



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ECOTEC
FACULTAD DE INGENIERIAS, ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA
NATURALEZA**

CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJO INVESTIGACIÓN

**INFLUENCIA DE BACTERIAS NITRIFICANTES EN AGUAS
CONTAMINADAS UTILIZADAS PARA RIEGO AGRÍCOLA EN
ECUADOR**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
GESTIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS**

**AUTOR
TAMAY NIVELÓ VIVIANA ROCIO
FLORES ALVARADO JORGE HUGO**

GUAYAQUIL – ECUADOR

2024



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ECOTEC
FACULTAD DE INGENIERIAS, ARQUITECTURA Y CIENCIAS
DE LA NATURALEZA**

CARRERA DE AGRONOMÍA

**INFLUENCIA DE BACTERIAS NITRIFICANTES EN AGUAS
CONTAMINADAS UTILIZADAS PARA RIEGO AGRÍCOLA EN
ECUADOR
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención del
título de
INGENIERO AGRÓNOMO/A

**AUTOR
TAMAY NIVELÓ VIVIANA ROCIO
FLORES ALVARADO JORGE HUGO**

**TUTOR
DR. CÉSAR ALCÁCER SANTOS**

GUAYAQUIL – ECUADOR

2024

ANEXO No. 10

**PROCESO DE TITULACIÓN
CERTIFICADO DEL PORCENTAJE DE COINCIDENCIAS
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Habiendo sido revisado el trabajo de titulación TITULADO: **Evaluación del Impacto de Bacterias Nitrificantes en Aguas Contaminadas Utilizadas para Riego Agrícola en Ecuador** elaborado por **JORGE HUGO FLORES ALVARADO y VIVIANA ROCIO TAMAY NIVelo** fue remitido al sistema de coincidencias en todo su contenido el mismo que presentó un porcentaje del **3%**, mismo que cumple con el valor aceptado para su presentación que es inferior o igual al 10% sobre el total de hojas del documento. Adicional se adjunta captura de pantalla de dicho resultado.



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

FLORES ALVARADO JORGE HUGO_TAMAY
NIVelo VIVIANA ROCÍO _TFC_19DIC2024

3%
Textos sospechosos

3% Similitudes
0% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
0% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: FLORES ALVARADO JORGE HUGO_TAMAY NIVelo VIVIANA ROCÍO _TFC_19DIC2024.pdf
ID del documento: d530c7ea11fa0924d92b672a0783d2a24fc70487
Tamaño del documento original: 1,7 MB
Autores: []

Depositante: CESAR ALCACER SANTOS
Fecha de depósito: 17/12/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 17/12/2024

Número de palabras: 14.405
Número de caracteres: 101.841

ATENTAMENTE,



Firmado electrónicamente por:
**CESAR ALCACER
SANTOS**

César Alcácer Santos, Ph.D.

18 de diciembre de 2024

ANEXO No. 12

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TUTOR PARA LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CON INCORPORACIÓN DE LAS OBSERVACIONES DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Samborondón, 18 de diciembre de 2024

Magíster

Érika Ascencio Jordán

Facultad de Ingenierías, Arquitectura y Ciencias de la Naturaleza

Universidad Tecnológica ECOTEC

De mis consideraciones:

Por medio de la presente comunico a usted que el trabajo de titulación TITULADO: **Evaluación del Impacto de Bacterias Nitrificantes en Aguas Contaminadas Utilizadas para Riego Agrícola en Ecuador**; fue revisado y se deja constancia que el estudiante acogió e incorporó todas las observaciones realizadas por los miembros del tribunal de sustentación por lo que se autoriza a: **FLORES ALVARADO JORGE HUGO** y **TAMAY NIVEL VIVIANA ROCIO**, para que proceda a la presentación del trabajo de titulación para la revisión de los miembros del tribunal de sustentación y posterior sustentación.

ATENTAMENTE,



Firmado electrónicamente por:
**CESAR ALCACER
SANTOS**

PhD. César Alcácer Santos

Tutor

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a todas las personas que de una u otra forma influyeron y contribuyeron con nosotros en nuestra formación profesional y personal ofreciéndonos todo su apoyo.

Agradecimiento

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos al Dr. César Alcácer tutor de esta tesis por su invaluable guía, paciencia y apoyo. Así mismo extendemos nuestros agradecimientos al Ing. Kelvin Sanoja, la Mgtr. Marianela Barona y a más docentes que nos brindaron su apoyo durante este proceso.

Finalmente expresamos nuestros agradecimientos a nuestros padres quienes han sido nuestro mayor pilar a lo largo de todo este camino, gracias por su amor y apoyo incondicional.

Resumen

La creciente contaminación de las aguas empleadas para el riego agrícola en el Ecuador representa una amenaza en la sostenibilidad y la seguridad alimentaria del país. Este problema se acentúa en las masas de agua de diferentes ríos y esteros de la ciudad como el estero salado de Guayaquil, donde los altos niveles de elementos como el fósforo y los nitratos generan riesgos de eutrofización. Para abordar esta problemática, se evaluó en laboratorio el impacto que poseen diferentes bacterias en la reducción de contaminantes de manera individual y combinada de 3 tipos: microorganismos eficientes (Embioecsa), Biocompost (Bacterias nitrificantes) y Biomasa activada (Bioservice); mediante diferentes análisis se elaboró un protocolo de aplicación dando como resultado una dosis óptima de aplicación de 1ml de bacterias nitrificantes por 1000 litros de agua. Los resultados mostraron una disminución significativa de nitratos pasando de 0,45 mg/L (solución madre) a alcanzar niveles de 0 mg/L evidenciando la eficacia del tratamiento en la mejora de la calidad del agua. Este estudio resaltó el potencial de las bacterias nitrificantes en los procesos de biorremediación.

Palabras claves: agua contaminada, biorremediación, eutrofización

Abstract

The increasing contamination of water used for agricultural irrigation in Ecuador represents a threat to the sustainability and food security of the country. This problem is accentuated in the water bodies of different rivers and estuaries of the city, such as the salty estuary of Guayaquil, where high levels of elements such as phosphorus and nitrates generate eutrophication risks. To address this problem, the impact of different bacteria in the reduction of pollutants was evaluated in the laboratory individually and in combination of 3 types: efficient microorganisms (Embioecsa), Biocompost (nitrifying bacteria) and activated Biomass (Bioservice); through different analyses, an application protocol was developed resulting in an optimal application dose of 1ml of nitrifying bacteria per 1000 liters of water. The results showed a significant decrease of nitrates from 0.45 mg/L (stock solution) to reach levels of 0 mg/L, evidencing the effectiveness of the treatment in improving water quality. This study highlighted the potential of nitrifying bacteria in bioremediation processes.

Keywords: polluted water, bioremediation, eutrophication

(página intencionalmente en blanco)

Tabla de Contenidos

Resumen	3
Abstract.....	4
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	1
Contexto general del estudio.....	1
Importancia local	2
Identificación del problema	4
Limitaciones del trabajo.....	5
Justificación y Objetivos	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	8
Bases teóricas	8
Estado del Arte	22
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.....	25
Introducción a la metodología utilizada	25
Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
Introducción a los resultados.....	31
Capítulo 5: CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de contaminantes y su impacto tóxico	3
Tabla 2 Microorganismos y el daño ocasionado.....	4
Tabla 3 Análisis de los contaminantes del agua.....	32
Tabla 4 Pruebas en agua y lodo	36

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 Regiones del mundo que suscitan preocupación (Zonas expuestas a la contaminación por plaguicidas)	8
Ilustración 2 Proceso de eutrofización.....	11
Ilustración 3 Ciclo del nitrógeno	12

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Contexto general del estudio

Hoy en día, el gran crecimiento de distintas actividades urbanas, agrícolas e industriales ocasionan un impacto negativo a gran escala en las masas de agua a nivel mundial y especialmente en el Ecuador. El uso del agua residuales en diferentes zonas agrícolas con la finalidad del riego para los cultivos representa riesgos para el suelo, la salud alimentaria y salud humana (Montiel et al., 2023). Diferentes nutrientes como fosfatos y nitratos presentes en el agua como consecuencia de las actividades agrícolas y el mal manejo de residuos inorgánicos y orgánicos fomentan el aumento de algas y eutrofización creando un impacto negativo en la biodiversidad del agua y la productividad de los suelos agrícolas (Zhou et al., 2024).

En base a este contexto, las bacterias nitrificantes (BN) aparecen como una excelente alternativa que promete disminuir las consecuencias ocasionadas por la contaminación del agua. Las BN poseen la capacidad de transformar compuestos como el amonio (NH_4^+) y nitrito (NO_2^-) en nitratos, este último puede ser utilizado por las plantas de forma más eficiente (Li et al., 2024). Estas bacterias además de mejorar la calidad del agua, ayudan a que exista un mayor y mejor aprovechamiento de la variedad de nutrientes que posee un suelo agrícola, disminuyendo la dependencia de insumos químicos (Tao et al., 2024).

La motivación principal de este estudio toma como punto de partida la necesidad de buscar y aplicar soluciones sostenibles para tratar aguas contaminadas, sobre todo aquellas aguas residuales que van dirigidas para ser usadas en la agricultura. Al existir un aumento de población, crece la demanda de alimentos y la utilización de recursos hídricos lo cual implica la búsqueda de nuevos métodos que sean efectivos para el mejoramiento de la calidad del agua evitando comprometer la salud ambiental y agrícola (B. Kaur et al., 2024).

El uso de bacterias nitrificantes propone un enfoque nuevo e innovador que se basa en una solución ecológica para ayudar con el mejoramiento de las aguas residuales promoviendo prácticas agrícolas sostenibles (Dhanker et al., 2023). El presente estudio busca explorar la viabilidad y efectividad que poseen dichas bacterias en aguas contaminadas del Ecuador, lo cual podría tener un impacto favorable para todos los seres vivos, ayudando así a la biodiversidad acuática, mejorando la calidad de los alimentos y beneficiando a pequeños y grandes agricultores del país.

Importancia local

El cuidado del agua dentro de la agricultura es importante para los ecuatorianos debido a que el país depende de la agricultura. Quinde, Bucaram, et al (2023) establecen que el 40% de la población en el Ecuador que conformaba áreas rurales, 2/3 de las familias están relacionadas con las actividades agrícolas que se encuentran en las mismas tierras que producen. Además, cerca del 25% de los ecuatorianos se enfocan en el sector agrícola y el 62% se concentra en trabajar en la agricultura.

Ecuador es un país en el cual una de sus mayores fuentes de trabajo es la agricultura especialmente en la zona de la Costa y de la Sierra donde existe una variedad de cultivos que dependen del agua para su riego (Hoogesteger et al., 2023). A pesar de todo esto, la calidad en las masas de agua ha ido empeorando con el pasar del tiempo, en los últimos años la carga de contaminación ocasionada por los desechos urbanos, industriales y agroquímicos han generado el deterioro del agua lo cual impacta negativamente sobre los cultivos que absorben esos tipos de agua mediante el riego (Oli et al., 2024).

La contaminación de las masas de agua afecta especialmente a las zonas periurbanas y rurales del país, en donde distintos agricultores deben de utilizar aguas contaminadas con compuestos de dudosas procedencias para el riego de sus cultivos (Christou et al., 2017). Esto no solo afecta a los suelos agrícolas, sino que también genera repercusiones en la salud de los

ecuatorianos al consumir productos que fueron regados con este tipo de agua. Es por ello, que el uso de las bacterias nitrificantes en las masas de agua ayuda a mejorar no solo la calidad del agua, sino que también la calidad de los alimentos que son destinados para el consumo humano (Baque-Mite, y otros, 2016). En la Tabla 1 presentada a continuación se muestran los distintos tipos de contaminantes que tiene un agua destinada para consumo humano dentro del Ecuador.

Tabla 1 Tipos de contaminantes y su impacto tóxico

Tipo de contaminante	Impacto
Elemento traza	Salud, biota acuática, toxicidad
Metales pesados	Salud, biota acuática, toxicidad
Metales enlazados orgánicamente	Transporte de metales
Radionúclidos	Toxicidad
Contaminantes inorgánicos	Toxicidad, biótica acuática
Asbesto	Salud humana
Nutrientes de algas	Eutrofización
Sustancias que dan acidez, alcalinidad, salinidad (en exceso)	Calidad del agua, vida acuática
Contaminantes orgánicos traza	Toxicidad
Medicamentos, anticonceptivos, etc.	Calidad del agua, vida acuática
Bifenilos policlorados	Posibles efectos biológicos
Plaguicidas	Toxicidad, biota acuática, fauna
Residuos de petróleo	Efectos en la fauna, contaminación visual
Alcantarillados, residuo humano y de animals	Calidad del agua, niveles de oxígeno
Material orgánico medida como demanda bioquímica de oxígeno	Calidad del agua, niveles de oxígeno
Patógenos	Efectos en la salud
Detergentes	Eutrofización, fauna, contaminación visual
Compuestos carcinógenos químicos	Incidencia de cáncer
Sedimentos	Calidad del agua, vida acuática, fauna
Sustancias que dan sabor, olor y color	Calidad del agua, vida acuática, contaminación visual

Fuente (Manahan, 2007)

Identificación del problema

El uso de aguas contaminadas empleadas para el riego agrícola en el Ecuador, en especial en áreas rurales y periurbanas, trae consigo una serie de aspectos negativos dentro de la producción de cultivos agrícolas y en la salud humana como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Microorganismos y el daño ocasionado

Microorganismo	Enfermedad
<i>Campylobacter spp.</i>	Síndrome de Guillain-Barré (trastorno neurológico autoinmune)
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniosis (fiebre, dolor abdominal y diarrea hasta hemorrágica)
<i>Helicobacter pylori</i>	Úlcera péptica, cáncer gástrico
<i>Enterobacter spp.</i>	Gastroenteritis aguda, infecciones hospitalarias, infecciones de las vías urinarias por heridas.
<i>Citrobacter spp.</i>	Abscesos, meningitis, bacteremia
<i>Klebsiella spp.</i>	Artritis reactiva
<i>E. coli O157:H7</i>	Síndrome urémico hemolítico.
<i>E. coli enterotoxigénica</i>	Diarrea del viajero
<i>E. coli enteropatógena</i>	Episodio diarreico, destrucción de las microvellosidades
<i>E. coli enteroinvasiva</i>	Diarrea disenteriforme, muerte celular
<i>E. coli enterohemorrágica</i>	Síndrome urémico hemolítico, insuficiencia renal aguda
<i>E. coli enteroagregativa</i>	Septicemia, meningitis neonatal, gastroenteritis
<i>Salmonella spp.</i>	Salmonelosis (fiebre tifoidea/paratifoidea)
<i>Shigella spp.</i>	Shigelosis (diarrea, fiebre, dolor abdominal, vómitos y náuseas)
<i>Vibrio Cholerae</i>	Cólera (enfermedad aguda diarreica)

Fuente: (Pullés, 2014)

El uso continuo de las aguas dentro del riego para los cultivos sin un debido tratamiento disminuye la productividad de los mismos e introduce riesgos dentro de la cadena alimentaria debido a que los contaminantes llegan a ser absorbidos por los cultivos que posteriormente son vendidos para el consumo humano (Munyai et al., 2024). Este ciclo de contaminación continua trae efectos a largo plazo en la salud de los ecosistemas y en particular en la economía de los pequeños agricultores quienes dependen del agua para sacar adelante sus plantaciones (Moghimi Dehkordi et al., 2024).

El problema tiene su centro de atención en la necesidad del mejoramiento de la calidad de las aguas que son utilizadas para riego agrícola en el Ecuador, sobre todo en aquellas áreas que se enfrentan a niveles altos de contaminación. La falta de soluciones accesibles en infraestructura y economía para tratar esas masas de agua hacen que la búsqueda y desarrollo de nuevas tecnologías como la aplicación de bacterias nitrificantes sean una alternativa viable para esta problemática (Guilcamaigua & Chancusig, 2019)

Limitaciones del trabajo

A pesar de que el uso de aguas contaminadas en riego agrícola representa un grave problema, esta situación aún no ha sido resuelta de forma eficiente (Anyango et al., 2024). En primer lugar, aquellas soluciones utilizadas de manera convencional para tratar dichas masas de agua llegan a tener costos muy elevados y sobre todo requieren de una buena infraestructura como por ejemplo plantas de tratamientos residuales que requieren de una gran inversión (Ellis et al., 2025). Las comunidades rurales y pequeños agricultores no pueden costear limitando el acceso a tecnologías avanzadas que podrían ayudar con la calidad del agua para riego.

Además de ello, la falta de capacitación y concientización por parte de los agricultores sobre los efectos que ocasionan el utilizar las aguas contaminadas dentro del ciclo de vida de un cultivo aporta a que el problema siga aumentando y no se busque una solución (Karimi & Ataei, 2023). Lamentablemente la mayoría de pequeños productores no poseen los conocimientos ni recursos necesarios para implementar prácticas que ayuden en la sostenibilidad del agua. Otro factor relevante es la falta de investigación local dentro del Ecuador acerca de las biotecnologías accesibles y económicas que favorezcan a la calidad de los cuerpos de agua como es el caso de las bacterias nitrificantes (Paladines, 2015). Todo esto, sumado con la falta de solidez en las políticas públicas y marcos regulatorios del Ecuador, contribuyen a que este problema siga siendo un desafío para la sociedad.

Justificación y Objetivos

El uso de aguas contaminadas empleadas para riego agrícola en Ecuador ha pasado a ser parte del conjunto de prácticas cotidianas en varias zonas rurales del país. Todo esto es producto de la falta de un agua libre de contaminantes para su uso en la agricultura. El ser humano no es consciente de que el uso de masas de aguas contaminadas ocasiona consecuencias negativas en la salud del consumidor y en la calidad de los distintos productos agrícolas (Asha et al., 2024). En este contexto, nace la necesidad buscar soluciones que ayuden a disminuir los distintos efectos nocivos que provocan la contaminación de las aguas empleadas para la agricultura.

Las bacterias nitrificantes representan la clave del éxito dentro del proceso de conversión de amonio a nitritos y nitratos (nitrificación), proceso que es esencial dentro del ciclo del nitrógeno y que además genera un impacto positivo y directo en la calidad del agua y mejora del suelo (X. Wang, Cao, et al., 2024). Las bacterias nitrificantes representan una alternativa biológica eficaz que ayuda en el mejoramiento de la calidad de las distintas aguas contaminadas, por ello, su uso para la agricultura favorece a la sostenibilidad de la producción y a la salud de los distintos ecosistemas agrícolas (Gómez-Lucena et al., 2024).

La importancia de la presente investigación radica en abordar un problema que al pasar de los años ha ido aumentando y ha generado gran relevancia dentro del país. Además de eso, aporta distintas soluciones basadas en el uso de microorganismos y los resultados que se obtienen ayudan a mejorar las diversas prácticas agrícolas en el Ecuador con beneficios para la productividad de los cultivos y especialmente para brindar mayor protección al medio ambiente. Además, esta investigación contribuirá al aumento de conocimiento acerca del uso de bacterias nitrificantes para tratar aguas contaminadas que representa un tema poco explorado dentro del país.

Pregunta de investigación

¿Cómo influyen las bacterias nitrificantes en la reducción de la contaminación y los olores en cuerpos de aguas contaminados?

Hipótesis

Las bacterias nitrificantes mejoran la calidad del agua utilizada para riego agrícola.

Objetivo general

Optimizar las aguas utilizadas en la agricultura del Ecuador a partir del uso de bacterias nitrificantes en masas de aguas contaminadas.

Objetivos específicos

- Analizar la composición y concentración de contaminantes presentes en el agua de riego.
- Evaluar la capacidad de las bacterias nitrificantes para degradar los contaminantes.
- Establecer un protocolo de biorremediación para las aguas de riego contaminadas en función de los resultados obtenidos.

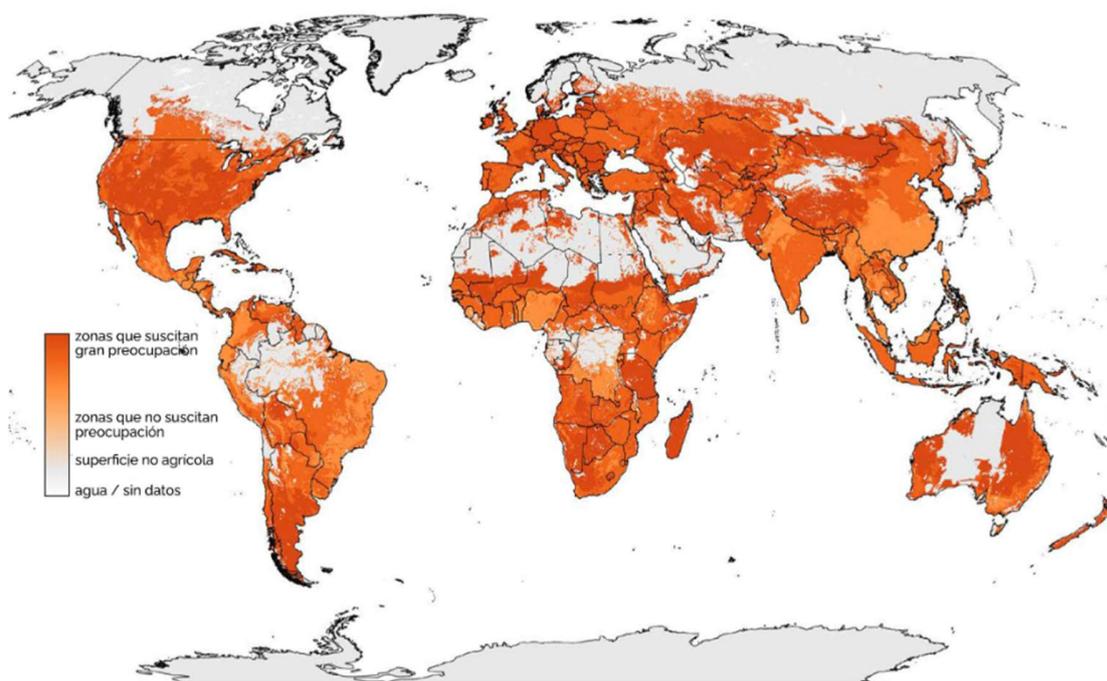
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Bases teóricas

Contaminación hídrica por prácticas agrícolas.

La agricultura es una fuente de contaminación muy grande a nivel mundial. Usar fertilizantes y pesticidas en niveles muy altos aporta al deterioro de la calidad de las masas de agua un ejemplo de todo esto se encuentra en la Ilustración 1. Todo esto afecta a la salud del ser humano y la biodiversidad acuática. Las aguas contaminadas llegan a contener nitrógeno y fósforo en niveles muy altos lo que promueve la eutrofización (Velázquez-Chávez et al., 2022a).

Ilustración 1 Regiones del mundo que suscitan preocupación (Zonas expuestas a la contaminación por plaguicidas)



Fuente: Tang et al. 2021.

Tipos de contaminantes

Dentro de las masas de agua agrícolas, los fertilizantes sintéticos ricos en fósforo y nitrógeno, además de herbicidas, pesticidas y residuos orgánicos forman parte de los principales contaminantes. A este grupo se le incluyen ciertos contaminantes industriales como metales pesados y productos resultantes de las farmacéuticas que pueden estar presente en aguas residuales para riego (Rad et al., 2022a).

Mecanismos de contaminación hídrica

Los mecanismos de contaminación hídrica que provienen de la agricultura, se encuentran relacionados con la movilidad de los contaminantes desde el suelo agrícola hasta llegar a las masas de agua, hay distintos mecanismos que afectan a la superficie del suelo y a las aguas.

La escorrentía es el mecanismo más común y se da cuando existe un exceso de agua de lluvia o un excedente de agua de riego y este fluye sobre los campos agrícolas arrastrando fertilizantes, pesticidas o residuos orgánicos que previamente han sido colocado en los cultivos para su nutrición (Rad et al., 2022b).

La lixiviación es un proceso en el cual se da la infiltración de agua por el suelo, lo que transporta nutrientes y contaminantes hacia lo más profundo del suelo y en varias ocasiones logra alcanzar las aguas subterráneas. Esto puede afectar negativamente a las fuentes de agua potable y a los ecosistemas (Hina, 2024a).

La volatilización y deposición atmosférica de ciertos pesticidas e insecticidas son otro factor que aporta a la contaminación hídrica, ciertos productos químicos son aplicados mediante aspersión lo que ocasiona que pequeñas partículas se transporten por medio del viento hacia áreas externas y lleguen a ciertas masas de agua lejanas afectando la calidad del aire y del agua (Rad et al., 2022c).

Eutrofización

La eutrofización es un proceso de contaminación el cual se da cuando las masas de agua reciben una carga excesiva de nutrientes entre los que se destacan el fósforo y el nitrógeno. En general,

estos nutrientes son producidos por la escorrentía agrícola fomentando un crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas. Esto se puede dar por un fenómeno natural o por causa de las actividades humanas en especial por la agricultura intensiva y el uso de aguas residuales sin tratamiento (Hina, 2024).

Fases del proceso de eutrofización

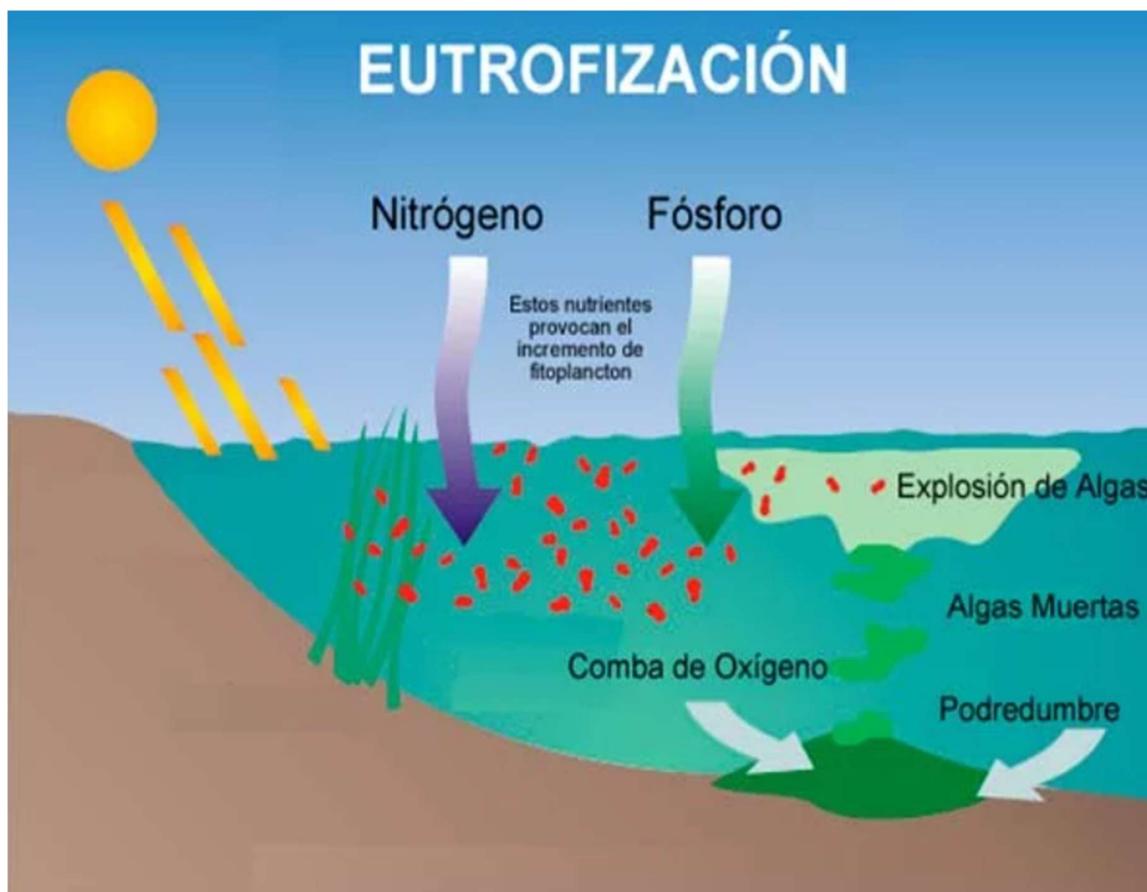
La eutrofización empieza por el enriquecimiento de nutrientes en donde el nitrógeno y el fósforo se acumulan en el agua por escorrentía o descargas de aguas contaminadas y todo esto actúa como un fertilizante y nutriente para las plantas acuáticas.

El crecimiento masivo de algas o también conocido como florecimiento algal se da como consecuencia del exceso de nutrientes hacia las algas y estas se proliferan rápidamente, esto puede ser tóxico y afectar a la fauna acuática ya que bloquea la luz necesaria para que otras plantas realicen la fotosíntesis (Lin et al., 2009).

Cuando las algas cumplieron su ciclo de vida y se descomponen, este proceso requiere de cantidades elevadas de oxígeno disuelto en el agua, lo que provoca la hipoxia (niveles bajos de oxígeno) Esto pone en riesgo la vida de los peces y otros organismos que necesitan oxígeno para sobrevivir (Choi et al., 2011).

Finalmente, la vida acuática disminuye a medida que bajan los niveles de oxígeno, en algunos casos los peces se trasladan a otras áreas. Todo esto crea zonas muertas donde la vida acuática es insostenible (Shin et al., 2011).

Ilustración 2 Proceso de eutrofización



Fuente: (Green Teach, sf)

Causas de la eutrofización

La eutrofización dentro de un ecosistema acuático se da principalmente por dos razones: la escorrentía agrícola y la descarga de aguas residuales. La primera se da principalmente por el uso excesivo de fertilizantes que contienen nitrógeno y fósforo, todos estos nutrientes son arrastrados por las lluvias y viajan hacia las masas de agua más cercanas (Velázquez-Chávez et al., 2022b). La descarga de aguas residuales por su parte es debido a la sobre carga de nutrientes en las masas de aguas debido a las zonas urbanas e industriales (P. Singh et al., 2022).

Tipos de eutrofización

Eutrofización natural, es un proceso lento que llega a tardar siglos o milenios en su desarrollo y este se da principalmente por factores climáticos o geológicos. La eutrofización antropogénica o también denominada cultural, se da por actividades humanas y se acelera de forma considerable por la descarga indiscriminada por parte de la industria (J. Li et al., 2023a).

Ciclo del nitrógeno

Ilustración 3 Ciclo del nitrógeno



Fuente: Autor

El ciclo del nitrógeno inicia por la fijación del nitrógeno en el cual distintos microorganismos fijan dicho elemento. Posterior a ello la materia orgánica que posee nitrógeno se descompone y pasa a convertirse en amoniaco o amonio (Widdison & Burt, 2008). En la nitrificación el amoniaco y amonio se transforman en nitritos y nitratos. Luego las plantas lo asimilan por las raíces ya sea

en el suelo o en el agua (X. Wang, Li, et al., 2024). Finalmente, el resto de nitrógeno que no llegó a las plantas u otros seres vivos son asimilados por bacterias desnitrificantes quienes descomponen nitritos y nitratos y los liberan como nitrógeno gaseoso (Fang et al., 2024).

Importancia del nitrógeno

El nitrógeno forma parte de los elementos esenciales para los seres vivo, debido a que es un componente clave de los aminoácidos que forman proteínas y de las bases nitrogenadas del ADN y ARN. El nitrógeno constituye cerca del 78% de la atmósfera, sin embargo, este se encuentra en su forma gaseosa, por ende, no es accesible para todos los organismos.

Impacto del ser humano en el ciclo del nitrógeno

Las actividades producto del ser humano alteran el ciclo del nitrógeno, la causa principal se debe al uso indiscriminado de fertilizantes, quema de combustibles fósiles y los desechos animales en grandes producciones.

Dentro de la agricultura, la forma en la que emplean los fertilizantes aumenta los nitratos que se encuentran disponibles en el suelo, lo que conlleva a una cantidad muy grande de nitratos presentes en muchos ecosistemas acuáticos.

Soluciones sostenibles

Para disminuir el impacto del ser humano sobre el ciclo del nitrógeno, se puede optar por soluciones sostenibles como la utilización de fertilizantes orgánicos, rotación de cultivos y siembra de plantas fijadoras de nitrógeno las cuales van a enriquecer el suelo sin la necesidad de utilizar fertilizantes químicos.

Bacterias nitrificantes

Las bacterias nitrificantes (BN) son bacterias termo dependientes, es decir, sus actividades y su crecimiento son influenciadas por la temperatura, por ejemplo: a medida que aumenta la temperatura, la bacteria denominada Nitrosomonas y Nitrobacter incrementan su tasa de crecimiento y a su vez optimizan el proceso de oxidación del amonio en nitritos y nitratos. Algunos

estudios han demostrado que una actividad de nitrificación eficiente se da entre los 15°C y 25°C (Németh et al., 2023).

Las BN componen un grupo importante de microorganismos dentro de los ecosistemas acuáticos y terrestres, además forman parte del ciclo del nitrógeno, el cual es uno de los más importantes para mantener la vida en el planeta (Kim et al., 2013a). Las BN son las encargadas de transformar el amonio y amoniaco en nitritos y posteriormente nitratos. Este proceso es esencial para mantener la fertilidad del suelo y mejorar la productividad dentro de un ecosistema (Kim et al., 2013b).

Clasificación de las bacterias nitrificantes

Las bacterias nitrificantes se clasifican en dos tipos dependiendo el proceso de nitrificación en el cual se encuentran, existen las bacterias que oxidan amonio a nitrito y las bacterias que transforman el nitrito en nitrato (Wijffels et al., 1996).

Bacterias oxidantes de amonio

Encargadas de la primera fase o etapa de la nitrificación en donde el amonio va a ser transformado en nitrito, las más conocidas forman parte de los géneros: Nitrosomonas y Nitrospira. Y utilizan el amonio como su fuente para adquirir energía (W. Zhang et al., 2023).

Bacterias oxidantes de nitrito

Encargadas de la segunda etapa de la nitrificación, en donde toman el nitrito y lo convierten en nitrato. Este proceso es esencial debido a que ayuda a evitar que el nitrito sea tóxico para las plantas y muchos organismos acuáticos (Wei et al., 2024).

Rol de las bacterias nitrificantes en el ciclo del nitrógeno

Las BN poseen un papel fundamental dentro del ciclo del nitrógeno, estas ayudan a transformar las diferentes formas de nitrógeno no asimilables para las plantas en nitrato el cual es un nutriente clave dentro de su crecimiento (LIU et al., 2021). Este proceso ayuda con la fertilidad del suelo y

conlleva a una mejora en la sostenibilidad agrícola, a pesar de ello, se debe gestionar más adecuadamente la aplicación de fertilizantes nitrogenados (G. Yang et al., 2024).

Beneficios de las bacterias nitrificantes

Las BN poseen una gran capacidad para mejorar la disponibilidad de nitrógeno en un suelo, al ser el nitrógeno un nutriente importante en el ciclo de vida de las plantas las BN pueden otorgar una ventaja considerable frente a otros medios (González-Camejo et al., 2022). Cuando las bacterias convierten el amonio en nitrato, mejoran la absorción del nitrógeno por parte de las plantas (Bankston et al., 2020).

Estas, a su vez mantienen un correcto equilibrio en los compuestos nitrogenados que posee el suelo lo cual es crucial para el ecosistema y la mejora de la productividad agrícola (Nishi et al., 2020). En aquellos suelos que poseen grandes cantidades de amonio, el proceso de nitrificación no permite que este compuesto se acumule en grandes cantidades y genere toxicidad para los organismos que se encuentran presentes (Yan et al., 2022).

Dentro de la purificación del agua, las BN desempeñan un papel fundamental ayudando en la eliminación de cantidades excesivas de amonio que en la mayoría de los casos provienen de fuentes de desechos industriales como las agrícolas, farmacéuticas e incluso de las zonas urbanas (Nguyen et al., 2022). Durante la nitrificación en el agua, las bacterias reducen los altos niveles de toxicidad contribuyendo a la restauración del equilibrio químico del agua.(M. Wang et al., 2020)

Beneficios en la agricultura

Al hablar de tratamiento de aguas residuales, las BN se emplean en distintos procesos biológicos para remover el nitrógeno antes de que estas sean reutilizadas (X. Li, Zheng, et al., 2024). Esto evita la contaminación de aguas de ríos, lagos o acuíferos y evitan los problemas de salud a largo plazo. Además de eso, las BN ayudan en la eficiencia de los distintos fertilizantes nitrogenados en el ámbito agrícola (Fatima et al., 2024).

Interacción de bacterias nitrificantes con aguas contaminadas

La interacción entre las bacterias y el agua contaminada favorece a la eliminación de compuesto nitrogenados, mejorando la calidad de agua dentro de un ecosistema contaminado (Kim et al., 2013c). Las bacterias como Nitrosomas o Nitrobacter, desempeñan un papel importante en la conversión de amoníaco en nitritos y nitratos dentro del proceso de nitrificación (Hansen & Cheong, 2013).

Beneficios de las bacterias nitrificantes en aguas contaminadas

Las BN ayudan a reducir la cantidad de amoníaco presente en un ecosistema acuático, provocando que sus altas concentraciones sean reducidas y de esta forma dejen de ser tóxicas para la vida acuática (Kim et al., 2013d). Al remover ciertos compuestos nitrogenados, las BN reducen la eutrofización, en el caso de plantas de tratamientos de aguas residuales se emplea la biorremediación para la eliminación de contaminantes, mejorando su calidad y de esa forma poder liberarla al medio ambiente (Lawson & Lücker, 2018).

Desafíos y limitaciones

A pesar de su eficacia, las bacterias nitrificantes no pueden eliminar distintos tipos de contaminantes que no sean compuestos nitrogenados como metales pesados o hidrocarburos quienes requieren de otro tipo de microorganismos para poder eliminarse.

Las condiciones ambientales también juegan un papel fundamental para las BN ya que estas son sensibles a los cambios del pH, el oxígeno disuelto e incluso la temperatura. En un ambiente muy contaminado o con condiciones complejas la eficiencia de estas bacterias puede disminuir debido a que existe una limitante para realizar su proceso de nitrificación.

Aplicaciones en Ecuador

En el país las bacterias nitrificantes son empleadas en su mayoría para tratar aguas residuales que provienen de áreas urbanas en donde la aplicación de este tratamiento es eficaz para reducir la carga de nutrientes y evitar contaminación de fuentes hídricas. A pesar de ello.

Muchas plantas de tratamiento necesitan mejorar su uso para que exista una eliminación eficiente.

Sostenibilidad de bacterias nitrificantes

El objetivo principal en la sostenibilidad de BN se basa en maximizar su efectividad al momento de remover el nitrógeno en un sistema agrícola o industrial, al mismo tiempo que disminuye el impacto ambiental. Además de ello, uno de sus enfoques consiste en la reducción de la huella energética durante su proceso. Los sistemas que emplean BN necesitan de un aporte significativo de oxígeno lo que implica altos costos de energía (Deng et al., 2021).

Simultaneidad en la nitrificación

Un análisis prometedor se centra en integrar procesos de nitrificación y desnitrificación dentro de un sistema permitiendo la eliminación simultánea de nitrógeno sin agregar reactores o infraestructura reduciendo de esta forma costos del proceso (Y. Zhang et al., 2024).

El agua

El agua es una molécula que está formada por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno que se encuentran unidos por enlaces covalentes. A pesar de parecer una molécula muy simple, es vital para la vida de todos los seres vivos. El agua es conocida por todo el mundo como el solvente universal por su gran capacidad para disolver una variedad de sustancias entre las que se encuentran las sales minerales, los compuestos orgánicos y los gases.

Características fisicoquímicas del agua que favorecen la eutrofización

El exceso de nutrientes en masas de agua es el factor principal para que se dé la eutrofización. La mayoría de esos nutrientes provienen del área agrícola y las descargas de aguas residuales lo que ayuda al crecimiento de las algas. En este proceso las moléculas de agua actúan como solventes para esos nutrientes y de esa forma ayudan a que haya disponibilidad de los mismos para las algas (Chakraborty, 2021).

El aumento de la temperatura es otro factor que incrementa la tasa de concentración de algas acelerando su crecimiento. Un agua calida disuelve menos oxígeno lo que favorece a la hipoxia y por ende una zona muerta. Las temperaturas altas disminuyen la capacidad de las masas de agua para que estas mantengan condiciones saludables de oxígeno disuelto lo que da como consecuencia un incremento en los procesos de eutrofización (Jeong et al., 2017).

El oxígeno disuelto ayuda a mantener el equilibrio dentro de las masas de agua. Sin embargo, el crecimiento de forma descontrolada de algas y su proceso de descomposición consumen cantidades de oxígeno muy altas y limitan la capacidad de supervivencia de todos los organismos acuáticos (R. Li, Xiao, et al., 2024).

El pH del agua también influye sobre la disponibilidad de distintos nutrientes, el ejemplo más común es el fósforo. Un pH elevado ayuda a liberar fósforo proveniente de los sedimentos que hay en el agua contribuyendo a una mayor disponibilidad de nutrientes para las algas. Un pH desequilibrado afecta a aquellos organismos que dependen de ciertos rangos de pH para su supervivencia (Silk et al., 2006).

Marco teórico conceptual

Nitrificación

La nitrificación es un proceso que implica la oxidación de diversas formas reducidas de nitrógeno, tanto orgánico como inorgánico, convirtiéndolas en amoníaco (Prosser, 2005). Este proceso juega un papel clave en el ciclo del nitrógeno, ya que actúa como un puente entre la descomposición de la materia orgánica, la liberación de amoníaco y la desnitrificación (Casciotti et al., 2011).

Biorremediación

La biorremediación, se deriva de “bio” – vida y “remediar” – resolver el problema (D. Kaur et al., 2020) Es un proceso de tratamiento que emplea microorganismos naturales, como

bacterias, hongos o levaduras, para descomponer sustancias peligrosas y transformarlas en compuestos no tóxicos para el medio ambiente (Arvanitoyannis & Kassaveti, 2008).

Metales pesados

Los metales pesados son elementos metálicos que poseen una densidad mayor a la de $5.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (Z. Zhang et al., 2024) Son considerados tóxicos y fácilmente acumulados dentro del ambiente, este incluye ciertas fuentes naturales como la erupción de un volcán, descomposición de rocas, mayor urbanización, crecimiento de industrias, etc (Pujari & Kapoor, 2021). La fuente principal de contaminación de metales pesados proviene de las actividades antropogénicas, el uso de fertilizantes, pesticidas y distintos productos de uso agrícola contribuyen un porcentaje muy significativo de aporte a la contaminación de metales pesados (Pandey & Tiwari, 2021). Los sedimentos fluviales transportan más del 90% de metales pesados hacia los océanos (Hu et al., 2024).

Contaminación hídrica

Al hablar de contaminación hídrica, se hace referencia a la inducción de distintos materiales o sustancias dentro de distintos cuerpos de agua, los cuales afectan la calidad del agua y su composición natural. La disponibilidad de agua potable y accesible para el ser humano representa un problema de importancia justicia ambiental (Kelly et al., 2024). Las distintas fuentes de contaminación de agua engloban desechos provenientes de industrias, de la agricultura, urbanos, plásticos, etc. que resultan ser tóxicos para todos aquellos organismos vivos que dependen de este recurso (Feng et al., 2024).

La contaminación hídrica puede darse por distintas fuentes, las más comunes son la contaminación puntual y contaminación difusa. La primera es ocasionada por una fuente que está identificada y localizada, por ejemplo, una planta de tratamiento (Xue et al., 2024). La contaminación difusa proviene de varias fuentes dispersas, es decir, no está exactamente

identificada, por ejemplo, el arrastre de distintos contaminantes químicos movidos por las lluvias (Ma, 2024).

Tipos de contaminantes

Contaminantes químicos: formados principalmente por metales pesados, productos químicos tóxicos y farmacéuticos (Onyeaka et al., 2024).

Contaminantes biológicos: Contiene principalmente microorganismos patógenos como bacterias o parásitos que llegan a ocasionar enfermedades que son transmitidas por el agua (Eyvazi et al., 2021).

Contaminantes físicos: Formado principalmente por los cambios en la turbidez o temperatura del agua, además de residuos de plásticos y desechos (Walworth & Pepper, 2019).

Eutrofización

Fenómeno que se relaciona con la contaminación del agua, consiste cuando hay una cantidad excesiva de nutrientes que mayormente vienen de fertilizantes agrícolas, provocando que haya un crecimiento excesivo de algas lo que conlleva a una reducción de los niveles de oxígeno en el agua abriendo paso a “zonas muertas” donde la mayoría de especies no pueden mantenerse con vida (de Jonge & Elliott, 2001).

Agricultura sostenible

El objetivo principal de la agricultura sostenible se basa en la salud ambiental, la equidad y rentabilidad, estas suelen ser llamadas también como “las tres patas del taburete de la sostenibilidad” (Jeranyama et al., 2020). La agricultura sostenible engloba los diferentes avances dentro de las prácticas y las tecnologías de las gestiones agrícolas, además del cambio a cerca de que la agricultura convencional ya no podrá abastecer las necesidades la población mundial que poco a poco va en aumento (J. S. Singh et al., 2011).

La agricultura sostenible trata de realizar la producción de alimentos de forma eficiente, manteniendo como objetivo principal el respeto hacia el medio ambiente (S. Wang & Yang, 2024).

Además, intenta satisfacer las necesidades de la población sin afectar a las futuras generaciones para proporcionarles un menor impacto ambiental y agotamiento de recursos naturales (Z. Yang & Solangi, 2024).

Existen diferentes principios que se destacan dentro de la agricultura sostenible, entre ellos se encuentra la conserva de los recursos naturales, disminución de la utilización de agroquímicos, diversidad de cultivos, uso consciente del agua, disminución de la huella de carbono, entre otros (Kumar et al., 2024).

Ecotoxicología

Es una disciplina que se encarga del estudio de los impactos tóxicos que provocan distintas sustancias químicas y contaminantes dentro de un ecosistema, además, analiza los efectos negativos de las sustancias en los organismos (Tarazona, 2024a). Esta ciencia tiene como objetivo la comprensión del impacto que generan los contaminantes en todos los organismos vivos (Daam, 2024).

La ecotoxicología examina como ingresan, se distribuyen y hacia donde se dirigen los contaminantes dentro del medio ambiente y que impacto genera en la salud del mismo (Tarazona, 2024b). Esta disciplina incluye el estudio de los distintos medios de dispersión como el agua, el suelo y el aire (Versonnen et al., 2024).

Biodegradación

Es un proceso mediante el cual distintos microorganismos descomponen sustancias consideradas complejas en compuestos que no son tóxicos y más simples (Hu et al., 2022). Este proceso es de vital importancia dentro de los ciclos biogeoquímicos puesto que ayuda con la descomposición de materia orgánica (Wu et al., 2012).

Tipos de biodegradación

Aeróbica

La biodegradación aeróbica se da con la presencia de oxígeno, durante este proceso, los microorganismos utilizan el oxígeno para poder degradar los compuestos orgánicos (Zaborowska et al., 2024). Es común encontrar este proceso en aguas, suelos superficiales y residuos sólidos que se encuentren en contacto con el aire (Gjini et al., 2024).

Anaeróbica

La biodegradación anaeróbica se da cuando no hay presencia de oxígeno, en donde los microorganismos empiezan a degradar diferentes compuestos orgánicos reemplazando el oxígeno otros compuestos como sulfatos y nitratos (J. Li, Usman, et al., 2024).

Marco teórico contextual

En el Ecuador, el clima varía dependiendo la región, en las zonas costeras se encuentran las principales masas de agua empleadas para riego con climas cálidos y húmedos y temperaturas que varían entre 25°C – 30°C. En época lluviosa, las precipitaciones tienden a ser intensas lo que aumenta la escorrentía agrícola (Chávez-Jiménez & González-Zeas, 2015).

En las zonas agrícolas ecuatorianas, los suelos comúnmente encontrados son los suelos arcillosos y aluviales. Estos suelos que son muy fértiles y poseen buena capacidad de retención de agua y nutrientes, facilitando la acumulación de nitrógeno y fósforo los cuales aumentan la posibilidad de eutrofización en el ecosistema acuático (J. Li et al., 2023b).

En el Ecuador ya existen regulaciones sobre el uso de aguas residuales para el riego agrícola, sin embargo, aún existe poca gestión de las mismas en ciertas áreas rurales. Instituciones como Agrocalidad y Senagua son un punto clave para controlar la calidad del agua. Sus políticas buscan disminuir en su mayoría la entrada de contaminantes a las aguas.

Estado del Arte

El manejo a largo plazo del nitrógeno dentro de un sistema agrícola ha adquirido una mayor relevancia frente a los desafíos relacionados con su uso indiscriminado. Recientes investigaciones destacan la importancia que poseen los inhibidores biológicos en la nitrificación

como parte de una estrategia para mitigar la pérdida del nitrógeno reactivo y al mismo tiempo disminuir emisiones de gases de efecto invernadero (Bozal, González, & González, 2023).

Un estudio realizado en el Lago de Xochimilco evalúa la relación de las diferentes formas de nitrógeno con las BN, en donde demostraron que las altas concentraciones de amonio y pH elevados llevan a una toxicidad en el agua. Ese trabajo resaltó la importancia de la dinámica de nitrificación y desnitrificación en los ambientes acuáticos (Lozada, 2014).

Estos hallazgos son relevantes en la gestión de las masas de agua contaminados y complementan investigaciones sobre el uso de las BN en su papel de reducción de eutrofización.

El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura ha provocado salinización en los suelos y con ello la contaminación de las masas de agua, ante estos problemas, algunos investigadores destacan la importancia de la biorremediación mediante microorganismos como una solución sostenible a largo plazo, en donde técnicas basadas en las bacterias como *Pseudomonas* y *Bacillus* demostraron ser efectivas para reducir los nitratos y transformar los compuestos nitrogenados en sus formas menos tóxicas (García, Capera, Melendez, & Mayorquín, 2020).

El uso de las aguas contaminadas en la agricultura es un problema que aumenta día a día, varias investigaciones han analizados los efectos de distintos tipos de agua en la calidad del suelo y la comunidad microbiana. Un reciente artículo evaluó como la utilización de aguas subterráneas y residuales para riego afectó las propiedades biológicas y químicas del suelo en una zona de Senegal. Se encontraron resultados en los que a pesar de que había cambios dentro de la composición del agua, los niveles de nitrato, amonio y carbono orgánico en el suelo no hubo diferencias significativas entre dos tipos de riego. (Ndour et al., 2008).

Esta investigación es relevante dentro de esta investigación, puesto que aborda el impacto que posee el riego con aguas residuales. Sin embargo, a diferencia de este estudio realizado en suelos arenosos, la presente investigación busca analizar el efecto de las bacterias

nitrificantes en cuerpos de agua contaminados en Ecuador, un país que posee diferentes condiciones geográficas y limitantes agrícolas.

A nivel global, una de las mayores preocupaciones es el tratamiento de aguas residuales especialmente cuando estas aguas van destinadas para su reutilización en la agricultura. En respuesta al cambio climático y los desafíos que este presenta, el uso de tecnologías que se basan en soluciones naturales ha cobrado mayor relevancia para ser aplicado como un método amigable con el medio ambiente y accesible económicamente. Según un estudio realizado por (Mancuso et al., 2023) evaluaron la eficacia de los sistemas de humedales construidos y las lagunas para tratar aguas residuales de manera que cumplan con los estándares de calidad del agua necesarios para su reutilización en la agricultura. Este tipo de investigaciones buscan basarse en procesos biológicos y físicos que ocurren en los humedales y lagunas.

El estudio comparó dos tecnologías basadas en soluciones naturales (NBS, por sus siglas en inglés) en unas instalaciones en el norte de Italia en donde obtuvieron como resultados que ambos sistemas eliminan algunos contaminantes como el nitrógeno total. Estos resultados son relevantes para nuestra investigación en donde el uso de aguas residuales para la agricultura también enfrenta problemas relacionados con la presencia de contaminantes que afectan tanto la salud pública como la calidad de los cultivos.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

Introducción a la metodología utilizada

El presente estudio posee un enfoque cuantitativo experimental, debido a que se manipulan ciertas variables expuestas a condiciones controladas que sirve para analizar la incidencia de las bacterias nitrificantes en masas de agua contaminadas. El objetivo principal es determinar como la utilización de las BN puede contribuir a la mejora de la calidad de agua destinada para el riego agrícola en un contexto en donde la contaminación hídrica representa un desafío muy grande en el Ecuador.

Este trabajo posee un alcance exploratorio en donde se busca identificar el impacto de esas bacterias en un área geográfica poco estudiada. Al mismo tiempo, posee un alcance correlacional ya que se intenta establecer una relación entre dos componentes: la acción de las bacterias nitrificantes y la disminución de contaminantes en el agua.

El diseño de investigación es experimental y se apoya de pruebas de laboratorio realizadas con diferentes combinaciones de bacterias bajo condiciones controladas, además de que las muestras de aguas provienen de masas de agua contaminadas utilizando pruebas comparativas entre el antes y después de la aplicación de las bacterias.

Materiales y métodos del objetivo específico 1

El objetivo de esta parte del estudio consiste en analizar la composición y concentración de contaminantes presentes en el agua de riego. Para ello, se llevó a cabo una serie de análisis de resultados empleando muestras de agua provenientes de un estero dentro del Ecuador donde se ha identificado un alto grado de contaminación.

Recolección de muestras de agua

Las muestras fueron obtenidas de un estero de la ciudad de Guayaquil con cargas altas de contaminación, en donde se recolectaron un total de 61 muestras de agua, tomadas en diferentes puntos de la zona de estudio y en días diferentes, en donde se tomó en cuenta una

profundidad de 30cm aproximadamente para asegurar que las muestras reflejen el contenido de contaminantes en la capa superficial del agua.

Las muestras fueron recolectadas en vasos de precipitación de vidrio esterilizados y tapados de forma hermética y almacenados a una temperatura constante dentro de un laboratorio para evitar alteraciones en su composición antes de su análisis. Y se empleó un volumen de 100 ml por muestra.

Las muestras de agua del experimento se recolectaron por los autores de este documento junto con el apoyo y supervisión de un personal cualificado y se llevó a cabo en el laboratorio de la universidad Ecotec.

Equipos y materiales utilizados

- Vasos de precipitación esterilizados
- Termómetro de precisión
- Micropipetas
- Tacho de almacenamiento para muestras de agua
- Papel Parafilm
- Medidor multiparamétrico
- Espectrofotómetro UV-Vis (concentración de nitritos y nitratos)
- Kit de análisis de DBO y DQO
- Kit de análisis de sólidos disueltos totales
- Reactivos químicos

Procedimiento

Análisis de nitritos y nitratos

Para el análisis de la concentración de nitritos y nitratos de las debidas muestras se empleó un espectrofotómetro UV-Vis y se siguió un protocolo estándar denominado Environmental Protection Agency (EPA) para el debido análisis del agua (Hoyos, 2020).

Para ello, se filtraron las muestras empleando filtros de membrada de 0,45 μm para la eliminación de distintas partículas sólidas que no permitieran el análisis de las muestras. Además, se emplearon dos tipos de reactivos: ácido sulfosalicílico para los nitratos (Londoño, Londoño, & Barrera, 2016) y la reacción de Griess para los nitritos (Jo, 2023).

Las muestras fueron analizadas a longitudes de ondas específicas, en el caso de los nitratos fueron de 220 nm y para los nitritos 543 nm. De esta forma se obtuvieron las lecturas de absorbancia que luego se compararon con la curva de calibración para determinar las concentraciones (Villegas, 2019).

Determinación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

Para determinar el parámetro DBO se utilizó el método estándar de Winkler (Valencia, 2014). En donde se colocó un poco de la muestra en botellas de incubación y estas se incubaron durante 5 días con una temperatura constante de 20°C sin luz. La concentración inicial de oxígeno disuelto se determinó mediante titulación y se la midió por segunda vez después de 5 días y la diferencia entre ambas lecturas dio como resultado la DBO.

Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El parámetro de DQO se midió empleando el método de reflujo cerrado con dicromato de potasio (Lapara et al., 2000). En donde se mezclaron 10ml de la muestra con dicromato de potasio y se calentó por 2 horas. Para la medición se empleó un espectrofotómetro que ayuda a determinar la cantidad de oxígeno que se consume durante el proceso (Harris, 2004).

Medición de parámetros físico- químicos

La medición de otros parámetros adiciones fueron hechos directamente en el campo con la ayuda de un medidor multiparamétrico. En donde se midieron los siguientes puntos: pH para determinar la acidez o alcalinidad de las muestras, conductividad eléctrica para la concentración de sales disueltas y oxígeno disuelto para conocer cuanta cantidad de oxígeno había disponible en el agua (Ruth, 2015).

Análisis de Sólidos Disueltos (SDT) y Suspendidos Totales (SST)

Estos parámetros fueron determinados mediante filtración gravimétrica (Peñates, 2020). Para ello, las muestras filtradas para SDT pasaron por una evaporación y secado en un horno a una temperatura de 105°C para medir el peso de la cantidad de sólidos disueltos. En el caso de las muestras de SST, sus partículas retenidas en los filtros de membrana se pesaron después de ser secadas en el horno a una temperatura de 105°C

Protocolos de control de calidad

Para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos, las muestras fueron analizadas dos veces para verificar la consistencia de los resultados, además de que se emplearon ciertas soluciones patrón para calibrar el espectrofotómetro y se utilizó el medidor multiparamétrico antes de cada sesión de análisis.

Materiales y métodos del objetivo específico 2

El segundo objetivo específico consiste en evaluar la capacidad de las bacterias nitrificantes para degradar los contaminantes presentes en el agua de riego contaminada. Para ello se emplearon experimentos con distintas combinaciones y dosificaciones de bacterias nitrificantes, en donde se observaron cambios en parámetros importantes como el olor, turbidez y color del agua.

Para ello, se emplearon dos tipos de muestras: agua con sedimentos recolectadas de un estero con sedimentos visibles y muestras de agua con una concentración elevada de sólidos suspendidos y partículas orgánicas (lodos). Se procesaron 40 muestras de agua con sedimentos y 21 muestras de lodos, dando un total de 61 muestras, el volumen empleado para cada muestra fue de 100 ml.

Para este análisis se emplearon 3 tipos de bacterias que se encuentran disponibles de forma comercial, cada una de ella con diferentes concentraciones bacterianas, las marcas utilizadas fueron: Embioecsa (microorganismos eficientes), Biocompost (bacterias nitrificantes) y

BioService (biomasa activada). Además, se realizaron combinaciones de esos productos en distintas proporciones:

- Embioecsa: Biocompost (75:25 y 50:50)
- Embioecsa: BioService (75:25 y 50:50)

Las bacterias nitrificantes fueron dosificadas en distintos volúmenes para conocer su capacidad de degradar contaminantes, las dosificaciones probadas fueron las siguientes:

Agua con sedimentos:

- 5 µl, 10 µl, 20 µl, 50 µl, 100 µl, 500 µl, 1000 µl, 2000 µl por cada muestra.
- Combinaciones: Embioecsa - Biocompost y Embioecsa - BioService (75:25 y 50:50).

Lodos:

- 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, 30 ml por cada muestra.
- Embioecsa, Biocompost, BioService (por separado).
- Combinaciones Embioecsa: Biocompost y Embioecsa: BioService (75:25).

Para la preparación de las muestras de lodos y del agua se recogieron muestras en un recipiente grande y se las subdividió en vasos de precipitación esterilizados con 100 ml cada uno. Después de la aplicación de las bacterias las muestras se mantuvieron dentro de un laboratorio a una temperatura constante por 24 horas para observar los efectos en olor, color y turbidez.

En la evaluación de los parámetros la turbidez se la midió visualmente y con un turbidímetro portátil, antes y después del tratamiento bacteriano. El olor fue evaluado de forma sensorial por cinco observadores capacitados registrando la intensidad y tipo de olor en una escala cualitativa antes y después del tratamiento.

Y el color fue medido mediante un espectrofotómetro UV-Vis para determinar los cambios en la tonalidad y claridad del agua.

Materiales y métodos del objetivo específico 3

El tercer objetivo consistió en establecer un protocolo de biorremediación para las aguas de riego contaminadas en función de los resultados obtenidos. Este protocolo se enfocó en la reducción de los contaminantes presentes en las masas de agua a través de la aplicación de BN, con el fin de obtener un mejoramiento en la calidad del agua y que esta sirva para emplearla en el riego agrícola.

Para emplear la biorremediación se necesitaron de varias herramientas y materiales, además la aplicación deberá ser realizada mediante un sistema de riego asistido por una bomba de agua.

Materiales:

- Manguera 3-4 metros: distribución del agua con la solución bacteriana.
- Bomba de agua: Para la aplicación controlada de bacterias.
- Tanque de 1000 litros: Contenedor en donde se empleará la mezcla de bacterias y agua (puede variar dependiendo la cantidad a aplicar)
- Bacterias nitrificantes: Combinación de las bacterias nitrificantes y las bacterias de Embioecsa.
- Tubo de agitación: Herramienta que permitirá mezclar las bacterias con el agua para asegurar la homogeneidad de los mismos.
- Equipo de seguridad: Trajes de protección para el personal, incluye un par de botas y un traje impermeable.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción a los resultados

La investigación actual se centró en la evaluación de la calidad de agua de un estero para riego en áreas agrícolas contaminadas y la eficiencia de un tratamiento biológico de bacterias nitrificantes para reducir los niveles de contaminación. Los resultados que se obtuvieron se enfocaron en la caracterización de distintos contaminantes presentes en las muestras de agua, además de la capacidad que tienen las bacterias para degradar esos contaminantes y así mejorar la calidad del agua para que sea óptima para riego agrícola.

Resultados del objetivo específico 1

En la tabla 3 se presentan los resultados de la composición y concentración de los diferentes contaminantes que se encuentran presentes en las muestras de agua. Esos parámetros permiten comparar la calidad del agua antes y después de la aplicación de los distintos tratamientos biológicos los cuales incluyen las bacterias nitrificantes, Biocompost y las bacterias de Embioecsa. Todo esto, con el objetivo de determinar el impacto que tienen sobre los contaminantes críticos.

Para cada tratamiento se analizaron varios contaminantes: hidrocarburos totales de petróleo, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), amoníaco, fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl, sulfuro de hidrógeno, alcalinidad total, carbono orgánico total y salinidad. Estos parámetros son los más relevantes dentro de la calidad del agua y proporcionan una visión integral de la contaminación que existe en las masas de agua.

Tabla 3 Análisis de los contaminantes del agua

Dosis	HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO (mg/L)	OXIGENO DISUELTO (%)	NITRITOS (mg/L)	NITRATOS (mg/L)	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (mg/L)	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (mg/L)	AMONÍACO (mg/L)	FOSFORO TOTAL (mg/L)	NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL (mg/L)	SULFURO DE HIDRÓGENO (mg/L)	ALCALINIDAD TOTAL (mg/L)	CARBONO ORGÁNICO TOTAL (mg/L)	SALINIDAD (%)
Solución madre	17,35	67,309	0,008	0,45	387,90	195,84	26,18	37,64	102,03	3,34	365,51	82,57	0,62
Biocompost 5 ml	14,93	3,908	0,025	0	905,42	175,54	256,70	37,73	83,77	1,03	356,58	85,24	0,61
Embioecsa 5 ml	12,98	3,119	0,03	0,2	394,94	183,12	22,92	32,46	60,63	1,77	349,21	72,92	0,80
B. Nitrificantes 5 ml	11,41	1,3	0,005	0,63	409,23	211,08	28,14	56,64	119,86	1,42	361,63	130,56	0,75
Biocompost 10 ml	11,99	3,9	0,03	0,1	366,88	190,18	24,65	34,45	83,89	1,09	369,41	75,98	0,68
Embioecsa 10 ml	11,78	3,1	0,019	0,1	810,57	429,05	18,45	43,14	83,47	4,32	372,51	118,98	0,67
Bacterias Nitrificantes 10 ml	17,12	2	0,01	0,298	900,00	456,29	24,29	72,25	62,59	1,44	417,75	145,36	0,75
50/50 Bacterias Nitrificantes/Embioecsa 5 ml	19,69	2,45	0,014	0,41	520,33	247,12	22,25	54,09	65,77	2,00	391,09	134,21	0,75
50/50 Bacterias Nitrificantes/Embioecsa 10 ml	6,84	24,147	0,02	0	2873,68	1409,98	2,23	108,66	90,39	7,98	198,62	413,50	0,29
50/50 Biocompost/Embioecsa 5 ml	11,41	0,777	0,005	0,1	360,66	168,84	25,76	92,95	63,49	0,37	370,94	73,62	0,69
50/50 Biocompost/Embioecsa 10 ml	12,76	12,098	0,045	0	2444,45	1199,98	1,24	139,46	15,87	5,92	258,96	411,42	0,25
25/75 Bacterias Nitrificantes/Embioecsa 5 ml	12,41	2,1	0,045	6,02	590,86	296,76	24,43	41,61	110,92	1,23	378,09	93,10	0,70

25/75 Bacterias Nitrificantes/Embioecsa 10 ml	13,61	5,861	0,016	0,095	1679,17	783,25	1,24	70,15	30,69	9,66	287,38	276,87	0,26
25/75 Biocompost/Embioecsa 10 ml	13,835	3,93	0,03	0	2212,08	1044,73	2,57	142,39	438,22	5,82	307,10	309,33	0,24

La cantidad de hidrocarburos totales de petróleo presentes en todas las muestras de agua da como resultado una reducción de forma más efectiva con respecto a la concentración inicial de hidrocarburos. La solución madre que contiene 17.346 mg/L de HTP se utilizó como punto de referencia y después de la aplicación de todos los tratamientos biológicos dio como resultado una disminución en los niveles de hidrocarburos llegando a alcanzar 6.84 mg/L en la dosis de bacterias nitrificantes y embioecea.

A pesar de que la gran parte de tratamientos disminuyeron las concentraciones de HTP, los niveles alcanzados aún no son seguros ni recomendados para utilizar esas masas de agua como un sistema de riego agrícola. Según la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) los niveles aceptables de HTP para agua potable deben de ser de 0mg/L y para que esas aguas sean empleadas para riego agrícola deben de mantenerse por debajo de 0.1 mg/L para que no haya efectos negativos en los cultivos (Mayco, 2020).

El oxígeno disuelto (OD) ayuda como un indicador de la calidad de las masas de agua. En las muestras analizadas se observó que el tratamiento de bacterias nitrificantes (1.3%) presentó la concentración de OD más baja en comparación con la solución madre que es de 67.309%. Estos porcentajes sugieren que hay una alta actividad biológica por la cantidad de bacterias que se les aplicó en los distintos tratamientos. Las bacterias consumen oxígeno para llevar a cabo sus procesos metabólicos

Los nitritos representan un producto intermedio en el proceso de nitrificación, en altas concentraciones llegan a ser tóxicos para los organismos que se encuentran en el agua. En los resultados se muestra una notable disminución de nitritos con la mayoría de tratamientos. Esto demuestra que las bacterias si cumplen su función de transformar nitritos en nitratos de forma eficiente y reducen su presencia en el agua.

Los nitratos representan el producto final del proceso de nitrificación y no llegan a ser tan tóxicos para el ambiente acuático. En la tabla se muestra que el tratamiento con BN presentaron una mayor concentración (0,63 mg/L) esto confirma la efectividad de las bacterias al oxidar los nitritos. La DQO refleja que el tratamiento con biocompost es alto (905.42 mg/L) indicando que hay una carga orgánica considerable en esa muestra, sugiriendo que el tratamiento con biocompost posee sustancias oxidables en grandes cantidades y podría requerir tratamientos adicionales que ayuden a reducir la carga orgánica y mejoren la calidad del agua.

En las muestras que se trataron dieron como resultados que las bacterias nitrificantes presentan un valor elevado (211.081mg/L) con respecto a la DBO indicando que esas bacterias consumieron oxígeno de manera activa en el proceso de descomposición de compuestos orgánicos. Esto es importante debido a que una alta DBO puede llegar a reducir el oxígeno disponible para otros organismos acuáticos, por ende, se debe de monitorear esos niveles en sistemas de tratamiento biológico.

El amoníaco puede llegar a ser tóxico para la vida acuática en concentraciones elevadas, la concentración más alta se encontró en el tratamiento de biocompost (256.7mg/L) indicando que esa muestra tuvo más compuestos orgánicos que no pudo convertir.

El fósforo es esencial en un ecosistema, pero en exceso puede causar eutrofización. En el tratamiento con bacterias nitrificantes el nivel de fósforo encontrado fue alto (56.643 mg/L) Esto podría generar problemas ecológicos si no se lo controla.

El Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) en las muestras tratadas demuestra que aún hay varios compuestos nitrogenados que deben de ser tratados ya que el uso de microorganismos no es lo suficientemente fuerte para erradicarlo.

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) es tóxico y se llega a generar en ambientes sin oxígeno. El tratamiento con biocompost mostró los niveles más bajos de H_2S (1.03 mg/L) Por su parte las

bacterias nitrificantes lograron mantener niveles moderados indicando un ambiente poco probable para producir ese gas.

La alcalinidad total demuestra la capacidad que posee el agua para resistir a cambios en el pH. En las muestras analizadas los niveles de alcalinidad se mantuvieron estables entre los distintos tratamientos contribuyendo a un ambiente seguro.

El Carbono Orgánico Total (COT) mide la cantidad de materia orgánica que hay en el agua. El tratamiento de BN demostró un COT alto de (130.558 mg/L) sugiriendo una presencia relativamente considerable de compuestos orgánicos que las bacterias descompusieron activamente.

El parámetro de salinidad demuestra la cantidad de sales disponibles en el agua. El tratamiento con BN posee una salinidad ligeramente alta de 0.752% lo cual podría ser beneficiosos para la acción de los microorganismos que soportan ambientes con más sales.

Resultados del objetivo específico 2

Tabla 4 Pruebas en agua y lodo

Pruebas en agua				
Dosificación	Bacterias y/o combinación	Cambios observados		
		Turbidez	olor	color
Aguas con sedimentos				
5 µl	Embioecsa	No	No	No
	Biocompost	No	No	No
	BioService	No	No	No
10 µl	Embioecsa	No	No	No
	Biocompost	No	No	No
	BioService	No	No	No
20 µl	Embioecsa	No	No	No
	Biocompost	No	No	No
	BioService	No	No	No
50 µl	Embioecsa	No	No	No
	Biocompost	No	No	No
	BioService	No	No	No
100 µl	Embioecsa	No	No	No
	Biocompost	No	No	No

	BioService	No	No	No
500 µl	Embioecsa	No	No	No
	Biocompost	No	No	No
	BioService	No	Si	Si
1000 µl	Embioecsa	No	Si	Si
	Biocompost	No	Si	No
	BioService	Si	Si	Si
2000 µl	Embioecsa	No	Si	Si
	Biocompost	No	Si	No
	BioService	Si	Si	Si
100 µl	Embioecsa:	No	No	No
	Biocompost			
	75:25			
	Embioecsa:	No	No	No
	BioService			
	75:25			
	Embioecsa:	No	No	No
	Biocompost			
	50:50			
	Embioecsa:	Si	Si	Si
	BioService			
	50:50			
500 µl	Embioecsa:	No	No	No
	Biocompost			
	75:25			
	Embioecsa:	Si	Si	Si
	BioService			
	75:25			
	Embioecsa:	No	No	No
	Biocompost			
	50:50			
	Embioecsa:	Si	Si	Si
	BioService			
	50:50			
1000 µl	Embioecsa:	No	No	No
	Biocompost			
	75:25			
	Embioecsa:	Si	Si	Si
	BioService			
	75:25			
	Embioecsa:	No	Si	Si
	Biocompost			
	50:50			
	Embioecsa:	Si	Si	Si
	BioService			
	50:50			
2000 µl	Embioecsa:	Si	Si	Si
	Biocompost			

		75:25		75:25	
	Embioecsa: BioService 75:25	Si	Si	Si	
Lodos					
1 ml	Embioecsa	--	Si	--	
	Biocompost	--	Si	--	
	BioService	--	Si	--	
5 ml	Embioecsa	--	Si	--	
	Biocompost	--	Si	--	
	BioService	--	Si	--	
10 ml	Embioecsa	--	Si	--	
	Biocompost	--	Si	--	
	BioService	--	Si	--	
20 ml	Embioecsa	--	Si	--	
	Biocompost	--	Si	--	
	BioService	--	Si	--	
30 ml	Embioecsa	--	Si	--	
	Biocompost	--	Si	--	
	BioService	--	Si	--	
1 ml	Embioecsa: Biocompost 75:25	--	Si	--	
	Embioecsa: BioService 75:25	--	Si	--	
5 ml	Embioecsa: Biocompost 75:25	--	Si	--	
	Embioecsa: BioService 75:25	--	Si	--	
10 ml	Embioecsa: Biocompost 75:25	--	Si	--	
	Embioecsa: BioService 75:25	--	Si	--	

	Poco Cambio
	Buen Cambio
	Cambio Significativo
	Cambio No Positivo
	Sin Cambio

Para evaluar la capacidad de las bacterias nitrificantes para degradar los contaminantes se realizó una tabla en donde se llevó un control sensorial y visual con respecto a la turbidez, olor y color de las distintas muestras con respecto a las distintas dosificaciones de las bacterias. Las muestras de 5 µl a 100µl no demostraron ningún cambio con respecto a los parámetros evaluados, demostrando que esas dosis no son suficiente para combatir varios parámetros de la calidad del agua.

Las muestras que se realizaron a partir de la dosificación de 500 µl si mostraron cambios representativos con la aplicación de las diversas BN. Sin embargo, se debe de tener en cuenta que no todas las dosificaciones van a servir para ser aplicadas a gran escala. Esto debido a que a mayor cantidad de bacterias aumenta los valores económicos que se deben de utilizar para llevar a cabo el proceso de mejorar las masas de agua.

A nivel general las bacterias nitrificantes demostraron una buena capacidad para degradar contaminantes. Si esas dosis se las va a emplear para la biorremediación de grandes cantidades de aguas contaminadas la opción que genera un balance entre el beneficio y el precio de inversión es la dosificación de 1ml por litro de agua.

Resultados del objetivo específico 3

En base a los resultados obtenidos de los objetivos específicos anteriores, se demostró que la aplicación de bacterias nitrificantes es un tratamiento eficaz en la reducción de los niveles de contaminación en el agua. Se ha determinado que la combinación de bacterias nitrificantes con las bacterias de Embioecsa es eficiente para el mejoramiento en la calidad del agua, tomando en cuenta la relación costo – eficiencia, en donde se recomienda aplicar 1ml de la mezcla bacteriana por cada litro de agua contaminada.

Protocolo de biorremediación

1. Medidas de seguridad para el aplicador:

La persona que realizará la aplicación deberá usar un equipo de protección que incluya un traje resistente a salpicaduras y botas en caso de trabajar en lugares llenos de lodo, de esta forma se garantiza una manipulación eficiente del producto.

2. Preparación de las bacterias

- Se inicia llenando un tanque de 1000 litros con agua potable.
- Se pesan 100 gramos de la mezcla de bacterias y se la coloca en el tanque.
- Se emplea el tubo de agitación y se mezcla la solución hasta lograr homogeneizar el producto y permitir que las bacterias se distribuyan uniformemente dentro del agua.

3. Activación de bacterias

Se deja reposar la mezcla durante 1 hora para permitir que las bacterias se activen y puedan ejercer su efecto durante el proceso de biorremediación.

4. Aplicación de la solución

- Se enciende la bomba de agua y se inicia con la distribución uniforme de la solución bacteriana en la/las áreas contaminadas. La manguera debe utilizarse para cubrir el sitio a tratar.
- Se comiende la aplicación de las bacterias en las zonas con mayor cantidad de materia sólida (lodos) para que las bacterias se mantengan por más tiempo en el sitio.

5. Frecuencia de aplicación

- Durante los primeros 6 meses de tratamiento la aplicación debe de realizarse dos veces por semana para lograr la reducción efectiva de los contaminantes.
- Pasado el primer periodo de aplicación, se deberá reducir la frecuencia a una vez por semana como mantenimiento.

Este protocolo para biorremediación de aguas contaminadas establece una estrategia sistemática para la reducción en la carga de contaminantes, permitiendo emplear prácticas agrícolas más seguras y sostenibles minimizando el impacto ecológico en los cultivos y suelos irrigados.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El análisis desarrollado acerca de la influencia que poseen las bacterias nitrificantes en aguas contaminadas para riego agrícola en Ecuador ayuda a establecer un avance importante en base al uso más sostenible de los recursos hídricos que posee el país. La implementación de bacterias nitrificantes demostraron ser una herramienta eficaz y de calidad para combatir contaminantes como amoníaco, fósforo y otros compuestos tóxicos presentes en el agua.

Las bacterias nitrificantes contribuyeron en la mejora de la calidad del agua para su reutilización en los diferentes sistemas agrícolas que tiene el país, estas mejoras están relacionadas directamente con la sostenibilidad del sector agrícola debido a que promueve el uso responsable y renovable de las distintas masas de agua.

La implementación de un protocolo de biorremediación a seguir en algún otro estudio en base a los niveles óptimos de aplicación de las bacterias nitrificantes, ayudan a establecer una base técnica que pueda ser aplicable en zonas agrícolas contaminadas que enfrentan problemas similares en el agua. Esto implica la preservación de los ecosistemas acuáticos reduciendo su carga de nutrientes y evitando la eutrofización.

Para contribuir a esta problemática es necesario ampliar el estudio hacia un enfoque más grande en donde se evalúe la estabilidad a largo plazo de los diferentes tratamientos con microorganismos, teniendo en cuenta las condiciones climáticas y los cultivos a los cuales se va a aplicar el agua para riego. Además de ello, sería útil evaluar la combinación de bacterias nitrificantes con distintas prácticas de manejo del agua para de esta forma maximizar su eficiencia y desarrollo de protocolos enfocados a las necesidades específicas de cada ecosistema.

Este trabajo representa un paso importante hacia adelante con respecto al avance de las prácticas agrícolas sostenibles, contribuyendo a un ecosistema más sano y con menos

contaminantes químicos. Los resultados alcanzados son prometedores para poder desarrollar estrategias en base a la biorremediación en Ecuador y en otros países en donde se enfrentan día a día a una mala calidad de agua.

BIBLIOGRAFÍA

Anyango, G. W., Bhowmick, G. D., & Sahoo Bhattacharya, N. (2024). A critical review of irrigation water quality index and water quality management practices in micro-irrigation for efficient

policy making. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100304.

<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100304>

Arvanitoyannis, I. S., & Kassaveti, A. (2008). Olive Oil Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste. In *Waste Management for the Food Industries* (pp. 453–568).

Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012373654-3.50011-0>

Asha, J. F., Ahmed, S. F., Biswas, A., Bony, Z. F., Chowdhury, Md. R., & Sarker, B. C. (2024).

Impacts of long-term irrigation with coalmine effluent contaminated water on trace metal contamination of topsoil and potato tubers in Dinajpur area, Bangladesh. *Heliyon*, 10(2), e24100.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24100>

Bankston, E., Wang, Q., & Higgins, B. T. (2020). Algae support populations of heterotrophic, nitrifying, and phosphate-accumulating bacteria in the treatment of poultry litter anaerobic digestate. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125550.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125550>

Baque-Mite, R., Simba-Ochoa, L., González-Ozorio, B., Suatunce, P., DiazOcampo, E., & Cadme-Arevalo, L. (20 de septiembre de 2016). Calidad del agua destinada al consumo humano en un cantón de Ecuador. *Revista Ciencia Unemi*, 109-117. doi:2528-7737

Bozal, A., González, B., & González, C. (2023). Los inhibidores biológicos de la nitrificación y su importancia en la agricultura. *Fundación de Estudios rurales*, 139-144.

Casciotti, K. L., Buchwald, C., Santoro, A. E., & Frame, C. (2011). *Assessment of Nitrogen and Oxygen Isotopic Fractionation During Nitrification and Its Expression in the Marine*

Environment (pp. 253–280). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381294-0.00011-0>

- Chakraborty, S. K. (2021). Water: Its Properties, Distribution, and Significance. In *Riverine Ecology Volume 1* (pp. 23–55). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53897-2_2
- Chávez-Jiménez, A., & González-Zeas, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Ribagua*, 2(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- Choi, H. G., Moon, H. B., Choi, M., & Yu, J. (2011). Monitoring of organic contaminants in sediments from the Korean coast: Spatial distribution and temporal trends (2001–2007). *Marine Pollution Bulletin*, 62(6), 1352–1361. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.03.029>
- Christou, A., Karaolia, P., Hapeshi, E., Michael, C., & Fatta-Kassinos, D. (2017). Long-term wastewater irrigation of vegetables in real agricultural systems: Concentration of pharmaceuticals in soil, uptake and bioaccumulation in tomato fruits and human health risk assessment. *Water Research*, 109, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.033>
- Daam, M. A. (2024). Ecotoxicology. In *Encyclopedia of Biodiversity* (pp. 343–350). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00089-X>
- de Jonge, V. N., & Elliott, M. (2001). Eutrophication. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 306–323). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00047-3>
- Deng, M., Zhao, X., Senbati, Y., Song, K., & He, X. (2021). Nitrogen removal by heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas* sp. DM02: Removal performance, mechanism and immobilized application for real aquaculture wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 322, 124555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124555>
- Dhanker, R., Khatana, K., Verma, K., Singh, A., Heena, Kumar, R., & Mohamed, H. I. (2023). An integrated approach of algae-bacteria mediated treatment of industries generated wastewater:

Optimal recycling of water and safe way of resource recovery. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 54, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102936>

Ellis, A. C., Boyer, T. H., & Strathmann, T. J. (2025). Regeneration of conventional and emerging PFAS-selective anion exchange resins used to treat PFAS-contaminated waters. *Separation and Purification Technology*, 355, 129789. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129789>

Eyvazi, S., Baradaran, B., Mokhtarzadeh, A., & Guardia, M. de la. (2021). Recent advances on development of portable biosensors for monitoring of biological contaminants in foods. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.024>

Fang, C., Yang, Y., Zhang, S., He, Y., Pan, S., Zhou, L., Wang, J., & Yang, H. (2024). Unveiling the impact of microplastics with distinct polymer types and concentrations on tidal sediment microbiome and nitrogen cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 472, 134387.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134387>

Fatima, S., Abbas, S., Rebi, A., & Ying, Z. (2024). Sustainable forestry and environmental impacts: Assessing the economic, environmental, and social benefits of adopting sustainable agricultural practices. *Ecological Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.05.009>

Feng, Y., Cheng, J., & Deng, Y. (2024). Study on agricultural water resource utilization efficiency under the constraint of carbon emission and water pollution. *Environmental Research*, 253, 119142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119142>

García, L., Capera, A., Melendez, J., & Mayorquín, N. (Marzo de 2020). Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. 172-182.

- Gjini, L., Kuznetsova, A., Okpala, G., Foght, J. M., Ulrich, A., & Siddique, T. (2024). Aerobic biodegradation of cycloalkanes in non-aqueous extracted oil sands tailings. *Chemosphere*, *349*, 140900. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140900>
- Gómez-Lucena, I., Camacho Poyato, E., Martín García, I., Fahd Draissi, K., & Rodríguez-Díaz, J. A. (2024). NITRINET: A predictive model for nitrification in reclaimed water distribution in pressurised irrigation networks. *Agricultural Water Management*, *302*, 108982. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108982>
- González-Camejo, J., Aparicio, S., Pachés, M., Borrás, L., & Seco, A. (2022). Comprehensive assessment of the microalgae-nitrifying bacteria competition in microalgae-based wastewater treatment systems: Relevant factors, evaluation methods and control strategies. *Algal Research*, *61*, 102563. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102563>
- Guilcamaigua, D., & Chancusig, E. (2019). Evaluación de la calidad del agua de riego en tres agrosistemas: tradicional, orgánico y convencional. *Boletín Informativo Spondylus*, *57-84*. Obtenido de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6932/1/CON-PAP-Guilcamaigua-Chancusig-Evaluacion.pdf>
- Hansen, C. L., & Cheong, D. Y. (2013). Agricultural Waste Management in Food Processing. In *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (pp. 619–666). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00023-9>
- Harris, D. (2004). Determinación de materia orgánica. 1-4.
- Hina, N. S. (2024a). Global Meta-Analysis of Nitrate Leaching Vulnerability in Synthetic and Organic Fertilizers over the Past Four Decades. *Water*, *16*(3), 457. <https://doi.org/10.3390/w16030457>

- Hoogesteger, J., Bolding, A., Sanchis-Ibor, C., Veldwisch, G. J., Venot, J.-P., Vos, J., & Boelens, R. (2023). Communitarity in farmer managed irrigation systems: Insights from Spain, Ecuador, Cambodia and Mozambique. *Agricultural Systems*, 204, 103552.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103552>
- Hoyos, R. (2020). Validación de un método analítico para la determinación de nitritos y nitratos en agua potable, natural y residual por espectrometría uv-vis. *Universidad de Córdoba*, 1-80.
- Hu, C., Liu, M., Li, Y., Li, J., Che, X., & Wang, H. (2024). Sedimentation and transformation of heavy metals during the transport from the Yellow River estuary to the sea: Evidence from surface sediments of the Yellow River subaqueous delta. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116862. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116862>
- Hu, C., Zhang, Y., Zhou, Y., Liu, Z., & Feng, X. (2022). Unsymmetrical dimethylhydrazine and related compounds in the environment: Recent updates on pretreatment, analysis, and removal techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 432, 128708.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128708>
- Jeong, Y., Hermanowicz, S. W., & Park, C. (2017). Treatment of food waste recycling wastewater using anaerobic ceramic membrane bioreactor for biogas production in mainstream treatment process of domestic wastewater. *Water Research*, 123, 86–95.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.049>
- Jeranyama, P., Shrestha, A., & Neupane, N. (2020). Sustainable food systems. In *The Role of Ecosystem Services in Sustainable Food Systems* (pp. 1–16). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816436-5.00001-9>

- Jo, J. (2023). Rapid-Response Nitrite Probes: Intramolecular Griess Reaction for Nitrite Detection at Picogram Level. *Organic Process Research & Development*, 27(10), 1820–1826.
<https://doi.org/10.1021/acs.oprd.3c00145>
- Karimi, H., & Ataei, P. (2023). Perceived social risks and farmers' behavior in using urban wastewater in their farms. *Environmental and Sustainability Indicators*, 20, 100301.
<https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100301>
- Kaur, B., Choudhary, R., Sharma, G., & Brar, L. K. (2024). Sustainable and effective microorganisms method for wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100419.
<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100419>
- Kaur, D., Singh, A., Abhijit Kumar, & Gupta, S. (2020). Genetic engineering approaches and applicability for the bioremediation of metalloids. In *Plant Life Under Changing Environment* (pp. 207–235). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818204-8.00010-2>
- Kelly, B. C., Brewer, S. C., Medina, R. M., & Bakian, A. V. (2024). Racial and ethnic disparities in health risk from industrial surface water pollution in the United States, 2011–2021. *Health & Place*, 89, 103343. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2024.103343>
- Kim, J., Lim, J., & Lee, C. (2013a). Quantitative real-time PCR approaches for microbial community studies in wastewater treatment systems: Applications and considerations. *Biotechnology Advances*, 31(8), 1358–1373. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.05.010>
- Kumar, S., Rana, S. S., Abdelrahman, K., Uddin, M. G., Fnais, M. S., & Abioui, M. (2024). Impact of Conservation Agriculture and Weed Management on Carbon Footprint, Energy Efficiency, and Sustainability in Maize-Wheat Cropping Systems. *Energy*, 133131.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133131>

- LaPara, T. M., Alleman, J. E., & Pope, P. G. (2000). Miniaturized closed reflux, colorimetric method for the determination of chemical oxygen demand. *Waste Management*, *20*(4), 295–298. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(99\)00304-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00304-9)
- Lawson, C. E., & Lücker, S. (2018). Complete ammonia oxidation: an important control on nitrification in engineered ecosystems? *Current Opinion in Biotechnology*, *50*, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.01.015>
- Li, J., Liu, H., Pei, H., Liu, W., Yang, G., Xie, Y., Cao, S., Wang, J., Ma, L., & Zhang, H. (2024). Coupled processes involving ammonium inputs, microbial nitrification, and calcite dissolution control riverine nitrate pollution in the piedmont zone (Qingshui River, China). *Science of The Total Environment*, *931*, 172970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172970>
- Li, J., Usman, M., Arslan, M., & Gamal El-Din, M. (2024). Molecular and microbial insights towards anaerobic biodegradation of anionic polyacrylamide in oil sands tailings. *Water Research*, *258*, 121757. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121757>
- Li, J., Zheng, Z., Liu, G., Chen, N., Lei, S., Du, C., Xu, J., Li, Y., Zhang, R., & Huang, C. (2023a). Estimating Effects of Natural and Anthropogenic Activities on Trophic Level of Inland Water: Analysis of Poyang Lake Basin, China, with Landsat-8 Observations. *Remote Sensing*, *15*(6), 1618. <https://doi.org/10.3390/rs15061618>
- Li, R., Xiao, K., Zhao, G., Huang, X., Li, Z., Wu, H., Huang, X., Pan, Y., & Liang, L. (2024). Comprehensive Assessment of Eutrophication and the Mechanisms Driving Phytoplankton Blooms in Multifunctional Reservoirs. *Water*, *16*(12), 1752. <https://doi.org/10.3390/w16121752>
- Li, X., Zheng, G., Li, Z., & Fu, P. (2024). Formulation, performance and environmental/agricultural benefit analysis of biomass-based biodegradable mulch films: A review. *European Polymer Journal*, *203*, 112663. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112663>

- Lin, Q., Deng, Y., Li, G., Zhu, J., & Huang, X. (2009). Salt tolerance of *Capsicum annuum* with introduced total DNA from *Rhizophora apiculata*. *Ecological Engineering*, 35(4), 497–501. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.03.004>
- LIU, X., WANG, J., WU, L., ZHANG, L., & SI, Y. (2021). Impacts of silver nanoparticles on enzymatic activities, nitrifying bacteria, and nitrogen transformation in soil amended with ammonium and nitrate. *Pedosphere*, 31(6), 934–943. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60036-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60036-X)
- Londoño, E., Londoño, L., & Barrera, R. (Diciembre de 2016). Determinación analítica de nitratos en aguas usando el método de ion selectivo. *Revista Politécnica ISSN 1900-2351*, 73-82.
- Lozada, M. (Febrero de 2014). Evaluación del nitrógeno en sus diferentes formas y su relación con las bacterias nitrificantes en el lago de xochimilco. *Unam – Dirección General de Bibliotecas*, 1-99.
- Ma, W. (2024). Assessing nonpoint source pollution risk in watersheds using a water-functioning zone approach. *Environmental Research*, 259, 119547. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119547>
- Mancuso, G., Lavrnić, S., Canet-Martí, A., Zaheer, A., Avolio, F., Langergraber, G., & Toscano, A. (2023). Performance of lagoon and constructed wetland systems for tertiary wastewater treatment and potential of reclaimed water in agricultural irrigation. *Journal of Environmental Management*, 348, 119278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119278>
- Mayco, R. (2020). Influencia de los aceites automotrices residuales en la contaminación de suelos de los servicentros del distrito de el tambo. *Universidad Nacional Del Centro Del Perú*, 1-62.

- Moghim Dehkordi, M., Pournuroz Nodeh, Z., Soleimani Dehkordi, K., Salmanvandi, H., Rasouli Khorjestan, R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, *23*, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729>
- Montiel, M., Villalba-Briones, R., Berruz, J., Castillo, T., González-Narváez, M., Ruiz-Barzola, O., Tiscama-Checa, N., Paredes-Sánchez, A., & Morales, F. (2023). Assessment of spatio-temporal variation in microbial quality of groundwater for irrigation and drinking water: A case study in Santa Lucia canton, Ecuador. *Groundwater for Sustainable Development*, *23*, 101033. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101033>
- Munyai, R., Ogola, H. J. O., Wambui Kimani, V., & Modise, D. M. (2024). Unlocking water potential in drylands: Quicklime and fly ash enhance soil microbiome structure, ecological networks and function in acid mine drainage water-irrigated agriculture. *Heliyon*, *10*(6), e27985. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27985>
- Ndour, N. Y. B., Baudoin, E., Guissé, A., Seck, M., Khouma, M., & Brauman, A. (2008). Impact of irrigation water quality on soil nitrifying and total bacterial communities. *Biology and Fertility of Soils*, *44*(5), 797–803. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0285-3>
- Németh, A., Ainsworth, J., Ravishankar, H., Lens, P. N. L., & Heffernan, B. (2023). Temperature dependence of nitrification in a membrane-aerated biofilm reactor. *Frontiers in Microbiology*, *14*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1114647>
- Nguyen, T. M., Ha, P. T., Le, T. T. H., Phan, K. S., Le, T. N. C., Mai, T. T. T., & Hoang, P. H. (2022). Modification of expanded clay carrier for enhancing the immobilization and nitrogen removal capacity of nitrifying and denitrifying bacteria in the aquaculture system. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *134*(1), 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2022.04.006>

- Nishi, K., Akizuki, S., Toda, T., Matsuyama, T., & Ida, J. (2020). Development of light-shielding hydrogel for nitrifying bacteria to prevent photoinhibition under strong light irradiation. *Process Biochemistry*, *94*, 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.04.037>
- Oli, C. C., Offor, C. C., Ezeudu, E. C., & Muotanya, C. L. (2024). Exposure hazards of As in semi-urban rivers of Anambra, South-East Nigeria: Concentrations, source apportionments, health risks, and irrigation quality assessments. *HydroResearch*, *7*, 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.03.003>
- Onyeaka, H., Ghosh, S., Obileke, K., Miri, T., Odeyemi, O. A., Nwaiwu, O., & Tamasiga, P. (2024). Preventing chemical contaminants in food: Challenges and prospects for safe and sustainable food production. *Food Control*, *155*, 110040. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110040>
- Paladines, F. (2015). Uso de bacterias nitrificantes para el control de amonio y nitrito en cultivos intensivos de camarón. 1-9. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/56677/1/T-76827%20Paladines%20C%20c3%b3rdova.pdf>
- Pandey, N., & Tiwari, A. (2021). Human health risk assessment of heavy metals in different soils and sediments. In *Heavy Metals in the Environment* (pp. 143–163). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00008-0>
- Peñates, K. (2020). Validación del método gravimétrico para la determinación de sólidos disueltos (sdt) en aguas naturales y residuales, en el laboratorio de aguas de la universidad de córdoba. *Universidad de córdoba*, 1-55.
- Prosser, J. I. (2005). Nitrogen in soils | Nitrification. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 31–39). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00512-9>

- Pujari, M., & Kapoor, D. (2021). Heavy metals in the ecosystem: Sources and their effects. In *Heavy Metals in the Environment* (pp. 1–7). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821656-9.00001-8>
- Pullés, R. (2014). Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en cuba. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 25-36. doi:ISSN: 0253-5688
- Quinde, V., Bucaram, R., Márquez, M., & Salazar, M. (2023). Caracterización e importancia de laEl sector agrícola en la economía ecuatoriana. *Revista de Estudios Namibia*, 3028-3037. doi:2197-5523
- Rad, S. M., Ray, A. K., & Barghi, S. (2022a). Water Pollution and Agriculture Pesticide. *Clean Technologies*, 4(4), 1088–1102. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040066>
- Ruth, S. (2015). Estudio hidrológico de la calidad del agua de la cuenca media del río puyo ramal salome. *UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZONICA*, 1-79.
- Shin, D., Moon, H. S., Lin, C.-C., Barkay, T., & Nam, K. (2011). Use of reporter-gene based bacteria to quantify phenanthrene biodegradation and toxicity in soil. *Environmental Pollution*, 159(2), 509–514. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.017>
- Silk, W. K., Bambic, D. G., O'Dell, R. E., & Green, P. G. (2006). Seasonal and spatial patterns of metals at a restored copper mine site II. Copper in riparian soils and *Bromus carinatus* shoots. *Environmental Pollution*, 144(3), 783–789. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.02.018>
- Singh, J. S., Pandey, V. C., & Singh, D. P. (2011). Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3–4), 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
- Singh, P., Raj, A., & Yadav, B. (2022). *Impacts of Agriculture-Based Contaminants on Groundwater Quality* (pp. 249–261). https://doi.org/10.1007/978-3-031-13467-8_16

- Tao, R., Cui, M., Li, Y., Wang, J., He, W., Zhao, Y., Wenping, X., Shen, Y., Feng, Y., & White, J. C. (2024). Nanoscale Biochar for Fertilizer Quality Optimization in Waste Composting: Microbial Community Regulation. *Bioresource Technology*, *414*, 131571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131571>
- Tarazona, J. V. (2024a). Ecotoxicology. In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 13–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00258-X>
- Tarazona, J. V. (2024b). Ecotoxicology, terrestrial. In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 51–57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00259-1>
- Valencia, C. (18 de septiembre de 2014). Análisis de la relación del coeficiente de balasto y su incidencia en la estabilidad estructural de un edificio de 7 pisos de hormigón armado en la parroquia la matriz, cantón ambato, provincia tungurahua”. *Universidad Técnica De Ambato*, 1-360.
- Velázquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022a). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, *25*. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Versonnen, B. J., Sobanska, M., Cesnaitis, R., & Nyman, A.-M. (2024). Ecotoxicology, Aquatic. In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 19–22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00001-4>
- Villegas, G. (noviembre de 2019). Determinación de nitratos por espectrofotometría uvvisible en productos cárnicos. 1-32.
- Walworth, J., & Pepper, I. L. (2019). Physical Contaminants. In *Environmental and Pollution Science* (pp. 163–173). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00011-2>

- Wang, M., Zhang, S.-C., Tang, Q., Shi, L.-D., Tao, X.-M., & Tian, G.-M. (2020). Organic degrading bacteria and nitrifying bacteria stimulate the nutrient removal and biomass accumulation in microalgae-based system from piggery digestate. *Science of The Total Environment*, 707, 134442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134442>
- Wang, S., & Yang, L. (2024). Mineral resource extraction and resource sustainability: Policy initiatives for agriculture, economy, energy, and the environment. *Resources Policy*, 89, 104657. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104657>
- Wang, X., Cao, J., Sun, R., Liu, W., Qi, L., Song, P., & Yang, S. (2024). Improving dryland maize productivity and water efficiency with heterotrophic ammonia-oxidizing bacteria via nitrification and cytokinin activity. *The Crop Journal*, 12(3), 880–887. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2024.04.006>
- Wang, X., Li, J., Wang, D., Sun, C., Zhang, X., Zhao, J., Teng, J., & Wang, Q. (2024). Unveiling microplastic's role in nitrogen cycling: Metagenomic insights from estuarine sediment microcosms. *Environmental Pollution*, 359, 124591. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124591>
- Wei, Y., Chen, Y., Xia, W., Ye, M., & Li, Y.-Y. (2024). Dynamic pulse approach to enhancing mainstream Anammox process stability: Integrating sidestream support and tackling nitrite-oxidizing bacteria challenges. *Bioresource Technology*, 395, 130327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130327>
- Widdison, P. E., & Burt, T. P. (2008). Nitrogen Cycle. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 2526–2533). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00750-3>

- Wijffels, R. H., de Gooijer, C. D., Schepers, A. W., & Tramper, J. (1996). *Immobilized-Cell Growth: Diffusion Limitation in Expanding Micro-Colonies* (pp. 249–256).
[https://doi.org/10.1016/S0921-0423\(96\)80034-7](https://doi.org/10.1016/S0921-0423(96)80034-7)
- Wu, Y., Li, T., & Yang, L. (2012). Mechanisms of removing pollutants from aqueous solutions by microorganisms and their aggregates: A review. *Bioresource Technology*, *107*, 10–18.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.088>
- Xue, R., Huang, T., Wen, G., Li, K., Li, N., Huang, K., Ji, G., & Hou, Y. (2024). Dynamic analysis of non-point source pollution in the Sanhekou Reservoir watershed: Implications for sustainable water management. *Ecohydrology & Hydrobiology*.
<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.07.006>
- Yan, R., Wang, Y., Li, J., Wang, X., & Wang, Y. (2022). Determination of the lower limits of antibiotic biodegradation and the fate of antibiotic resistant genes in activated sludge: Both nitrifying bacteria and heterotrophic bacteria matter. *Journal of Hazardous Materials*, *425*, 127764. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127764>
- Yang, G., Chen, H., Zhang, G., Yang, G., Wang, X., & Hu, Y. (2024). Effect of nitrogen fertilizers on the starch and protein contents, and physicochemical characteristics of rice noodles. *Journal of Food Composition and Analysis*, *135*, 106565. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106565>
- Yang, Z., & Solangi, Y. A. (2024). Analyzing the relationship between natural resource management, environmental protection, and agricultural economics for sustainable development in China. *Journal of Cleaner Production*, *450*, 141862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141862>
- Zaborowska, M., Bernat, K., Pszczołkowski, B., Cydzik-Kwiatkowska, A., Kulikowska, D., & Wojnowska-Baryła, I. (2024). Timeframe of aerobic biodegradation of bioplastics differs under

standard conditions and conditions simulating technological composting with biowaste. *Journal of Environmental Management*, 369, 122399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122399>

Zhang, W., Wu, H., Ping, Q., Wen, R., & Jin, Y. (2023). Application of positively charged red mud-based carriers for anaerobic ammonium oxidizing bacteria biofilm formation. *Environmental Pollution*, 338, 122692. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122692>

Zhang, Y., Yin, Z., Liu, M., & Liu, C. (2024). Enhancing simultaneous nitrification and denitrification in a plant-scale integrated fixed-film activated sludge system: Focusing on the cooperation between activated sludge and biofilm. *Chemical Engineering Journal*, 496, 154322. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154322>

Zhang, Z., Wu, H., Zhang, A., Tan, M., Yan, S., & Jiang, D. (2024). Transfer of heavy metals along the food chain: A review on the pest control performance of insect natural enemies under heavy metal stress. *Journal of Hazardous Materials*, 478, 135587. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135587>

Zhou, J., Mogollón, J. M., van Bodegom, P. M., Beusen, A. H. W., & Scherer, L. (2024). Global regionalized characterization factors for phosphorus and nitrogen impacts on freshwater fish biodiversity. *Science of The Total Environment*, 912, 169108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169108>