.6 | 7.42 | 7.69 | 7.28 | 7.33 |
| CELDA4 | 7.79 | 7.16 | 7.54 | 7.07 | 7.36 | 7 | 7 |
| pH | totora | | | | | | |
| Celda/ Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 7.65 | 7.58 | 7.76 | 7.69 | 7.97 | 7.45 | 7.61 |
| CELDA2 | 7.83 | 7.87 | 8.04 | 7.73 | 7.98 | 7.74 | 7.67 |
| CELDA3 | 7.88 | 7.84 | 7.98 | 7.74 | 7.9 | 7.77 | 7.69 |
| CELDA4 | 7.86 | 7.79 | 7.96 | 7.69 | 7.69 | 7.77 | 7.52 |

El pH para los ensayos con el carrizo muestra un comportamiento decreciente a lo largo de los 7 días de tratamiento. Sin embargo, se puede observar un aumento en los días 3 y 5, prácticamente días centrales, este patrón se observa para todas las celdas con carrizo.

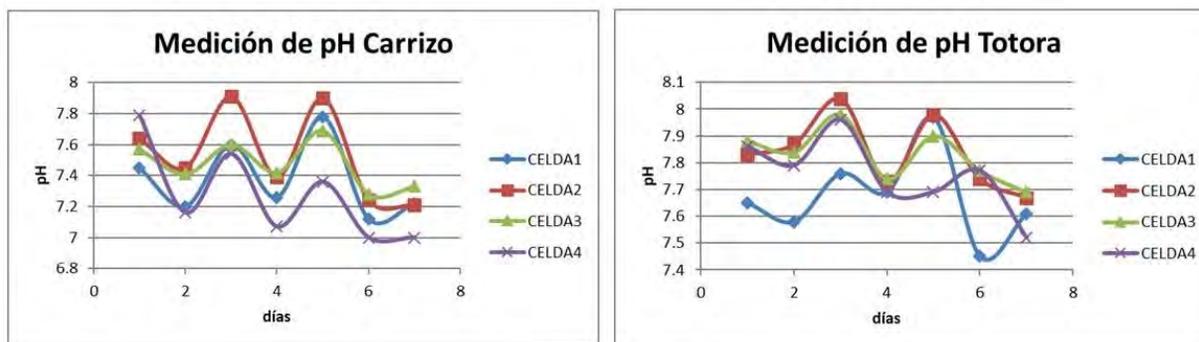


Figura N° 24: Medición del pH con la especie Carrizo y Totora

Para el caso de la totora, también se observó un comportamiento decreciente en el pH. Sin embargo, un incremento del pH para los días centrales solo fue observado para las celdas n°2, n°3 y n°4. Para la celda que no contiene ningún metal competidor el despunte se dio en los días 3 y 6.

❖ BOD

Con ayuda de un Oxímetro se realizó la medición del parámetro en mención y ver la cantidad de oxígeno consumido.

Para el parámetro de BOD, el carrizo muestra un crecimiento notorio para las cuatro celdas durante los 7 días de tratamiento (Figura 25)

Del mismo modo para la totora el Figura 25 muestra que las cuatro celdas tuvieron un comportamiento creciente en cuanto al parámetro del BOD.

Tabla 21:

Valores de BOD para carrizo y totora

| BOD | Carrizo | | | | | | |
|------------|----------------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Celda/Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 37.62 | 38.98 | 39.45 | 41.23 | 43.56 | 44.89 | 46.92 |
| CELDA2 | 36.22 | 37.43 | 39.21 | 40.11 | 43.12 | 43.99 | 46.44 |
| CELDA3 | 36.44 | 36.94 | 37.44 | 38.34 | 39.54 | 40.46 | 42.01 |
| CELDA4 | 35.98 | 36.65 | 38.42 | 39.53 | 40.23 | 41.76 | 43.91 |
| BOD | Totora | | | | | | |
| Celda/Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 32.47 | 33.67 | 33.89 | 34.43 | 37.11 | 38.99 | 39.97 |
| CELDA2 | 33.21 | 34.59 | 35.92 | 36.12 | 38.52 | 39.53 | 41.21 |
| CELDA3 | 33.67 | 34.19 | 34.79 | 35.91 | 36.56 | 37.88 | 39.67 |
| CELDA4 | 32.72 | 33.54 | 34.93 | 35.65 | 36.12 | 36.78 | 38.45 |

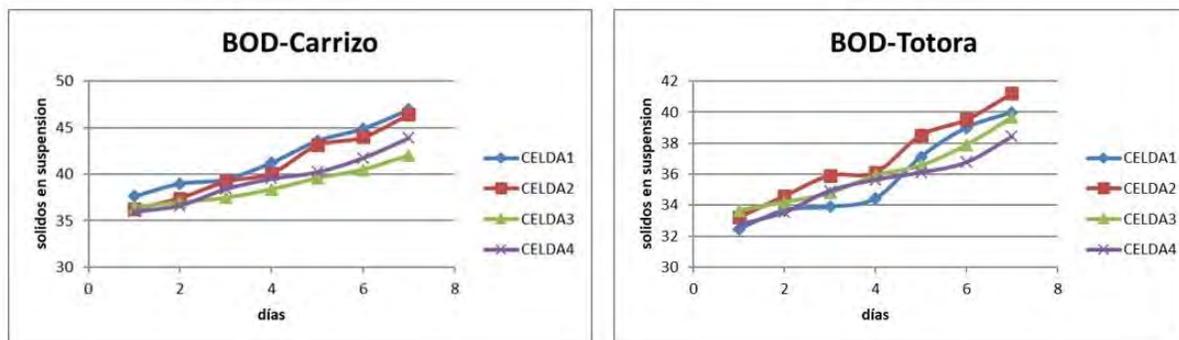


Figura N° 25: Medicion de BOD Carrizo y Totora

❖ Turbidez

Se toman 10 mL de las muestras a analizar en un turbidímetro el cual analiza la turbidez en unidades nefelométricas (NTU). A continuación, la tabla N° 20 muestra los resultados obtenidos para su posterior interpretación.

Tabla 22:

Valores de turbidez para carrizo y totora en unidades nefelométricas (NTU).

| turbidez | Carrizo | | | | | | |
|-----------------|----------------|-------------|------|------|-------------|------|-------------|
| Celda/Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 0.13 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.29 | 0.28 | 0.41 |
| CELDA2 | 0.71 | 0.38 | 0.27 | 0.29 | 0.29 | 0.2 | 0.43 |
| CELDA3 | 0.03 | 0.03 | 0.18 | 0.11 | 0.27 | 0.43 | 0.43 |
| CELDA4 | 0.67 | 0.67 | 0.5 | 0.5 | 0.71 | 0.39 | 0.62 |
| Turbidez | Totora | | | | | | |
| Celda /día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.04 |
| CELDA2 | 0.02 | 0.03 | 0.07 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.03 |
| CELDA3 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.03 | 0.08 | 0.05 | 0.04 |
| CELDA4 | 0.09 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.02 |

Durante los 7 días de tratamiento, las celdas n°1 y n°3 con el carrizo muestran un comportamiento creciente, mientras que para la celda n°2 decrece. La celda n°4 mantuvo la turbidez.

En cuanto a la totora, el grafico 26 muestra que las celdas n°1 y n°2 presentan un comportamiento creciente y constante, mientras que para las celdas n°3 y n°4 la turbidez decreció.

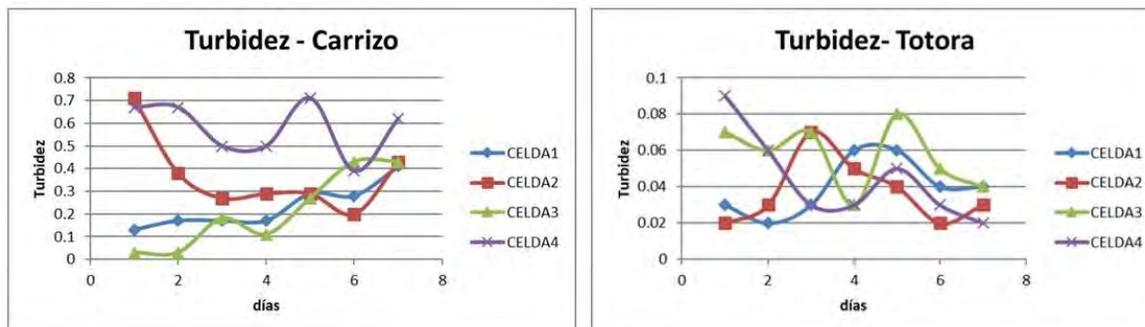


Figura N° 26: Medicion de Turbidez Carrizo y Totora.

❖ Conductividad

Se puede observar, en la Tabla 23, que los valores de conductividad tanto para la especie carrizo como totora, en la celda n°2, bajo de un 2.5 a 2 s/m (siemens por metro) 1.7 a 1.4 respectivamente, dado que la concentración de metal también decreció. En cuanto al zinc y al plomo, se mantuvieron constantes, dado que algunas veces las plantas ya contienen un contenido metálico que hace que dicha conductividad se mantenga, cabe resaltar que dicho resultado se obtiene en ambas especies.

Tabla 23:

Valores de Conductividad para carrizo y totora.

| conductividad | carrizo | | | | | | |
|---------------|------------|------------|-----|-----|------------|-----|------------|
| celda | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 1.7 |
| CELDA2 | 2.5 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.1 | 2 |
| CELDA3 | 2.6 | 2.7 | 2.4 | 2.7 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| CELDA4 | 0.9 | 1 | 0.9 | 1 | 1 | 0.9 | 1.1 |
| conductividad | totora | | | | | | |
| celda | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| CELDA2 | 1.7 | 1.5 | 1.3 | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.3 |
| CELDA3 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 0.9 | 0.9 | 1 |
| CELDA4 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 |

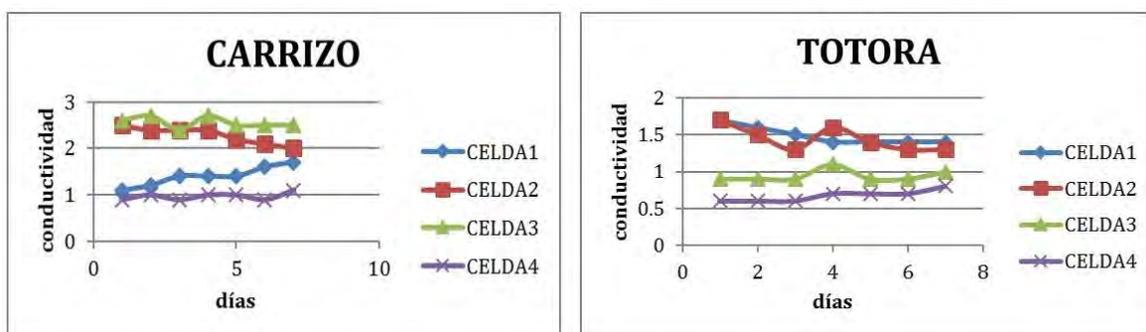


Figura N° 27: Medicion de Conductividad Carrizo y Totora

❖ Sólidos totales

Para determinar la cantidad de partículas presentes en el humedal se tomó un volumen adicional de cada subcelda. Dichos volúmenes adicionales se colocaron en vasos de precipitado (previamente pesados y codificados para su posterior identificación). Seguidamente el agua fue evaporada colocando los vasos en una estufa de secado durante 24 horas a una temperatura de 100°C. Posteriormente los vasos fueron pesados nuevamente para calcular la masa de las partículas residuales.

A continuación, la siguiente tabla ilustra los resultados obtenidos para su posterior interpretación el carrizo, durante los 7 días de tratamiento, el Figura 28 muestra en decrecimiento en todas las celdas.

Tabla 24:

Sólidos en suspensión para Carrizo y Totora en unidades de mg/l.

| Carrizo | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| celda/ Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0.01 |
| CELDA2 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| CELDA3 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| CELDA4 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0 |
| totora | | | | | | | |
| Celda/ Día | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| CELDA1 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0 | 0 |
| CELDA2 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| CELDA3 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0 |
| CELDA4 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

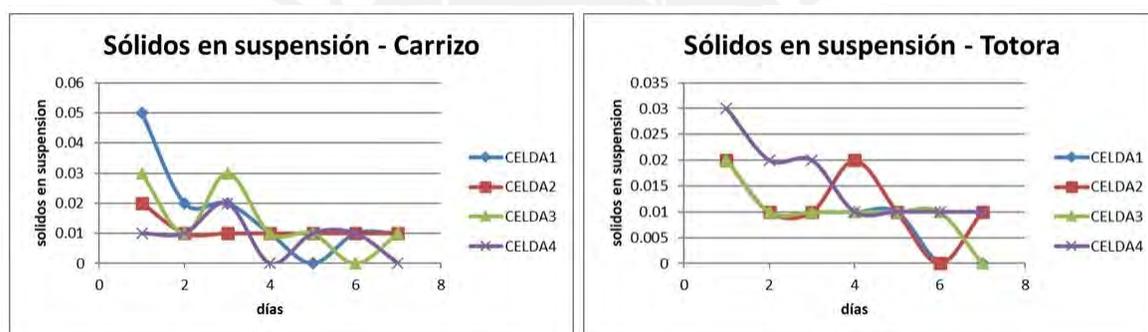


Figura N° 28: *Medición de Sólidos en suspensión Carrizo y Totora*

Del mismo modo para la totora: el Figura 28 muestra que las cuatro celdas presentan un comportamiento decreciente de sólidos totales.

3.4.2. Aniones

Se utilizó un equipo multiparámetro de la marca Hanna para determinar el contenido de nitrato y amonio a lo largo de la experimentación.

❖ Nitrato

Para el carrizo, después de 7 días la concentración de nitrato según la Tabla 25 muestra que las celdas n°1, n°2, n°3 y n°4 han decrecido en cuanto a su concentración en 74%, 99%, 97% y 95 % respectivamente. Se puede observar que la presencia de un metal pesado en la solución mejora la remoción de nitrato.

Del mismo modo para la totora: la Tabla 25 muestra que las que las celdas n°1, n°2, n°3 y n°4 han decrecido en cuanto a su concentración en 99%, 92%, 87% y 88% respectivamente. Asimismo, se puede observar que a diferencia del carrizo, en la totora la presencia de un metal pesado en la solución reduce la remoción de nitrato.

Tabla 25 :

Evaluación del nitrato durante el periodo de investigación

| Contaminante | Celda | E. Vegetal | dia0 | dia1 | dia7 | variación/d1 | variación/d7 |
|--------------|-------|---------------|-----------|------------|------------|--------------|--------------|
| Nitrato | c1 | carrizo | 10 | 3.4 | 2.6 | 66% | 74% |
| | | totora | 10 | 0.4 | 0.1 | 96% | 99% |
| | c2-Cu | carrizo | 10 | 3.03 | 0.1 | 69.7% | 99% |
| | | totora | 10 | 2.4 | 0.8 | 76% | 92% |
| | c3-Zn | carrizo | 10 | 3.8 | 0.3 | 62% | 97% |
| | | totora | 10 | 2.3 | 1.3 | 77% | 87% |
| | c4-Pb | carrizo | 10 | 3.2 | 0.5 | 68% | 95% |
| | | totora | 10 | 1.9 | 1.2 | 81% | 88% |

A continuación, se presentan los Figuras que detallan la comparación del comportamiento del nitrato para el primer y último día de acuerdo a cada celda.

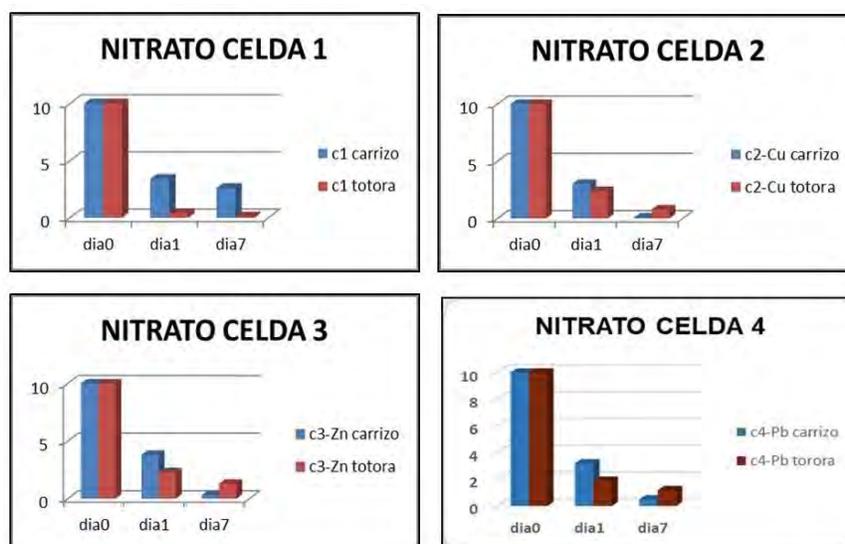


Figura N° 29: Comportamiento de la remoción de nitrato en las cuatro celdas.

❖ Amonio

A continuación, se observan los valores obtenidos para el amonio.

Tabla 26

Evaluación del amonio durante el periodo de investigación

| Contaminante | Celda | E. Vegetal | dia0 | dia1 | dia7 | variación/d1 | variación/d7 |
|--------------|-------|------------|------|------|------|--------------|--------------|
| amonio | c1 | carrizo | 10 | 0.02 | 0.17 | 99.80% | 98.30% |
| | | totora | 10 | 0.57 | 1.44 | 94.30% | 85.60% |
| | c2-Cu | carrizo | 10 | 0.48 | 3 | 95.20% | 70.00% |
| | | totora | 10 | 0.39 | 0.73 | 96.10% | 92.70% |
| | c3-Zn | carrizo | 10 | 2.27 | 3 | 77.30% | 70% |
| | | totora | 10 | 0.03 | 2.47 | 99.70% | 75.30% |
| | c4-Pb | carrizo | 10 | 0.01 | 0.08 | 99.90% | 99.20% |
| | | totora | 10 | 0.92 | 1.23 | 90.80% | 87.70% |

Para el carrizo, después de 7 días la concentración de amonio según la Tabla 26 muestra que las celdas n°1, n°2, n°3 y n°4 han decrecido en cuanto a su concentración en 98.3%, 70%, 70% y 99.2 % respectivamente. Se puede observar que la presencia de cobre y cinc en la solución mejora la remoción de amonio; no siendo el mismo caso para el plomo. Del mismo modo para la totora: la Tabla 26 muestra que las que las celdas n°1, n°2, n°3 y n°4 han decrecido en cuanto a

su concentración en 85.6%, 92.7%, 75.3%, 87.7% respectivamente. Asimismo, se puede observar que la presencia de zinc reduce la remoción de amonio y que la presencia de cobre y plomo la incrementan.

A continuación, se presentan los Figuras que detallan la comparación del comportamiento del amonio para el primer y último día de acuerdo a cada celda

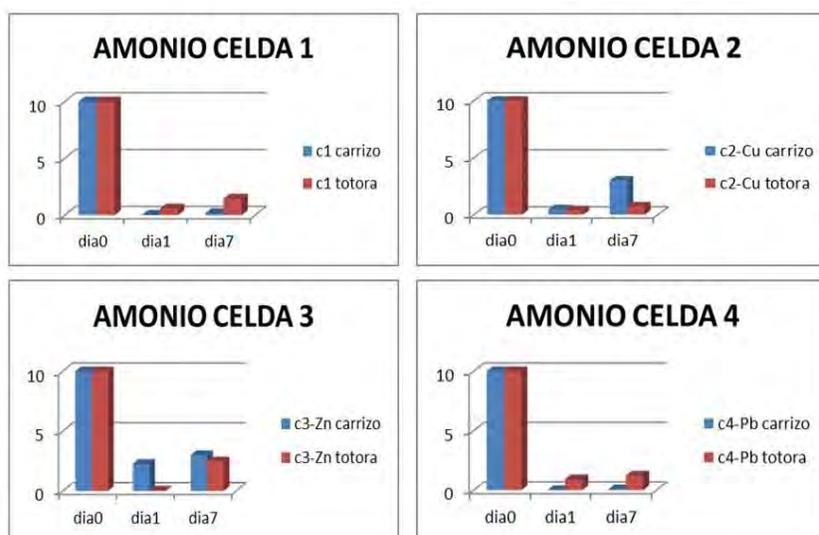


Figura N° 30: Comportamiento de la remoción de amonio en las cuatro celdas

3.4.3. Metales pesados

Se realizaron análisis por espectroscopia de adsorción atómica (AAS) para determinar la concentración de metales pesados (Cobre, Zinc, Plomo) en los efluentes a lo largo del experimento.

❖ Cobre

Las concentraciones de cobre se muestran en la Tabla 27. Se puede observar que la concentración más baja para la especie vegetal carrizo se encuentra en el día 6 con 0.015 mg/L. Encontrándose la concentración más alta en el día 2 con 0.23 mg/L. Para la especie

vegetal totora se puede observar que la concentración más baja se encuentra en el día 4 con 0.005 mg/L. Encontrándose la concentración más alta en el día 1.

Tabla 27

Análisis de absorción atómica AAS de cobre (mg/l) en el humedal artificial.

| Especie | DIA1 | DIA2 | DIA3 | DIA4 | DIA5 | DIA6 | DÍA 7 |
|---------|--------------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| CARRIZO | 0.02 | 0.023 | 0.022 | 0.019 | 0.018 | 0.015 | 0.021 |
| TOTORA | 0.016 | 0.01 | 0.008 | 0.005 | 0.006 | 0.008 | 0.014 |

Para determinar en qué estación del humedal artificial se produce la mayor depuración de contaminante de acuerdo a especie vegetal, se tomaron muestras en todas las estaciones de la celda en el día 7. Las concentraciones se muestran en la Tabla 28, obteniéndose que para el carrizo la estación 3 presenta el valor más bajo y para la totora, en la estación 2.

Adicionalmente se realizó una toma de muestras once días después del tiempo de estudio establecido para el experimento en las cuatro celdas para observar el grado de depuración en el tiempo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla. Se puede observar que para el caso del carrizo la remoción de cobre continua. No pudiendo establecer una tendencia para el caso de la totora.

Tabla 28

Grado de depuración por estación y por especie vegetal en el día 7 del experimento.

| ESPECIE/ESTACIÓN | Concentración de cobre (mg/l) | | |
|------------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| | ESTACIÓN 1 | ESTACIÓN 2 | ESTACIÓN 3 |
| CARRIZO | 0.039 | 0.042 | 0.021 |
| TOTORA | 0.012 | 0.006 | 0.014 |

Tabla 29

Concentración del cobre once días después (día 18)

| Concentración de cobre (mg/l) | |
|-------------------------------|-------|
| CARRIZO | 0.012 |
| TOTORA | 0.007 |

❖ **Zinc**

Las concentraciones de zinc se muestran en la Tabla 29. Se puede observar que la concentración más baja para la especie vegetal carrizo se encuentra en el día 4 con 0.0087 mg/L. Encontrándose la concentración más alta en el día 2 con 0.0128 mg/L. Para la especie vegetal totora se puede observar que la concentración más baja se encuentra en el día 2 con 0.0114 mg/L. Encontrándose la concentración más alta en el día 6 con 0.0159 mg/L.

Tabla 30

Análisis de adsorción atómica AAS de zinc (mg/l) en el humedal artificial

| Especie | DIA 1 | DIA 2 | DIA 3 | DIA 4 | DIA 5 | DIA 6 | DÍA 7 |
|---------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| CARRIZO | 0.0107 | 0.0128 | 0.0106 | 0.0087 | 0.0103 | 0.0103 | 0.0118 |
| TOTORA | 0.0125 | 0.0114 | 0.0113 | 0.0125 | 0.0142 | 0.0159 | 0.0146 |

Para saber en qué estación del humedal artificial se produce la mayor depuración de zinc de en función de la especie vegetal se tomaron muestras en todas las estaciones de la celda después de 7 días de iniciado el experimento. Los resultados se muestran en la Tabla n° 30, obteniéndose que para ambas especies vegetales en la primera estación se obtienen los valores más bajos.

Tabla 31

Grado de depuración por estación y por especie vegetal en el día 7 del experimento

| Concentración de cinc (mg/l) | | | |
|------------------------------|---------------|------------|------------|
| | ESTACIÓN 1 | ESTACIÓN 2 | ESTACIÓN 3 |
| CARRIZO | 0.0084 | 0.0101 | 0.0118 |
| TOTORA | 0.0134 | 0.0176 | 0.0146 |

Adicionalmente se realizó una toma de muestras once días después del tiempo de estudio establecido para el experimento en las cuatro celdas para observar el grado de depuración en función del tiempo. Los resultados se muestran en la tabla 31. Se puede observar que para el caso la totora la remoción de cinc continúa tomando como referencia el día 7. No pudiendo establecer una tendencia para el caso del carrizo.

Tabla 32 *Concentración de cinc once días después*

| Concentración de cinc (mg/l) | |
|------------------------------|--------|
| CARRIZO | 0.0125 |
| TOTORA | 0.0128 |

❖ Plomo

Las concentraciones de plomo se muestran en la Tabla 32. Se puede observar que la concentración más baja para la especie vegetal carrizo se encuentra en el día 1 con 0.04 mg/L; encontrándose la concentración más alta en el día 6 con 0.09 mg/L. Para la especie vegetal totora se puede observar que la concentración más baja se encuentra en el día 1 con 0.11 mg/L. Encontrándose la concentración más alta en el día 3 con 0.13 mg/L.

Tabla 33

Análisis de adsorción atómica AAS de plomo (mg/l) en el humedal artificial

| Especie | DIA1 | DIA2 | DIA3 | DIA4 | DIA5 | DIA6 | DÍA 7 |
|---------|-------------|------|------|------|------|-------------|-------|
| CARRIZO | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 |
| TOTORA | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.13 |

De la misma forma, para determinar la estación del humedal artificial donde se produce la mayor depuración de contaminante de acuerdo a especie vegetal, se tomaron muestras en todas las estaciones de la celda en el día 7. Las concentraciones se muestran en la Tabla 33, observándose que para la especie vegetal carrizo el valor más bajo de concentración en la primera estación de monitoreo. Para la especie vegetal totora se obtienen el valor más bajo tanto para la segunda y tercera estación.

Adicionalmente se realizó una toma de muestras once días después del tiempo de estudio establecido para el experimento en las cuatro celdas para observar el grado de depuración en el tiempo, los resultados se muestran en la Tabla 35. Se puede observar que para el caso la totora no se produce una mayor remoción de plomo tomando como referencia el día 7. No pudiendo establecer una tendencia para el caso del carrizo.

Tabla 34

Grado de depuración por estación y por especie vegetal en el día 7 del experimento.

| Concentración de plomo (mg/l) | | | |
|-------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| | ESTACIÓN1 | ESTACIÓN2 | ESTACIÓN3 |
| CARRIZO | 0.08 | 0.1 | 0.09 |
| TOTORA | 0.15 | 0.13 | 0.13 |

Tabla 35

Concentración de plomo once días después

| DIA 18 | |
|----------------|------|
| CARRIZO (mg/L) | 0.11 |
| TOTORA (mg/L) | 0.13 |

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Parámetros fisicoquímicos

❖ Variación del pH

Se puede observar que todas las celdas con la especie vegetal carrizo mostraron un comportamiento decreciente en cuanto al pH. A lo largo de los 7 días de tratamiento el pH de la celda n°1, de 7.45 pasó a 7.22; el de la celda n°2, de 7.64 a 7.21; el de la celda n°3, de 7.57 a 7.33 y el de la celda n°4, de 7.79 a 7. Sin embargo, las celdas también mostraron subidas de pH notables. En los días 3 y 5 el pH registrado de la celda n°1, fue de 7.6 y 7.78; el de la celda n°2, 7.91 y 7.90; el de la celda n°3, 7.60 y 7.69 y el de la celda n°4, 7.54 y 7.36 respectivamente.

En cuanto a la totora, también se observó un comportamiento decreciente del pH. Para la celda n°1 disminuyó de 7.65 a 7.61; para la celda n°2, de 7.83 a 7.67; para la celda n°3, de 7.88 a 7.69 y para la celda n°4, de 7.86 a 7.52. Sin embargo, también mostraron subidas de pH en los días 3 y 5. Para la celda n°1 los valores de pH fueron 7.76 y 7.97; para la celda n°2, 8.04 y 7.98; para la celda n°3, 7.98 y 7.90 y para la celda n°4, 7.96 y 7.94 respectivamente.

Se sabe que los pH iniciales de las muestras eran neutras, ya que la solución estaba compuesta por 15 litros de agua y cierta cantidad de sales metálicas. Se puede observar que las plantas tuvieron la capacidad de llevar la solución a un pH básico desde el primer día; sin embargo, se reportaron días donde el pH tendió a bajar, esto se debe a que las plantas por un proceso de senescencia no contaron con los nutrientes suficientes para seguir llevando la solución a un pH básico. Así mismo para el último día del experimento, se observa que para ambas especies vegetales el pH llegó a decrecer en comparación del día 1, lo cual refleja la carencia de nutrientes en las plantas al pasar los días.

❖ Variación del BOD

Se puede observar que con la especie vegetal carrizo todas las celdas mostraron un comportamiento creciente de la demanda bioquímica de oxígeno (BOD). A lo largo de los 7 días de tratamiento la celda n°1 pasó de 37.62 a 46.92; la celda n°2 pasó de 36.22 a 46.44; la celda n°3 pasó de 36.44 a 42.01 y la celda n°4 pasó de 35.96 a 43.91.

En cuanto a la totora, también tuvo un comportamiento creciente del BOD. Para el caso de la celda n°1 se observaron valores que pasaron de 32.47 a 39.97; para la celda n°2, de 33.21 a 41.21; para la celda n°3, de 33.67 a 39.67 y para la celda n°4, de 32.72 a 38.45.

La DBO para todas las celdas fue aumentado al pasar los días debido al proceso de senescencia, ya que la ausencia de nutrientes provocó la muerte gradual de las especies vegetales; pese a que éstas en algunos días recuperaban nutrientes, pero de manera finita. Sin embargo, se puede observar que la mayor demanda de oxígeno es reportado por el carrizo.

❖ Turbidez

Se puede observar para el carrizo dos de las celdas mostraron un comportamiento decreciente de turbidez a lo largo de los 7 días de tratamiento. La celda n°2, pasó de 0.71 NTU a 0.43 NTU y la celda n°4, pasó de 0.67 NTU a 0.62 NTU. Mientras que la celda n°1 y la celda n°3 aumentaron su turbidez.

En cuanto a la totora, se observó un comportamiento decreciente en dos celdas. La celda n°3, pasó de 0.07 NTU a 0.04 NTU y la celda n°4, pasó de 0.09 NTU a 0.02 NTU, la celda n°1 y la celda n°2 aumentaron ligeramente su turbidez.

Dado que la cantidad de sólidos disueltos disminuye a lo largo del tratamiento y se mantiene un sistema estático, la turbidez fue cada vez menor para las cuatro celdas. Asimismo, se puede

observar que las celdas conteniendo la totora muestran valores de turbidez menores a las que contienen carrizo.

❖ **Conductividad**

Con el carrizo a lo largo de los 7 días de tratamiento, las celdas mostraron comportamientos variados. La celda n°1 aumentó su valor de conductividad de 1.10 a 1.7 S/cm. La celda n°2, mostró una disminución de 2.50 a 2.00 S/m. Mientras que para la celda n°3 la celda n°4 la variación es mínima. Asimismo, se observa que para la celda conteniendo cobre y cinc muestran mayor conductividad que la celda sin metales pesados. Caso contrario sucede con la celda de plomo cuya conductividad es menor si comparamos las celdas con los metales pesados.

En cuanto a la totora, también se evidenció un comportamiento decreciente en dos celdas. Para la celda n°1, pasó de 1.70 a 1.40 S/cm y la celda n°2, de 1.70 a 1.30 S/cm. Mientras que se observa un aumento de conductividad para las celdas n°3 y n°4. Por otro lado, se observa que las celdas que contienen cinc y plomo muestran conductividades más bajas de aquella que contiene cobre o ningún metal pesado.

Asimismo, se puede observar que las celdas con totora conteniendo metales pesados muestran valores de conductividad menores a las que contienen carrizo, siendo este comportamiento más evidente en las celdas con cobre y cinc.

❖ **Sólidos en suspensión**

Para las celdas con carrizo se puede observar que a lo largo de los 7 días de tratamiento todas mostraron un comportamiento decreciente en contenido de sólidos en suspensión. Siendo el comportamiento más evidente en la celda que no contenía metales pesados.

En cuanto a la totora, también se tuvo un comportamiento decreciente para todas las celdas.

Para las celdas con plomo se observa que la que es tratada con totora presenta ligeramente mayor cantidad de sólidos en suspensión que la que utiliza carrizo.

Debemos mencionar que la capa filtrante utilizada sirvió como trampa para gran parte del contenido sólidos presentes en la solución.

4.2 Aniones

❖ Nitrate

Se puede observar que todas las celdas lograron depurar considerablemente la concentración de nitrato. En el día 1, todas las celdas disminuyeron como máximo la concentración de nitratos con valores máximos de 69.7% y 96% para el carrizo y la totora respectivamente.

Para la especie vegetal carrizo en el día 7 las celdas n°2, n°3 y n°4 removieron más del 90 % del nitrato. Mientras que la celda n°1 reportó la menor remoción de este anión con solo el 74%. Asimismo, se observa que para el día 1 la presencia de metales pesados no interfiere en la remoción de nitratos, siendo esta interferencia evidente en el día 7.

En cuanto a la totora, tanto para el día 1 y el día 7 todas las celdas tuvieron una capacidad depuradora considerable, siendo 96% y 99% el mayor porcentaje de remoción para la celda 1. Asimismo, se observa que para el día 1 y el día 7 la presencia de metales pesados interfiere en la remoción de nitratos. Por otro lado, en el día 1 la remoción de nitratos en la celda conteniendo plomo es mayor en comparación a las que contienen cobre y cinc. Sin embargo, para el día 7 la remoción de nitratos es mayor en la celda que contiene cobre, seguida de la que contiene zinc. Se observa que existe una tendencia de aumento de remoción de nitratos para las tres celdas que contienen metales pesados.

Se puede observar que tanto para el día 1 y el día 7, es la totora la que remueve el nitrato de manera más eficiente. Esta remoción se dio gracias a los procesos de asimilación, absorción y desnitrificación, esta última precedida por un proceso de nitrificación que en conjunto pueden lograr un gran porcentaje de remoción: entre 60% y 95%, (Lee y col., 2009)

La desnitrificación es óptima en temperaturas entre 60 C° y 75 C° (Bremner y Shaw, 1958), y el experimento se llevó a cabo con una media histórica entre 22°C y 16°C, por lo que no se llegó al mayor punto de eficiencia. En cuanto al pH, se contó con el rango óptimo y se llegó a acelerar el proceso, ya que todas las soluciones se encontraban entre valores de pH de 6 y 8 (Paul y Clark, 1996).

Dado que el experimento fue a corto plazo, el intercambio catiónico ocurrido en las celdas fue reversible, ya sea con el sustrato formado o las capas filtrantes utilizadas en el humedal artificial (Vymazal y col., 1998).

Entre el nitrato y amonio, el ión amonio fue mayormente, seleccionado por los organismos, ya que se les encuentra más energéticos (Kadlec y Knight, 1996); aun así, el nitrato incorporado en la biomasa es considerable.

Además, el sistema de humedales también tuvo la presencia de bacterias que ayudaron a la eliminación de compuestos nitrogenados en forma de nitrógeno atmosférico.

La remoción de nitrato no llegó a un 100%, dado que las plantas en un determinado punto no tuvieron todos los nutrientes necesarios, pasando a un proceso de senescencia. Así mismo, la parte aérea de las plantas no fue retirada durante el experimento, provocando el traspaso nuevamente de contaminantes en cierto porcentaje hacia el sistema (Vymazal, 1995).

❖ **Amonio**

Se puede observar que todas las celdas lograron depurar considerablemente la concentración de amonio.

En el día 1, para la especie vegetal carrizo, las celdas n°1, n°2 y n°4 bajaron la concentración por encima del 90%, mientras que la celda n°3 solo pudo remover el amonio hasta un 77%. Para el día 7 las celdas n°1 y n°4 removieron un 98 % y 99% respectivamente, siendo las celdas n°2 y n°3 las de menor remoción: 70% en ambos casos.

Para la totora las celdas redujeron la concentración de amonio en el día 1 en valores superiores al 90%. Para el día 7 las celdas n°1, n°2 y n°4 removieron 86%, 93% y 88% respectivamente- siendo la celda n°3 la de menor remoción: 75%.

A diferencia del nitrato, la depuración del amonio se dio gracias a los procesos de asimilación, absorción, desasimilación y anammox, donde el proceso de amonificación juega un papel importante, ya que mientras más se permita este, más amonio se encontrará en nuestra solución.

Dado que los procesos de amonificación en las plantas fueron más rápidos que los de nitrificación (Kadlec y Knight, 1996), se ven concentraciones mayores de amonio en el último día.

Se sabe que se contó con pH entre 6 y 8, por lo que el proceso amonificación encontró condiciones óptimas, y, con ello, la formación de nitrato en ciertos tiempos (Vymazal, 2007).

El intercambio catiónico, en el proceso de adsorción, al igual que en el nitrato, también juega un papel importante para la remoción de amonio.

A los iones de amonio se les encuentra más energéticos, por lo que, a diferencia del nitrato, serán incorporados a la biomasa en mayor proporción (Kadlec y Knight, 1996).

Del mismo modo que en el nitrato, las bacterias ayudaron a la eliminación de compuestos nitrogenados en forma de nitrógeno atmosférico.

El mismo proceso de senescencia ocurre para el amonio, donde la remoción de este no llegó a un 100%, dado que las plantas en un determinado punto, no tuvieron todos los nutrientes necesarios

Así mismo, la parte aérea de las plantas no fue retirada durante el experimento, provocando el traspaso de contaminantes hacia el sistema nuevamente, en cierto porcentaje.

4.3 Metales pesados

❖ COBRE

Para el carrizo se observa que la concentración de Cu decrece a medida que avanzaron los días (Figura 31), obteniendo su remoción máxima el día 6 (99.6%). Luego en el día 7 la planta trata de restaurarse nuevamente para empezar con la remoción en los días siguientes. El día 18 llega a un valor máximo de remoción de 99.7 %.

En cuanto a la totora, se observa en el Figura 31 que la concentración de Cu decrece a medida que avanzan los días. Alcanza su remoción máxima en el día 4 (99.9%). Es probable que el día 4 la totora alcance su punto de saturación. El punto de saturación es un fenómeno superficial de adsorción monocapa, caracterizado por una capacidad máxima por adsorbente, el cual después de un cierto tiempo de contacto con la solución, llega a un nivel de saturación en el que la concentración de la sustancia de interés en el adsorbente es constante (remoción constante luego de un periodo de tiempo) (OPORTO et al 2001). La remoción en los demás días se mantiene constantes.

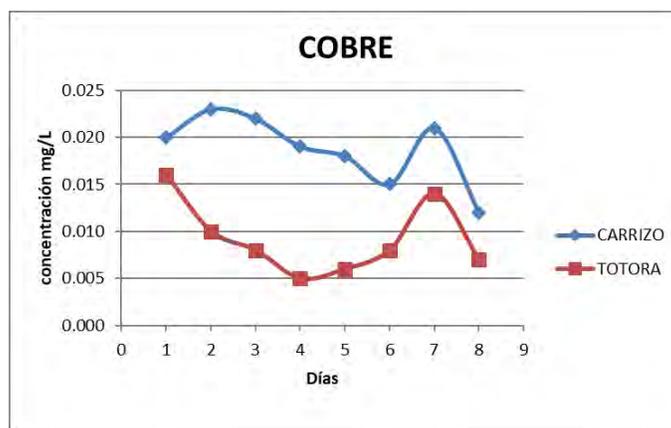


Figura N° 31: Evaluación del competidor metálico cobre

A nivel porcentaje se obtiene una eficiencia máxima de depuración del 99.70 % para la especie vegetal carrizo y 99.88 % para la especie vegetal totora. Comparando ambas especies vegetales notamos que la totora tiene un mayor efecto fitodepurador que el carrizo. Llegando a la depuración máxima el cuarto día.

❖ ZINC

Se observa en el Figura 32 que la concentración de zinc para el carrizo tiende a decrecer a medida que avanzan los días. Alcanza su pico máximo de adsorción en el día 4. Sin embargo; en los días posteriores de la investigación, ya no logra seguir adsorbiendo el competidor, sino que lo devuelve al humedal.

Al igual que en la especie anterior, Se observa en el Figura 32 que la concentración del metal zinc para la totora tiende a decrecer a medida que avanzan los días y alcanza su pico máximo de adsorción en el día 2.

Ambas especies vegetales tratan de restaurarse y empezar nuevamente la depuración de contaminantes hasta llegar al último día de registro de datos: día 18, donde la concentración de Zn es similar a la inicial. Se observa la pseudo restauración de las especies vegetales en la

adsorción de contaminantes, probablemente sea un mecanismo competitivo-consecutivo con etapas de reacción reversibles.

A nivel porcentaje se obtiene una eficiencia de depuración del 99.78 % para la especie vegetal carrizo y 99.72 % para la especie vegetal totora. Comparando ambas especies vegetales la que tiene un mayor efecto fitodepurador es el carrizo llegando a la depuración máximo en el 4to día.



Figura N° 32: Evaluación del competidor metálico zinc

❖ PLOMO

Para nuestra experiencia usamos una concentración de 6.8 ppm de dicho metal tanto para la especie vegetal totora como para la especie vegetal carrizo.

La concentración de plomo tanto para el carrizo como para la totora no decrece a medida que avanzan los días como se observa en el Figura 33. La concentración alcanza su pico máximo de remoción sólo en el primer día (luego de transcurridas 24 horas de iniciado el tratamiento). Pero en los siguientes registros los niveles de concentración son mayores. Se podría decir que las especies vegetales actúan rápidamente al inicio y con el transcurrir de los días y a las condiciones dadas, existe un proceso de eliminación de plomo hacia la solución. El plomo resulta ser tóxico para estas especies, por lo que estas en su intención de recuperarse tienden a expulsarlo y devolverlo en pequeñas cantidades al agua residual.

Los registros máximos de depuración de plomo se dieron en primer día con 99.41% para plomo y 98.38% para la totora. Sin embargo, para el día 7, último día de experimentación, se obtuvo para el carrizo una remoción del 98.68% y para la totora 98.09%. Este decrecimiento se debe a lo antes expuesto, lo que nos hace suponer que la tendencia a devolver el metal tóxico hacia el agua residual continuará a medida que avance el tratamiento.

Comparando ambas especies vegetales la que se podría decir tiene ligeramente un mayor efecto fitodepurador es el carrizo.

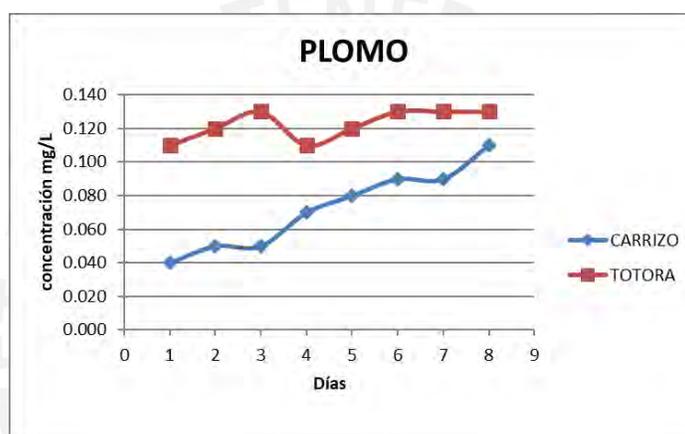


Figura N° 33: Evaluación del competidor metálico plomo

5. Evaluación económica de implementación de un wetland artificial

5.1 Presupuesto nivel laboratorio

| PRESUPUESTO NIVEL LABORATORIO | Humedales artificiales | | | | |
|---|--|-------------|-------------|-----------|--------------|
| Nombre: Jorge Pulcha/ Michael Valencia | Pontificia Universidad Católica del Perú | | | | |
| Teléfono: 993270966 / 989028608 | | | | | |
| correo electrónico: jorge.pulcha@pucp.pe / a20111731@pucp.pe | | | | | |
| DESCRIPCION | UNIDADES | PRECIO UNIT | TOTAL/CELDA | N° CELDAS | TOTAL |
| plancha acrilico 1.2m*1.8m | 1 | S/. 230.00 | S/. 230.00 | 4 | S/. 920.00 |
| tubo pvc 1 1/2" 3m | 1 | S/. 10.40 | S/. 10.40 | 4 | S/. 41.60 |
| conecciones T pvc 1 1/2 " | 4 | S/. 2.00 | S/. 8.00 | 4 | S/. 32.00 |
| Cemento para CPVC 118 ml | 1 | S/. 12.90 | S/. 12.90 | 4 | S/. 51.60 |
| tapas de pvc 1 1/2 " | 6 | S/. 0.90 | S/. 5.40 | 4 | S/. 21.60 |
| estructura soporte de fierro | 1 | S/. 35.00 | S/. 35.00 | 4 | S/. 140.00 |
| recipientes plasticos con tapa Q'Plast Balde de plástico 20 L | 4 | S/. 13.40 | S/. 53.60 | 4 | S/. 214.40 |
| almacigo de totora | 3 | S/. 8.00 | S/. 24.00 | 4 | S/. 96.00 |
| almacigo de carrizo | 3 | S/. 8.00 | S/. 24.00 | 4 | S/. 96.00 |
| piedra chancada 4" (100mm) 40kg | 1 | S/. 5.90 | S/. 5.90 | 4 | S/. 23.60 |
| piedra chancada 1"(25mm) 40kg | 1 | S/. 5.90 | S/. 5.90 | 4 | S/. 23.60 |
| tierra preparada 5kg | 1 | S/. 7.90 | S/. 7.90 | 4 | S/. 31.60 |
| aguas residuales | 1 | | S/. 0.00 | 4 | S/. 0.00 |
| analisis de laboratorio MIN medio ambiente | 1 | | S/. 0.00 | 4 | S/. 0.00 |
| Mayoría de precios tomados de catalogo de SODIMAC Perú | TOTAL | | S/. 423.00 | | S/. 1,692.00 |

5.2 Valorización económica escala

| ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE IMPLEMENTACIÓN | | Humedales artificiales | | | |
|---|-----|---|-------------|-------------|--------|
| Nombre: Jorge Pulcha/ Michael Valencia Teléfono: 993270966 / 989028608 correo electrónico: jorge.pulcha@pucp.pe / a20111731 | | Pontificia Universidad Católica del Perú | | | |
| DESCRIPCIÓN | | Precios referenciales: la mayoría tomados de una Empresa contratista minera y del catalogo de una empresa de ferreteria comercial | | COMENTARIOS | |
| UNIDAD | QTY | PRECIO UNIT | Rendimiento | SUBTOTAL | |
| Equipos: | | | | | |
| Excavadora cat 336 para poza y canal de anclaje de geosintéticos | UND | 1 | 180 m3/h | 84.6 \$/h | 0.47 |
| Volquete de 15 m3 | UND | 1 | 35 m3/h | 32.35 \$/h | 0.92 |
| Mano de obra: | | | | | |
| Operador de excavadora | HH | 1 | 180 m3/h | 11.25 \$/h | 0.06 |
| Operador de volquete | HH | 1 | 35 m3/h | 11.25 \$/h | 0.32 |
| capataz | HH | 1 | 180 m3/h | 11.42 \$/h | 0.06 |
| Ayudantes de piso | HH | 2 | 45 m3/h | 8.19 \$/h | 0.36 |
| Técnico de geosintéticos | HH | 1 | 15 m3/h | 18 \$/h | |
| Herramienta y Materiales: | | | | | |
| Regla de aluminio 2.98 m | UND | 2 | | 18\$ | 36.00 |
| Impermeabilización de Poza | | | | | |
| Geotextil p/obras de drenaje (240 gr/m2) rollo 150 m | m2 | 1 | 5 m2/m3 | 1.37 \$/m2 | 0.27 |
| GEOMEMBRANA HDPE 1 CARA TEXT, E=1.5MM rollo 1 | m2 | 1 | 5 m2/m3 | 3.63 \$/m2 | 0.73 |
| cuña para termofusión de geosintéticos | UND | 1 | 120m3/día | 40 \$/día | 0.33 |
| exclusora para termofusión de geosintéticos | UND | 1 | 120m3/día | 40 \$/día | 0.33 |
| Relleno de canal de anclaje | | | | | |
| Vibropizón | HM | 1 | 7 m3/h | 4.5 \$/h | 0.64 |
| materia fino (arena, tierra, etc) | m3 | 1 | 0.36 m2/m3 | 3.63 \$/m2 | 0.73 |
| Red de Tuberías para fluido a tratar en el Humedal Artificial | | | | | |
| TUBERIA HDPE SDR-21, D=6" | m | | 1.5m/m3 | 16.3 \$/m | 10.87 |
| Frasco de Cemento para PVC 118ml | UND | 2 | | 3.9 \$ | 7.80 |
| Conexión T para Tuberías de 6" | UND | 1 | | 3.13 \$ | 3.13 |
| Tapas de PVC de 6" | UND | 2 | | 1.5\$ | 2.00 |
| Taladro Percutor black-decker + broca | UND | 1 | | \$28 | 28.00 |
| Sierra | UND | 1 | | \$12 | 12.00 |
| Lija de agua | UND | 5 | | 0.6\$ | 3.00 |
| Material Filtrante: | | | | | |
| piedra chancada 1/2 " | m3 | | 0.5 | 19.2 \$/m3 | 9.60 |
| piedra chancada 1" | m3 | | 0.5 | 19.2 \$/m3 | 9.60 |
| Especies Vegetales: | | | | | |
| Almacigo de Totora | alm | 9 | 9 alm/m3 | 2.7 \$/alm | 0.30 |
| Almacigo de Carrizo | alm | 9 | 9 alm/m3 | 2.7 \$/alm | 3.00 |
| | | | TOTAL | | 130.54 |

Siempre y cuando la excavadora este en mina (necesaria para realizar excavación de poza geosintéticos)
Para eliminar el material extraído de la excavación. El rendimiento depende de la distancia al botadero

Para operar el equipo
Para operar el equipo
Para supervisar las actividades
Para realizar los acabados dentro de la poza
Para realizar el impermeabilizado de la poza

Para perfilar y dar los acabos de la poza
Se recubre de manera perimetral y no en la tapa superior de la poza excavada
Se recubre de manera perimetral y no en la tapa superior de la poza excavada
Para unir dos paneles de geomembrana
Para unir más de dos paneles de geomembrana (Parche)

Se compactan capas cada 0.2m para asegurar el anclaje
Considerando que el canal de anclaje tiene una area transeversal de 0.6*0.6 m2

Considera 0.7m de tubería puesta paralela en la base y 0.8m de tubería perpendicular a la base como fuente de aereación
Para unir los tubos y conexiones

Para realizar orificios en la tubería y que estos capten las aguas para distribuir las en la red
Para cortar las tuberías
Dejar liso los tubos cortados

Material filtrante en la zona intermedia
Material filtrante en las zonas inicial y final

Considerando un espaciamiento de 0.4m entre cada rizoma sembrado
Considerando un espaciamiento de 0.4m entre cada rizoma sembrado

Nota: En la mayoría de proyectos de unidades mineras se cuentan con la mayoría de los items mencionados líneas arriba por lo que el costo total de implementación por metro cúbico se reduciría considerablemente

6. CONCLUSIONES

- Se logró diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales, donde se combinan distintos tratamientos que logran extraer contaminantes del agua (sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización).
- La concentración de contaminantes metálicos en el agua disminuyó durante todos los muestreos con respecto a la concentración inicial ingresante variable entre 4 y 6.8 ppm. Las concentraciones finales de los metales pesados se encontraban por debajo de los LMP.
- La especie vegetal Carrizo tuvo mayor capacidad depuradora para el competidor metálico zinc, mientras que la especie vegetal totora presenta una mayor capacidad depuradora para el competidor metálico cobre.
- Existe una tendencia del pH a incrementarse a medida que atraviesa cada lecho micro biológico. Sin embargo, se observa que el proceso de senescencia en las especies vegetales provocó una leve disminución de pH en la solución, hasta llegar a un pH neutro.
- El contenido de sólidos fue retenido prácticamente en su totalidad, gracias a la capa filtrante de piedra chancada que se utilizó, con ayuda de la biomasa de la planta que también sirvió como una trampa secundaria.
- La eficiencia para remover el nitrato en las cuatro celdas con ambas especies fue prácticamente la misma, ya que solo hay un margen de 0.25% a favor de la especie totora; sin embargo, para la remoción de amonio la especie vegetal carrizo fue más eficiente en cuanto a su remoción en un 5 %. El mayor porcentaje de remoción de nitrógeno amoniacal (amonio) se dio al pasar las 24 horas. Así mismo, el proceso de senescencia tuvo un papel importante para la eficiencia en el resto de días, tanto para la totora como el carrizo,

obteniéndose una remoción de 90% de este último en 3 de las celdas, a excepción de las celda que contenía zinc, ya que la remoción llegó a un 77.30% con la especie vegetal carrizo.

- En cuanto al nitrato, el mayor porcentaje de remoción se registró en el último día de tratamiento, alcanzando un 91.5 % de remoción para ambas especies, esto se debe a que el proceso de nitrificación es más lento que amonificación.
- La remoción de cobre es el que obtiene resultados más favorables, pues presenta una tendencia decreciente en la concentración de dicho contaminante a medida que avanza el tratamiento. Se consigue reducir casi en su totalidad el contenido de Cu en el agua con ambas especies vegetales sobre todo con totora (99.86%) que muestra un mayor efecto depurador bajo estas condiciones comparado al carrizo (99.79%).
- Se consigue depurar el cinc con mayor eficacia con la especie vegetal carrizo (99.88%); sin embargo, la consistencia de depuración para este metal es menos notoria en comparación del cobre. Por otro lado, la especie vegetal totora depuro en un (99.85%) al contenido de zinc, siendo aún más efectiva que con el cobre, pero también con menos consistencia en la capacidad depuradora para las concentraciones más bajas.
- Ambas especies vegetales consiguieron depurar el plomo en el primer día de tratamiento, pero al tratarse de un metal tóxico para las plantas, estas no consiguieron retener el contaminante, sino que para restaurarse a sí mismas devolvieron al agua residual contenido de dicho metal a lo largo de los siguientes días, pero en cantidad pequeñas. Al tener un biotipo más resistente el carrizo obtiene mejores resultados para sólo el primer día, pues consigue ser 60% más efectiva que la totora en ese momento.

- Con base en los resultados obtenidos de remoción de metales por nuestro sistema de estudio, se puso de manifiesto el aporte de las especies vegetales utilizadas tolerantes en los humedales artificiales, al dar lugar a una mayor remoción y, sobre todo, al propiciar la estabilidad de dicha remoción. Los mecanismos de remoción que se suscitan dentro de los humedales como la adsorción, fito extracción y voltaización se incrementaron, además sabemos existen bacterias tolerantes en la acumulación y distribución de metales dentro del humedal.
- El sistema de tratamiento pasivo Humedal artificial sub superficial de flujo horizontal a nivel laboratorio con las especies vegetales totora y carrizo utilizadas, muestra una tendencia en la supresión de la acidez, consigue precipitar metales pesados, elimina sólidos en suspensión y disminuye los sulfatos. Este sistema trabaja como una tecnología natural de depuración para el tratamiento de aguas residuales no sólo de la industria minera, resulta ser un sistema eficaz, de fácil diseño e implementación, que logra la remoción de contaminantes ecotóxicos como lo son nitrato, amonio y competidores metálicos. Si bien es autónomo, también puede ser complementario e integrado a otras tecnologías de limpieza de aguas. Esta tecnología, al igual que los métodos convencionales de tratamiento de agua también purifican a través de sistemas de oxidación y microorganismos. La diferencia es que captura el oxígeno de forma natural sin necesidad de utilizar sistemas de inyección mecánica, además de ser de baja inversión inicial y costos operativos mucho más bajos porque su consumo energético es mínimo (energía eléctrica), produce ahorro y eficiencia energética, al tratarse de humedal artificial subsuperficial no se producen lodos ni olores, siendo su mantenimiento limitado y sencillo (labores fitosanitarias).

7. Recomendaciones

- Antes de utilizar humedales artificiales, se debe conocer la carga contaminante. En vista que podría ser necesario aplicar un pre tratamiento al efluente que ayude a degradar de manera más eficiente los contaminantes.
- Es necesario cuantificar la eliminación de contaminantes neta debido a procesos químicos y biológicos en los sistemas de tratamiento pasivo, y poder distinguirlos de la eliminación debido a efectos de dilución o evaporación. Sería necesario realizar un estudio detallado del balance hidrológico y químico, o en su defecto haciendo uso de un ión cuya concentración se conserve, es decir, no debe participar en ninguna reacción química entre los puntos de muestreo inicial y final, si se hace uso de concentraciones de iones contaminantes que exceden a las de los iones que se conservan, pueden ser atribuidos a procesos químicos y biológicos en el humedal. Para ello los contaminantes deben estar presentes en el agua residual en una concentración elevada y no debe ser reactivo en condiciones de pH, de manera que su concentración pueda ser medida de una forma precisa.
- Una limitación de este sistema pasivo es que, si el contenido metálico es muy elevado, las aguas pueden resultar tóxicas para las plantas y ocasionar su muerte a corto plazo produciendo una degradación de biomasa que devolverá dichos contaminantes al agua. Hecho que empezó a suceder a partir del día 4 cuando empezamos a notar cambios en las especies vegetales sobre todo en la totora. Sería recomendable fertilizar con nutrientes a las especies vegetales para atenuar la acumulación de metales y aumentar la tolerancia a los mismos. El enriquecimiento con nutrientes mejoraría la remoción de metales de agua

a través del aumento en la producción de biomasa y del mejoramiento del metabolismo (Hadad et al., 2007). Gothberg et al. (2004)

- Con respecto a los aspectos fitosanitarios y manutención del humedal artificial, es siempre importante proceder con la siega y retirada periódica de la vegetación de los humedales, de lo contrario la mayor parte de los nutrientes retenidos volverán a las aguas mediante procesos de degradación de la biomasa vegetal. Además de ser sencillo de realizar resulta importante para la sostenibilidad medioambiental y económica de las depuradoras convencionales. Los residuos obtenidos del mantenimiento realizado al humedal artificial pueden utilizarse para la preparación de compost, para devolver al suelo valiosos nutrientes (abono). Los restos de plantas muertas, como las hojas, sirven como valiosa protección y abono para el suelo, ésta cubierta natural protege contra la erosión en caso de lluvias, calor y heladas pues tiene un efecto aislante. Un suelo cubierto se evapora aproximadamente una tercera parte menos de agua que de la tierra no cubierta, los microorganismos desintegran lentamente estos restos vegetales y se forman nuevos humus y nutrientes.
- Para poder corroborar nuestra investigación en laboratorio, resulta conveniente poder realizar estudios a escala piloto basados en los resultados de la presente investigación, ya que las concentraciones tanto de nitrato, amonio como de metales pesados de la solución contaminada tratada, en función de las pruebas de toxicidad, y las características operacionales utilizadas, fueron las adecuadas, al garantizar la subsistencia y proliferación tanto de las bacterias como de la vegetación durante todo el tiempo de operación, además de encontrarse dentro de las reportadas para efluentes de industrias relacionadas con el uso y/o producción de los metales pesados. Sumado a ello los materiales a usarse en este sistema pasivo, no demandan altos costos de inversión, preferentemente se utilizan

substratos que se obtienen de las zonas cercanas y los materiales y equipos adicionales en su gran mayoría para su construcción pueden ser obtenidos en la unidad minera. Aunque la eficacia de los métodos pasivos es defendida por la gran mayoría de los investigadores, los realizados “in situ” son métodos aún en experimentación. Por tanto, aunque se consideran representativos de las condiciones dadas en estudio, son numerosos los procesos y reacciones que pueden originarse en la propia zona de origen de las aguas ácidas y que pueden tal vez no ser reproducibles a grandes escalas (Inga, 2011). Por ello, para pretender diseñar un sistema pasivo a escala piloto existen una serie de factores que deben ser considerados para evaluar y seleccionar la ubicación del humedal construido. Estos factores incluyen la topografía (pendientes suaves), las características del terreno y la disponibilidad de éste (impermeabilidad de terreno para evitar percolación), el riesgo de inundación, el clima (los mecanismos biológicos de un humedal se ven afectados a bajas temperaturas) y los factores hidrológicos (caudal para el tiempo de retención).



BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, Rodrigo (2005) *Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro*. Tesis Doctoral. Oviedo, España. Universidad de Oviedo, Escuela técnica superior de ingenieros de minas de Oviedo.
- Alianza por el agua (2004). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Secretaria Alianza por el Agua, Ecología y Desarrollo. Ideasamares.
- Benefield, L.D. & C.W. Randall (1980). *Biological process desing for wastewater treatment*. Pretice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- Bremmer & Shaw (1958) *Denitrification in soil. I. Methods of investigation*. Journal of Agricultural Science. Iowa State University.
- Coulton, R., Bullet, C., Hallet, C. (2003). *The Design and Optimization of Active Mine Water Treatment Plants*. Land Contam Reclam, pp. 273-279.
- Curt, María (2012) *Manual de Fitodepuración, Filtros de Macrófitas en Flotación*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Delgadillo, O. Camacho, A. Pérez, L & Andrade. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del agua. Facultad de agronomía. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.
- Dupoldt, C., Edwards, R., Garber, L., Isaacs, B., Murphy, T., Rider G. (1994) *A handbook of constructed wetlands*. Pennsylvania, USDA Pennsylvania Department of Environmental Resources.

- Environment Agency (2002). *Constructed Wetlands for Minewater Treatment*. R&D technical Report P2-181/TR. I Wiseman. UK.
- Flemming, C., Trevors, J. (1989). *Water, Air, and Soil Pollution Cooper Toxicity and Chemistry in the Environment*. Kluwer Academic Publishers, pp. 143-158 University of Guelph, Ontario, Canada.
- Kadlec, R; Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. Library of Congress Cataloging- 2nd Edition. USA.
- Hammer, D.A. & R.K. Bastian (1989). *Wetlands ecosystems: natural water purifiers*. Chapter 2 in *Constructed wetland for wastewater treatment*, Lewis Publishers, Chelsea.
- Hu. B. (2007). *Quantitative comparison of stability of Anammox process ion different reactor configurations*. Bioresource Technol. USA.
- Kadlec, R. H. W. Bastiacens (1993). *Hidrological design of free water surface treatment wetlands*. In G. Moshiri (ed). *Constructed wetlands for water quality improvement*; Lewis Publishers, Chelsea, MI, pp. 77-86.
- Knight, Robert L. (1994). *Treatment wetlands data base. Water environment & technology*. Vol. 6, 2: 31-33 for water quality treatment, U.S. Environmental protection agency, risk reduction environmental laboratory; Cincinnati.
- Llagas Chafloque, Wilmer; Guadalupe Gómez, Enrique (2006). *Diseño de humedales artificiales parciales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 15, N° 17, pp. 85-96.

- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2011). *Compendio de la Legislación Ambiental Peruana*. Lima, Perú. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental de Ministerio del Ambiente.
- Organismo De Evaluación Y Fiscalización Ambienta (OEFA) (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Lima, Perú. Recuperado el 23 de mayo de 2017 de www.oefa.gob.pe
- Palomino Zevallos (1996). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química.
- Paul Y Clark (1996). *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*. Oxford. 3rd Edition. England.
- Reed, S. C., J. Miledlebrooks & R. W., Crites (1995). *Natural systems for waste management and treatment wetlands*. McGraw Hill, New York. Constructed wetlands and mosquitoes health hazards.
- Russell, R.C. (1999). *Natural systems for waste management & treatment*. Mc Graw Hill, New York.
- Seidel, Kathe (1965). *Phenol-Abbau in Wasser durch Scirpus lacustris*. L. wehrend einer versuchsdauer von 31 Monaten. *Naturwissenschaften* 52, pp. 398–406.
- Skousen, Jeffrey G. (2000). *Mine Water and the Environment*. Journal of the International Mine Water Association. Springer. Volume 19.
- Vymazal, Jan. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Czech University of Life Sciences, Prague. Balogh Scientific Books.

Whitehead P.G., Prior H. (2005). *Bioremediation of acid mine drainage: an introduction to the Wheal Jane wetland project*". Science of the total environment. UK, pp. 15-21.

Younger, Paul L. (2002). *The adoption and adaption of passive treatment technologies for mine waters in The United Kingdom*. Newcastle: University of Newcastle. Department of civil engineering.

