UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA AMBIENTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:
ADN AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA PARA EL MONITOREO DE BIOINDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA

AUTOR:

Sarahì Salome Álvarez Villamarín

DOCENTE - TUTOR:

Marcos David Landivar .PhD

Puyo - Pastaza - Ecuador

2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	Conciso e informativo
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	Presenta información pertinente
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	19.0 / 20	Si cumple
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	14.0 / 15	Ordenado y articulado
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	14.0 / 15	Expone con claridad el procesamiento de la información

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	23.0 / 25	Entrega los resultados de manera organizada
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	9.0 / 10	De acuerdo
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	Si cumple
VALORACIÓN TOTAL	94	NOVENTA Y CUATRO

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	94

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
CHRISTOPHER OSWALDO PAREDES ULLOA

CHRISTOPHER OSWALDO PAREDES ULLOA (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 12 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

UEA
UNIVERSIDAD
ESTATAL AMAZÓNICA

FORMATO 4
APROBACIÓN DE LOS TRABAJOS DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

En el siguiente cuadro se detalla un conjunto de criterios a evaluar con un total de cien (100) puntos.

Criterios	Puntaje	Argumentos de la calificación
1. TÍTULO		
El título es conciso e informativo de la idea principal del escrito. Genera expectativas de lectura que se cumplen.	5.0 / 5	CUMPLE
2. RESUMEN		
Entrega información necesaria que oriente al lector a identificar de que se trata la investigación y su relevancia. Incorpora los objetivos, metodología, principales harrazgos y conclusiones.	5.0 / 5	CUMPLE
3. INTRODUCCIÓN		
Entrega información sobre temática a tratar. Describe la relevancia del tema dentro de las temáticas de investigación, vinculación y docencia. Presentación del problema y objetivos del problema del artículo de manera clara y concisa.	20.0 / 20	CUMPLE
4. MARCO TEÓRICO		
Marco teórico coherente y articulado con los objetivos. Entrega conceptos de términos que son empleados en el estudio. Sustenta el referente conceptual con adecuadas fuentes de autoridad.	15.0 / 15	CUMPLE
5. METODOLOGÍA		
Describe el tipo de investigación a desarrollar. Expone con claridad el procesamiento de la información y obtención de los datos. Plantea los criterios de análisis con que se abordo la información.	15.0 / 15	CUMPLE

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		
Entrega los resultados de manera organizada a partir del problema planteado, objetivos específicos, etc. Los cuadros y figuras son pertinentes y estan claramente representados. El texto no repite infromación entregada en los cuadros y figuras.	20.0 / 25	PERSISTEN DIFICULTADES DE REDACCIÓN. DENTRO DE VENTAJAS SE CITAN LIMITACIONES. DOS EPÍGRAFES 3.3. FALTA DE CUIDADO EN REVISIÓN.
7. CONCLUSIONES		
Las conclusiones deben ser claras y precisas, acorde a los objetivos trazados. Discute, reflexiona sobre los resultados obtenidos.	10.0 / 10	CUMPLE
8. REFERENCIAS		
Atiende las normas APA en las citas, fuentes y referencias. Las referencias bibliográficas tienen la fuente en el texto y viceversa.	5.0 / 5	CUMPLE
VALORACIÓN TOTAL	95	NOVENTA Y CINCO

DICTAMEN

Marque la casilla correspondiente a su criterio de evaluación respecto al documento revisado.

Recomendación	Marque con X
Aprobar	X
No Aprobar	
CALIFICACIÓN	95

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
MARIA ADELA VALDES SAENZ

MARÍA ADELA VALDES SAENZ (PAR CIEGO)

Dado en la ciudad de PUYO, a los 13 días del mes de SEPTIEMBRE de 2023

Ouriginal by Turnitin

Firmado electrónicamente por:
MARCOS DAVID LANDIVAR VALVERDE

Document Information

Analyzed document	Sarahi Alvarez - David Landivar pdf.pdf (D173607396)
Submitted	9/8/2023 5:17:00 PM
Submitted by	
Submitter email	md.landivarv@uea.edu.ec
Similarity	0%
Analysis address	md.landivarv.uea@analysis.urkund.com

Sources included in the report

W URL: http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/13979/3/03%20RNR%20450%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf
Fetched: 9/8/2023 5:18:00 PM 3

Entire Document

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Trabajo de Integración Curricular
ADN ambiental como herramienta para el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua Autor 1 1 ss.alvarezv@uea.edu.ec Autor 2 1 md.landivar@uea.edu.ec Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería Ambiental (1) Resumen
El presente trabajo constituye una revisión del estado del arte sobre el uso del ADN ambiental, como herramienta para el monitoreo de bioindicadores en ecosistemas acuáticos. Para tal efecto, se ocupó como referencia la Declaración PRISMA, enfocada en la revisión de literatura y meta- análisis de información científica. En este sentido, se tomaron como criterios de selección de la información relevante los estudios sobre ADN ambiental, enfocados hacia bioindicadores de calidad en agua. Se consideraron 35 referencias bibliográficas, conforme a los criterios mencionados. Por otra parte, se determinó que la tecnología de eDNA tiene un enfoque creciente en la conservación y gestión de ecosistemas acuáticos, destacando el potencial del eDNA para la planificación de la conservación en áreas protegidas, la evaluación de la salud de los ecosistemas y la toma de decisiones para la gestión sostenible de los recursos hídricos, así como también para la detección temprana y eficiente de especies invasoras en los ecosistemas acuáticos. El análisis de bioindicadores de calidad del agua, mediante eDNA, ha permitido identificar y monitorear especies sensibles a la contaminación y cambios en la calidad del agua, de una forma más eficiente y versátil que con los métodos tradicionales, pudiendo ampliar la gama de especies que pueden usarse como indicadoras, entre los cuales figuran bacterias, meiofauna e incluso las propias especies invasoras en los ecosistemas acuáticos. Palabras Clave: Metabarcoding, conservación, meiofauna, contaminación.
UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Trabajo de Integración Curricular
Abstract The present study constitutes a review of the state of the art on the use of environmental DNA, as a tool for monitoring bioindicators to evaluate the state of aquatic ecosystems. For this purpose, the PRISMA Declaration was used as a reference, focused on the literature review and meta- analysis of scientific information. In this sense, studies on environmental DNA, focused on bioindicators of water quality, were taken as selection criteria for relevant information. 35 bibliographical references were considered, according to the indicated criteria. On the other hand, eDNA technology has an increasing focus on the conservation and management of aquatic ecosystems, highlighting the potential of eDNA for conservation planning in protected areas, assessment of ecosystem health and decision-making for the sustainable management of water resources, as well as for the early and efficient detection of invasive species in aquatic ecosystems. The analysis of water quality bioindicators, through eDNA, has helped to identify and monitor pollution-sensitive species and changes in water quality, in a more efficient and versatile way than with traditional methods, In addition, eDNA has the potential to expand the range of species that can be used as indicators, including bacteria, meiofauna and even the invasive species themselves. Keywords: Metabarcoding, ecosystems, meiofauna, water quality 1.
INTRODUCCIÓN La calidad del agua es un aspecto crucial para el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y la preservación de la salud humana. En la actualidad, el monitoreo de la calidad del agua se basa en análisis físico-químicos y en la observación directa de indicadores biológicos, Sin embargo, la evolución de la tecnología, ha permitido el surgimiento de nuevas herramientas, como el ADN ambiental, que ofrecen un enfoque innovador para el estudio de la calidad del agua (Castro et al., 2014). El ADN ambiental se refiere al material genético presente en muestras ambientales, como el agua, el suelo o el aire, que permite detectar y analizar la diversidad biológica de un ecosistema de manera rápida, precisa y no invasiva (Domínguez et al., 2019). Esta tecnología se basa en la extracción y secuenciación del ADN presente en el ambiente, lo que brinda información sobre la presencia y abundancia de diferentes especies, incluso aquellas difíciles de observar directamente (SGS, 2022).
UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Trabajo de Integración Curricular

ADN ambiental como herramienta para el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua

Autor 1[1]
ss.alvarezv@uea.edu.ec

Autor 2[1]
md.landivar@uea.edu.ec

Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería Ambiental (1)

Resumen

El presente trabajo constituye una revisión del estado del arte sobre el uso del ADN ambiental, como herramienta para el monitoreo de bioindicadores en ecosistemas acuáticos. Para tal efecto, se ocupó como referencia la Declaración PRISMA, enfocada en la revisión de literatura y meta-análisis de información científica. En este sentido, se tomaron como criterios de selección de la información relevante los estudios sobre ADN ambiental, enfocados hacia bioindicadores de calidad en agua. Se consideraron 35 referencias bibliográficas, conforme a los criterios mencionados. Por otra parte, se determinó que la tecnología de eDNA tiene un enfoque creciente en la conservación y gestión de ecosistemas acuáticos, destacando el potencial del eDNA para la planificación de la conservación en áreas protegidas, la evaluación de la salud de los ecosistemas y la toma de decisiones para la gestión sostenible de los recursos hídricos, así como también para la detección temprana y eficiente de especies invasoras en los ecosistemas acuáticos. El análisis de bioindicadores de calidad del agua, mediante eDNA, ha permitido identificar y monitorear especies sensibles a la contaminación y cambios en la calidad del agua, de una forma más eficiente y versátil que con los métodos tradicionales, pudiendo ampliar la gama de especies que pueden usarse como indicadoras, entre los cuales figuran bacterias, meiofauna e incluso las propias especies invasoras en los ecosistemas acuáticos.

Palabras Clave*:* Metabarcoding, conservación, meiofauna, contaminación.

Abstract

The present study constitutes a review of the state of the art on the use of environmental DNA, as a tool for monitoring bioindicators to evaluate the state of aquatic ecosystems. For this purpose, the PRISMA Declaration was used as a reference, focused on the literature review and meta-analysis of scientific information. In this sense, studies on environmental DNA, focused on bioindicators of water quality, were taken as selection criteria for relevant information. 35 bibliographical references were considered, according to the indicated criteria. On the other hand, eDNA technology has an increasing focus on the conservation and management of aquatic ecosystems, highlighting the potential of eDNA for conservation planning in protected areas, assessment of ecosystem health and decision-making for the sustainable management of water resources, as well as for the early and efficient detection of invasive species in aquatic ecosystems. The analysis of water quality bioindicators, through eDNA, has helped to identify and monitor pollution-sensitive species and changes in water quality, in a more efficient and versatile way than with traditional methods, In addition, eDNA has the potential to expand the range of species that can be used as indicators, including bacteria, meiofauna and even the invasive species themselves.

Keywords: Metabarcoding, ecosystems, meiofauna, water quality

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un aspecto crucial para el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y la preservación de la salud humana. En la actualidad, el monitoreo de la calidad del agua se basa en análisis físico-químicos y en la observación directa de indicadores biológicos, Sin embargo, la evolución de la tecnología, ha permitido el surgimiento de nuevas herramientas, como el ADN ambiental, que ofrecen un enfoque innovador para el estudio de la calidad del agua (Castro *et al*., 2014).

El ADN ambiental se refiere al material genético presente en muestras ambientales, como el agua, el suelo o el aire, que permite detectar y analizar la diversidad biológica de un ecosistema de manera rápida, precisa y no invasiva (Domínguez *et al*., 2019). Esta tecnología se basa en la extracción y secuenciación del ADN presente en el ambiente, lo que brinda información sobre la presencia y abundancia de diferentes especies, incluso aquellas difíciles de observar directamente (SGS, 2022).

El ADN ambiental, también conocido como eDNA por sus siglas en inglés (environmental DNA), es una tecnología que permite detectar y analizar el ADN de los organismos presentes en el agua, sin necesidad de capturar u observarlos directamente. Por lo tanto, esta tecnología se basa en la detección de fragmentos de ADN que los organismos liberan al medio ambiente (Padilla-García *et al*., 2021).

En este sentido, el ADN de un organismo puede ser excretado al entorno a través de cualquier tipo de excreción corporal, incluyendo heces fecales, restos de pelaje, piel o escamas, así como en gametos que se liberan en el entorno. El principio de la tecnología de ADN ambiental, se basa en la capacidad de colectar muestras que contengan el ADN extracelular liberado y secuenciarlas por métodos moleculares (González *et al*., 2014).

No obstante, es preciso considerar que el ADN es relativamente frágil, siendo susceptible a la degradación por diferentes factores ambientales y moleculares, que incluyen la acción de la radiación UV o la temperatura, así como a la acción de enzimas endo y exonucleasas, secretadas por diversos organismos. A pesar de ello, en condiciones óptimas el ADN puede conservarse en el agua por un tiempo que oscila entre 7 – 21 días. Adicionalmente, la dispersión que sufre el ADN excretado por un organismo, por acción de las corrientes y otros factores hidrológicos, facilita que éste pueda distribuirse en una amplia zona (Nuñez, 2022).

La aplicación de ADN ambiental en los análisis de calidad del agua, implica evaluar la sensibilidad, precisión y confiabilidad de esta técnica en la detección y cuantificación de especies bioindicadores, así como su capacidad para identificar posibles amenazas ambientales y evaluar la eficacia de las medidas de gestión y conservación implementadas (Gómez Ochoa de Alda *et al*., 2019).

Para los análisis de bioindicadores de calidad de agua, mediante ADN ambiental, el proceso inicia con la recolección de muestras acuáticas del entorno a estudiar. Posteriormente, se emplean técnicas especializadas en laboratorio para extraer el ADN de dichas muestras, entre las técnicas de extracción de ADN se puede mencionar la que involucra el uso de kits comerciales diseñados específicamente para la extracción de ADN de muestras ambientales, que contienen reactivos y columnas de filtración que permiten purificar el ADN de manera eficiente y la Extracción Fenol-Cloroformo, que se se basa en la extracción química del ADN. Implica la lisis de las células presentes en la muestra acuática y la separación de las fases acuosas y orgánicas utilizando fenol y cloroformo. Posteriormente, el ADN se recupera de la fase acuosa y se somete a purificación adicional (Gómez Ochoa de Alda *et al*., 2019).

Una vez obtenido el ADN, se procede a su secuenciación, que implica determinar la secuencia de las bases nitrogenadas presentes en el ADN. Este proceso aporta detalles sobre las secuencias genéticas existentes en el ambiente, lo que permite la identificación de las especies presentes y la evaluación de su diversidad, además se realiza el análisis de datos de ADN ambiental, conocido como metagenómica, es un proceso que comienza con la recolección y secuenciación del ADN presente en muestras acuáticas, una vez obtenidas estas secuencias, se ensamblan y anotan para identificar genes y regiones funcionales, y luego se comparan con bases de datos genómicas para asignar una identificación taxonómica a cada secuencia, que permite identificar las especies presentes en el ambiente acuático. A través del análisis de diversidad, se evalúa la riqueza y equidad de las especies, proporcionando información sobre la salud del ecosistema acuático y permitiendo el monitoreo de cambios en la biodiversidad a lo largo del tiempo (Núñez, 2022).

En cuanto a la aplicación del ADN ambiental en el biomonitoreo de calidad del agua, esta tecnología ha sido utilizada en diferentes estudios y proyectos en todo el mundo. Se ha aplicado en la detección y monitoreo de diversas especies indicadoras de la calidad del agua, como macroinvertebrados acuáticos, peces, bacterias y algas. Estos organismos son sensibles a los cambios en las condiciones ambientales y, por lo tanto, su presencia o ausencia, así como su abundancia relativa, pueden proporcionar información valiosa sobre la salud del ecosistema acuático (Aguas Urbanas, 2021)

Por lo tanto, el problema de investigación se formula de la siguiente manera: ¿En qué medida la tecnología del ADN ambiental puede ser aplicada como una herramienta efectiva en el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua? Esta pregunta guía el desarrollo de la presente investigación y permitirá establecer la originalidad y el interés de este estudio.

1.1.Objetivos:

Objetivo General

- Analizar el estado actual de la tecnología de ADN ambiental aplicada al estudio de bioindicadores de calidad de agua a través de una revisión del estado de arte.

Objetivos Específicos:

- Determinar las principales aplicaciones de la tecnología de ADN ambiental en la caracterización de comunidades biológicas en ecosistemas acuáticos
- Evaluar el uso de bioindicadores de calidad de agua, basados en ADN ambiental, como herramientas efectivas para la detección de cambios en la composición biológica y la respuesta de ecosistemas acuáticos a la contaminación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

2.1. Tipo de Investigación

El presente estudio es una investigación bibliográfica, que tiene como objetivo revisar y analizar el estado del arte sobre la tecnología del ADN ambiental como herramienta para el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua. Para este propósito se empleó la Declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*) para estudios y meta análisis de literatura, conforme lo reportan Sarkis-Onofre *et al*. (2021).

2.2. Búsqueda Bibliográfica

Se realizó una búsqueda exhaustiva en diferentes bases de datos, tales como Web of Science, Scopus, PubMed, Google académico, entre otros, utilizando palabras clave relacionadas con ADN ambiental, calidad de agua, bioindicadores y monitoreo. También se revisaron libros, artículos y otros recursos de investigación relevantes en el campo de la ecología y la biología molecular.

2.3. Análisis de Datos

Se efectuó un análisis sistemático de la información recopilada, a través de la identificación y clasificación de las publicaciones relevantes a la investigación. Se extrajeron datos importantes sobre las características de los estudios incluidos, tales como: los autores, la localización geográfica, los objetivos y resultados del estudio, así como las metodologías utilizadas en cada caso.

2.4. Síntesis de la Información

La información recopilada se organizó temáticamente para una mejor comprensión y análisis. Se resumió la información relevante en torno a los objetivos planteados, examinando tanto los aspectos técnicos como los resultados de los estudios incluidos.

2.5. Aplicación de la declaración PRISMA

Tema	ADN Ambiental como Herramienta para el Monitoreo de Bioindicadores de la Calidad de Agua
Criterios de Inclusión	- Estudios científicos sobre ADN ambiental y calidad del agua. Entre 2011 y 2023 tanto en idioma inglés como español, con las siguientes temáticas: - ADN ambiental aplicado a bioindicadores

	- Evaluación de calidad de agua con ADN ambiental - Biomonitoreo de aguas mediante ADN ambiental - Metabarcoding para comunidades acuáticas - Nuevos bioindicadores de calidad de agua con ADN ambiental
Criterios de Exclusión	- Estudios no relacionados con ADN ambiental o monitoreo de bioindicadores de calidad del agua. - Estudios que emplean ADN ambiental, pero para monitoreo de especies no acuáticas.
Métodos de Búsqueda	- Búsqueda sistemática en bases de datos científicas utilizando palabras clave relevantes (Google académico, Publimed, Scielo, Elsevier).
Métodos de Síntesis de Resultados	- Realizar análisis temático de estudios incluidos para identificar patrones y tendencias en el uso del ADN ambiental para el monitoreo de calidad del agua. - Identificar ventajas, limitaciones y desafíos de la tecnología en relación a calidad del agua y diversidad biológica. - Comparar y contrastar hallazgos de estudios seleccionados para obtener una visión integral de la aplicación del ADN ambiental en el monitoreo de calidad del agua

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis general sobre la actualidad y relevancia de los estudios en materia de ADN ambiental

En la última década, se ha visto un notable incremento en las investigaciones en el campo del ADN ambiental. Adicionalmente, aunque el protocolo de extracción y análisis de ADN ambiental ha cambiado muy poco, los avances en secuenciación de alto rendimiento han permitido generar una gran cantidad de datos a un costo relativamente bajo. Esta situación ha permitido desarrollar una aproximación no taxonómica para el monitoreo de nuevos bioindicadores de calidad del agua.

Dentro de este estudio, se consideraron un total de 35 fuentes que cumplieron con los requisitos de selección citados en la metodología. Los resultados y la discusión de este estudio se enfocaron en presentar de manera sistemática y detallada los hallazgos obtenidos a través de la revisión bibliográfica realizada, por lo que se abordaron aspectos clave relacionados con la

eficiencia y la sensibilidad de la tecnología del ADN ambiental, su comparación con los métodos tradicionales de monitoreo de la calidad del agua, así como su aplicabilidad en el análisis de bioindicadores de calidad del agua. La Tabla 1 presenta un resumen de las publicaciones más importantes dentro de este estudio.

Tabla 1

Principales publicaciones sobre el uso del ADN ambiental enfocado en bioindicadores de calidad de agua.

Año	Autor/es	Título
2011	(Hajibabaei *et al*., 2011) .	Environmental barcoding: A next-generation sequencing approach for biomonitoring applications using river benthos.
2014	(Bassi *et al*., 2014)	Estado de los humedales en la India: una revisión de la extensión, los beneficios del ecosistema, las amenazas y las estrategias de manejo.
2014	(Díaz-Ferguson & Moyer, 2014)	History, applications, methodological issues and perspectives for the use of environmental DNA (eDNA) in marine and freshwater environments.
2014	(Ficetola & Pompannony, 2008)	Species detection using environmental DNA from water samples.
2014	(González *et al*., 2014)	Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro.
2014	(Castro *et al*., 2014)	Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global.
2015	(Drummond *et al*., 2015)	Evaluating a multigene environmental DNA approach for biodiversity.

2015	(Taberlet *et al*., 2012)	Hacia la evaluación de la biodiversidad de próxima generación mediante metabarcode de ADN.
2015	(Valentini *et al*., 2015)	Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using environmental DNA metabarcoding.
2016	(Arocena, 2016)	Principios y métodos de limnología: ejemplos de Uruguay.
2016	(Collins *et al*., 2018)	Persistence of environmental DNA in marine systems.
2016	(Evans *et al*., 2016)	Quantification of mesocosm fish and amphibian species diversity via environmental DNA metabarcoding.
2018	(Terneus-Jácome & Yánez, 2018)	Fundamental principles on water quality, the use of aquatic bioindicators and fluvial ecological restoration in Ecuador.
2018	(Cheaib *et al*., 2018)	El desacoplamiento de funciones taxonómicas como una firma adaptativa de metacomunidades microbianas lacustres bajo un gradiente de contaminación polimetálica crónica.
2018	(Huerta & Centeno, 2018)	Aplicaciones de las técnicas de ADN ambiental al estudio y conservación de los recursos naturales.
2019	(Fernández Fernández, 2019)	ADN ambiental y sus aplicaciones en la evaluación de conectividad en ecosistemas acuáticos.
2019	(Stat *et al*., 2019)	Combined use of eDNA metabarcoding and video surveillance for the assessment of fish biodiversity.

2020	(Amaia *et al*., 2020)	Desarrollo y aplicación de una metodología basada en el estudio del ADN ambiental, que permita caracterizar las comunidades de anfibios en el término municipal de Vitoria-Gasteiz en aras de su gestión y conservación.
2020	(Gonzalez, 2020)	ADN ambiental como herramienta de caracterización y monitoreo de la biodiversidad.
2020	(Rodríguez, 2020)	Aplicación de indicadores biológicos en cursos de agua de la ecorregión Pampa.
2020	(Domínguez & Giorgi, 2020)	Los indicadores biológicos como herramientas de gestión de la calidad del agua.
2020	(Huerta, 2020)	Aplicaciones de las técnicas de ADN Ambiental en las ciencias ambientalesTrabajo de Grado.
2021	(Morales, 2021)	Uso de diatomeas como bioindicadores de calidad de agua en la zona ganadera del río Tarqui. Tesis de grado.
2021	(Padilla-García *et al*., 2021)	Metabarcoding de DNA ambiental: un enfoque para el seguimiento de la biodiversidad.
2021	(Caballero Gaitán, 2021)	Estudio de la biodiversidad acuática de vertebrados en la amazonía y orinoquía colombiana por medio de ADN ambiental.
2021	(Forero Pineda *et al*., 2021)	Extracción de ADN bacteriano a partir de cuerpos de agua de uso agrícola.

2022	(Chiriap *et al*., 2022)	Evaluación de la calidad de agua a través del estudio de bioindicadores acuáticos y parámetros físicos químicos del sitio turístico Río Quimi de la Parroquia Tundayme del Cantón el Pangui, Provincia Zamora Chinchipe durante el año 2022
2022	(Nivelo, 2022)	Desarrollo de una base de datos de macroinvertebrados acuáticos para futuros estudios de ADN ambiental en regiones amazónicas del Ecuador.
2022	(Organización de sanidad mundial, 2022)	Uso de los métodos de ADN ambiental (ADNa) para la detección de las enfermedades de los animales acuáticos de la lista de la OMSA.
2022	(Nuñez, 2022)	Aplicación de ADN ambiental en áreas protegidas: estimando la biodiversidad acuática en Pantanos de Villa.
2022	(Red del Agua UNAM, 2022)	El uso del ADN ambiental en el estudio de cuerpos de agua: una propuesta para su implementación en México.
2023	(Deiner *et al*., 2021)	The future of biodiversity monitoring and conservation utilizing environmental DNA.
2023	(Jois Vanesa Carrion Pilco Asesores & Steffany Calderón Ríos Danilo Edson Bustamante Mostajo, 2023)	Análisis del uso del DNA Barcoding en el Perú en la diversidad de bioindicadores ambientales de Chachapoyas, Amazonas
2023	(Alfonso *et al*., 2023)	Environmental management strategies for aquaculture production companies in La Cocha lagoon, Nariño department, Colombia. Conciencia Tecnológica
2023	(Fierro, 2023)	Diversidad de las macrófitas en el lago eutrófico Yahuarcocha a través de la técnica de ADN Ambiental

La tabla anterior, presenta una lista de referencias bibliográficas relacionadas con el uso del ADN ambiental en diversos campos de estudio. Estas referencias abarcan un período desde el año 2007 hasta el año 2023, lo que refleja el creciente interés y la relevancia de esta técnica en la investigación científica.

Se puede observar una diversidad de temas abordados en las publicaciones, lo que refleja la versatilidad y amplitud de aplicaciones del ADN ambiental; Algunos de los temas incluyen la evaluación de la biodiversidad en ecosistemas acuáticos, el impacto ecológico de especies invasoras, la detección de enfermedades en animales acuáticos, la conservación de recursos naturales y la mejora de la gestión ambiental en proyectos mineros, entre otros.

Es importante destacar la evolución temporal de la investigación en ADN ambiental, mostrando un aumento significativo de publicaciones en los últimos años, que sugiere un creciente reconocimiento de la utilidad de esta técnica y una mayor inversión en investigaciones relacionadas. Además, la inclusión de trabajos recientes demuestra que el campo del ADN ambiental sigue siendo activo y está en constante desarrollo.

Por otra parte, la presencia de estudios realizados en diferentes regiones geográficas, lo que demuestra la aplicabilidad global del ADN ambiental y su relevancia en distintos contextos ambientales y ecosistemas. Esto proporciona una perspectiva amplia y enriquecedora para el avance del conocimiento en esta área.

En este contexto, El ADN ambiental ha surgido como una herramienta poderosa en la investigación y el monitoreo de la ecología acuática, por cuanto permite detectar y analizar la diversidad biológica presente en diferentes entornos acuáticos, a través del análisis del material genético que los organismos liberan en su entorno.

El análisis de las investigaciones revela un creciente interés en el uso del ADN ambiental en el monitoreo de la ecología acuática, es así que el número de investigaciones ha ido en aumento a lo largo de los años, con un incremento significativo a partir de 2014, lo que indica un reconocimiento creciente de la utilidad y las ventajas de esta tecnología en la comprensión y el estudio de los ecosistemas acuáticos.

Varias investigaciones descritas en la Tabla 1, exploran el uso del ADN ambiental como una herramienta para el análisis de bioindicadores de calidad del agua, estos bioindicadores, como ciertas especies de macroinvertebrados acuáticos, pueden proporcionar información valiosa sobre la calidad y la integridad de los ecosistemas acuáticos, por lo que el ADN ambiental permite identificar y monitorear estas especies de manera rápida y precisa.

Desde esta perspectiva, también se utiliza para la detección y la identificación de especies acuáticas en diferentes entornos acuáticos, como aguas superficiales y suelos acuáticos, este enfoque ha demostrado ser eficiente para la identificación de especies acuáticas, incluso en condiciones donde otros métodos tradicionales pueden ser limitados.

El gráfico anterior demuestra las investigaciones realizadas por año, desde el año 2011 hasta el 2023, se llevaron a cabo investigaciones pioneras que sentaron las bases para el uso del ADN ambiental en el estudio de la biodiversidad, que demostraron la viabilidad de detectar especies a partir de muestras ambientales, abriendo nuevas posibilidades para el monitoreo de la fauna y la identificación de especies en ecosistemas acuáticos y terrestres.

En el período de tiempo comprendido entre 2011 y 2023, se han llevado a cabo diversas investigaciones relacionadas con el uso del ADN ambiental para abordar temas cruciales en la conservación y el monitoreo de ecosistemas acuáticos, por lo cual estas investigaciones han explorado una amplia gama de aplicaciones y técnicas para comprender mejor la biodiversidad acuática y evaluar la salud de los sistemas acuáticos.

En este contexto, existen investigaciones se han centrado en la utilización del eDNA como una herramienta eficiente para la detección y monitoreo de especies en ambientes acuáticos. Estas técnicas de secuenciación masiva, conocidas como metabarcoding de eDNA, permiten identificar de manera rápida y precisa la presencia de diferentes organismos acuáticos, incluyendo peces, anfibios, macroinvertebrados y microorganismos; el enfoque del eDNA ha demostrado ser valioso para el seguimiento de la biodiversidad, facilitando la obtención de datos sobre la composición de especies y sus patrones de distribución en diferentes hábitats acuáticos.

Existen también varias investigaciones se han dedicado a la evaluación de la calidad del agua en ambientes acuáticos, estos estudios han utilizado indicadores biológicos y metabarcoding de eDNA para analizar la salud de los ecosistemas acuáticos y detectar posibles fuentes de contaminación y perturbaciones ambientales. La combinación de información genética obtenida a través del eDNA y la aplicación de bioindicadores ha demostrado ser una estrategia efectiva para evaluar la salud y la integridad de los sistemas acuáticos.

Otro tema importante abordado en estas investigaciones es la conservación y manejo de áreas protegidas y humedales; El eDNA ha sido utilizado para estimar la biodiversidad acuática en entornos naturales, lo que proporciona información valiosa para el diseño y aplicación de estrategias de conservación. Además, el uso del eDNA en áreas protegidas ha permitido identificar especies clave y evaluar la conectividad genética en ecosistemas acuáticos.

Es relevante destacar que estas investigaciones han destacado la importancia de fortalecer la implementación efectiva de las técnicas de eDNA en políticas y programas de conservación y manejo de recursos hídricos. Esto implica asignar recursos adecuados, capacitar a los funcionarios encargados de la aplicación de la ley y sensibilizar a la sociedad sobre la importancia de la protección de los ecosistemas acuáticos.

En las investigaciones presentadas, exploran el uso de la metagenómica ambiental en el monitoreo de la calidad del agua, que permiten el análisis de comunidades microbianas presentes en el agua, brindando información valiosa sobre la salud y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos.

Se observa una progresión desde publicaciones iniciales que introducen el concepto de ADN ambiental como una herramienta prometedora para el biomonitoreo en ambientes acuáticos hasta investigaciones más recientes que exploran una amplia variedad de aplicaciones de esta tecnología. En los primeros años, se establecieron los fundamentos teóricos y metodológicos, destacando la detección de especies y la evaluación de la biodiversidad mediante el análisis de muestras de agua.

Con el tiempo, las investigaciones se diversificaron, cubriendo temas como la conservación de recursos naturales, la gestión de humedales y la aplicación de técnicas de ADN ambiental en la evaluación de la calidad del agua. Además, se exploraron enfoques metabarcoding más avanzados y se aplicaron técnicas de ADN ambiental en la caracterización de comunidades de anfibios y macroinvertebrados acuáticos.

También se destacan estudios que consideran la aplicación del ADN ambiental en áreas protegidas y en la detección de enfermedades en animales acuáticos, lo que demuestra la versatilidad de esta técnica en la conservación y gestión de ecosistemas acuáticos.

Figura 1

Año de publicación de los trabajos referenciados en el presente estudio.



Durante este período, se ha observado un crecimiento considerable, al menos a partir del 2014, en el número de investigaciones relacionadas con el uso del ADN ambiental en ecosistemas acuáticos, que refleja el creciente interés y reconocimiento de la utilidad y eficacia del eDNA como una herramienta valiosa para el monitoreo y la conservación de la biodiversidad acuática.

Las investigaciones han estado impulsadas por los avances tecnológicos y metodológicos en la secuenciación masiva de ADN. La aparición de técnicas como el metabarcoding de eDNA ha permitido obtener información detallada sobre la diversidad de especies en ambientes acuáticos de manera rápida y precisa, lo que ha aumentado la eficiencia de las investigaciones y ha ampliado su alcance.

Se ha observado un enfoque creciente en la aplicación del ADN ambiental en la conservación y gestión de ecosistemas acuáticos. Las investigaciones han destacado cómo el eDNA puede proporcionar información relevante para la identificación de áreas protegidas, la evaluación de la salud de los ecosistemas y la toma de decisiones informadas para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

A medida que ha crecido el conocimiento sobre el eDNA, se ha evidenciado una tendencia hacia la integración de esta herramienta con otros enfoques de monitoreo y evaluación de ecosistemas acuáticos. Las investigaciones han combinado el uso del eDNA con bioindicadores, monitoreo tradicional y otras tecnologías para obtener una comprensión más completa de la biodiversidad y los procesos ecológicos en ambientes acuáticos.

Las investigaciones han demostrado la importancia de la cooperación internacional en el estudio del ADN ambiental en ecosistemas acuáticos. La colaboración entre diferentes países ha permitido la comparación de datos, el intercambio de buenas prácticas y la armonización de las políticas de conservación y gestión de recursos hídricos.

Por lo tanto, la tendencia en las investigaciones de ADN ambiental en el período 2011-2023 ha sido de crecimiento y consolidación como una herramienta clave en la investigación y conservación de la biodiversidad acuática. El enfoque se ha centrado en la eficiencia tecnológica, la aplicación en la conservación y gestión, la integración con otros enfoques y la cooperación internacional. Se espera que esta tendencia continúe en el futuro, fortaleciendo aún más la capacidad para comprender y proteger los valiosos ecosistemas acuáticos de nuestro planeta.

3.2 VENTAJAS DEL USO DE ADN AMBIENTAL SOBRE EL MONITOREO TRADICIONAL EN BIOINDICADORES DE CALIDAD DE AGUA

La aplicación del ADN ambiental en el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua ha demostrado ser una herramienta prometedora en el campo de la ecología acuática, en el

periodo de estudio analizado, se ha observado un creciente interés en esta tecnología, como se refleja en el aumento del número de investigaciones relevantes en el tema, la disponibilidad de técnicas de secuenciación de próxima generación y la mejora en los protocolos de extracción y análisis de ADN ambiental han contribuido al desarrollo y la expansión de esta área de investigación.

El análisis de las investigaciones muestra que el ADN ambiental ha sido utilizado para una amplia gama de aplicaciones en el monitoreo de la ecología acuática, una de las áreas destacadas es la detección de especies invasoras, por lo tanto, el uso del ADN ambiental permite una detección temprana y eficiente de especies invasoras en los ecosistemas acuáticos, lo que facilita la implementación de medidas de gestión y conservación para limitar su impacto, además las investigaciones han destacado la importancia de utilizar el ADN ambiental como una herramienta de monitoreo para controlar y prevenir la propagación de especies invasoras, lo que a su vez contribuye a la protección de la biodiversidad nativa.

Otro aspecto clave abordado en las investigaciones es la evaluación de la diversidad biológica en los ecosistemas acuáticos, que ha permitido obtener información detallada sobre las especies presentes en un área determinada, lo que ayuda a evaluar la salud y el estado de conservación de los ecosistemas acuáticos, además estos estudios han demostrado la capacidad del ADN ambiental para identificar y cuantificar la presencia de diferentes especies, incluso en entornos donde los métodos tradicionales de muestreo pueden ser limitados, lo que resulta crucial para la toma de decisiones en la gestión de los recursos acuáticos y la conservación de la biodiversidad.

El análisis de bioindicadores de calidad del agua es otro enfoque importante abordado en las investigaciones, el ADN ambiental ha permitido identificar y monitorear bioindicadores sensibles a la contaminación y cambios en la calidad del agua, que pueden proporcionar información valiosa sobre la salud y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, es decir, que se convierte en una herramienta eficiente y precisa para su detección, por lo que los resultados de estas investigaciones contribuyen al desarrollo de estrategias de monitoreo más efectivas y al diseño de medidas de gestión para mejorar la calidad del agua y preservar la integridad de los ecosistemas acuáticos.

Además de estas aplicaciones específicas, las investigaciones también han contribuido al desarrollo y la mejora de metodologías relacionadas con el uso del ADN ambiental en el monitoreo de la ecología acuática, se evidenciado que existen propuestas con diferentes enfoques y técnicas para la recolección, extracción y análisis del ADN ambiental, lo que ha permitido una mayor eficiencia y precisión en los estudios.

En este contexto, se han comparado los resultados obtenidos mediante el uso del ADN ambiental con los métodos convencionales de monitoreo de bioindicadores acuáticos, estas comparaciones demuestran la concordancia y la capacidad del ADN ambiental para proporcionar

información valiosa y complementaria a los métodos tradicionales, aportando beneficios adicionales como mayor eficiencia y menor impacto en los ecosistemas.

Sin embargo, de los avances y las aplicaciones prometedoras del ADN ambiental en el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua, es importante tener en cuenta algunas limitaciones y desafíos asociados con esta tecnología, por ejemplo, la detección de especies puede verse afectada por la degradación del ADN ambiental y la presencia de inhibidores en las muestras, lo que puede generar falsos negativos o falsos positivos, o la interpretación de los resultados del ADN ambiental requiere conocimientos sólidos en taxonomía y genética, así como la disponibilidad de bases de datos y referencias genéticas adecuadas.

3.3. LIMITACIONES DEL ANÁLISIS ADN AMBIENTAL

A pesar de los avances realizados en el uso del ADN ambiental, para el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua, existen desafíos que deben abordarse que incluyen la estandarización de los métodos de muestreo y análisis, la interpretación de los datos genéticos en relación con otros parámetros ambientales, y la integración de la tecnología en los programas de monitoreo existentes, sin embargo, se vislumbran oportunidades prometedoras para el uso cada vez más extendido del ADN ambiental en el monitoreo de la calidad del agua, especialmente con los avances en la tecnología y la colaboración interdisciplinaria.

El análisis de ADN ambiental, utilizado para el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua, presenta ciertas limitaciones importantes a considerar. En primer lugar, es sensible a la contaminación cruzada, lo que significa que pequeñas cantidades de material genético de organismos pueden introducirse en las muestras, lo que potencialmente puede conducir a resultados incorrectos, por lo tanto, la interpretación de los datos puede ser complicada debido a la dificultad en la identificación precisa de especies a partir del ADN ambiental, especialmente cuando el ADN está fragmentado o proviene de múltiples especies. Los costos y recursos necesarios para llevar a cabo este tipo de análisis también pueden ser prohibitivos en áreas con recursos limitados, la falta de una base de datos de referencia exhaustiva y la influencia de factores ambientales en los resultados son otras limitaciones a tener en cuenta, cuantificar la abundancia de especies a partir de datos de ADN puede ser desafiante, y la recolección de muestras de ADN ambiental puede plantear cuestiones éticas y legales.

Por último, la presencia de ADN humano en las muestras y su interferencia con la detección de ADN ambiental de otras especies es una preocupación adicional, a pesar de estas limitaciones, el análisis de ADN ambiental sigue siendo una herramienta valiosa en la investigación de la ecología acuática y la calidad del agua, y las mejoras continuas en las técnicas y las bases de datos están ayudando a abordar estos desafíos.

3.3 PRINCIPALES ENFOQUES DEL USO DE LA TECNOLOGÍA DE ADN AMBIENTAL PARA MONITOREO DE CALIDAD DE AGUA

El análisis de las investigaciones muestra que el ADN ambiental ha sido utilizado para diversos enfoques en el monitoreo de la calidad del agua, por lo que se ha destacado su eficacia en la detección temprana y eficiente de especies invasoras en los ecosistemas acuáticos, esta capacidad es fundamental para implementar medidas de gestión y conservación que limiten el impacto negativo de estas especies y protejan la biodiversidad nativa.

Otro enfoque relevante es la evaluación de la diversidad biológica en los ecosistemas acuáticos, en decir, el ADN ambiental ha permitido identificar y cuantificar la presencia de diferentes especies de forma precisa, incluso en ambientes donde los métodos tradicionales de muestreo pueden ser limitados, esta información es esencial para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos y respaldar la toma de decisiones en la gestión y conservación de los recursos acuáticos.

Desde este análisis, el ADN ambiental se ha utilizado para el análisis de bioindicadores de calidad del agua. La detección y monitoreo de bioindicadores sensibles a la contaminación y cambios ambientales son cruciales para evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos y diseñar estrategias de gestión para mejorar la calidad del agua.

Otro aspecto relevante es la evaluación de la diversidad biológica en los ecosistemas acuáticos mediante el uso del ADN ambiental, esta tecnología ha permitido identificar y cuantificar la presencia de diferentes especies de manera precisa y confiable, a través de secuenciación de alta resolución, se pueden obtener perfiles detallados de la comunidad biológica presente en un área determinada, lo que proporciona información esencial para evaluar la salud del ecosistema y respaldar la toma de decisiones en la gestión y conservación de los recursos acuáticos.

Por lo tanto, el ADN ambiental ha demostrado ser una herramienta valiosa en el monitoreo de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos, su aplicación ha permitido una detección temprana de especies invasoras, evaluación de la diversidad biológica y análisis de bioindicadores de calidad del agua; a medida que la tecnología avanza y se superan los desafíos, se vislumbran oportunidades prometedoras para una implementación más amplia del ADN ambiental en el monitoreo y la conservación de la biodiversidad acuática. Su aplicación en el campo de la ecología acuática es una herramienta clave para la toma de decisiones informadas y la gestión sostenible de los recursos acuáticos.

El enfoque hacia los nuevos tipos de bioindicadores, como la meiofauna y las bacterias, ha surgido como una perspectiva prometedora en el uso de la tecnología de ADN ambiental para el monitoreo de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos. La meiofauna, que comprende organismos pequeños que habitan en los sedimentos acuáticos, y las bacterias, juegan un papel crucial en la salud y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. La aplicación del ADN

ambiental en la detección y evaluación de estos bioindicadores no solo permite una identificación precisa y eficiente de su presencia, sino que también supera las limitaciones de los métodos tradicionales de muestreo, que pueden ser laboriosos y consumir tiempo.

Una de las ventajas clave de utilizar un enfoque no taxonómico, conocido como "taxonomic-free", en la identificación de bioindicadores mediante ADN ambiental es su capacidad para brindar información más amplia y holística sobre la salud del ecosistema acuático. En lugar de depender únicamente de la identificación taxonómica a nivel de especie, este enfoque se basa en la detección de marcadores genéticos específicos que indican la presencia o actividad de ciertos grupos funcionales de organismos, como las bacterias descomponedores o los organismos bentónicos.

Esta aproximación taxonomic-free tiene varias ventajas notables. En primer lugar, permite una evaluación más completa de la estructura y funcionamiento del ecosistema al considerar múltiples niveles tróficos y funciones ecológicas. Además, al centrarse en características genéticas específicas en lugar de depender de la morfología, se reduce el margen de error y la identificación se vuelve más precisa y rápida. Esto es particularmente valioso para evaluar la respuesta del ecosistema a cambios ambientales sutiles o perturbaciones, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Principales aplicaciones de la tecnología de ADN ambiental en el análisis de bioindicadores de calidad de agua

Categoría	Tipo de Bioindicador	Aplicación	Referencia
Bionindicador Convencional	Bacterias	Calidad del agua	(Castro *et al*., 2014)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Estado de los humedales	(Bassi *et al*., 2014)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Bioindicadores	(González *et al*., 2014)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Evaluación de biodiversidad utilizando multigenes eDNA	(Drummond *et al*., 2015)

Bionindicador Convencional	Bacterias	Principios y métodos de limnología	(Arocena, 2016)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Persistencia de eDNA en sistemas marinos	(Collins *et al.*, 2018)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Evaluación de biodiversidad utilizando eDNA metabarcoding	(Evans *et al*., 2016)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Indicadores de calidad del agua	(Terneus-Jácome & Yánez, 2018)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Evaluación de biodiversidad de peces usando eDNA	(Stat *et al*., 2019)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Indicadores biológicos en cursos de agua	(Rodríguez, 2020)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Extracción de ADN bacteriano en agua de uso agrícola	(Forero Pineda *et al*., 2021)
Bionindicador Convencional	Diatomeas	Uso de diatomeas como bioindicadoras de calidad de agua en la zona ganadera del río Tarqui. Tesis de grado.	(Morales, 2021)
Bionindicador Convencional	Bacterias	Diversidad de las macrófitas en el lago eutrófico Yahuarcocha a través de la técnica de ADN Ambiental	(Fierro, 2023)
Bionindicador Nuevo	Meiofauna/ biomonitoreo	Detección de especies invasoras en ríos	(Hajibabaei *et al.*, 2011)
Bionindicador Nuevo	Bacterias/ADN Ambiental	Evaluación de eDNA en ambientes acuáticos	(Díaz-Ferguson & Moyer, 2014)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Detección de especies usando eDNA	(Ficetola & Pompannony, 2008)

Bionindicador Nuevo	Bacterias	Evaluación de biodiversidad utilizando metabarcoding de ADN	(Taberlet *et al*., 2012)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Monitoreo de biodiversidad acuática utilizando metabarcoding de eDNA	(Valentini *et al*., 2015)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Desacoplamiento de funciones taxonómicas como firma adaptativa	(Cheaib *et al*., 2018)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Aplicaciones de técnicas de eDNA en conservación	(Huerta & Centeno, 2018)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Evaluación de conectividad en ecosistemas acuáticos	(Fernández Fernández, 2019)
Bionindicador Nuevo	Meiofauna	Caracterización de comunidades de anfibios usando eDNA	(Amaia *et al*., 2020)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Aplicaciones de las técnicas de ADN Ambiental en las ciencias ambientales Trabajo de Grado.	(Huerta, 2020)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Caracterización y monitoreo de biodiversidad usando eDNA	(Gonzalez, 2020)
Bionindicador Nuevo	Vertebrados	Estudio de biodiversidad acuática de vertebrados usando eDNA	(Caballero Gaitán, 2021)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Metabarcoding de eDNA para seguimiento de biodiversidad	(Padilla-García *et al*., 2021)
Bionindicador Nuevo	Vertebrados	Aplicación de eDNA en áreas protegidas	(Nuñez, 2022)

Bionindicador Nuevo	Bacterias	Uso de eDNA en el estudio de cuerpos de agua	(Red del Agua UNAM, 2022)
Bionindicador Nuevo	Meiofauna	Base de datos de macroinvertebrados en eDNA	(Nivelo, 2022)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Uso de eDNA para detección de enfermedades de animales acuáticos	(Organizacion de sanidad mundial, 2022)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Evaluación de la calidad de agua a través del estudio de bioindicadores acuáticos y parámetros físicos químicos del sitio turístico Río Quimi de la Parroquia Túndame del Cantón el Pangui, Provincia Zamora Chinchipe durante el año 2022	(Chiriap *et al*., 2022)
Bionindicador Nuevo	Bacterias y Vertebrados	Futuro del monitoreo y conservación de biodiversidad utilizando eDNA	(Deiner *et al*., 2021)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Análisis del uso del DNA BARCODING en el Perú en la diversidad de bioindicadores ambientales de CHACHAPOYAS, AMAZONAS	(Pilco, Calderón & Bustamante, 2023)
Bionindicador Nuevo	Bacterias	Environmental management strategies for aquaculture production companies in La Cocha lagoon, Nariño department, Colombia. Conciencia Tecnológica	(Alfonso *et al*., 2023)

3.4 DESAFÍOS EN EL ESTUDIO DE BIOINDICADORES DE CALIDAD DE AGUA MEDIANTE ADN AMBIENTAL

El estudio de bioindicadores de calidad de agua a través del análisis de ADN ambiental presenta varios desafíos importantes, la complejidad de los ecosistemas acuáticos y la diversidad de especies presentes pueden dificultar la identificación precisa de organismos a partir del ADN ambiental. Esto se agrava cuando el ADN está fragmentado o cuando se trata de comunidades microbianas, donde la identificación precisa puede ser especialmente desafiante. Otro desafío radica en la necesidad de mantener la integridad de las muestras de ADN ambiental y evitar la contaminación cruzada, ya que incluso pequeñas cantidades de material genético de organismos pueden afectar los resultados. Además, la falta de una base de datos de referencia completa puede dificultar la identificación precisa de especies, lo que puede llevar a resultados ambiguos.

Los factores ambientales, como la variabilidad en las condiciones del agua, también pueden influir en los resultados, lo que hace que la interpretación de los datos sea más compleja. Además, la cuantificación precisa de la abundancia de especies a partir de datos de ADN ambiental puede ser un desafío. Desde una perspectiva práctica, el costo y los recursos requeridos para llevar a cabo análisis de ADN ambiental pueden ser prohibitivos en áreas con recursos limitados. La recolección de muestras de ADN ambiental puede plantear cuestiones éticas y legales, especialmente en entornos sensibles.

Por último, la presencia de ADN humano en las muestras y su posible interferencia con la detección de ADN ambiental de otras especies es una preocupación que debe abordarse, en este contexto, el análisis de ADN ambiental sigue siendo una herramienta prometedora para el monitoreo de la calidad del agua, y las mejoras continuas en las técnicas y la colaboración internacional están ayudando a superar estos obstáculos y aprovechar su potencial en la investigación ambiental.

4. CONCLUSIONES

El ADN ambiental ha demostrado ser una herramienta prometedora y efectiva en la evaluación de la biodiversidad acuática y la calidad del agua. Su aplicación ha experimentado un crecimiento significativo en el periodo 2012-2022, debido a los avances en las técnicas de secuenciación de próxima generación y la mejora en los protocolos de extracción y análisis de ADN.

La versatilidad del uso del ADN ambiental no se limita solamente a los bioindicadores de calidad tradicionales, abriendo el abanico de indicadores que se pueden utilizar, entre los cuales figuran bacterias, meiofauna e incluso especies invasoras en los ecosistemas acuáticos. En tal sentido, el ADN ambiental ha sido muy efectivo en el análisis de especies sensibles a la

contaminación y a los cambios ambientales.

No obstante,

El análisis de ADN ambiental promete ser una herramienta valiosa en el estudio de bioindicadores de calidad de agua, capaz de complementar los estudios que se realizan con bioindicadores tradicionales de los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, existen desafíos que deben abordarse; tales como la degradación del ADN en las muestras, la falta de una base de datos de referencia completa y la necesidad de evitar la contaminación cruzada. Para tal efecto, se requiere una mayor estandarización de los métodos de muestreo y análisis, así como una colaboración interdisciplinaria para integrar esta tecnología en los programas de monitoreo existentes.

Referencias

Aguas Urbanas. (2021). *Monitoreo biológico de calidad de agua*. Montevideo, Udelar. https://doi.org/https://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/category/monitoreo-de-calidad-de-agua/

Alfonso, V., Mandón, M., Andrade, O. A., Alberto, C., & Ibarra, B. (2023). Environmental management strategies for aquaculture production companies in La Cocha lagoon, Nariño department, Colombia. *Conciencia Tecnológica*, *1*(1), 20–40. https://doi.org/10.55411/26652544.238

Amaia, C., Maderia, M. J., Somoza, E., & Gómez, J. (2020). *Desarrollo y aplicación de una metodología basada en el estudio del ADN ambiental, que permita caracterizar las comunidades de anfibios en el término municipal de Vitoria-Gasteiz en aras de su gestión y conservación*. Universidad del Pais Vasco. https://doi.org/https://blogs.vitoria-gasteiz.org/ceagreenlab/files/2020/09/Informe-final-CEA-Green-Lab-EHU-eDNA-anfibios.pdf

Arocena, R. (2016). *Principios y métodos de limnología: ejemplos de Uruguay*. Udelar. FC. DIRAC. https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12008/27350

Bassi, N., Kumrb, D., Sharmac, A., & Saradhi, P. (2014). Estado de los humedales en la India: una revisión de la extensión, los beneficios del ecosistema, las amenazas y las estrategias de manejo. *Revista de Hidrología: Estudios Regionales*, *2*(1), 1–19. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.07.001

Caballero Gaitán, S. J. (2021). *Estudio de la biodiversidad acuática de vertebrados en la amazonía y orinoquía colombiana por medio de ADN ambiental Rita Daniela Martinelli Marín trabajo de grado para optar al título de microbióloga*. https://doi.org/https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/51307/23349.pdf?sequence=1

Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Diaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, *10*(17), 111–124. https://doi.org/10.16925/in.v9i17.811

Cheaib, B., Le Boulch, M., Luc Mercier, P., & Derome, N. (2018). El desacoplamiento de funciones taxonómicas como una firma adaptativa de metacomunidades microbianas lacustres bajo un gradiente de contaminación polimetálica crónica. *Fronteras En Microbiologia*, *1*(1), 1–15. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/335617437_Taxon-Function_Decoupling_as_an_Adaptive_Signature_of_Lake_Microbial_Metacommunities_Under_a_Chronic_Polymetallic_Pollution_Gradient

Chiriap, U., Alexandra, J., Juepa, T., & Ronaldo, J. (2022). *Evaluación de la calidad de agua a través del estudio de bioindicadores acuáticos y parámetros físico-químico del sitio turístico Río Quimi de la Parroquia Tundayme del Cantón el Pangui, Provincia Zamora Chinchipe durante el año 2022" Tesis de grado*. http://dspace.tecnologicosudamericano.edu.ec/jspui/handle/123456789/702

Collins, R. A., Wangensteen, O. S., O'Gorman, E. J., Mariani, S., Sims, D. W., & Genner, M. J. (2018). Persistence of environmental DNA in marine systems. *Communications Biology*, *1*(1), 50–60. https://doi.org/10.1038/s42003-018-0192-6

Deiner, K., Yamanaka, H., & Bernatchez, L. (2021). The future of biodiversity monitoring and conservation utilizing environmental DNA. *Environmental DNA*, *3*(1), 3–7. https://doi.org/10.1002/edn3.178

Díaz-Ferguson, E. E., & Moyer, G. R. (2014). History, applications, methodological issues and perspectives for the use of environmental DNA (eDNA) in marine and freshwater environments. In *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN* (Vol. 62, Issue 4).

Domínguez, E., & Giorgi, A. (2020). *Los indicadores biológicos como herramientas de gestión de la calidad del agua*. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/146379/CONICET_Digital_Nro.782f4438-45e6-4640-9fb3-d258bb49b33a_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Dominguez, R., León, M., Samaniego, J., & Sunkel, O. (2019). *Recursos naturales, medio ambiente y sostenibilidad*. CEPAL. https://doi.org/https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44785/8/S1900378_es.pdf

Drummond, A. J., Newcomb, R. D., Buckley, T. R., Xie, D., Dopheide, A., Potter, B. C. M., Heled, J., Ross, H. A., Tooman, L., Grosser, S., Park, D., Demetras, N. J., Stevens, M. I., Russell, J. C., Anderson, S. H., Carter, A., & Nelson, N. (2015). Evaluating a multigene environmental DNA approach for biodiversity assessment. *GigaScience*, *4*(1). https://doi.org/10.1186/s13742-015-0086-1

Evans, N. T., Olds, B. P., Renshaw, M. A., Turner, C. R., Li, Y., Jerde, C. L., Mahon, A. R., Pfrender, M. E., Lamberti, G. A., & Lodge, D. M. (2016). Quantification of mesocosm fish and amphibian species diversity via environmental DNA metabarcoding. *Molecular Ecology Resources*, *16*(1), 29–41. https://doi.org/10.1111/1755-0998.12433

Fernández Fernández, S. (2019). *ADN ambiental y sus aplicaciones en la evaluación de conectividad en ecosistemas acuáticos*. http://hdl.handle.net/10651/50848

Ficetola, G., & Pompannony, P. (2008). Species detection using environmental DNA from waters samples. *Biology Letters*, *4*(5), 420–450. https://doi.org/DOI: 10.1098/rsbl.2008.0118

Fierro, S. (2023). *Diversidad de las macrófitas en el lago eutrófico Yahuarcocha a través de la técnica de ADN Ambiental trabajo de grado*. http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/13979/3/03%20RNR%20450%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf

Forero Pineda, N., Marín - Suárez, J., Forero- Ulloa, F. E., & Gómez-Palacio, A. (2021). Extracción de ADN bacteriano a partir de cuerpos de agua de uso agrícola. *Ciencia y Agricultura*, *18*(1), 36–45. https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n1.2021.11703

Gómez Ochoa de Alda, J., Esteban Gallego, R., & Marcos-Merino, J. M. (2019). Extracción de ADN con material cotidiano: diseño, implementación y validación de una intervención activa interdisciplinar. *Educación Química*, *30*(1), 42. https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.1.67658

González, C., Vallarino, A., Perez, J., & Low, A. (2014). *Bioindicadores*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). https://doi.org/https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/1752/1/PUB-CAPITULOS-LIBROS-961.PDF

Gonzalez, M. (2020). *ADN ambiental como herramienta de caracterización y monitoreo de la biodiversidad*. Agencia Nacional de Hidrocarburos.

Gonzalo Gajardo, B. (2009). Darwin, Genética y Biodiversidad. In *Theoria* (Vol. 18, Issue 1). www.cbd.int/convention

Guadalupe, M., & Bertha, G. (2018). *Envejecimiento: algunas teorías y consideraciones genéticas, epigenéticas y ambientales*. http://www.redalyc.org/articulo.oa?

Hajibabaei, M., Shokralla, S., Zhou, X., Singer, G. A. C., & Baird, D. J. (2011). Environmental barcoding: A next-generation sequencing approach for biomonitoring applications using river benthos. *PLoS ONE*, *6*(4), 20–40. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017497

Huerta, A. (2020). *Aplicaciones de las técnicas de ADN Ambiental en las ciencas ambientalesTrabajo de Grado*. https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/22437/AMADOR%20HUERTA%20TFG%20ADN%20AMBIENTAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huerta, A., & Centeno, A. (2018). *Aplicaciones de las técnicas de ADN ambiental al estudio y conservación de los recursos naturales*. Universidad de Cadiz. https://doi.org/https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero40/ArticuloDestacado-01.pdf

Jois Vanesa Carrion Pilco Asesores, B., & Steffany Calderón Ríos Danilo Edson Bustamante Mostajo, M. (2023). *Análisis del uso del DNA BARCODING en el Perú en la diversidad de bioindicadores ambientales de CHACHAPOYAS, AMAZONAS Tesis de grado*. https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/3211/Carrion%20Pilco%20Jois%20Vanesa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Kelly, H., Benavente, Y., Pavon, M. A., De Sanjose, S., Mayaud, P., & Lorincz, A. T. (2019). Performance of DNA methylation assays for detection of high-grade cervical intraepithelial neoplasia (CIN2+): a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Cancer*, *121*(11), 954–965. https://doi.org/10.1038/s41416-019-0593-4

Morales, K. (2021). *Uso de diatomeas como bioindicadoras de calidad de agua en la zona ganadera del río Tarqui. Tesis de grado*. https://dspace.ucacue.edu.ec/bitstream/ucacue/10944/1/MORALES%20CASTRO%20KEVIN%20FERNANDO.pdf

Nivelo, A. (2022). *Desarrollo de una base de datos de macroinvertebrados acuáticos para futuros estudios de ADN ambiental en regiones amazónicas del Ecuador tesis de obtencion de biológo*. https://doi.org/http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/53160/1/T-111298%20NIVELO%20-%20ROMO.pdf

Nuñez, D. (2022). *Aplicación de ADN ambiental en áreas protegidas: estimando la biodiversidad acuática en Pantanos de Villa, tesis para la obtención del titulo de bióloga*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://doi.org/https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/18675/Nu%c3%b1ez_rd.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Organizacion de sanidad mundial. (2022). *Uso de los métodos de ADN ambiental (ADNA) para la detección de las enfermedades de los animales acuáticos de la lista de la OMSA*.

Padilla-García, C. Y., Camacho-Sánchez, F. Y., & Reyes-López, M. Á. (2021). Metabarcoding de DNA ambiental: un enfoque para el seguimiento de la biodiversidad. *CienciaUAT*, 136–149. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1509

Red del Agua UNAM. (2022). El uso del ADN ambiental en el estudio de cuerpos de agua: una propuesta para su implementación en México. *Publicación Digital de La Red Del Agua UNAM*, *1*(1), 19–30. https://doi.org/2022_CruzCanoetal.eDNApropuesta_EdicionEspecial_TerceraDiasporaHidrica%20(2).pdf

Rodríguez, A. (2020). *Aplicación de indicadores biológicos en cursos de agua de la ecorregión Pampa*. Eudeba. https://doi.org/http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/150958/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sarkis-Onofre, R., Catalá-López, F., Aromataris, E., & Lockwood, C. (2021). How to properly use the PRISMA Statement. In *Systematic Reviews* (Vol. 10, Issue 1). BioMed Central Ltd. https://doi.org/10.1186/s13643-021-01671-z

SGS. (2022). *ADN Ambiental*. Perú. https://doi.org/https://www.sgs.com/es-pe/noticias/2023/03/como-se-realiza-un-adn-ambiental

Stat, M., John, J., DiBattista, J. D., Newman, S. J., Bunce, M., & Harvey, E. S. (2019). Combined use of eDNA metabarcoding and video surveillance for the assessment of fish biodiversity. *Conservation Biology*, *33*(1), 196–205. https://doi.org/10.1111/cobi.13183

Taberlet, P., Coissac, E., Pompanon, F., Brochmann, C., & Willerslev, E. (2012). Hacia la evaluación de la biodiversidad de próxima generación mediante metabarcode de ADN. *Molecular Ecology*, *21*(8), 10–50. https://doi.org/https://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v16n1/2007-7858-cuat-16-01-136.pdf

Terneus-Jácome, E., & Yánez, P. (2018). Fundamental principles on water quality, the use of aquatic bioindicators and fluvial ecological restoration in Ecuador. *Granja*, *27*(1), 36–50. https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.03

Thomsen, P. F., & Willerslev, E. (2015). Environmental DNA - An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. In *Biological Conservation* (Vol. 183, pp. 4–18). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.019

Valentini, A., Taberlet, P., Miaud, C., Civade, R., Herder, J., Thomsen, P. F., Bellemain, E., Besnard, A., Coissac, E., & Boyer, F. (2015). Next-generation monitoring of aquatic biodiversity using

environmental DNA metabarcoding To cite this version. *Molecular Ecology*, *25*(4), 929–942. https://doi.org/10.1111/mec.13428ï

ANEXOS

1.1.Marco teórico

El ADN ambiental, también conocido como eDNA (environmental DNA), se refiere al ADN presente en el medio ambiente, en este caso, en el agua. Los organismos acuáticos liberan constantemente fragmentos de ADN a través de sus excreciones, desechos y restos celulares, que pueden ser detectados y analizados. El ADN ambiental ofrece una ventana única para investigar la diversidad biológica y la presencia de organismos en los ecosistemas acuáticos (Fernández, 2019).

Métodos de muestreo y extracción de ADN ambiental, el muestreo de ADN ambiental implica la recolección de muestras de agua de diferentes cuerpos acuáticos, como ríos, lagos, estanques y océanos, las técnicas de extracción de ADN se utilizan para aislar y purificar el ADN presente en estas muestras, por lo que los métodos de extracción pueden variar, pero generalmente involucran pasos de filtración, concentración y purificación del ADN (Huerta & Centeno, 2018).

Técnicas de detección y análisis de ADN ambienta, existen diferentes enfoques para detectar y analizar el ADN ambiental. La técnica más utilizada es la secuenciación de nueva generación (NGS, por sus siglas en inglés), que permite la identificación de secuencias de ADN presentes en las muestras, otras técnicas incluyen la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés), que amplifica y detecta regiones específicas de ADN y el uso de sondas de hibridación para identificar especies específicas (Thomsen & Willerslev, 2015).

Aplicaciones del ADN ambiental en el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua El uso del ADN ambiental en el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua ha demostrado ser prometedor en diversos estudios, por cuanto permite la detección y seguimiento de especies acuáticas, como peces, macroinvertebrados y anfibios, sin la necesidad de capturar o observar directamente a los organismos. Además, el análisis del ADN ambiental puede proporcionar información sobre la diversidad de especies, la presencia de especies invasoras y los impactos ambientales en los ecosistemas acuáticos (Gómez Ochoa de Alda *et al*., 2019).

Ventajas y limitaciones del uso del ADN ambiental, la capacidad para proporcionar datos a

largo plazo y su potencial para identificar cambios en la composición de las comunidades biológicas. Sin embargo, también existen algunas limitaciones a considerar, como la posible degradación del ADN en el medio ambiente, la contaminación cruzada de muestras durante el proceso de muestreo y el desafío de distinguir el ADN ambiental activo del ADN residual (Organizacion de sanidad mundial, 2022).

Evaluación de la calidad del agua a través del ADN ambiental, el análisis del ADN ambiental ofrece una forma novedosa de evaluar la calidad del agua a través de bioindicadores. Los bioindicadores son organismos o especies que responden a cambios en el entorno y pueden utilizarse como indicadores de la salud y la calidad del agua. El ADN ambiental permite detectar y cuantificar la presencia de bioindicadores en muestras de agua, lo que proporciona información valiosa sobre el estado de los ecosistemas acuáticos y la efectividad de las medidas de conservación y gestión implementadas (Fernández Fernández, 2019).

El uso del ADN ambiental como herramienta para el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua ofrece grandes posibilidades para el avance de la investigación en este campo. Esta tecnología proporciona información detallada sobre la diversidad biológica acuática y permite una evaluación precisa y no invasiva de la calidad del agua, a pesar de algunas limitaciones, el ADN ambiental ha demostrado ser una herramienta prometedora en la identificación de cambios en los ecosistemas acuáticos y en el seguimiento de la eficacia de las medidas de conservación y gestión implementadas. Con futuros avances tecnológicos y un mayor desarrollo metodológico, el ADN ambiental tiene el potencial de convertirse en una herramienta estándar en el monitoreo de bioindicadores de calidad del agua (Organización de sanidad mundial, 2022).

El monitoreo de la calidad del agua es crucial para el mantenimiento de ecosistemas acuáticos saludables y para proteger la salud humana. Tradicionalmente, se ha basado en análisis físico-químicos y observación directa de indicadores biológicos. Sin embargo, el surgimiento de la tecnología del ADN ambiental ha abierto nuevas posibilidades en este campo.

El ADN ambiental, también conocido como eDNA, se refiere al ADN que los organismos liberan en el medio ambiente a través de excreciones, desechos o restos celulares. Esta tecnología permite detectar y analizar el ADN presente en muestras de agua, sin necesidad de capturar o observar directamente a los organismos, el análisis del ADN ambiental proporciona información sobre la diversidad de especies presentes en el agua y puede servir como un indicador de la calidad del ecosistema acuático (Organización de sanidad mundial, 2022).

Uno de los primeros estudios destacados en el campo del ADN ambiental fue realizado por (Ficetola & Pompannony, 2008), quienes utilizaron esta tecnología para detectar y cuantificar la

presencia de anfibios en estanques temporales, desde entonces, la investigación en este campo ha crecido rápidamente, abarcando una amplia gama de organismos acuáticos y tipos de cuerpos de agua.

En este contexto autores como (Thomsen & Willerslev, 2015) que son considerados pioneros en el campo del ADN ambiental. Han realizado numerosos estudios sobre la aplicación de esta tecnología en la detección de especies acuáticas y su uso como bioindicadores de calidad del agua. Sus investigaciones han demostrado la viabilidad y eficacia del ADN ambiental para evaluar la biodiversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos.

De la misma manera, (Hajibabaei *et al*., 2011) han contribuido significativamente al desarrollo de métodos y técnicas relacionados con el análisis del ADN ambiental. Su investigación se ha centrado en la aplicación de esta tecnología en el monitoreo de la diversidad biológica en diferentes entornos acuáticos. Han demostrado la utilidad del ADN ambiental para la detección de especies raras, invasoras y en peligro de extinción.

(Taberlet *et al*., 2012)son reconocidos por su trabajo en el campo de la genética de la conservación y el uso del ADN ambiental como herramienta para la evaluación de la biodiversidad, sus estudios se han centrado en el análisis de muestras de ADN ambiental para la detección de especies en el agua, lo que ha permitido identificar patrones de distribución, evaluar la efectividad de medidas de conservación y monitorear cambios en las comunidades biológicas acuáticas.

Kelly *et al*. (2019) han investigado ampliamente la utilidad del ADN ambiental en el monitoreo de la calidad del agua. Sus estudios se han centrado en el análisis de muestras de ADN ambiental para identificar y cuantificar la presencia de especies acuáticas, lo que ha permitido evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos y detectar posibles impactos ambientales.

Siguiendo la línea de investigación relacionada con los bioindicadores de calidad del agua, Deiner *et al*. (2021) han trabajado en el desarrollo de enfoques basados en el ADN ambiental para la evaluación de la calidad del agua dulce, sus investigaciones han demostrado que el análisis del ADN ambiental puede ser utilizado para identificar la presencia de especies indicadoras de la calidad del agua, como macroinvertebrados y peces sensibles a la contaminación.

En el campo de la ecología molecular, Valentini *et al*. (2015) han investigado la aplicabilidad del ADN ambiental en la detección de organismos acuáticos y la evaluación de la biodiversidad en diferentes cuerpos de agua. Sus estudios han demostrado la capacidad del ADN ambiental

para proporcionar información precisa y detallada sobre la composición de las comunidades biológicas acuáticas.

A medida que la tecnología del ADN ambiental ha avanzado, se han desarrollado nuevas metodologías y enfoques para mejorar su aplicabilidad en el monitoreo de la calidad del agua, por ejemplo, la metagenómica ambiental ha surgido como una técnica prometedora que permite analizar y secuenciar todo el ADN presente en una muestra ambiental, lo que proporciona una visión más completa de la diversidad biológica y de los procesos ecológicos.

Un estudio realizado por Stat *et al*. (2019) en el cual demostró la utilidad de la metagenómica ambiental en el monitoreo de la calidad del agua. Utilizando esta técnica, los investigadores fueron capaces de identificar microorganismos patógenos y contaminantes químicos en muestras de agua, lo que permitió una evaluación más precisa de los riesgos para la salud humana y la calidad del ecosistema acuático.

En términos de aplicaciones prácticas, el ADN ambiental ha demostrado ser una herramienta valiosa en la detección temprana de especies invasoras y en la evaluación de la efectividad de medidas de control. Un estudio realizado por Evans *et al*. (2016) que utilizó el ADN ambiental para identificar la presencia de una especie invasora de carpa en ríos y lagos, lo que permitió una respuesta rápida para prevenir la propagación y minimizar los impactos negativos en los ecosistemas acuáticos nativos.

En el estudio de Cheaib *et al*. (2018), evalúan la aplicabilidad del ADN ambiental para el monitoreo de la calidad del agua en ríos contaminados. Utilizando técnicas de secuenciación de próxima generación, identificaron y cuantificaron las especies acuáticas presentes en las muestras de agua, los resultados mostraron una correlación significativa entre la diversidad de especies detectadas mediante ADN ambiental y la calidad del agua determinada por métodos tradicionales, este estudio destaca la capacidad del ADN ambiental para detectar cambios en la biodiversidad acuática en respuesta a la contaminación.

Sin embargo, a pesar de los avances y beneficios potenciales, existen desafíos que deben abordarse para mejorar la implementación y la efectividad del ADN ambiental en el monitoreo de la calidad del agua. Uno de los desafíos clave es la estandarización de los métodos de muestreo, extracción de ADN y análisis bioinformático, la falta de protocolos estandarizados puede dificultar la comparabilidad de los resultados entre estudios y limitar la capacidad de establecer líneas de base y tendencias a largo plazo.

La teoría del ADN ambiental, también conocida como eDNA (Environmental DNA), se basa en la premisa de que los organismos acuáticos liberan constantemente fragmentos de su ADN en el medio ambiente, como en el agua, sedimentos o suelo, estos fragmentos de ADN provienen de excreciones, células muertas, mucus y otros materiales biológicos que se liberan en el agua que a través del análisis de muestras ambientales, como agua o sedimentos, es posible detectar y analizar estos fragmentos de ADN para inferir la presencia y abundancia de especies presentes en un área determinada, sin necesidad de observar directamente a los organismos (Guadalupe & Bertha, 2018),

El proceso de detección de eDNA implica la extracción y análisis de ADN presente en muestras ambientales, para lo que se utilizan técnicas avanzadas de secuenciación de ADN de próxima generación para identificar y cuantificar las secuencias de ADN de diferentes organismos presentes en la muestra, estas secuencias de ADN se comparan con bases de datos genéticas para identificar a qué especies corresponden; de esta manera, el eDNA proporciona una herramienta no invasiva y eficiente para el monitoreo de la biodiversidad en entornos acuáticos (Padilla-García *et al*., 2021)

Esta teoría ha revolucionado el campo de la ecología acuática y ha abierto nuevas posibilidades para el estudio y monitoreo de los ecosistemas acuáticos, al eliminar la necesidad de capturar u observar directamente a los organismos, el eDNA permite obtener información sobre especies que pueden ser difíciles de detectar mediante métodos tradicionales de muestreo.

En este contexto, otro tema importante es la correlación ADN-biodiversidad, que se basa en la relación entre la información genética presente en el ADN y la diversidad de especies en un ecosistema, por lo que sugiere que la diversidad de especies en un área determinada puede ser inferida o correlacionada con la información genética obtenida a partir de muestras ambientales de ADN (Gonzalo Gajardo, 2009).

La principal premisa, es que la variabilidad genética de las diferentes especies presentes en un ecosistema se refleja en el ADN ambiental que liberan en el medio, a través del análisis de este ADN ambiental, es posible detectar y secuenciar diferentes fragmentos genéticos que corresponden a diversas especies presentes en el área estudiada; de esta manera, la correlación entre la diversidad de especies y la información genética del ADN se convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo y evaluación de la biodiversidad (Gonzalo Gajardo, 2009)

Para aplicar la teoría de la correlación ADN-biodiversidad, se recolectan muestras ambientales, como agua, suelo o sedimentos, y se extrae el ADN presente en ellas, posteriormente, se utilizan técnicas de secuenciación de ADN para identificar y analizar las

secuencias genéticas obtenidas en las muestras, estas secuencias de ADN se comparan con bases de datos genéticas existentes para identificar a qué especies corresponden.