

Diseño y evaluación de un sistema de barreras reactivas permeables a escala piloto para la reducción de carga de nitrato en agua de escorrentía superficial agrícola

Design and Evaluation of a Pilot-Scale Permeable Reactive Barrier System for Nitrate Load Reduction in Agricultural Surface Runoff Water

Colber Antonio Somoza Sandino

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua). Laboratorio de Aguas Residuales. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

<http://orcid.org/0000-0002-1660-6598>

colbert.somoza@cira.unan.edu.ni

Jorge Carlos Cuadra Molina

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua). Laboratorio de Aguas Residuales. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

<http://orcid.org/0000-0003-0866-6221>

jorgecm_21@outlook.es

Recibido

01/03/2023

Aceptado

29/03/2023

RESUMEN

La necesidad de incrementar la seguridad alimentaria ha conllevado a la sobre aplicación de fertilizantes sintéticos. El nitrato es un fertilizante de gran movilidad en los suelos, por lo que, al entrar en contacto con un cuerpo de agua, este puede iniciar un proceso de eutrofización al enriquecerlo excesivamente; así como causar una enfermedad conocida como: metahemoglobinemia. El objetivo de la presente investigación fue diseñar y evaluar una barrera reactiva permeable para remover nitratos en agua de escorrentía superficial agrícola. Esta investigación tiene un alcance de tipo: piloto, a escala de laboratorio y aplicada dado que los resultados resolverán una problemática identificada, de corte exploratorio desde el punto de vista de la profundidad de la investigación, por abordar un campo nuevo en Nicaragua, para ello se construyeron dos barreras reactivas permeables con dimensiones de 1.0 metro de largo, 0,5 m de ancho y 0,5 m de profundidad, perfiladas en CIRA/UNAN-Managua. La primera se rellenó con suelo del sitio, la segunda con una mezcla de suelo más un sustrato (previamente seleccionado). El sistema se alimentó con una mezcla de 100 mg/l de nitratos provenientes de un fertilizante sintético comercial (FORMUNICA, NH_4NO_3). Como fuente de carbono se utilizó aserrín para el desarrollo de las bacterias desnitrificantes. Se tomaron muestras a la salida del sistema los días: 0, 7, 9, 12, 15 y 19, para posteriormente analizar los nitratos presentes. La eficiencia de remoción del sistema fue del 55% para lecho control y 66% para lecho desnitrificante. Es importante destacar los hallazgos relacionados al

PALABRAS CLAVE

Barreras reactivas permeables; desnitrificación; Nitratos; remoción de Nitratos.

funcionamiento de las Barreras desde el punto de vista físico en vista que esta tecnología viene a ser una alternativa de bajo costo, fácil construcción, mantenimiento y manejo, con resultados eficientes para la remoción de nitrato.

ABSTRACT

The need to increase food security has led to the over-application of synthetic fertilizers. Nitrate is a highly mobile fertilizer in soils, so when it comes into contact with a body of water, it can initiate a process of eutrophication by over-enriching it, as well as cause a disease known as methemoglobinemia. The objective of the present research was to design and evaluate a permeable reactive barrier to remove nitrates in agricultural surface runoff water. This research has a pilot type scope, at laboratory scale and applied since the results will solve an identified problem, of exploratory cut from the point of view of the depth of the research, because it deals with a new field in Nicaragua. For this purpose, two permeable reactive barriers were built with dimensions of 1.0-meter-long, 0.5 m wide and 0.5 m deep, profiled in CIRA/UNAN-Managua. The first was filled with soil from the site, the second with a mixture of soil plus a substrate (previously selected). The system was fed with a mixture of 100 mg/l of nitrates from a commercial synthetic fertilizer (FORMUNICA, NH_4NO_3). As a carbon source, sawdust was used for the development of denitrifying bacteria. Samples were taken at the outlet of the system on days 0, 7, 9, 12, 15 and 19, for subsequent analysis of the nitrates present. The removal efficiency of the system was 55% for the control bed and 66% for the denitrifying bed. It is important to highlight the findings related to the operation of the Barriers from the physical point of view, since this technology is a low-cost alternative, easy to build, maintain and manage, with efficient results for nitrate removal.

KEYWORDS

Permeable reactive barriers; denitrification; nitrates; removal of nitrates.

INTRODUCCIÓN

Las Barreras Permeables Reactivas (PRB – *Permeable Reactive Barrier*) son zonas de tratamientos “in situ” formadas por materiales reactivos que transforman o inmovilizan los contaminantes cuando el agua fluye a través de ellas, (EPA, 1998), Esta tecnología se ha aplicado a un amplio espectro de contaminantes demostrándose su eficacia tanto en la descontaminación de compuestos orgánicos (p.e. organoclorados) como inorgánicos (p.e. metales pesados, nitratos y fosfatos).

En España existen problemas de escasez hídrica que conllevan la aparición de grandes disputas territoriales, políticas y, sobre todo, sociales (MMA, 2000), en el ámbito científico-tecnológico han sido varias las soluciones propuestas, pero quizás una de las que está adquiriendo más importancia en los últimos años es la reutilización o regeneración de las aguas residuales. De esta manera, lo que inicialmente era un residuo es convertido en un nuevo recurso de gran valor (Hochstrat, Wintgens, Melin, & Jeffrey, 2005).

Con este punto de partida, la regeneración de aguas residuales mediante barreras permeables reactivas para la recarga de acuíferos es una de las líneas de investigación actualmente en desarrollo por el Instituto IMDEA Agua, la Universidad Rey Juan Carlos y la Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua.

Las barreras reactivas permeables (PRB) son tecnologías eficientes para la remediación in situ de aguas subterráneas contaminadas, cuya efectividad depende en gran medida de los medios reactivos que se llenen. La pirita natural es un material de sulfuro de hierro con un contenido muy bajo de hierro y azufre, y un desecho minero que es un material potencial para la inmovilización de Cr (VI).

En el estudio: **Cr (VI)-contaminated groundwater remediation with simulated permeable reactive barrier (PRB) filled with natural pyrite as reactive material: Environmental factors and effectiveness**, (Yuanyuan , Haiyan, Liqun, Zakaria, & Li, 2015) , se llevaron a cabo una serie de pruebas por lotes para investigar los efectos de los factores ambientales típicos en la eliminación de Cr (VI), simulamos en una PRB rellenos con pirita natural para investigar su eficacia, con el fin de encontrar un método adecuado desde el punto de vista ambiental y económico para remediación de aguas subterráneas.

Las pruebas de columna demostraron que la PRB simulada con pirita natural como medio reactivo fue considerablemente eficaz para eliminar el Cr (VI) de las aguas subterráneas, con una capacidad de sorción de 0,6222 mg de Cr por gramo de pirita natural a una concentración inicial de Cr (VI) de 10 mg /l a pH 5,5 en ambiente anóxico.

En el estudio: **Diagnóstico de la calidad del agua de consumo en las comunidades del sector rural 2007. León-Nicaragua**, en pozos excavados en comunidades al noreste de León, mostraron resultados que indica que el 4.3% de los pozos muestreados tienen concentraciones de nitratos mayores a los valores máximos permisibles establecidos por las (Normas CAPRE, 2020); lo que representa una amenaza a la población ya que estas son las principales fuentes de abastecimiento para su consumo y uso doméstico (Gonzales, Aguirre, Orozco, & Palacio, 2007).

Para el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó la agenda 2030, en la cual dicta el Objetivo de Desarrollo Sostenible No. 6 "Agua limpia y Saneamiento" donde se establece que la principal meta es garantizar el acceso universal al agua y asequible en el año 2030. (Naciones Unidas, 2015)

Con relación a la búsqueda de soluciones al ODS número 6, sumado a las diversas problemáticas ambientales que están intrínsecamente relacionadas al uso, disponibilidad y calidad del recurso agua, se recomienda la siguiente propuesta de investigación: Diseño y Evaluación de un Sistema de Barreras Reactivas Permeables, como una tecnología nueva en Nicaragua.

Para ello es necesario diseñar y evaluar un sistema de tratamiento para las aguas de escorrentía superficial agrícola que son arrastradas de forma natural por las lluvias y que pueden llegar a contaminar un cuerpo de agua o infiltrarse mediante procesos naturales.

Una evaluación positiva de esta tecnología es demostrar que sea una alternativa económicamente viable, ecológicamente sostenible y eficiente, cabe destacar que dichos esfuerzos representarían los primeros resultados que se llevan a cabo en Nicaragua poniendo en práctica esta alternativa de tratamiento para aguas de escorrentía superficial agrícola.

La hipótesis que se definió para la realización de esta investigación fue:

$H_0 = \mu = 100$ mg/l concentración de nitratos en el afluente del sistema de barreras reactivas permeables

$H_1 = \mu \neq 100$ mg/l concentración de nitratos en el afluente del sistema de barreras reactivas permeables

Al realizarse la prueba de hipótesis estadística con un nivel de significancia del 0,05 en el Software SPSS Statistic versión 23, se obtuvo la tabla 1.

Gracias al análisis que se llevó a cabo con SPSS Statistic versión 23 se encontró que el valor de la significancia es $0.994 \geq 0.05$ por lo tanto se acepta la hipótesis nula, es decir que a un nivel de significación de 0.05 la concentración promedio de nitratos usada en el afluente del sistema de barrera reactiva permeable es de 100 mg/l de nitrato.

Tabla 1. Prueba T para la determinación de la concentración de nitratos.

Prueba T

Estadísticas para una muestra				
	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Concentración de Nitratos en el afluente del Sistema BRP	9	100.0239	8.73544	2.91181

Prueba para una muestra						
Valor de prueba = 100						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
					Inferior	Superior
Concentración de Nitratos en el afluente del Sistema BRP	.008	8	.994	.02389	-6.6908	6.7385

Nota: Programa utilizado SPSS Statistics versión 23.

Autor: Ing. Jorge Cuadra Molina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de Investigación

Esta investigación es de carácter cuantitativo con una metodología experimental en la que, se realizaron análisis de diferentes datos los cuales fueron interpretados utilizando el software estadístico SPSS Statistic versión 23.

Para el procedimiento de los datos clasificamos la investigación con un alcance de tipo: piloto a escala de laboratorio y aplicada, puesto que el tema que se quiso abordar a la fecha es poco estudiado en nuestro país, dicha investigación tuvo como objetivo: diseñar y evaluar un sistema de Barrera Reactiva Permeable para la remoción de nitratos en agua de escorrentía superficial agrícola, cabe señalar que para la evaluación del sistema se emulo un agua agrícola con una concentración de 100 mg/l de nitrato obtenida de un fertilizante ampliamente comercializado en Nicaragua (FORMUNICA, NH_4NO_3) (Rittman & Macarty, 2001).

Para la selección de las muestras se consideró de tipo no probabilística, tomando en cuenta lo que indica la metodología de (Sampieri, 2014) al tratarse de una investigación exploratoria, puesto a que la elección de los elementos no depende estrictamente de la probabilidad, las características de elección de los elementos va a estar ligada a las características de la investigación, en este caso la eficiencia de remoción de un sistema de barreras reactivas permeables a escala piloto para remoción de nitratos.

Recolección de Datos

Selección de Área de Construcción para las Barreras Reactivas Permeables

Para la instalación del sistema de simulación de agua de escorrentía superficial agrícola más las barreras reactivas permeables se eligió una de las áreas verdes del CIRA/UNAN-MANAGUA.

Criterios de Selección:

- Disponibilidad del sitio, fácil acceso a pie durante todo el año y acceso restringido a personal ajeno a la investigación.
- Posee una pendiente natural que facilitara el flujo representante de un Agua Agrícola que fue preparada en el laboratorio conteniendo una solución de 100 mg/l de nitrato.
- Dentro de las características del suelo se encuentra que es muy poco permeable, lo que impide la sorción del efluente a tratar, obligándolo a pasar a través de la barrera construida.

Figura 1. Lugar de emplazamiento seleccionado.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina, Lic. Josué Arana B.

Selección de Sustrato de Carbono

Una parte fundamental del mecanismo de remoción de las barreras, es el sustrato de carbono orgánico como donador de electrones para llevar a cabo el proceso de desnitrificación en los suelos.

Los sustratos que se utilizaron para este experimento, son de poco o ningún valor comercial como lo es el aserrín (residuos del proceso del serrado de la madera) y la pulpa de café previamente secado. Una vez que se realizó la preparación de cada uno de los sustratos, se procedió a realizar el lavado de ambos para posteriormente determinar su densidad y tomar en cuenta este dato para calcular el espacio que utilizarían dentro de la barrera.

Figura 2. Aserrín lavado.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina.

Figura 3. Residuos liquido del lavado de la pulpa de café.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina.

Realizado el lavado de la pulpa de café, se descartó utilizarla ya que el agua del lavado se tornó oscuro y viscosa alterando sus propiedades organolépticas.

Determinación de la Densidad del Aserrín

Utilizando una balanza analítica se pesó una probeta graduada de 1000 ml, este proceso de pesado de la probeta se realizó aproximadamente unas 20 veces para obtener un peso constante, con variaciones no mayores al 4%, así mismo se determinó el promedio y coeficiente de variación de las mediciones. Una vez que se obtuvo un peso constante, de la misma manera se procedió a pesar la misma probeta, pero con esta vez aforada con sustrato de carbono orgánico (aserrín) hasta obtener un peso constante, con variaciones no mayores al 4% y de igual manera se estimó el promedio y el coeficiente de variación.

Figura 4. Determinación de la densidad del aserrín.



Autores: Ing. Jorge Cuadra Molina.

Diseño y Simulación

Preparación de la Solución de Nitrato, para el Sistema de Simulación de Escorrentía Superficial Agrícola

Se pesó en una balanza analítica 8,5 gramos de nitrato de amonio, que posteriormente se disolvió en 66,54 L de agua de grifo, correspondiente al volumen del tanque de alimentación del sistema de simulación de escorrentía para las barreras.

La determinación de la concentración media de la muestra se efectuó por medio de la distribución T de Student en el programa SPSS Statistics. Estableciendo una concentración de nitratos en el afluente del sistema de cada una de las barreras de 100 mg/L.

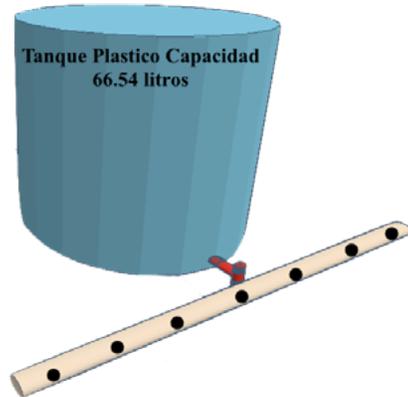
Diseño del Sistema de Simulación de Aguas de Escorrentías Superficial Agrícolas

Para poder llevar a cabo el proyecto de evaluación del sistema de barreras reactivas permeables, fue necesario identificar, analizar, conceptualizar para finalmente crear un sistema de simulación para aguas de escorrentía superficial agrícola.

El sistema de simulación para las barreras integro los siguientes elementos: un tanque plástico a cómo podemos ver en la figura 5, al cual por medio de la técnica de aforo volumétrico se le calculo el volumen determinando una capacidad de 66,54 litros, para la instalación de una llave de pase plástica se le realizó una pequeña abertura y posteriormente se instaló una tubería de PVC a la cual se le efectuaron pequeñas perforaciones de tal manera que las barreras estuvieran alimentadas por medio de un sistema de riego por goteo emulando

una escorrentía superficial agrícola que fluye en sentido horizontal a través de la pendiente natural que posee el sitio de instalación del sistema.

Figura 5. Diseño del Tanque de almacenamiento para simular una escorrentía superficial agrícola, dopada con una solución de 100 mg/l de nitratos.



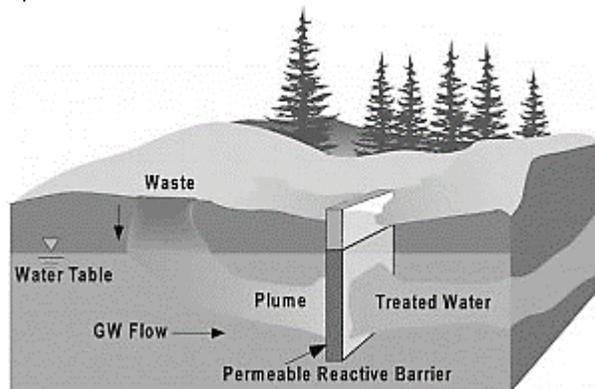
Autor: MSc. Colber Somoza Sandino

Diseño Final del Sistema de Simulación de Escorrentía más las Barreras Reactivas Permeables

Se elaboraron dos barreras, en el sitio previamente seleccionado con las siguientes dimensiones: 1.0 metro de largo, 0.5 metros de ancho y 0.5 metros de profundidad, para impermeabilizarlas y evitar pérdidas de agua por infiltración en el suelo se utilizaron sacos macen y plástico negro, además de impedir la contaminación cruzada por el contacto con el suelo o pluma contaminante.

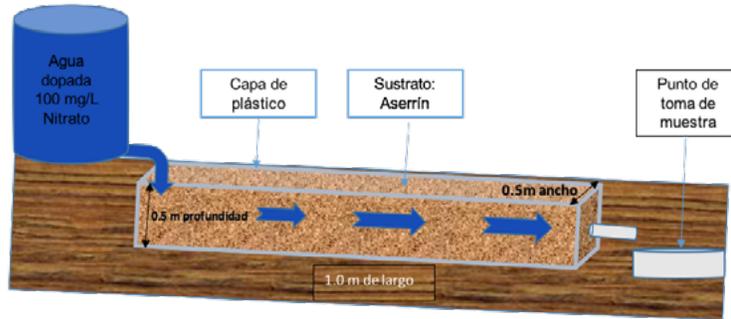
El diseño se inspiró en un esquema propuesto por EPA en 1998.

Figura 6. Esquema de una Barrera Permeable Reactiva. (EPA, 1998)



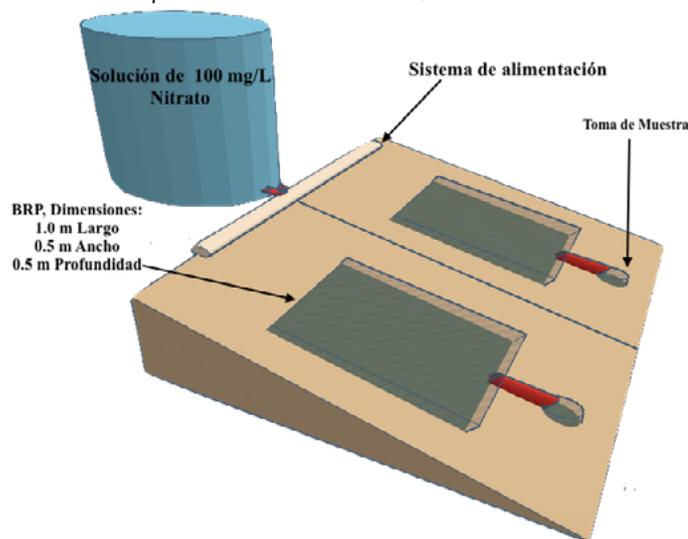
En la figura 6, podemos observar uno de los primeros modelos implementados y sugeridos por EPA para una BRP, sin embargo y de acuerdo a las limitantes económicas se optó por el diseño de la figura 7 y 8:

Figura 7. Vista Lateral, Barrera sub superficial en dirección horizontal.



Autores: MSc. Osnar Mondragón, Ing. Jorge Cuadra Molina.

Figura 8. Vista de planta BRP a Evaluar, CIRA/UNAN-Managua.



Autor: MSc. Colber Somoza Sandino.

Universo

Construcción del Sistema de Barreras Reactivas Permeables más el Sistema de Simulación de Escorrentía Superficial Agrícola.

Figura 9. Construcción de las dos barreras reactivas permeables.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina, Lic. Josué Arana B.

En la figura 9, podemos apreciar la construcción e impermeabilización con saco macen y plástico negro de las barreras. Una vez seleccionado el sustrato a utilizar, una de las barreras se relleno solo con suelo del sitio a modo de punto control y la otra con aserrín, posteriormente a este se le adiciono el sistema de simulación de agua de escorrentía superficial agrícola.

Figura 10. Vista lateral, Barrera reactiva permeable llena con aserrín.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina, Lic. Josué Arana B

Figura 11. Sistema de simulación de escorrentía superficial agrícola alimentando las dos barreras con una solución de 100 mg/l de nitrato.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina.

Figura 12. Vista frontal, sistema de simulación de escorrentía superficial agrícola alimentando las dos barreras con una solución de 100 mg/l de nitrato.



Autores: MSc. Colber Somoza Sandino, Ing. Jorge Cuadra Molina

Técnica de recolección de los datos

Monitoreo de las concentraciones de nitrato en las barreras

Una vez establecida la concentración de 100 mg/l de nitrato en el afluente del sistema se procedió con el monitoreo, este se realizó durante 19 días, iniciando el 30 de setiembre del 2020, las muestras se tomaron siguiendo los procedimientos establecidos para la toma de muestras y se procesaron en los laboratorios de CIRA-UNAN Managua.

Obteniendo los datos con los que se elaboró la tabla 2, en que podemos observar la disminución en la concentración de nitratos con respecto al tiempo, grafico 1.

Tabla 2. Monitoreo de las concentraciones de nitrato en las barreras.

Días de Alimentación de la Barrera	Concentración de Nitratos en el Afluente del Sistema	Barrera Control	Barrera Desnitrificante
7 días	100,02 mg/l de Nitratos	96,08 mg/l	95,48 mg/l
9 días		69,46 mg/l	63,72 mg/l
12 días		61,80 mg/l	55,50 mg/l
15 días		50,64 mg/l	46,14 mg/l
19 días		45,00 mg/l	33,68 mg/l

Nota: El día 0 la concentración fue de 100.02 mg/l de nitrato.

Cálculo de la Eficiencia de Remoción

La toma de los parámetros de campo más el monitoreo de las barreras se elaboró en el efluente del sistema con la finalidad de evaluar la eficiencia en cuanto a la reducción de la carga de nitratos suministrada a través del sistema

de simulación de escorrentía superficial de agua agrícola. Dicha eficiencia será medida o expresada como eficiencia de remoción.

Para el cálculo de la eficiencia de la remoción del sistema de barreras reactivas permeables se utilizó la ecuación 1.0

$$E = \frac{C_o - C_e}{C_o} * 100 \quad (\text{Ecuación 1.0})$$

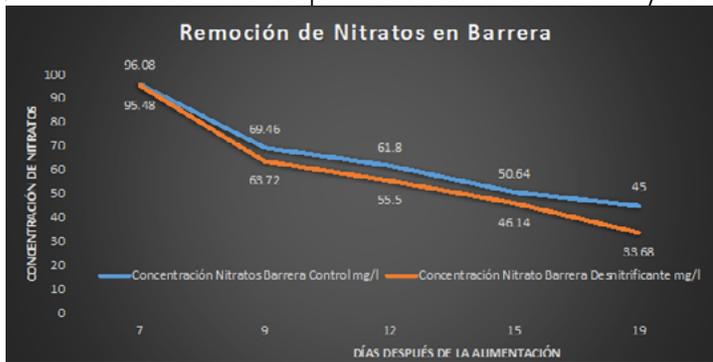
Donde:

E: Eficiencia de remoción del sistema (porcentaje de remoción)

Co: Carga de nitratos en la entrada del sistema (mg/l)

Ce: Carga de nitratos en la salida del sistema (mg/l)

Gráfico 1. Remoción de nitratos para las barreras control y desnitrificante.



Autor: Jorge Cuadra Molina.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentajes de Remoción para cada una de las Barreras

Eficiencia de la Barrera Control

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{100.02 - 45.00}{100.02} * 100 = 55 \%$$

$$\text{Eficiencia de remoción} = 55\%$$

Eficiencia de la Barrera Desnitrificante

$$\text{Eficiencia de remoción}; \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100$$

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{100.02 - 33.68}{100.02} * 100 = 66 \%$$

La eficiencia de remoción para la barrera desnitrificante fue de 66 % un porcentaje de remoción alto, siendo este un poco más de lo esperado, si se toma en cuenta que fue un proyecto experimental a escala piloto. Al correlacionar ambos datos, se obtuvo un mayor porcentaje de remoción con la barrera control en vista a que la materia orgánica externa juega un rol fundamental en los procesos de desnitrificación. (Bednarek, Szklarek, & Zalewski, 2014).

Al confrontar los resultados, tenemos que recordar que el diseño original de las barreras se centra en establecer condiciones anóxicas, para ello se utilizan perfiles profundos (Environmental Management Support, Inc., Silver Spring, MD.; Environmental Protection Agency, Washington, DC. Office of Solid Waste and Emergency Response., 1999), en los cuales se crean las condiciones propicias para que se den los procesos de desnitrificación, por lo que podemos decir que el 66.0 % obtenido podría aumentar siempre y cuando la profundidad de la barrera aumente, sin embargo el 55.0 % obtenido en la barrera control de mantenerse el perfil somero de 0.5 metros posiblemente disminuya por la inestabilidad inherente del nitrato y la alta presencia de oxígeno en el sistema lo que podría transformar el nitrato a nitrito y concluir el ciclo de desnitrificación.

Uno de los aspectos no resueltos durante la realización de esta investigación sería comprobar la existencia o no de la pluma contaminante por infiltración de nitrato en el sitio de construcción del sistema de simulación de la escorrentía superficial agrícola.

El nitrógeno puede moverse a través del medio poroso por algunos métodos. Estos métodos pueden operar independientemente o en conjunto. Los compuestos de nitrógeno pueden moverse a través del suelo como gases o como solutos en soluciones acuosas.

El nitrógeno en la materia orgánica insoluble o en forma mineral puede ser transportado a través del perfil del suelo por organismos (a través de excreción o transporte mecánico) o por suspensión de partículas en suelo y agua. La distancia, dirección y cantidad de nitrógeno transportados varía con el tiempo y con las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo.

En términos prácticos, los datos que se obtuvieron del porcentaje de eficiencia mediante la simulación del sistema por goteo que emula una escorrentía superficial agrícola identifica la utilización de las barreras reactivas permeables como una técnica de tratamiento de bajo costo y alto rendimiento; si es cierto que el ciclo del Nitrógeno, la presencia de nitratos y nitritos en el ambiente se da de manera natural; las actividades humanas modifican sus concentraciones y pueden hacer que estos compuestos sean potencialmente peligrosos para la salud humana y animal.

Los nitratos en el suelo y en las aguas subterráneas se originan de la descomposición natural por microorganismos de materiales nitrogenados orgánicos como las proteínas de las plantas, animales, excretas de humanos y de animales. Las

fuentes ambientales más importantes son el uso de fertilizantes nitrogenados, la disposición de excretas y la disposición de desechos municipales e industriales. Aunque el nitrito es un compuesto tóxico, el factor determinante en la incidencia de su toxicidad es la concentración de nitratos en el agua. El principal mecanismo de toxicidad de los nitritos es la oxidación del ion ferroso a ion férrico, lo que puede producir metahemoglobinemia, efectos cardiovasculares y efectos respiratorios.

El riesgo para la salud debido a los nitratos y nitritos está dado en función de la exposición, la existencia de condiciones favorables para la reducción de nitratos a nitritos y algunos factores inherentes al individuo, por lo que no se puede formular una relación dosis-respuesta con respecto a la presencia de nitratos en el agua. (ugr.es, 1999), por lo que se deben controlar las concentraciones de ambos.

CONCLUSIONES

Gracias a la implementación de este proyecto podemos decir que:

- Este estudio es el inicio para desarrollar distintas líneas de investigación, una de ellas puede ser la evaluación de la pluma contaminante de nitrato mediante la utilización del software MODFLOW-MT3D, con el siguiente objetivo; determinar la presencia de este fenómeno y así poder comprender los procesos de transporte por advección y dispersión, en regímenes subterráneos.
- Las BRP para el tratamiento de las aguas de escorrentía agrícola, han demostrado ser una tecnología idónea para su aplicación en las zonas productivas de nuestro país, esto favorecerá sustancialmente, la protección de los recursos hídricos y por consiguiente el bienestar de la población debido a la utilización de materia prima de bajo costo como lo son: el aserrín, sacos macen y plástico negro de igual manera conllevan fases relativamente factibles de construcción y operación, por todo lo antes expuesto este proceso de bioremediación, es una alternativa económicamente viable, ecológicamente sostenible y eficiente. si comparamos las concentraciones en el efluente del sistema de barreras reactivas permeables con las normas de calidad de agua de CAPRE, se obtienen valores por debajo de los límites máximos permisibles.
- El manejo de los residuos generados debido a la saturación del material de relleno (aserrín), por efecto del tiempo y el uso, pueden ser reutilizados en calidad de abono orgánico en los huertos comunales o familiares, sin ningún efecto adverso para la salud de la población o ambientalmente peligrosos como son por ejemplo los residuos generados en sistemas de tratamiento con uso de carbón activado.

Financiamiento: este trabajo fue financiado por el Fondo para Proyectos de Investigación (FPI) de la UNAN-Managua. Agradecimientos: A todos y todas l@s participantes y colaboradores en el estudio. A las autoridades de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, UNAN Managua y Autoridades del CIRA-UNAN/Managua, en especial al maestro Osnar Mondragón G.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bednarek, A., Szklarek, S., & Zalewski, M. (2014). Nitrogen pollution removal from areas of intensive farming. *Revista*, 1-10. Lodz, Banacha, Polonia.
- Diagnóstico de la calidad del agua de consumo en las comunidades del sector rural Gonzales, O., Aguirre, J., Orozco, G., & Palacio, K. (2007). Diagnóstico de la calidad del agua de consumo en las comunidades del sector rural. Nicaragua.
- Environmental Management Support, Inc., Silver Spring, MD.; Environmental Protection Agency, Washington, DC. Office of Solid Waste and Emergency Response. (1999). Field applications of in situ remediation technologies : permeable reactive barriers. Ada, Ok, U.S.A.
- EPA. (1998). Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation. *Informe EPA 600-R-98-125*. Washington, U.S.A.
- Hochstrat, R., Wintgens, T., Melin, T., & Jeffrey, P. (2005). *Wastewater reclamation and reuse in Europe: a model-based potential estimation*, Water Supply.
- MMA. (2000). Libro Blanco del agua en España. Madrid, España.
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Normas CAPRE. (2020). *Rasnic.org*. Obtenido de https://www.rasnic.org/wp-content/uploads/2020/09/CAPRE_Normas_Regional-1.pdf
- Rittman, B. E., & Macarty, P. L. (2001). *Biotecnología del Medio Ambiente*. (McGraw-Hill, Ed.) Madrid, España.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación*. D.F, Mexico: McGRAW-HILL.
- ugr.es. (1999). Nitrificación. Importancia Ambiental. España.
- Yuanyuan , L., Haiyan, M., Liqun, C., Zakaria, A., & Li, L. (2015). Cr(VI)-contaminated groundwater remediation with simulated permeable reactive barrier (PRB) filled with natural pyrite as reactive materi. *Environmental factors and effectiveness*, . Chongqing , RP. China.