

Análisis de la calidad del agua de los arrecifes de coral en Punta Sal, Honduras.

María Elena Perdomo^{1,3}; Gabriela Cardenas^{1,4}; María Alejandra Ordoñez^{1,5}, María de Lourdes Jimenez-Badillo^{2,6}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras,

²Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías Universidad Veracruzana, Veracruz México

maria_perdomo@unitec.edu ³ gabriela.cardenas@unitec.edu ⁴ mariameonez@unitec.edu ⁵ ljimenez@uv.m ⁶

Abstract- Coral reefs, essential for marine biodiversity, face threats such as pollution, climate change and natural phenomena. This paper analyzes water quality in Tela Bay, Atlantida, Honduras, where Capiro Reef is located. For this purpose, sampling was carried out in three zones (A, B and C) to evaluate water quality at different distances from the coast. The parameters evaluated included: pH, total nitrogen, total phosphorus, dissolved oxygen, turbidity, chemical oxygen demand and fecal coliforms. The results indicated that point A, near the Lancetilla River, has a marginal quality index of 63.1, i.e., frequent deterioration. At points further away (B and C), the index improves slightly, but still reveals the presence of contaminants, such as nitrogen and chemical oxygen demand, which exceed the established limits. The analysis details how factors such as the presence of excessive nutrients, pathogens and ocean acidification negatively affect the health of these ecosystems.

Keywords- water quality, reef, reefs, bleaching

Análisis de la calidad del agua de los arrecifes de coral en Punta Sal, Honduras.

María Elena Perdomo^{1,3}; Gabriela Cardenas^{1,4}; María Alejandra Ordoñez^{1,5}, María de Lourdes Jimenez-Badillo^{2,6}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamérica (UNITEC), Honduras,

² Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías Universidad Veracruzana, Veracruz México

³ maria_perdomo@unitec.edu ⁴ gabriela.cardenas@unitec.edu ⁵ mariameonez@unitec.edu ⁶ [ljjimenez@uv.m](mailto:ljjimenez@uv.mx)

Resumen— Los arrecifes de coral, esenciales para la biodiversidad marina, se enfrentan a amenazas como la contaminación, el cambio climático y los fenómenos naturales. Este trabajo analiza la calidad del agua en la Bahía de Tela, Atlántida, Honduras, donde se encuentra el Arrecife Capiro. Para ello se realizó un muestreo en tres zonas (A, B y C) para evaluar la calidad del agua a diferentes distancias de la costa. Los parámetros evaluados incluyeron: pH, nitrógeno total, fósforo total, oxígeno disuelto, turbidez, demanda química de oxígeno y coliformes fecales. Los resultados indicaron que el punto A, próximo al río Lancetilla, presenta un índice de calidad marginal con 63,1, esto es, deterioro frecuente. En los puntos más alejados (B y C), la índice mejora ligeramente, pero sigue revelando la presencia de contaminantes, como el nitrógeno y la demanda química de oxígeno, que superan los límites establecidos. El análisis detalla cómo factores como la presencia de nutrientes excesivos, patógenos y la acidificación de los océanos afectan negativamente a la salud de estos ecosistemas.

Palabras clave- calidad del agua, arrecifes, blanqueamiento

I. INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral, verdaderos tesoros de biodiversidad marina son ecosistemas vitales que albergan una amplia variedad de especies marinas y contribuyen significativamente a la salud del océano. Sin embargo, estos ecosistemas únicos enfrentan numerosas amenazas, entre las que se encuentra la contaminación del agua. El análisis de la calidad del agua en los arrecifes de coral se convierte en una tarea crucial para comprender y abordar los desafíos que enfrentan.

En este informe, se presenta un estudio exhaustivo sobre la calidad del agua de los arrecifes de coral, abordando aspectos clave como la contaminación por nutrientes, la presencia de agentes patógenos, la acidificación oceánica y otros factores que afectan la salud de estos delicados ecosistemas. Se examinan las metodologías utilizadas, los resultados obtenidos y se ofrecen recomendaciones para la conservación y protección de estos valiosos recursos naturales.

A través de este análisis, se pretende contribuir al conocimiento científico sobre la calidad del agua en los arrecifes de coral, proporcionando información relevante para la toma de decisiones en políticas de conservación marina y acciones destinadas a mitigar los impactos negativos que amenazan la supervivencia de estos impresionantes ecosistemas submarinos. Por lo que el objetivo de este estudio

es analizar la calidad del agua de los arrecifes de coral en Tela, Atlántida.

II. ESTADO DEL ARTE

Los corales son animales acuáticos invertebrados de los *Anthozoa* clase del filo *Cnidaria*. Los arrecifes de coral son diversos ecosistemas submarinos construidos por pólipos de coral pétreo que producen exoesqueletos de carbonato de calcio para fortalecer y proteger los pólipos individuales [1]. El Arrecife Mesoamericano (MAR) es la barrera de coral más extensa compleja en las Américas como lo muestra la figura 1, ubicado en el oeste del Mar Caribe [2].

Las temperaturas elevadas están impulsando eventos de blanqueamiento cada vez más frecuentes que pueden conducir a la pérdida tanto de la cubierta de coral como de la complejidad estructural de los arrecifes. Sigue habiendo una variabilidad considerable en la distribución de las amenazas y en la capacidad de los arrecifes para sobrevivir o recuperarse de esas perturbaciones [3]. La pérdida tanto de la cubierta de coral como de la complejidad estructural de los arrecifes es una amenaza seria para estos ecosistemas marinos.

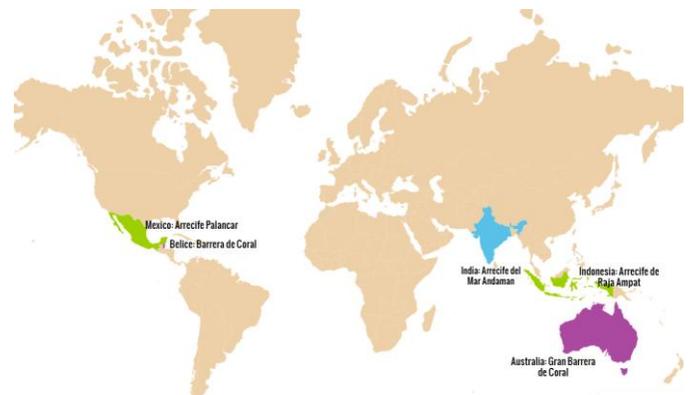


Fig. 1 Arrecifes de coral más importantes del mundo.

El control de la temperatura y la humedad del aire son aspectos esenciales en los laboratorios clínicos modernos. El rango aceptable de temperaturas suele estar entre 20 y 25 °C, con una humedad en el rango del 30 al 50% [4]. Las temperaturas de los océanos están aumentando, estos aumentos

de temperatura tienen un amplio impacto en los organismos marinos, como cambios en la distribución y abundancia de especies [5]. La Fig. 2 muestra la escala de PH, en el cual indica la cantidad presente de iones de hidrogeno.

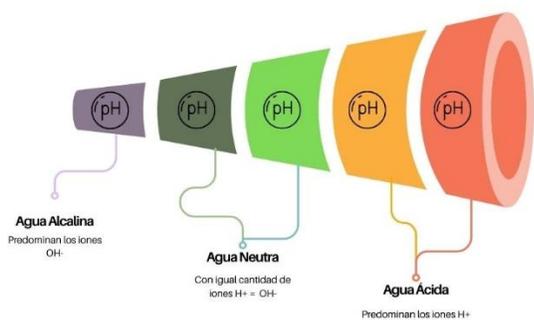


Fig. 2 Escala de PH

Los cambios en la calidad del agua, como el aumento de los nutrientes disueltos y los sedimentos finos asociados con los cambios en el uso de la tierra, se han relacionado con aumentos en la densidad de las algas [6]. Sin embargo, los corales pueden proporcionar su propia defensa antioxidante a dicho estrés mediante la utilización de las sustancias de azufre *dimetilsulfoniopropionato* (DMSP), *dimetilsulfuro* (DMS) y *dimetilsulfóxido* (DMSO) contenidos en el coral o producidos por él [7]. Dada esta importancia, la ruptura de la simbiosis coral-alga durante el blanqueamiento de los corales puede tener consecuencias devastadoras para los ecosistemas de los arrecifes de coral, [8].

La consecuencia irreversible de la desaparición de los arrecifes de coral sería sumamente devastadora. A pesar de ocupar solo el 0,2% del lecho marino, estos arrecifes son hogar de al menos el 25% de todas las especies marinas. Desempeñan un papel vital como hábitat y representan una fuente esencial de proteínas.

Décadas de investigación han sugerido oxidantes, incluyendo especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS y RNS, respectivamente), como fundamentales en la fisiología del blanqueamiento de los corales [9]. Uno de los impactos más visibles del cambio climático actual es el blanqueamiento catastrófico y la muerte de los corales en los arrecifes de todo el mundo [10].

Actividades económicas que se visualizan en la figura 3 como la pesca comercial y recreativa, la recreación basada en la naturaleza, el turismo, la educación y la investigación científica dependen sustancial o parcialmente de la comprensión y protección de la salud de los corales [11]. Los corales no solo son fundamentales para la biodiversidad marina, sino que también desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de los ecosistemas costeros y la sostenibilidad de ciertas industrias. Refleja de manera acertada la conexión vital entre la salud de los corales y varias actividades económicas y sociales.

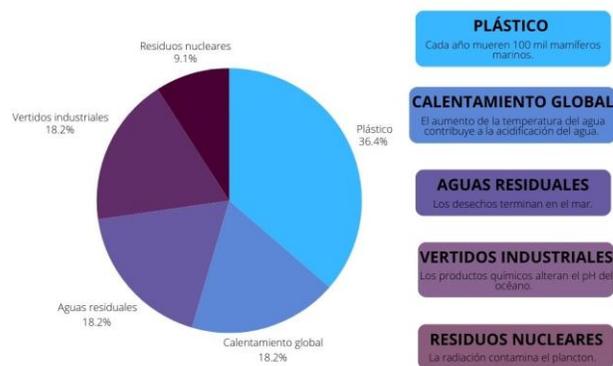


Fig. 3 Principales causas de la contaminación oceánica

Muchos arrecifes de coral costeros ya han sido degradados por siglos de sobrepesca y contaminación, y el cambio climático antropogénico está ejerciendo más presión, incluso en arrecifes remotos donde las presiones locales son bajas o inexistentes [12].

Los arrecifes de coral son una víctima de un clima más cálido y una advertencia temprana de lo que podría seguir. Pero los océanos son lugares complicados, y es difícil predecir cómo, dónde y cuándo podrían surgir más alteraciones, en otros ecosistemas marinos, [13].

La mala calidad del agua puede afectar directa e indirectamente a los arrecifes de coral a través de una variedad de procesos, disminuyendo en última instancia su capacidad para resistir y recuperarse de los ciclos de perturbación [15]. La reducción de la calidad del agua puede ser una de las causas principales de la pérdida de arrecifes de coral.

Los contaminantes son componentes importantes de la calidad del agua, puede causar reducciones en la función reproductiva de los corales, el reclutamiento, las tasas de crecimiento y la supervivencia de ambas larvas y adultos, al tiempo que aumenta la susceptibilidad a la enfermedad [16]. Es necesario rastrear las causas de la mala calidad del agua hasta el cambio de uso de la tierra para orientar la gestión de las cuencas hidrográficas a la gestión de las zonas costeras [17].

La identificación de los contaminantes como elementos clave en la calidad del agua y su impacto negativo en la función reproductiva de los corales, el reclutamiento, las tasas de crecimiento y la supervivencia tanto de larvas como de adultos, resalta la diversidad de impactos que la contaminación puede tener en los arrecifes de coral. Además, la mención de que la contaminación también aumenta la susceptibilidad a enfermedades enfatiza cómo los efectos negativos pueden estar interrelacionados.

El evento de blanqueamiento masivo de 2016 afectó a los arrecifes de coral de todo el mundo, con impactos catastróficos reportados en el Mar Rojo, el Océano Índico central, en el Pacífico y en el Caribe [18]. El patrón de escala

local (arrecife individual) de blanqueamiento recurrente en la Gran Barrera de Coral también revela la tendencia al aumento de la severidad y la erosión de los posibles refugios espaciales [19] [20].

Los corales que sobreviven a estos eventos extremos deben recuperarse rápidamente si quieren resistir eventos posteriores, y la supervivencia a largo plazo frente al aumento de las temperaturas oceánicas puede depender de la capacidad de recuperación y las ganancias de aclimatación en la tolerancia al calor durante la vida útil de un individuo. [8]

Se destaca la importancia de la resiliencia y la capacidad de recuperación de los corales frente a eventos extremos, especialmente aquellos relacionados con el aumento de las temperaturas oceánicas causadas por el cambio climático.

III. METODOLOGIA

La metodología que se describe a continuación muestra el proceso sistemático utilizado para recopilar, analizar y presentar la información del estudio de la calidad del agua. El enfoque utilizado en este análisis es el cuantitativo debido a que es fundamental para comprender el objetivo de proteger estos ecosistemas vitales. Las variables de investigación utilizadas divididas entre una variable dependiente y seis variables independientes se presentan en la figura 4.

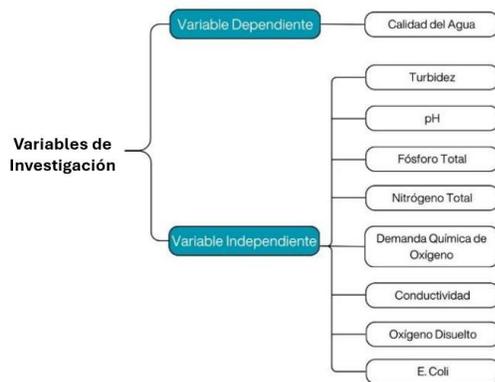


Fig. 4 Variables de investigación del estudio de la calidad del agua de los arrecifes de coral.

El diseño de investigación se identificó como tipo experimental debido a que su enfoque primordial es examinar el impacto de las variables independientes en la variable dependiente en condiciones controladas. Sin embargo, se considera también cuasiexperimental, ya que implica la evaluación de la relación entre las actividades antropogénicas y la calidad del agua de los arrecifes de coral.

La presente investigación se enfoca en el estudio de la calidad del agua de los arrecifes de coral empleando el (Índice de calidad del agua desarrollado por el consejo canadiense de ministros del medio ambiente) ICA – CCME. La metodología de estudio se muestra en la siguiente Fig. 5.

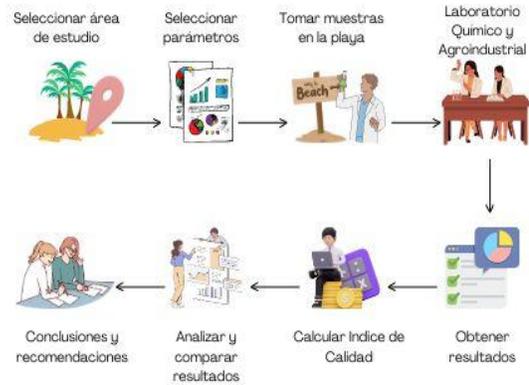


Fig. 5 Metodología de estudio para evaluar la calidad del agua de los arrecifes de coral.

El estudio se realizó en la ciudad de Tela, ubicado en el departamento de Atlántida, en donde su principal playa es atravesada por el río Lancetilla. El río Lancetilla divide a la ciudad de Tela en dos sectores, Tela viejo (sector Este) y Tela nuevo (sector Oeste). La playa de Tela cuenta con una superficie de 1,163.3 km² (449.2 mi²).

Con el propósito de obtener información detallada sobre el estado de la calidad del agua de los arrecifes de coral ubicada en las playas de Tela, fue dividida geográficamente en tres zonas: Punto A, Punto B y Punto C. Estas tres zonas fueron seleccionadas por su mayor cantidad de arrecifes de coral. En la Fig. 6 se muestran las ubicaciones en donde se tomaron las muestras dando como resultado la Punto A siendo en la orilla del río Lancetilla, Punto B a tres kilómetros de la orilla y Punto C a seis kilómetros de la orilla.

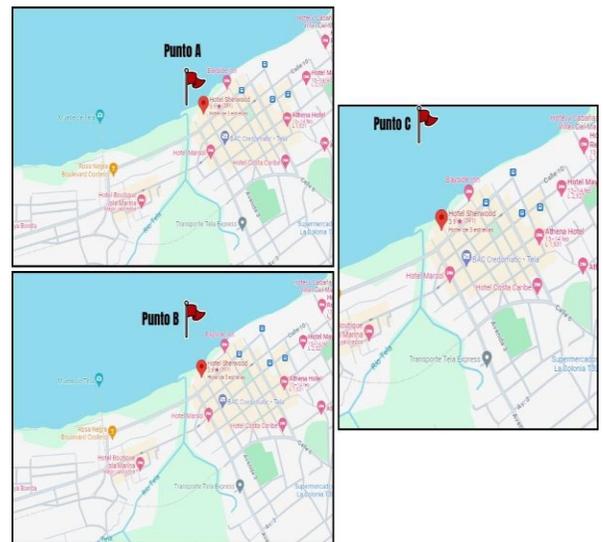


Fig. 6 Mapa de la playa de Tela en el año 2024.

Las muestras del agua se obtuvieron directamente en cada sitio y se conservaron en hieleras para que su uso sea más largo y eficiente, seguidamente se transportaron al Laboratorio de Química de la Universidad Tecnológica Centroamericana

en San Pedro Sula y al Laboratorio Agroindustrial de Centroamérica.

Se realizaron diferentes pruebas de laboratorio para los parámetros de calidad del agua considerando los componentes necesarios para la evaluación del índice de calidad y tomando en cuenta los parámetros en otros estudios [21]. Los parámetros que se analizaron en el Laboratorio de Química en la universidad fueron divididos entre físicos, químicos y biológicos de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2
PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS ARRECIFES DE CORAL.

CLASIFICACIÓN	PARÁMETRO
FÍSICOS	Turbidez
	Nitrógeno Total
	Fósforo Total
QUÍMICOS	Demanda Química de Oxígeno
	Oxígeno Disuelto
	Ph
BIOLÓGICOS	E. Coli

Se utilizaron índices de calidad de agua que consolidan múltiples parámetros en un solo valor, lo que simplifica la interpretación de los resultados obtenidos. Para la realización de esta investigación se utilizó el Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME – WQI) cuyo proceso empleado se describe en la Fig. 7.

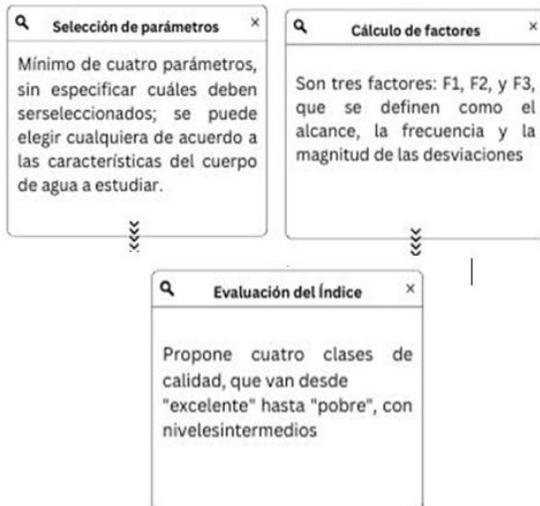


Fig. 7 Metodología general del CCME-WQI

Tabla 3

COMPONENTES DEL CCME-WQI

Denotación	F1	F2	F3
Componente	Alcance	Frecuencia	Amplitud
Significado	No cumplen el nivel deseado	Regularidad con la que se incumple el nivel deseado	Cantidad de veces que no se alcanza el nivel deseado

Cálculo del índice de Calidad del Agua CCME

$$CCME - WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right) \quad (1)$$

Los componentes anteriormente dados pueden ser calculados utilizando las siguientes ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente:

Cálculo del alcance para el CCME-WQI

$$(F_1) = \left[\frac{n_{nmo}}{n_{par}} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Cálculo de la Frecuencia para el CCME.WQI

$$(F_2) = \left[\frac{n_{fail}}{n_{total}} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Cálculo de la Amplitud para el CCME-WQI

$$(F_3) = \sqrt{\frac{n_{nse}}{0.01 \cdot n_{nse} + 0.01}} \quad (4)$$

- n_{nmo} representa el número de parámetros que no alcanzaron el objetivo
- n_{par} representa el número total de parámetros
- n_{fail} representa el número de pruebas que no tuvieron éxito
- n_{total} representa el número total de pruebas realizadas
- n_{nse} representa la suma normalizada de excursiones, o el número de pruebas individuales que no cumplen con los objetivos

El término "excursión" hace referencia a la concentración de un elemento donde puede ser mayor o menor que el valor necesario.

Cálculo de la suma normalizada de excursiones del CCME-WQI

$$n_{nse} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n excursion_i}{n_{test}} \right] \quad (5)$$

La excursión puede ser calculada de dos diferentes formas, dependiendo de la situación: la Ecuación 6 se aplica cuando se pretende que el valor de la prueba supere el objetivo, mientras que la Ecuación 7 se emplea cuando se requiere que el valor de la prueba no sea menor que el objetivo. Las fórmulas respectivas se muestran a continuación:

Formula en el caso que el valor debe ser superior al nivel deseado

$$excursion_i = \left[\frac{x_{fail,i}}{y_{obj}} \right] - 1 \quad (6)$$

Formula en el caso que el valor dado no deba ser inferior al nivel deseado

$$excursion_i = \left[\frac{y_{obj}}{x_{fail,i}} \right] - 1 \quad (7)$$

Con base en los resultados del laboratorio obtenidos, se determinó el estado de la calidad del agua con el índice CCME – WQI considerando un rango de 0 a 100, de acuerdo con la Tabla 4.

TABLA 4
CALIFICACIÓN DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AGUA SEGÚN LA METODOLOGÍA DE CCME-WQI.

Valor del Índice	Estado de Calidad	Grado de Deterioro
96 – 100	Excelente	Nulo
80 – 84	Bueno	Mínimo
65 – 79	Aceptable	Ocasional
45 – 64	Marginal	Frecuente
0 - 44	Pobre	Siempre

Se llevó a cabo una evaluación fisicoquímica y microbiológica en los tres puntos dividido en Punto A (Orilla del Rio Lancetilla), Punto B (a 3 km del Rio Lancetilla) y Punto C (a 6 km del Rio Lancetilla) de la playa publica de la ciudad de Tela, Atlántida en temporadas diferentes. A lo largo de estos resultados se presentan una serie de gráficos comparativos que ilustran la evolución de la calidad del agua. Los datos actuales se comparan con los resultados obtenidos en mediciones anteriores, lo que permite identificar tendencias. Para el estudio de la calidad del agua se utilizaron varios parámetros en donde se obtendrá una visión completa,

en la Tabla 5 se muestran los parámetros y los límites de detección que fueron utilizados para dicho

TABLA 5
PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA

Parámetro	Método	Límite de detección
Concentración de Iones de Hidrogeno	Ph indicator strips	8-8.3
Nitrógeno Total	4500A-B-E	0-2 mg/L
Fosforo Total	4500-PD	<0.03 <u>mg/L</u>
Oxígeno Disuelto	4500-OC	5-8 mg/L
Turbidez	2130B	1.8/100 mL
Demanda Química de Oxígeno	5220C	20-100 mg/L
NP Coliformes Fecales	S-9221E	0.1 F.T.U
E. Coli	S-9221E	0.1 F.T.U

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos que se muestran en la tabla 6 proporcionan datos relevantes sobre la calidad del agua en tres puntos (A, B y C), comparados con límites ideales.

En el caso de la temperatura los valores en los puntos A, B y C (29°C, 27.2°C y 27.6°C) están cercanos, pero los puntos B y C están por debajo del rango ideal. Esto podría afectar el metabolismo de los corales, ya que son sensibles a cambios de temperatura. El pH en los tres puntos es inferior al rango óptimo para los corales esto podría afectar la capacidad de los corales para formar sus esqueletos de carbonato de calcio, señalando posible acidificación.

El fósforo total para los puntos A (0.02 mg/L) y C (0.03 mg/L) están en el límite ideal, pero el punto B (0.36 mg/L) está significativamente elevado, lo que puede favorecer un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas que compiten con los corales. Para el Nitrógeno Total, los tres puntos exceden el límite ideal, especialmente los puntos B y C, un alto contenido de nitrógeno también fomenta la proliferación de algas nocivas.

La Demanda Química de Oxígeno se encuentra por debajo del rango ideal, aunque no parece crítico, esto podría reflejar bajos niveles de materia orgánica biodegradable, oxígeno disuelto también está en el límite inferior y podría ser un indicador de estrés para los corales

La Turbidez supera ampliamente el límite ideal en cada punto por lo que una alta turbidez afecta la luz que llega la fonde marino, limitando la fotosíntesis de las zooxantelas que son microalgas unicelulares fotosintéticas esenciales para los corales y para la E-coli y Coliformes Totales, ambos parámetros están dentro de los límites en todos los puntos por lo que no presentan riesgos directos para los corales, pero indican una posible contaminación fecal.

diversas fuentes como descargas de aguas residuales, escorrentía agrícola o urbana.⁵

TABLA 6
RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Punto	Temperatura (°C)	pH	Fósforo Total (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Turbidez (NTU)	E. Coli (NMP/100mL)	Coliformes Totales
A (0 km)	29	7.97	0.29	5.09	11	5.10	25.0	<1.8	<1600000
B (3 km)	27.2	7.68	<0.03	3.96	478	5.30	0.60	<1.8	<1.8
C (6 km)	27.6	7.86	<0.03	3.11	508	4.50	0.78	<1.8	<1.8
Limites	28.3-30	8-8.3	<0.03	0-2 mg/L	20-100 mg/L	5-8 mg/L	NMP: 1.8/100 mL	0.1 f.t.u.	0.1 f.t.u.

A continuación, se presentan una serie de gráficos comparativos que permiten visualizar las diferencias entre los datos actuales y los obtenidos en periodos anteriores. Estos gráficos ofrecen una representación clara y concisa de las tendencias y variaciones en los principales indicadores, facilitando así el análisis de los progresos y las áreas que requieren mejoras. La comparación gráfica permite destacar patrones clave y evaluar el impacto de las estrategias implementadas durante el último periodo.

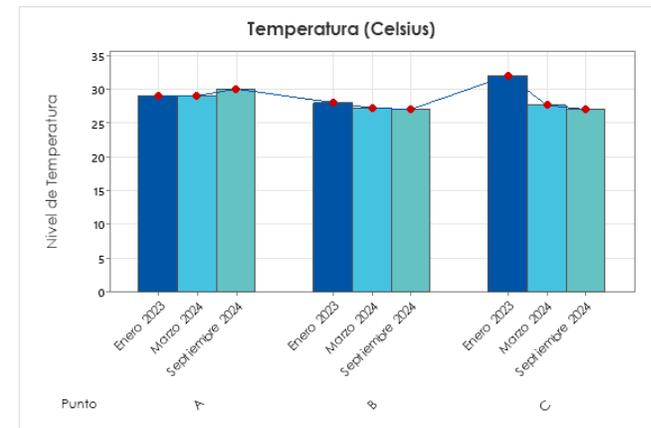


Fig. 9 Comparación de la temperatura en los puntos A, B y C.

En el mes de septiembre los valores de temperatura se encuentran dentro del rango establecido (28.3-30°C), lo que indica que este parámetro no representa una preocupación significativa en términos de calidad del agua. En el Punto A se presenta una variación de temperatura similar a la tendencia general, con un ligero aumento en septiembre. En el Punto B se muestra una tendencia similar al Punto A, pero con temperaturas ligeramente más bajas en general. Y por último el Punto C también sigue la tendencia estacional, pero con una variación más marcada entre los meses de enero y septiembre.

La temperatura es un factor crucial en el análisis de la calidad del agua, ya que, el aumento de la temperatura provoca que los corales expulsen las algas simbióticas (*zooxantelas*) que les proporcionan color y nutrientes. Este fenómeno, conocido como blanqueamiento, debilita a los corales y los vuelve más susceptibles a enfermedades y muerte. a medida que la temperatura aumenta, la capacidad del agua para disolver oxígeno disminuye, lo que representa otro foco de atención.

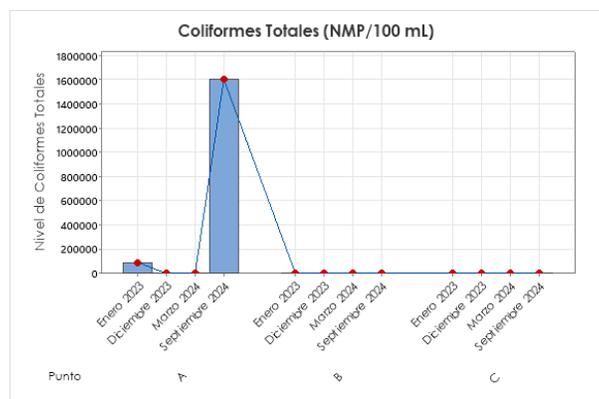


Fig. 8 Comparación de Coliformes Fecales en los puntos A, B y C.

Los coliformes fecales indican la concentración total de bacterias coliformes en el agua. Las bacterias coliformes son un grupo de bacterias que se encuentran en las heces de los animales y pueden ser un indicador de contaminación fecal. Los niveles extremadamente altos de coliformes totales, especialmente en septiembre de 2024 en el punto A, a la orilla del Rio Lancetilla, indican una significativa contaminación fecal en el área. Esta contaminación puede provenir de

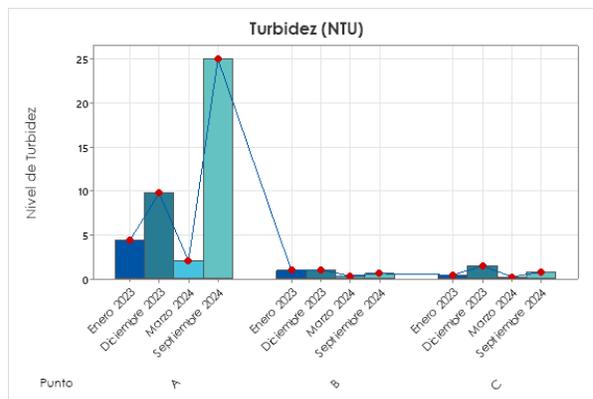


Fig. 10 Comparación de la turbidez en los puntos A, B y C.

La turbidez indica la claridad del agua. Una mayor turbidez indica una mayor cantidad de partículas en suspensión en el agua. Un valor alto de turbidez indica que el agua está turbia debido a la presencia de partículas en suspensión, como sedimentos, arcilla, plancton o materia orgánica. Los valores de turbidez en los puntos B y C superan el límite máximo establecido (5 NTU), lo que indica una alta concentración de partículas en suspensión en el agua, lo que puede afectar la penetración de la luz y la vida acuática.

El Punto A presenta los valores más altos de turbidez, especialmente en septiembre del 2024. Esto sugiere que en este punto hay una fuente de contaminación que introduce una gran cantidad de partículas en suspensión en el agua. En el punto B los valores de turbidez son más bajos que en el punto A, pero aún así se observan picos en algunos momentos del año. En el Punto C los valores de turbidez son los más bajos de los tres puntos, lo que indica que el agua en este punto es generalmente más clara, ya que se encuentra a seis kilómetros de la orilla del Río Lancetilla.

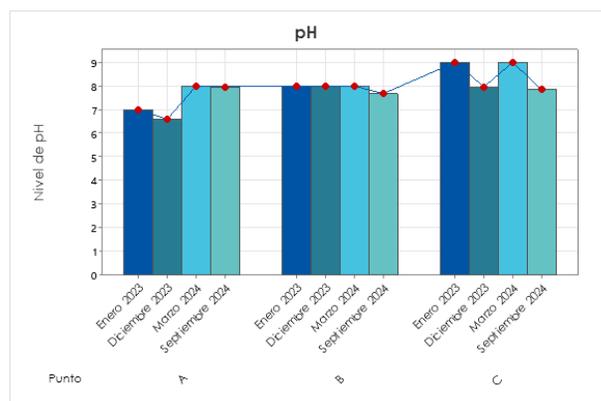


Fig. 11 Comparación del Ph en los puntos A, B y C.

El Ph indica la acidez o alcalinidad del agua, con valores entre 0 y 14. Un pH de 7 se considera neutro, valores inferiores a 7 indican acidez y valores superiores a 7 indican alcalinidad. En el mes de septiembre los valores de pH se encuentran dentro del rango establecido (8-8.3), lo que sugiere que el agua presenta un carácter ligeramente alcalino, lo cual es común en muchos cuerpos de agua naturales.

En la figura 11, los valores de pH se mantienen relativamente estables a lo largo del tiempo y entre los diferentes puntos, fluctuando principalmente entre 7 y 8, lo que indica que el agua en estos puntos es ligeramente alcalina.

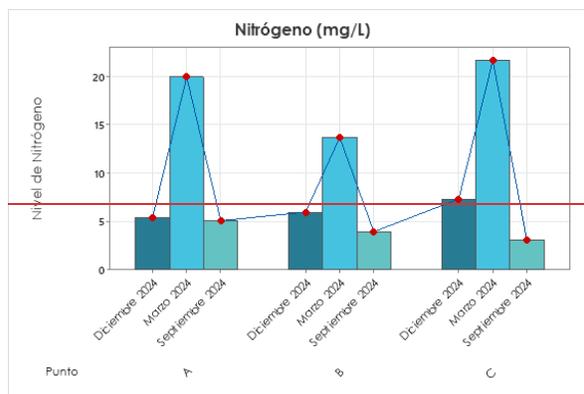


Fig. 12 Comparación del Nitrógeno Total en los puntos A, B y C

El nitrógeno es otro nutriente esencial para el desarrollo de los organismos acuáticos, pero su exceso puede provocar problemas de eutrofización. En el mes de marzo la concentración de nitrógeno total fue alta en el Punto A y C, incluso en C superando el límite permitido. Los niveles de NTK (nitrógeno total Kjeldahl) en los tres puntos medidos se encuentran por encima del rango ideal. Los altos niveles de NTK pueden contribuir a la eutrofización. La eutrofización es un proceso que daña y desequilibra el ecosistema acuático debido al crecimiento excesivo de algas. Cuando estas algas mueren, absorben grandes cantidades de oxígeno, lo que puede tener graves consecuencias para la vida acuática.

En el mes de septiembre los valores de nitrógeno total en los puntos B y C están ligeramente por encima del límite máximo establecido (0-2 mg/L). Aunque no superan significativamente el límite, esta leve elevación podría contribuir a la eutrofización si se combina con otros factores. Punto A: Presenta los valores más altos de nitrógeno en marzo de 2024, seguido de un descenso en septiembre. Esto sugiere que en este punto puede haber una fuente de contaminación que introduce una gran cantidad de nitrógeno en el agua, posiblemente relacionada con actividades agrícolas o descargas de aguas residuales. Punto B: Los valores de nitrógeno también presentan variaciones significativas a lo largo del año, con un pico en marzo de 2024.

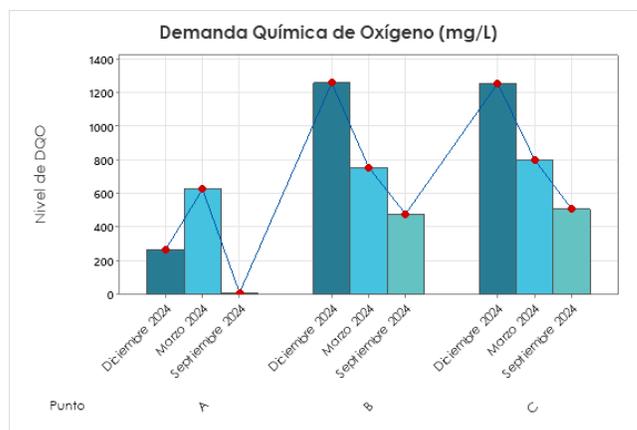


Fig. 13 Comparación del DQO en los puntos A, B y C.

Para el mes de septiembre los valores de DQO en los puntos B y C superan ampliamente el límite máximo establecido (20-100 mg/L), lo que indica una alta carga orgánica en el agua y una elevada contaminación. Se observa una alta variabilidad en los niveles de DQO entre los diferentes puntos y a lo largo del tiempo. Los valores más altos se registran en diciembre del Punto B y C, mientras que los más bajos se encuentran en septiembre. Punto A: Presenta valores de DQO relativamente bajos en comparación con los otros puntos, aunque con un pico en marzo. Punto B y C: Estos puntos presentan los valores más altos de DQO, especialmente en diciembre, lo que indica una alta concentración de materia orgánica en el agua. Una posible causa de los altos niveles de DQO son las lluvias que pueden arrastrar materia orgánica del suelo hacia los cuerpos de agua, aumentando la DQO.

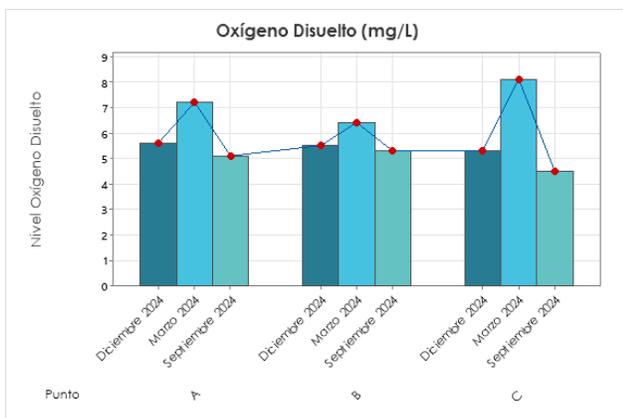


Fig. 14. Comparación del Oxígeno Disuelto en los puntos A, B y C.

Con relación al oxígeno disuelto, como se observa en la figura 14, en el mes de marzo, los tres puntos de recolección de muestras están dentro de los límites ideales para el agua superficial siendo un poco elevado en el Punto C dando como resultado un 8.1 mg/L. En el mes de septiembre el valor de oxígeno disuelto en el punto C está por debajo del límite mínimo establecido (5-8 mg/L), lo que sugiere una deficiencia de oxígeno en el agua. Los valores de oxígeno disuelto se encuentran dentro de un rango que generalmente se considera adecuado para la vida acuática, aunque hay variaciones entre los diferentes puntos y momentos, siendo el valor más alto en el mes de marzo.

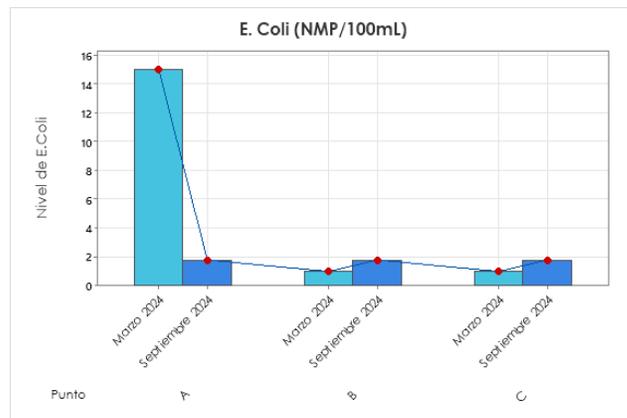


Fig. 15 Comparación del E. Coli en los puntos A, B y C

En el mes de marzo la concentración de E. Coli es baja en los tres puntos, siendo inferior al límite permitido. La figura 15, presenta la variación de los niveles de E. Coli (en número más probable por cada 100 ml de agua, NMP/100ml) en tres puntos diferentes (A, B y C) a lo largo de un año, específicamente en los meses de marzo y septiembre de 2024. E. Coli es una bacteria indicadora de contaminación fecal, es decir, su presencia en el agua sugiere la posible contaminación con heces de animales o humanos. Se observa una alta variabilidad en los niveles de E. Coli entre los diferentes puntos y a lo largo del tiempo. Los valores más altos se registran en marzo en el Punto A, localizado a la orilla del Río Lancetilla.

Los resultados del Índice de Calidad del Agua CCME obtenidos en los tres puntos asociados a los arrecifes de coral, se muestran en la Tabla 7.

TABLA 7
RESULTADOS CCME-WQI

Punto	ICA CCME	Categoría
A (0 km)	41.44	Pobre
B (3 km)	54.47	Marginal
C (6 km)	51.67	Marginal

El Punto A con un valor de 41.44, se clasifica como "Pobre". Esto indica que la calidad del agua en este punto es considerablemente baja y puede presentar problemas significativos en términos de contaminación o deterioro ambiental. Para los Puntos B y C, los valores de 54.47 y 51.67, respectivamente, los clasifica como nivel "Marginal". Esto significa que la calidad del agua en estos puntos es aceptable, pero presenta ciertas deficiencias y podría requerir medidas de mejora.

Los resultados presentados alertan de la baja calidad del agua y el impacto que esta puede tener en los arrecifes de

coral por las pueden tener impactos graves en los arrecifes de coral por las siguientes razones:

- Punto A: El agua con un índice "pobre" sugiere la presencia de contaminantes. Los corales son extremadamente sensibles a la calidad del agua, y niveles elevados de nutrientes (como nitrógeno y fósforo), sedimentos, y contaminantes químicos pueden provocar la muerte de los organismos coralinos.
- Puntos B y C: Aunque la categoría "marginal" indica una mejora en la calidad del agua, sigue siendo insuficiente para mantener ecosistemas coralinos saludables a largo plazo. Los corales pueden sobrevivir en condiciones marginales, pero su crecimiento y resistencia frente a alguna crisis, como olas de calor o tormentas, se verán afectadas.

Los efectos que esto puede tener hacia los arrecifes de coral son los siguientes:

- Blanqueamiento: La mala calidad del agua afecta las algas simbióticas que viven en los corales, esenciales para su nutrición. El estrés causado por la contaminación y el cambio climático puede conducir al blanqueamiento de los corales, al expulsar estas algas, generando la pérdida de color.
- Menor Resiliencia: Los corales en aguas de calidad marginal tienen menos capacidad para resistir perturbaciones adicionales, como el cambio climático.
- Disminución de la Biodiversidad: Los arrecifes de coral dependen de una buena calidad de agua para mantener su biodiversidad. Contaminación y condiciones pobres pueden reducir la presencia de especies de peces y otros organismos marinos.

VI. CONCLUSIONES

El análisis de los principales parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de la calidad del agua para la conservación de los arrecifes de coral, como: la temperatura, el pH, la salinidad, la concentración de oxígeno disuelto, los nutrientes, la turbidez y la concentración de coliformes fecales, integrados a través del Índice de Calidad del Agua (ICA) CCME, indicaron que: el Punto A (0 km), más cercano al río Lancetilla y la costa, presenta una calidad de agua "Pobre". Mientras que los puntos B (3 km) y Punto C (6 km) más alejados de la zona arrecifal, se encuentran en un estado "Marginal".

Estos resultados evidencian la necesidad de establecer medidas para evitar un impacto negativo en la salud de los corales, toda vez que una baja calidad de agua representa una amenaza a la resiliencia, biodiversidad y la productividad de éstos valiosos arrecifes.

REFERENCIAS

- [1] J. Han, H. Xiang, W. E. Ridley, and L. J. Ridley, "Coral reef aorta," *J Med Imag Rad Onc*, vol. 62, no. S1, pp. 26–26, Oct. 2018, doi: 10.1111/1754-9485.13_12785.
- [2] B. Kjerfve, M. McField, D. Thattai, and A. Giró, "Coral reef health in the Gulf of Honduras in relation to fluvial runoff, hurricanes, and fishing pressure," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 172, p. 112865, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112865.
- [3] M. D. Spalding and B. E. Brown, "Warm-water coral reefs and climate change," *Science*, vol. 350, no. 6262, pp. 769–771, Nov. 2015, doi: 10.1126/science.aad0349.
- [4] S. De Nitto, G. L. Salvagno, E. J. Favalaro, R. C. Gosselin, and G. Lippi, "Impact of water temperature on reconstitution of quality controls for routine hemostasis testing," *Diagnosis*, vol. 8, no. 2, pp. 233–238, May 2021, doi: 10.1515/dx-2019-0111.
- [5] L. L. García-Echauri, G. Liggins, P. Cetina-Heredia, M. Roughan, M. A. Coleman, and A. Jeffs, "Future ocean temperature impacting the survival prospects of post-larval spiny lobsters," *Marine Environmental Research*, vol. 156, p. 104918, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.marenvres.2020.104918.
- [6] M. A. MacNeil *et al.*, "Water quality mediates resilience on the Great Barrier Reef," *Nat Ecol Evol*, vol. 3, no. 4, pp. 620–627, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-0832-3.
- [7] E. Fischer and G. Jones, "Dimethylsulphoniopropionate as a water quality indicator of coral bleaching: Implications for monitoring studies on the Great Barrier Reef," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 164, p. 112081, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112081.
- [8] K. T. Brown *et al.*, "Divergent bleaching and recovery trajectories in reef-building corals following a decade of successive marine heatwaves," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 120, no. 52, p. e2312104120, Dec. 2023, doi: 10.1073/pnas.2312104120.
- [9] L. Fernandes De Barros Marangoni, C. Ferrier-Pagès, C. Rottier, A. Bianchini, and R. Grover, "Unravelling the different causes of nitrate and ammonium effects on coral bleaching," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 11975, Jul. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-68916-0.
- [10] "Speak for the reefs," *Nat Ecol Evol*, vol. 3, no. 2, pp. 137–137, Jan. 2019, doi: 10.1038/s41559-019-0808-3.
- [11] R. Kenchington, "Science and the management of coral reefs," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 136, pp. 508–515, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.09.046.
- [12] T. P. Hughes, J. T. Kerry, and T. Simpson, "Large-scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef," *Ecology*, vol. 99, no. 2, pp. 501–501, Feb. 2018, doi: 10.1002/ecy.2092.
- [13] "No time to chop funding for a pivotal climate programme," *Nature*, vol. 543, no. 7645, pp. 287–287, Mar. 2017, doi: 10.1038/543287a.
- [14] M. G. L. Pardo, "INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS Dra. Verónica Villarespe Reyes".
- [15] P. Houk *et al.*, "Nutrient thresholds to protect water quality and coral reefs," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 159, p. 111451, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111451.
- [16] E. M. Nalley *et al.*, "Water quality thresholds for coastal contaminant impacts on corals: A systematic review and meta-analysis," *Science of The Total Environment*, vol. 794, p. 148632, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148632.
- [17] "Sci-Hub | Tracing the influence of land-use change on water quality and coral reefs using a Bayesian model | 10.1038/s41598-017-05031-7." Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://sci-hub.yncjkj.com/10.1038/s41598-017-05031-7>
- [18] R. D. Stuart-Smith, C. J. Brown, D. M. Ceccarelli, and G. J. Edgar, "Ecosystem restructuring along the Great Barrier Reef following mass coral bleaching," *Nature*, vol. 560, no. 7716, pp. 92–96, Aug. 2018, doi: 10.1038/s41586-018-0359-9.
- [19] H. Tp *et al.*, "Global warming and recurrent mass bleaching of corals," *Nature*, vol. 543, no. 7645, Mar. 2017, doi: 10.1038/nature21707.
- [20] T. P. Hughes *et al.*, "Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene," *Science*, vol. 359, no. 6371, pp. 80–83, Jan. 2018, doi: 10.1126/science.aan8048.
- [21] M. E. Perdomo Perdomo, A. Y. Hernandez Martinez, A. F. Garcia, A. C. Alarcon Madrid, y L. M. Salmeron Sierra, «Statistical Analysis of The Effectiveness of An Electrocoagulator In The Process Of Cleaning Wastewater From The Rio Blanco River