



Alternativas de fitoremediación para aguas de uso agrícola

Phytoremediation alternatives for agricultural water

Johnny O. Corcho-Puche¹ ; Cristina M. Ruiz-Corrales¹ ; Bleydy Ortega-Vergara^{1*} ; Ricardo J. Del-Valle-Moreno¹ 

¹Servicio Nacional de Aprendizaje, Sena, regional Córdoba, Grupo Investigaciones CABP, Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Investigación, SENNOVA. Montería - Córdoba, Colombia; e-mail: jcorpu68@sena.edu.co; crcorrales@sena.edu.co; borteaga@sena.edu.co; rjvalle@sena.edu.co

*autor de correspondencia: borteaga@sena.edu.co

Cómo citar: Corcho-Puche, J.O.; Ruiz-Corrales, C.M.; Ortega-Vergara, B.; Del-Valle-Moreno, R.J. 2023. Alternativas de fitoremediación para aguas de uso agrícola. *Novum Ambiens*. 1(1):e2335. <http://doi.org/10.31910/novamb.v1.n1.2023.2335>

Artículo de acceso abierto publicado por Novum Ambiens, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: enero 23 de 2021

Aceptado: noviembre 01 de 2022

Editado por: Oscar Luis Pyszczyk

RESUMEN

La producción agropecuaria en los últimos tiempos se ha ido apoderando del progreso y del desarrollo de las comunidades rurales, razón por la cual, se plantea un cúmulo de alternativas para impulsar el bienestar social. La presente investigación tiene como objetivo implementar la fitoremediación, con la intención de hacer uso de una serie de tecnologías que se basan en el empleo de plantas, para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos e, incluso, aire. Para el desarrollo del experimento, se utilizó agua residual proveniente de un monocultivo de arroz, ubicado en el Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir del SENA, Montería, Colombia. De acuerdo con las variables preestablecidas, se corroboró de que el éxito de la fitoremediación depende, ante todo, de la selección minuciosa de las especies de plantas, su capacidad de sobrevivir y el clima en la región geográfica. Los tratamientos fueron alimentados con agua residual, con un caudal de 0,75 litros por segundo cada tres días. Con los resultados obtenidos, se pretende establecer un modelo de humedal para disminuir las concentraciones de los contaminantes en el agua, producto de la siembra de arroz convencional.

Palabras Clave: Acciones antropogénicas; Medio ambiente; Desarrollo sostenible; Producción industrial; Desequilibrio ecológico.

ABSTRACT

Agricultural production in recent times has been taking over the progress and development of rural communities; reason for which there is a host of alternatives to promote social welfare. The presented research aims to implement phytoremediation, with the

intention of making use of a series of technologies that are based on the use of plants to clean or restore contaminated environments, such as water, soil, and even air. For development of the experiment, residual water from a rice monoculture located at the Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir of SENA, Montería. According to the pre-established variables, it was corroborated that the success of phytoremediation depends, above all, on the judicious selection of plant species, their ability to survive, and the climate in the geographical region. The treatments were fed with residual water with a flow rate of 0.75 liters per second every three days, which indicates that according to the phytoremediation procedure. With these results, it is intended to establish a wetland model to reduce the concentrations of pollutants in the water produced by conventional rice planting.

Keywords: Anthropogenic actions; Ecological imbalance; Environment, Industrial production; Sustainable development.

INTRODUCCIÓN

El ambiente, se encuentra expuesto a impactos favorables y desfavorables y éstos últimos, reflejados en la contaminación que se desprende del uso indiscriminado de productos químicos en la producción agrícola, aspecto que requiere ser analizado minuciosamente, para generar acciones en función de garantizar mejores condiciones de vida a la humanidad. En efecto, es pertinente considerar lo planteado por Denis (2020), donde se asegura que: “La Amazonía está mucho más amenazada que hace ocho años”, debido al “avance de las actividades de extracción, de los proyectos de infraestructura, así como de los incendios, la deforestación y la pérdida de carbono”, advirtió recientemente un informe de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada, RAISG.

De hecho, surge una interrogante: ¿Cómo implementar la fitorremediación para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos e, incluso, aire?, teniendo en cuenta que la fitorremediación, según Delgadillo-López *et al.* (2011), se puede ver como “la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos, como metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo”. En efecto, a nivel mundial, los problemas de contaminación, tanto en suelos como en agua y aire, se deben, principalmente, a acciones antropogénicas, entre las que cabe destacar la extracción de recursos naturales, en este caso en particular, en procesos industriales, como el agropecuario, el de manufactura, hidrocarburos, entre otros. El impacto ambiental que se genera en Colombia, debido a esta situación, encierra la contaminación de fuentes hídricas, fauna y flora deterioradas y cambio en el paisaje. Por ello, las entidades gubernamentales, como el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA, han desarrollado diversas estrategias de control, con el fin de reducir el impacto en el medio ambiente (Velásquez Arias, 2017).

Ahora bien, la producción industrial ha traído consigo diversos problemas, entre ellos, el tratamiento inadecuado de las aguas residuales, lo que produce el deterioro de los suelos cuando son regados con estas, causando la contaminación de aguas subterráneas y superficiales por escorrentía. La carga orgánica presente en estas aguas origina una variación en las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo y del agua, lo cual, suscita un desequilibrio ecológico que, difícilmente, se puede remediar en el corto plazo (Arias Martínez *et al.* 2010).

En el Centro Agropecuario y de Biotecnología El Porvenir, se ha implementado el cultivo de arroz, como una alternativa para fortalecer la formación. En los procesos de producción del cereal, se utilizan una serie de agroquímicos que afectan directamente las condiciones fisicoquímicas del agua, suelo y de los componentes de biodiversidad, que se encuentran en la zona del cultivo; a razón de esto, se busca implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales con plantas endémicas, como la *Heliconia latispatha*, que ayude a minimizar los impactos negativos, producidos por el uso de los fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, utilizados en el cultivo de arroz.

Efectivamente, este experimento se respalda en estudios y en experiencias en diversas latitudes geográficas; tal es el caso de la investigación de López-Martínez *et al.* (2005), cuyo objetivo fue “mostrar a la fitorremediación como una opción tecnológica útil para la limpieza de suelos contaminados. Se hace una revisión de los mecanismos que la planta utiliza, las interacciones que se llevan al cabo en el suelo entre planta, microorganismos y compuestos orgánicos xenobióticos. Estos conocimientos permitirán proponer soluciones a los problemas de la contaminación y la eventual recuperación de suelos”. De hecho, se logró concluir que “La fitorremediación es una tecnología viable, eficiente y útil para la limpieza de suelos contaminados. Su efectividad ha sido demostrada

con todo tipo de contaminantes xenobióticos que van desde las moléculas inorgánicas hasta las orgánicas”.

Asimismo, es importante indicar que Marrero-Coto *et al.* (2012) realizaron una investigación, cuyo objeto de estudio se centró en demostrar que “La fitorremediación es una vertiente de la biorremediación que surge recientemente como alternativa ante esta problemática ambiental, y se basa en el uso de plantas que acumulan elevadas concentraciones de metales en sus tejidos para contener, remover o neutralizar contaminantes, mediante mecanismos de captura de metales propios de estas plantas y/o por los microorganismos que se desarrollan en la rizosfera”. Es importante indicar que estos trabajos van fortaleciendo el tema de investigación.

Bajo la misma mirada es conveniente mostrar la investigación realizada por Arias Martínez *et al.* (2010), que tuvo como propósito “evaluar la efectividad de los humedales para reducir la carga contaminante como sistemas económicos de tratamiento en las granjas porcícolas en Colombia” y se concluyó, que “Las plantas que se seleccionan para los humedales artificiales deben estar acordes con el clima y las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas que se van a tratar debido a la presencia de componentes que hacen difícil la sobrevivencia de las plantas y del sistema de filtro biogeoquímico”.

Otra de las experiencias investigativas, se enfoca en el trabajo realizado por Poma Llantoy & Valderrama Negrón (2014), cuyo objetivo fue “corroborar la remoción de dichos metales, las soluciones residuales, después de haber sido sometidas con la especie vegetal, fueron tratadas usando el método APHA 3030-e y las muestras de *E. crassipes* fueron tratadas usando el método EPA 200.3. La concentración de Cd (II) fue determinada por un equipo ICP-OES y la del Hg (II), por un equipo de absorción atómica”. De igual manera, los resultados alcanzados señalan que “Los resultados obtenidos fueron: Dosis óptima 1mL de A y 0,5 mL de B, pH óptimo 5, concentración óptima de Cd (II) y Hg (II) 5 mg/L para cada ion. Con estos parámetros se inició la remoción de 5 mg/L de los iones metálicos contenidos en 1 litro de solución. Los porcentajes de sorción fueron de 16,56 % para Cd (II) y 15,6 % para elHg (II) en un periodo de 7 días”.

Como se aprecia en los trabajos y experiencias revisadas, se logra evidenciar que el impacto de la fitorremediación es de suma importancia, tanto para el ambiente como para los productores agrícolas, pues es una alternativa que apunta a la recuperación y al mantenimiento de los sitios de siembra y eso conlleva en que exista rentabilidad en la producción, pues se apuesta al uso de recursos naturales, para que se logre un equilibrio entre la producción y el ambiente, lo que permite la inclusión de la sostenibilidad; de hecho, Marrero-Coto *et al.* (2012) señalan que la fitorremediación es una de las vertientes de la biorremediación que se puede considerar una tecnología alternativa rentable y sostenible. En ella, se emplean plantas (flora arbórea, arbustiva, herbácea) y algas, que tienen la capacidad de almacenar y de eliminar sustancias tóxicas, mediante sus procesos metabólicos, principalmente, metales pesados, por lo que son denominadas plantas hiperacumuladoras.

Los estudios y las experiencias descritos permiten abrir caminos y establecer las bases teóricas del presente experimento, el cual, cumple los requisitos de rigor para su muestra y, por ende, publicación; de hecho, se muestra la introducción, donde se hace énfasis en el planteamiento y la formulación del problema, el objeto de estudio y, por supuesto, los antecedentes, que hacen referencia y relación con el tema que se viene desarrollando; seguidamente, se presenta lo concerniente a los materiales y métodos, donde se explica la operatividad del experimento, acompañado, luego de los resultados; seguidamente, se presentan la discusión y se finaliza con un cuerpo de conclusiones, las cuales, hacen énfasis en los objetivos previstos y se finaliza con las referencias utilizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con relación a los materiales y los métodos del experimento, se debe tener presente que se tomaron diferentes elementos, entre los que vale señalar los siguientes:

Agua residual analizada. Para el desarrollo del experimento, se utilizó agua residual proveniente de un monocultivo de arroz, ubicado en el punto georreferenciado N 8°34'23.89", W 75°57'46.89" El análisis físico químico inicial, se presentan en la tabla 1.

Los parámetros fisicoquímicos en el agua se midieron para determinar las concentraciones de contaminantes en un cuerpo de

agua y determinar los respectivos tratamientos a realizar; de acuerdo con los resultados, se observa que la alcalinidad estaba por encima del límite permisible, según el Decreto 631/ 3015, MAVD, al igual que los nitratos y la DQO. Se establece que la presencia de materia orgánica en el agua es alta y, por lo tanto, no hay oxígeno suficiente para depurar el agua; asimismo, el valor de conductividad. La variación de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de la materia orgánica e, igualmente, contribuye a la detección de fuentes de contaminación, la evaluación de la actitud del agua para riego y la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno. En cuanto a la dureza, se puede decir que entre más alta la dureza mayor productividad en terrenos dispuestos para la agricultura.

Con estos resultados, se pretendió establecer un modelo de humedal, para disminuir las concentraciones de los contaminantes en el agua, producto de la siembra de arroz convencional.

Establecimiento del experimento. Se estableció, como diseño experimental, el montaje de cuatro tratamientos, los cuales, incluyeron lechos filtrantes (canto rodado, grava, antracita y sustrato) y una planta fitoremediadora, la *Heliconia latispatha*.

Para la implementación, se utilizaron 8 recipientes plásticos, con las siguientes medidas: 20 cm de ancho x 78 cm de alto; cada recipiente incluyó lechos filtrantes, abono y heliconias, según correspondía

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos medidos en el agua residual del arroz CABP.

| Parámetro | Límite de cuantificación | Resultado de la muestra |
|---|--------------------------|-------------------------|
| pH | 6,00 a 9,00 | 8,0 |
| Demanda química de oxígeno DQO (mg O ₂ /L) | 150,00 | 108,14 |
| Demanda bioquímica de oxígeno dbo ₅ (mg O ₂ /Lca) | 50,00 | 46,72 |
| Conductividad Eléctrica (MgCaCO ₃ /L) | Análisis y Reporte | 580 |
| Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L) | 6.040 | 240.00 |
| Cloruros | Análisis y Reporte | 35,98 |
| Dureza total (mgCaCO ₃ /l) | Análisis y Reporte | 208 |
| Nitritos (mg NO ₂ - -N/L) | Análisis y Reporte | 0,02 |
| Nitratos (NO ₃ - -N/L) | 0,02 | 2,03 |
| Nitrógeno total (mg N/L) | Análisis y Reporte | 0,84 |
| Fosforo total (mg P/L) | Análisis y Reporte | 4 |

a cada tratamiento. Los tratamientos implementados fueron los siguientes:

Tratamiento 1: Abono + Sustrato + Plantas

Tratamiento 2: Canto rodado + Antracita + Abono + Plantas

Tratamiento 3: Canto rodado + Grava + Abono + Plantas

Tratamiento 4: Grava + Canto rodado

Como tanque colector, que almacenaba y distribuía el agua residual en cada uno de los tratamientos, se utilizó un recipiente con capacidad de 100 litros, ubicado en la parte superior para alimentar

el sistema; este, a su vez, se controlaba con llaves de paso. Los tratamientos fueron alimentados con agua residual, con un caudal de 0,75 litros por segundo, cada tres días.

El abono utilizado para el experimento fue abono tipo bocashi, que se caracteriza por ser un abono completo en nutrientes, que les permite a las plantas desarrollarse con los nutrientes necesarios para el proceso; a su vez, se realizó una mezcla de hormigón y arena, permitiendo que la mezcla fuese más compacta. En la tabla 2, se muestra el análisis de laboratorio del abono.

Por otra parte, como lecho filtrante, se utilizó antracita, así como la grava, que oscila entre 50 a 100 mm y grava fina, diámetro entre 3 a 32 mm, los cuales, se seleccionaron por ser materiales capaces de retener partículas gruesas y finas, que permiten la depuración de las aguas residuales.

Las plantas fitoremediadoras usadas fue la *Heliconia latispatha*, una especie herbácea erecta rizomatosa, perenne, siempreverde, que forma densas matas altas 1,5-4 m. Las hojas, sobre un pecíolo largo 20-50 cm, son basales, alternas, simples, enteras, oblongo-elíptica,

Tabla 2. Análisis de laboratorio del abono.

| Análisis | Metodología | Valor | Parámetro a garantizar, según NTC 5167 |
|---|--|----------------|--|
| pH (unidades de pH) | Potenciométrico (NTC 5167) | 8,09 | 4,0 -9,0 unidades de pH |
| Conductividad (dS/m) | Electrométrico (NTC 5167) | 64,8 | - |
| Carbono orgánico total (%) | Método C. Oxidación húmeda (NTC 5167) | 14,63 | Mínimo 15% |
| CIC (cmol/kg) | Extracción con acetato de amonio 1M pH 7- Volumetría (NTC 5167) | 51,86 | Mínimo 30 Cmol/kg |
| | | | |
| Fósforo disponible (ppm) | Espectrofotométrico Bray II. (NTC 5350) | 933,98 | - |
| Humedad (%) | Gravimétrico (NTC 5167) | 10,99 | Max 20 % origen animal Max 30% origen vegetal |
| Acidez intercambiable (si pH es < 5,5) | Volumétrico (NTC 5167) | No determinada | 0 |
| Densidad real máxima (g/cm ³) | Gravimetría | 0,67 | Máximo 0,6 g/cm ³ |
| Nitrógeno total (%) | Método Kjeldahl modificado (NTC 370) | 0,1317 | - |
| Relación Carbono/Nitrógeno | Calculado | 111,08 | - |
| Calcio (cmol/kg) | Extracción con acetato de amonio 1M pH 7- y cuantificación por absorción - emisión atómica | 17,36 | |
| Magnesio (cmol/kg) | | 22,52 | |
| Potasio (cmol/kg) | | 40,02 | - |

con ápice en punta y nervadura central prominente en la página inferior, largas 0,5-1,5 cm, de color verde brillante y bases foliares tubulares envolventes, que forman un pseudotallo. Las plantas fueron recolectadas en los alrededores del Centro de formación, sometidas a un periodo de estabilización para adaptarse a las nuevas

condiciones, para luego ser replantarlas en el sistema de tratamiento de agua residual.

Variables. En el agua residual, sometida a proceso de descontaminación, mediante fitoremediación, se evaluaron

parámetros, tales como pH, oxígeno disuelto, metales pesados, conductividad, demanda biológica de oxígeno-DBO, demanda química de oxígeno-DQO y fósforo. Estas variables, se evalúan por las siguientes razones:

pH. Este parámetro permite determinar si una muestra de agua es alcalina o ácida, a pH inferior a 4,5 y superiores a 10, se tendrá un descenso de la colonia de bacterias en el sistema biológico. En vertidos urbanos, los rangos de pH están comprendidos entre 6,5 y 8,5, las variaciones de estos intervalos normalmente son debidos a vertidos incontrolados de origen industrial.

Demanda bioquímica de oxígeno DBO5 (mg O₂/L). Variación de la OD determinada al cabo de cinco días en condiciones estándar y que nos proporciona una idea del carbono orgánico biodegradable existente en la muestra y el impacto que ocasiona en la fauna acuática.

Demanda química de oxígeno DQO (mg O₂/L). La DQO, se define como la cantidad de oxígeno disuelto que consumen en la oxidación química de toda la materia oxidable de una muestra. Bajo tales condiciones, se oxida toda la materia oxidable presente en la muestra, incluso, aquella que los microorganismos no son capaces de degradar. El método consiste en someter a la muestra a un agente químico oxidante fuerte (dicromato potásico) en un medio ácido a alta temperatura y en presencia de un catalizador (sulfato de plata). Es un indicador de la contaminación orgánica de los vertidos, tanto la materia biodegradable como la que no lo es.

Nitritos (NO₂). Los nitritos son relativamente inestables y fácilmente oxidables a nitratos y raramente superan el valor de 3 mg/L. Cuando se presentan valores altos de nitritos en la salida de un sistema de agua residual, indica que no se está dando correctamente el ciclo del nitrógeno en el sistema biológico y no existe una colonia suficiente de bacterias nitrobacter en el sistema.

Nitratos (NO₃). Es la forma más oxidada del nitrógeno y la forma menos tóxica en la que se puede realizar el vertido. Puede facilitar el crecimiento de algas verdes.

Fósforo total. (UNE 77047-1983 y UNE EN ISO 1189-1997). El fósforo junto con el nitrógeno es dos de los nutrientes fundamentales de todos los seres vivos, de forma que contenidos, anormalmente altos de estos en las aguas, pueden producir un crecimiento incontrolado de la biomasa acuática (eutrofización). Una gran parte del fósforo presente en las aguas, se debe al uso de abonos fosfatados y detergentes.

Conductividad. (UNE EN 27888-1994). El agua pura se comporta como aislante eléctrico, siendo las sustancias en ella disueltas las que proporcionan al agua la capacidad de conducir la corriente eléctrica. Valores altos de este parámetro afectan al proceso biológico de depuración, impidiendo el desarrollo de una comunidad bacteriana estable. Se produce un desajuste en la colonia bacteriana, las bacterias filamentosas son más resistentes, lo que provoca que se debilite la estructura flocular del fango activo, disminuyendo su densidad y, por tanto, su velocidad de sedimentación.

Se realizaron un total de tres tomas de muestras para cada tratamiento. Se establecieron tiempos de retención del agua en los tratamientos para la toma de muestras. Inicialmente, se tomó como tiempo de retención 3 días; la segunda toma de muestra, se realizó luego de un tiempo de retención de 8 días y la última muestra, con un tiempo de retención de 15 días. El análisis de estos parámetros, se realizó en un laboratorio externo acreditado, para el desarrollo de las pruebas.

RESULTADOS

En cuanto a los resultados es conveniente considerar algunos aspectos de gran importancia; tal es el caso, que el tratamiento de la información se presentó bajo la data elaborada, mediante el software SPSS, con el cual, se pueden juntar para contribuir a un bienestar social, acorde a las exigencias del entorno, tal como se puede apreciar en los siguientes aspectos alcanzados, según el tipo de investigación, el cual, corresponde a una investigación de tipo experimental y donde se logró evidenciar los comportamientos estadísticos de la tabla 3.

Diseño hidráulico del sistema

$$As = \frac{Q_{in} \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{Kt (h) (n)} \quad \text{ecuación 1 (EPA, 1988)}$$

Donde:

As: área superficial (m²)

Q: caudal (m³/día)

Co: Concentración de entrada (mg/l)

Ce: Concentración de salida (mg/l)

Kt: Constante de primer orden dependiente de la temperatura (d⁻¹)

n Porosidad promedio del sistema, en fracción decimal

h: Profundidad promedio del sistema (m)

Dada un área superficial de 1,76 m², altura de lecho de 0,70 m, n de 0,40, Co de 220 mg/l y Ce 50 mg/l, un Kt de 1.49 d⁻¹; se procede a calcular el caudal de diseño del sistema de humedal subsuperficial de flujo horizontal, conforme a la ecuación 1.

$$Q = \frac{As Kt (h) (n)}{\ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)} \quad \text{ecuación 2}$$

$$Q = \frac{1.76m^2 \cdot 1.49d^{-1}(0.70m) (0.40)}{\ln \left(\frac{220mg/l}{50mg/l} \right)}$$

$$Q = 0.05 \frac{1}{s} = 1l/s$$

Tabla 3. Variables dependientes e independientes.

| Variables independientes | | |
|-----------------------------------|----------|--|
| Variable | Unidad | Método |
| Tiempo de retención | Segundos | Trazadores con Bromuro de potasio |
| Caudal real | Lts/s | Flujómetro medido en dos piezómetros por cada sistema |
| Conductividad hidráulica efectiva | | |
| Antracita | mm | |
| Grava | mm | 2 m ² el diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. 6 m ² zona de plantación está constituida por grava fina diámetro entre 3 mm a 32 mm; y 6 m ² antracita de un. |
| Variables dependientes | | |
| DBO | mg/l | |
| DQO | mg/l | |
| SST | | |
| Nitritos | | |
| Nitratos | | |
| pH | | |
| Temperatura | | |

Tabla 4. Variables con estructuras.

| Variable | Estructura 1 | Estructura 2 |
|-------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| As | 1,76 m ² | 1,76 m ² |
| Caudal de diseño | 1 Lts/s | 1 Lts/s |
| Tipo de lecho filtrante | Grava fina diámetro entre 3 a 32 mm | Antracita |
| Altura de lecho | 0,70 m | 0,70 m |
| Vegetación | Heliconia | Jincho de agua |

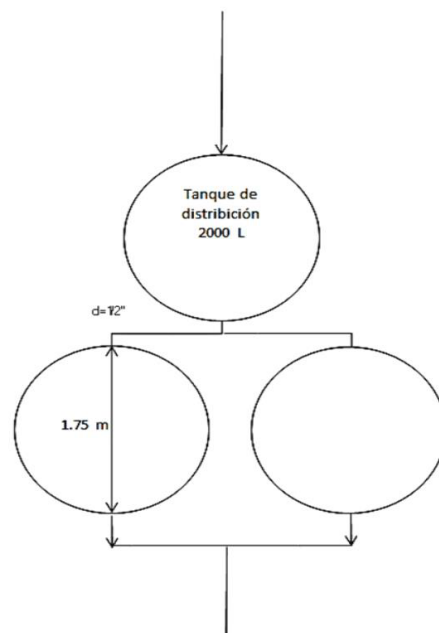


Figura 1. Operatividad del sistema.

A partir del caudal de diseño, se propone el siguiente esquema de tratamiento, compuesto por dos estructuras en paralelo con las características, que se presentan en la tabla 4. El comportamiento estadístico hallado, se refleja la figura 1.

DISCUSIÓN

Con relación a los resultados encontrados, se logró determinar, según algunos cálculos estadísticos, que se deben considerar en el momento de aplicación del experimento para que se logre disminuir la contaminación ambiental y, por supuesto, con ello, se establezca el equilibrio entre la producción y las implicaciones en el ambiente, generando aspectos relacionados con la sostenibilidad, lo cual, se convierte en una herramienta para los productores agrícolas generando, con ello, un rescate del ecosistema natural; de hecho, todo estos aspectos se logran ver al aplicar el software SPSS y que deja ver en la tabla 5.

Al revisar los datos estadísticos en la tabla 5, se logra evidenciar que la parte química es fundamental conocer para lograr disminuir los efectos contaminantes, lo cual, respalda el procedimiento que se realizó dentro del experimento y eso permite la disminución de la contaminación; adicional a ello es esencial tener en cuenta que este tipo de experiencia se puede llevar a otras latitudes geográficas, que presenten características similares en donde se ha llevado a cabo el experimento; esto ayuda a que se establezca un equilibrio entre el ambiente y la producción agrícola, con la finalidad de llegar a la sostenibilidad, es decir, se logre producir con el mínimo de uso de productos químicos y empleando recursos naturales para contrarrestar la contaminación, lo cual, permite calidad en el producto y rentabilidad para los productores, pues al disminuir la carga de agroquímicos, se logra disminuir los costos; eso conlleva a que se implementen alternativas y herramientas con recursos naturales, que puedan contrarrestar la contaminación.

Tabla 5. Resumen estadístico de la información recolectada.

| | pH | Demanda química de oxígeno DQO (mg O ₂ /L) | Demanda bioquímica de oxígeno dbo5 (mg O ₂ /Lca) | Conductividad Eléctrica (MgCaCO ₃ /L) | Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L) | Cloruros | Dureza total (mgcaCO ₃ /l) | Nitritos (mg NO ₂ - -N/L) | Nitratos (NO ₃ - -N/L) | Nitrógeno total (mg N/L) | Fósforo total (mg P/L) |
|---|--------|---|---|--|---|----------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|
| pH | 1,000 | 0,724 | 0,690 | 0,451 | 0,509 | 0,744 | 0,323 | -0,124 | 0,130 | 0,241 | 0,514 |
| Demanda química de oxígeno DQO (mg O ₂ /L) | 0,724 | 1,000 | 0,991 | 0,573 | 0,644 | 0,686 | 0,606 | 0,131 | 0,436 | 0,377 | 0,806 |
| Demanda bioquímica de oxígeno dbo5 (mg O ₂ /Lca) | 0,690 | 0,991 | 1,000 | 0,563 | 0,646 | 0,651 | 0,602 | 0,148 | 0,467 | 0,442 | 0,837 |
| Conductividad Eléctrica (MgCaCO ₃ /L) | 0,451 | 0,573 | 0,563 | 1,000 | 0,889 | 0,783 | 0,886 | 0,184 | -0,024 | 0,222 | 0,473 |
| Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L) | 0,509 | 0,644 | 0,646 | 0,889 | 1,000 | 0,860 | 0,929 | 0,216 | 0,237 | 0,266 | 0,637 |
| Cloruros | 0,744 | 0,686 | 0,651 | 0,783 | 0,860 | 1,000 | 0,759 | 0,158 | 0,163 | 0,103 | 0,466 |
| Dureza total (mgcaCO ₃ /l) | 0,323 | 0,606 | 0,602 | 0,886 | 0,929 | 0,759 | 1,000 | 0,308 | 0,196 | 0,178 | 0,629 |
| Nitritos (mg NO ₂ - -N/L) | -0,124 | 0,131 | 0,148 | 0,184 | 0,216 | 0,158 | 0,308 | 1,000 | 0,026 | -0,097 | 0,108 |
| Nitratos (NO ₃ - -N/L) | 0,130 | 0,436 | 0,467 | -0,024 | 0,237 | 0,163 | 0,196 | 0,026 | 1,000 | 0,478 | 0,582 |
| Nitrógeno total (mg N/L) | 0,241 | 0,377 | 0,442 | 0,222 | 0,266 | 0,103 | 0,178 | -0,097 | 0,478 | 1,000 | 0,621 |
| Fósforo total (mg P/L) | 0,514 | 0,806 | 0,837 | 0,473 | 0,637 | 0,466 | 0,629 | 0,108 | 0,582 | 0,621 | 1,000 |

Ahora bien, es importante señalar que las variables analizadas en la tabla 5, que se analizaron estadísticamente, cada una de ellas tiene sus implicaciones en el proceso de fitorremediación; cuando se logra ver que se cruzan las variables y estas arrojan datos significativos en función del humedal que se debe implementar para la disminución de la contaminación y, por ende, para alcanzar la sostenibilidad entre producción y ambiente, lo que converge en lograr mejoras en los lugares dispuestos para la producción agrícola.

Para cerrar esta parte es conveniente señalar que para alcanzar la información antes descrita, se realizó un análisis estadístico de cada una de las variables previstas, como pH, oxígeno disuelto, metales pesados, conductividad, DBO, DQO y fósforo, lo que indica que se analizan en función de su impacto dentro del humedal que se adelantó para la disminución de la contaminación, lo cual, favorece a los productores, para que logren una armonía entre los componentes del ecosistema y los tipos de producción que se estén desarrollando.

CONCLUSIONES

La investigación experimental permitió evidenciar aspectos de relevancia para la fitoremediación. Los tratamientos fueron alimentados con agua residual, con un caudal de 0,75 litros por segundo, cada tres días. Con los resultados obtenidos, se pretende establecer un modelo de humedal para disminuir las concentraciones de los contaminantes en el agua, producto de la siembra de arroz convencional, aspecto donde convergen las variables pH, oxígeno disuelto, metales pesados, conductividad, DBO, DQO y fósforo, las cuales, se lograron tratar para establecer el modelo de humedal que se pretende implementar, ya que se puede convertir en una alternativa o herramienta que pueden tener los productores agrícolas, con la intención de disminuir los efectos contaminantes, lo que conlleva a que se establezca un equilibrio entre el ambiente y las producciones agrícolas generando, con ello, una estabilidad, promoviendo la sostenibilidad, entre el ambiente y la sociedad, lo que conduce a que las secuelas de la contaminación disminuyan notablemente y el ambiente se logre consolidar para seguir la producción, de una manera eficiente, en función del progreso y desarrollo de las comunidades rurales.

REFERENCIAS

1. ARIAS MARTÍNEZ, S.A.; BETANCUR TORO, F.M.; GÓMEZ ROJAS, G.; SALAZAR GIRALDO, J.P.; HERNÁNDEZ ÁNGEL, M.L. 2010. Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico (Colombia)*. 74:12-22. <https://doi.org/10.23850/22565035.5>
2. DELGADILLO-LÓPEZ, A.E.; GONZÁLEZ-RAMÍREZ, C.A.; PRIETO-GARCÍA, F.; VILLAGÓMEZ-IBARRA, J.R.; ACEVEDO-SANDOVAL, O. 2011. Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14(2):597-612.
3. DENIS, O. 2020. Otro año negro para el medio ambiente en Latinoamérica. *La Nación – Paraguay*. 12 de diciembre de 2020. Disponible desde Internet en: <https://www.lanacion.com.py/mundo/2020/12/25/el-2020-otro-ano-negro-para-el-medio-ambiente-en-latinoamerica/>
4. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA. 1988. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models. EPA. Washington, DC, USA.
5. LÓPEZ-MARTÍNEZ, S.; GALLEGOS-MARTÍNEZ, M.E.; PÉREZ FLORES, L.J.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M. 2005. Mecanismos de fitoremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 21(2):91-100.
6. MARRERO-COTO, J.; AMORES-SÁNCHEZ, I.; COTO-PÉREZ, O. 2012. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 46(3):52-61.
7. POMA LLANTOY, V.R.; VALDERRAMA NEGRÓN, A.C. 2014. Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitoremediación de cadmio (ii) y mercurio (ii) con la especie *Eichhornia Crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 80(3):164-173. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v80i3.224>
8. UNE NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA. 1983. UNE 77047:1983. Métodos de análisis de agua en vertidos industriales. Determinación de Fósforo. Método del ácido ascórbico.
9. UNE NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA. 1997. UNE-EN 1189:1997. Calidad del agua. Determinación del fósforo. Método espectrométrico con molibdato amónico.
10. UNE NORMALIZACIÓN ESPAÑOLA. 1998. UNE-EN 27888:1994. Calidad del agua. Determinación de la conductividad eléctrica. (ISO 7888:1985).
11. VELÁSQUEZ ARIAS, J.A. 2017. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitoremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 8(1):151-167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>