

MODELOS ECONOMÉTRICOS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS RÍOS YAQUE DEL NORTE Y YAQUE DEL SUR DE LA REPÚBLICA DOMINICANA: 1990-2022

Econometric models to determine water quality in the Yaque del Norte and Yaque del Sur rivers of the Dominican Republic: 1990-2022

JOHANNA ANTONIA DÍAZ JIMÉNEZ¹, LUIS ORLANDO MAROTO²,
ROMMEL T. RAMOS³, BOANERGES DOMÍNGUEZ⁴ Y EDIAN F. FRANCO⁵

Recibido: 16 de diciembre 2024 • **Aceptado:** 29 de diciembre 2024

Cómo citar: Díaz Jiménez, J. A., Maroto, L. O., Ramos, R. T., Domínguez, B. & Franco, E. F. (2024). Modelos econométricos para determinar la calidad del agua en los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur de la República Dominicana: 1990-2022. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 7(2), 105-127. <https://doi.org/10.22206/cac.2024.v7i2.3411>

Resumen

El análisis de los factores que influyen en la calidad del agua en los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur entre 1990 y 2022 mostró hallazgos significativos. A través de modelos de Regresión Múltiple y el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA) se identificaron diferencias importantes entre ambas cuencas. El ICA presentó una media general de 52, clasificando la calidad como moderada, aunque con variabilidad entre los ríos. En el Yaque del Sur, se observaron mayores concentraciones de fosfatos (PO₄) y nitratos (NO₃), relacionados con la agricultura

¹ Universidad Autónoma de Santo Domingo, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Escuela de Estadística. ORCID: 0009-0004-7026-4500. Correo-e: jdj1409@gmail.com

² Departamento de Ciencia Básicas y Ambientales, Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), República Dominicana. ORCID: 0000-0001-8854-5512. Correo-e: luis.maroto@intec.edu.do

³ Instituto de Ciencias Biológicas, Universidad Federal de Pará, Belem, PA, Brasil.

⁴ Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Escuela de Estadística. Correo-e: bd25792@gmail.com

⁵ Universidad Autónoma de Santo Domingo, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Escuela de Estadística. Departamento de Ciencia Básicas y Ambientales, Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), República Dominicana. Correo-e: edian.franco@intec.edu.do



intensiva y el uso excesivo de fertilizantes. Estas variables tuvieron un impacto negativo significativo en el ICA, junto con otros contaminantes como nitritos (NO_2), amonio (NH_4) y sólidos disueltos totales (STD). Esto refleja una contaminación más uniforme y asociada a actividades agrícolas e industriales intensivas. Por otro lado, en el Yaque del Norte, la calidad del agua estuvo más influenciada por variables como coliformes fecales y STD, asociadas a una infraestructura de saneamiento insuficiente. Sin embargo, parámetros como el pH y la diversidad de fuentes de agua mostraron un efecto positivo sobre el ICA, sugiriendo que algunas condiciones locales favorecen la mala calidad del agua. El análisis de correlación y los modelos econométricos de regresión lineal múltiple confirmaron que los factores antropogénicos, como la urbanización y la agricultura intensiva, junto con eventos climáticos extremos, son los principales responsables de la degradación del agua en ambas cuencas. La falta de implementación efectiva de políticas ambientales también contribuyó significativamente a este deterioro. Recomendaciones realizadas incluyen la implementación de políticas específicas para cada cuenca: en el Yaque del Sur, mejorar las prácticas agrícolas y controlar las descargas industriales; en el Yaque del Norte, fortalecer la infraestructura de tratamiento de aguas residuales y la gestión de desechos. Cada uno de los resultados resaltan la necesidad urgente de estrategias diferenciadas y sostenibles para proteger y restaurar la calidad del agua en estos ríos fundamentales para la República Dominicana.

Palabras clave: calidad del agua, modelos econométricos, actividades antropogénicas, fenómenos climáticos, políticas ambientales.

Abstract

The analysis of factors influencing water quality in the Yaque del Norte and Yaque del Sur rivers between 1990 and 2022 revealed significant findings. Through Multiple Regression models and the calculation of the Water Quality Index (WQI), important differences were identified between the two basins. The WQI showed a general average of 52, classifying the water quality as moderate, although with variability between the rivers. In the Yaque del Sur, higher concentrations of phosphates (PO_4) and nitrates (NO_3) were observed, related to intensive agriculture and the excessive use of fertilizers. These variables had a significant negative impact on the WQI, along with other contaminants such as nitrites (NO_2), ammonium (NH_4), and total dissolved solids (TDS). This reflects more uniform contamination, primarily associated with intensive agricultural and industrial activities. In contrast, in the Yaque del Norte, water quality was more influenced by variables such as fecal coliforms and TDS, linked to insufficient sanitation infrastructure.

However, parameters such as pH and the diversity of water sources showed a positive effect on the WQI, suggesting that some local conditions favor poor water quality. The correlation analysis and econometric multiple regression models confirmed that anthropogenic factors such as urbanization and intensive agriculture, along with extreme climatic events, are the main drivers of water degradation in both basins. The lack of effective implementation of environmental policies also significantly contributed to this deterioration. Recommendations include implementing specific policies for each basin: in the Yaque del Sur, improving agricultural practices and controlling industrial discharges; in the Yaque del Norte, strengthening wastewater treatment infrastructure and waste management. Each result underscores the urgent need for differentiated and sustainable strategies to protect and restore water quality in these essential rivers for the Dominican Republic.

Keywords: water quality, econometric models, anthropogenic activities, climate phenomena, environmental policies.

Introducción

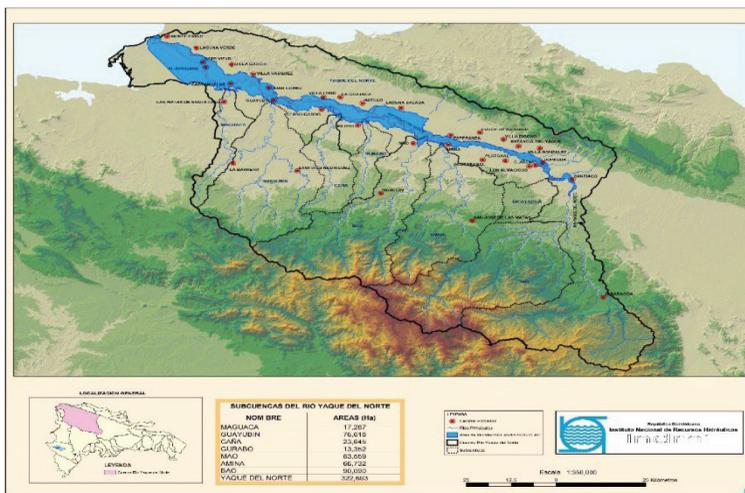
Los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur son las dos principales arterias fluviales de la República Dominicana y desempeñan un papel crucial en el desarrollo económico, social y ambiental del país. Estas cuencas hidrográficas son fundamentales para garantizar el suministro de agua potable, el riego de cultivos agrícolas, la generación de energía hidroeléctrica y el mantenimiento de la biodiversidad. Además, proporcionan recursos esenciales para las actividades industriales y recreativas. No obstante, su sostenibilidad a largo plazo está comprometida debido a la creciente presión derivada de actividades antropogénicas, como la urbanización descontrolada y la agricultura intensiva, así como por el impacto de fenómenos climáticos extremos, que exacerban la contaminación y erosionan los ecosistemas (INDRHI, 2018; Pérez & Pineda, 2010).

El Yaque del Norte (presentado en el Gráfico 1), con una longitud de aproximadamente 296 kilómetros, es el río más largo de la República Dominicana. Nace en la Cordillera Central, cerca del Pico Duarte, y atraviesa varias provincias, incluyendo Santiago, Valverde y Monte Cristi, hasta desembocar en el Océano Atlántico. Su cuenca abarca zonas agrícolas altamente productivas, como el Valle del Cibao, donde se cultivan productos de alto valor como arroz, tabaco y banano (INDRHI, 2018,

ONE, 2022, Ministerio de agricultura 2010, Ministerio de agricultura 2020). A pesar de su importancia económica, enfrenta desafíos significativos relacionados con la contaminación por aguas residuales urbanas, escorrentías agrícolas cargadas de fertilizantes y sedimentos, y la falta de infraestructura de tratamiento de aguas residuales en muchas áreas rurales y urbanas (Rodríguez et al., 2019).

Gráfico 1

Geografía del Yaque del Norte

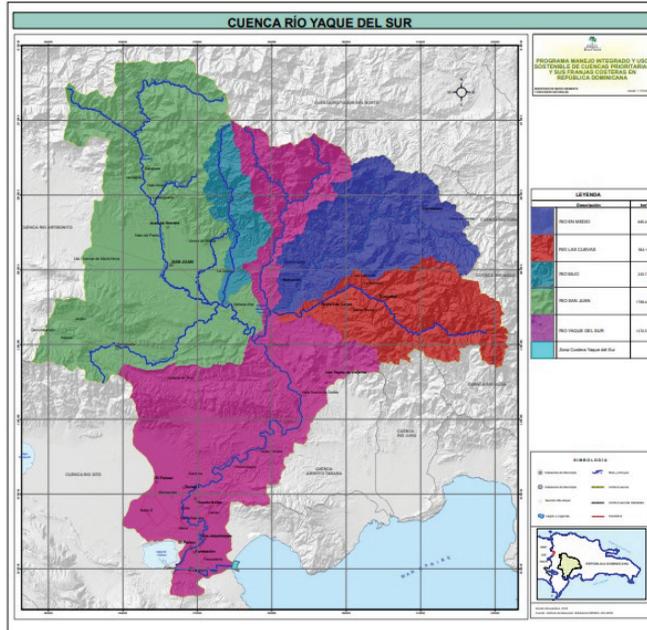


Fuente: Fondo Agua Yaque del Norte. <https://fondoaguayaque.org/cuenca-yaque-del-norte/>

Por otro lado, el Yaque del Sur (presentado en el Gráfico 2), de aproximadamente 183 kilómetros de longitud, también se origina en la Cordillera Central y desemboca en el Mar Caribe, cerca de Barahona. Su cuenca incluye provincias como San Juan, Azua y Barahona, y se caracteriza por su clima diverso y su importancia agrícola. Este río abastece a vastas extensiones del Valle de Azua y el Valle de San Juan, donde predomina el cultivo intensivo de caña de azúcar, arroz y plátano (INDRHI, 2018, ONE, 2022, Ministerio de agricultura 2010, Ministerio de agricultura 2020). Sin embargo, estas actividades han incrementado las concentraciones de nutrientes como nitratos (NO_3) y fosfatos (PO_4), que afectan negativamente la calidad del agua y fomentan la eutrofización (Carrillo & Urgilés, 2016).

Gráfico 2

Geografía del Yaque del Sur



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente de la República Dominicana. Yaque del Sur Subcuencas Hidrográficas. Recuperado de <https://ambiente.gob.do/app/uploads/2016/12/Yaque-del-Sur-Subcuencas-Hidrograficas.pdf>

Ambos ríos comparten vulnerabilidades similares debido a su origen en la Cordillera Central, lo que los hace susceptibles a fenómenos climáticos extremos, como huracanes e inundaciones. Estos eventos no solo aumentan la sedimentación, sino que también arrastran grandes cantidades de contaminantes hacia los cuerpos de agua, afectando tanto la calidad del agua como la biodiversidad asociada (Pérez & Pineda, 2010; UNEP, 2018).

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) destaca la relevancia de mantener una adecuada calidad del agua, señalando que esta es “fundamental para la salud pública, la seguridad alimentaria y el progreso económico” (PNUMA, 2018). Este enfoque resalta la conexión directa entre la calidad del agua, el bienestar humano y los objetivos de desarrollo sostenible.

En términos de investigación científica, los estudios econométricos han demostrado ser herramientas valiosas para analizar los factores que afectan la calidad del agua. A nivel internacional, se han utilizado modelos de regresión múltiple para comprender cómo las actividades humanas, los cambios en el uso del suelo y los eventos climáticos influyen en los recursos hídricos (Carrillo & Urgilés, 2016), otros estudios internacionales también han utilizado los modelos econométricos para identificar y cuantificar los factores que afectan la calidad del agua, proporcionando una base científica para el diseño de políticas públicas (Guzmán et al., 2010; Pérez y Pineda, 2010).

En la República Dominicana, sin embargo, la aplicación de estos modelos ha sido limitada, enfocándose principalmente en estudios puntuales sobre la contaminación agrícola o la falta de infraestructura de saneamiento. Esto evidencia la necesidad de un enfoque más integral que permita analizar múltiples variables y su interacción simultánea.

La República Dominicana enfrenta el reto de equilibrar el desarrollo económico con la conservación ambiental. Sin embargo, la falta de políticas ambientales efectivas y de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales ha permitido la continua degradación de los recursos hídricos en estas cuencas (PNUD, 2020).

Dada la importancia de estos recursos para la población local y su contribución al desarrollo económico, este estudio aporta un análisis integral que busca informar la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos en la República Dominicana. Al mismo tiempo, resalta la necesidad de implementar políticas efectivas que aseguren la sostenibilidad de estas cuencas y su capacidad para satisfacer las demandas actuales y futuras.

Metodología

El tema “Modelos econométricos para determinar la calidad del agua en los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur” fue seleccionado por su relevancia ambiental y social, la disponibilidad de datos históricos y contemporáneos, y su potencial para contribuir al conocimiento, llenando

vacíos en la literatura existente sobre el uso de modelos de regresión en la evaluación de la calidad del agua en la región.

Selección de Variables y Datos

Los datos utilizados para este estudio, fueron recolectados de por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), a los cuales se obtuvo acceso a través de libre acceso a la información al igual que otros datos de interés para este estudio desde el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Oficina Nacional de Estadística (ONE).

Una vez recibido todos los datos en Excel y PDF desde las instituciones gubernamentales antes mencionadas, se procedió a unir todos los archivos en un solo documentos Excel, se organizaron por ubicación y fecha, limpiando los datos no deseados para el estudio, seleccionando solo las variables de interés para el mismo, seguido se realizó la asignación de los pesos relativos según importancia y registros previos, continuado con los cálculos de los subíndice de cada variable para proceder a calcular el índice de calidad del agua.

El estudio analizó la calidad del agua de los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) como variable dependiente. Se consideraron las siguientes variables independientes: pH, nitratos (NO_3), fosfatos (PO_4), nitritos (NO_2), oxígeno total disuelto (OTD), solido totales disuelto (STD), coliformes totales y amonio (NH_4).

Se emplearon modelos de regresión múltiple para determinar las relaciones entre las variables independientes de características física, química y biológica del agua y la variable dependiente (calidad del agua). Para el análisis de los datos se utilizó el software estadístico Python en su interfaz de Google Colab. Se utilizaron librerías varias, las cuales proporcionaron un entorno robusto para el análisis, permitiendo una gestión eficiente de los datos y resultados visuales comprensibles para la interpretación estadística.

Las unidades de observación para este estudio incluyen las estaciones de monitoreo ubicadas a lo largo de los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur donde el INDRHI recolectó las muestras. En total se tuvo una muestra de 7 ríos del Yaque del Sur (ver Gráfico 3) y 21 ríos del Yaque del Norte (ver Gráfico 4).

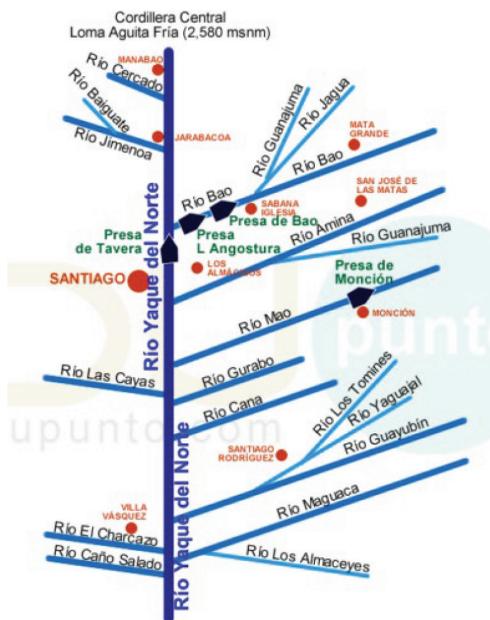
Gráfico 3

Diagrama topográfico del río Yaque del Sur



Gráfico 4

Diagrama topográfico del río Yaque del Norte



Fuente: Edupunto. Recuperado de <https://edupunto.com/tag/rios/>

Parámetros de la calidad del agua en el modelo NSF

Para evaluar la calidad del agua se han determinado 9 variables o parámetros del modelo NSF (Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos) inicialmente planteado por Horton en 1965 y modificado por Brow, MacClelland, Deininger y Tozer en 1970, modelo utilizado para analizar y determinar el grado de contaminación. Para este análisis se eligieron solo ocho (8) parámetros de interés relacionadas directamente con actividades antropogénicas.

En la República Dominicana, la calidad del agua para consumo humano está regulada por la Norma Dominicana (NORDOM) 53, que establece los parámetros fisicoquímicos y biológicos aceptables. Los valores aceptables para el consumo humano de las variables seleccionadas se establecen como a continuación:

pH: 6.5 - 8.5 unidades	Amonio (NH_4^+): ≤ 0.5 mg/L
Oxígeno Disuelto Totales (ODT): ≥ 5 mg/L	Fosfatos (PO_4^{3-}): ≤ 0.1 mg/L
Nitratos (NO_3^-): ≤ 10 mg/L	Sólidos Totales Disueltos (STD): ≤ 500 mg/L
Nitritos (NO_2^-): ≤ 1 mg/L	Coliformes Totales: 0 UFC/100 mL

Estos valores están diseñados para garantizar que el agua sea segura para el consumo humano y no represente riesgos para la salud. Es por ello que a partir de estos parámetros específicos del país se establece los pesos relativos para cada uno, sin dejar de tomar en cuenta los pesos relativos que se asignan en otros países y la importancia que representa para este estudio.

Carrillo y Urgilés 2016, en su tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental “DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA ICA-NSF DE LOS RÍOS MAZAR Y PINDILIG”, del Ecuador, presentaron la formula y pasos a seguir para realizar el Cálculo del índice de calidad del agua del modelo NSF, como lo plantea Brown R. M., 1970:

$$ICA_a = \sum_{i=1}^n I_i W_i$$

Donde:

- ICAa: índice de calidad aditivo
- i: cada uno de los parámetros de calidad elegidos
- I_i: subíndice del parámetro i
- W_i: pesos relativos asignados a cada parámetro (I_i), y ponderados entre 0 y 100, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a 100.

Para identificar los subíndices (I_i) de los distintos parámetros, se tomó en cuenta los valores establecidos según las características que deseamos calcular, de estar fuera de ese rango, pues se trabajó en base a las curvas promedios trabajadas por Brown R. M. en 1970 y especificadas por Carrillo y Urgilés 2016, identificando el valor en la gráfica haciendo la interpolación del eje X con el eje Y, luego este valor se multiplica con el peso relativo correspondiente y al final se realiza la sumatoria y queda como resultado la ICA de ese punto de muestreo en específico y este especifica la clasificación del ICA en ese punto como se especifica en la Tabla 1.

Tabla 1

Criterios para la clasificación de las aguas

ICA	Criterios generales	Uso
91-100	Excelente calidad	No requiere purificación
71-90	Buena calidad	Ligera purificación
51-70	Mediana calidad	Consumo dudoso si no se purifica
26-50	Mala calidad	Requiere tratamiento
0-25	Muy mala calidad	No acto para el consumo

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Fundación Nacional de Saneamiento.

Para cuestiones de análisis se creó la variable CA*, la cual subdividió el ICA en dos grupos, valores mayores de 50 se clasificaron como buena calidad y menores o igual de 50 como mala calidad de agua. En variable dicotómica la buena calidad representada por 1 y mala calidad por 0.

Resultados

Análisis Estadístico Descriptivo

Se calcularon medidas de tendencia central (media), dispersión (desviación estándar) y valores extremos (mínimos y máximos) para todas las variables (ver Tabla 2). Estas estadísticas permitieron explorar las características generales de la calidad del agua y las posibles diferencias entre los ríos.

Tabla 2

Estadística descriptiva de las características física, química y biológica de los Yagues

Variables	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Fuente	9.86	6.43	1.00	21.00
pH	7.32	1.74	0.00	8.90
PO ₄ (mg/l)	116.40	238.70	0.00	1288.00
NO ₃ (mg/l)	61.73	174.88	0.00	924.00
NO ₂ (mg/l)	27.81	106.25	0.00	791.00
NH ₄ (mg/l)	1.45	2.99	0.00	12.34
STD (mg/l)	65.11	226.81	0.00	2720.00
CTNMP/ 100ml	51113.86	141791.69	0.00	910000.00
OTD (mg/l)	115.84	120.61	0.00	752.50
ICA	52.41	9.82	24.24	79.24
CA*	0.58	0.49	0.00	1.00

Leyenda: ICA=Índice de Calidad del Agua, CA*= Calidad del Agua (0=Mala, 1=buena)
Fuente: Elaboración propia.

La variable Fuente muestra una amplia gama de tipos de agua con una variabilidad considerable, mientras que el pH, con una media de 7.32, refleja un agua generalmente neutra, pero con variaciones significativas, incluyendo valores anómalos. Los altos niveles de fosfato (media de 116.40 mg/l) y nitrato (media de 61.73 mg/l) sugieren posibles fuentes de contaminación agrícola o industrial, con rangos de valores que indican contaminación localizada en algunas áreas. Las concentraciones de amonio son relativamente bajas, lo cual favorece la vida acuática. En contraste, los sólidos totales disueltos (STD) y las bacterias coliformes muestran una gran variabilidad; en ciertos cuerpos de agua, los niveles de contaminación son muy elevados, lo que puede impactar negativamente tanto en la calidad del agua como en la salud pública. El oxígeno total disuelto (OTD) en promedio es elevado, favoreciendo la vida acuática, pero con gran variabilidad entre muestras. El Índice de Calidad del Agua (ICA) promedio de 52.41 sugiere una calidad de agua moderada en las zonas estudiadas.

La variable Calidad del Agua indica que aproximadamente el 58% de las muestras cumplen con una calidad buena según el umbral definido en el estudio.

Comparando ambos ríos en la última década, se observó que varios puntos de muestras en específico mostraron dentro de la clasificación de mala calidad una condición peor en comparación con otros puntos, tales son los puntos:

Para el Yaque del Sur (ver Tabla 3):

Para el Yaque del Norte (ver Tabla 4):

Se resaltó que el Yaque del Sur podría estar más expuesto a contaminantes derivados de la actividad humana, lo que requiere enfoques específicos para reducir la concentración de estas sustancias y mejorar la calidad del agua.

En cuanto al ICA en otros países, este índice es ampliamente utilizado para evaluar la calidad del agua, aunque los umbrales específicos pueden variar según la normativa y los estándares ambientales de cada nación, algunos ICA estudiados a nivel internacional se pueden mencionar:

Tabla 3

Características física, química y biológica del Yaque del Sur

Fuente	pH	PO4	NO3	NO2	NH4	STD	Coliformes T	OTD	ICA
5	8.40	1.68	90.00	200.00	1.20	410.00	148.00	145.50	37.66
6	2.40	0.20	616.00	2.00	0.06	1590.00	2300.00	247.50	45.39
7	7.90	2.30	616.00	3.00	1.50	2720.00	160000.00	312.00	39.75

Leyenda: 5-Río Los Baos, Barahona, 6-RÍO MIJO, San Juan, 7-Río San Juan
 Fuente: Elaboración propia. Base de datos general.

Tabla 4

Características física, química y biológica del Yaque del Norte

Fuente	pH	PO4	NO3	NO2	NH4	STD	Coliformes T	OTD	ICA
1	7.65	0.70	72.00	399.00	8.40	2.00	910000.00	0.00	24.24
4	6.80	7.00	0.00	0.00	1.20	1.20	2962.50	0.00	48.45
9	8.00	14.00	12.32	0.30	0.00	0.41	24000.00	353.00	49.25
11	8.40	145.00	0.00	0.14	12.02	0.50	2300.00	0.00	44.84
16	8.80	12.00	12.76	0.23	0.00	0.00	24000.00	355.00	49.25

Leyenda: 1-Arroyo Guayubín, 4-Río Bao, 9-Río Jimenoa, 11-Río Mao y 16-Río YN Jarabacoa
 Fuente: Elaboración propia. Base de datos general.

- Canadá: Muchas cuencas presentan un ICA superior a 80, clasificadas como “Buena” a “Excelente”, debido a una gestión ambiental eficaz.
- India: En el río Ganges, el ICA en áreas urbanas puede ser tan bajo como 25, clasificándose como “Pobre” o “Muy Pobre”, mientras que en zonas rurales alcanza entre 50 y 70, indicando una calidad “Regular” o “Buena”.
- Brasil: En el río Tietê, el ICA en tramos urbanos, especialmente en São Paulo, se ha encontrado en rangos de 20 a 30 “Muy Pobre”, aunque los trabajos de conservación ambientales recientes han elevado estos valores, aunque sigue siendo una zona crítica.
- España: En la cuenca del Ebro, la calidad del agua suele estar entre 70 y 90, clasificándose como “Buena” a “Excelente”, aunque algunos tramos impactados por actividades agrícolas muestran un ICA cercano a 60, indicando una calidad “Regular”.

En general, el ICA evalúa componentes físicos, químicos y biológicos, y su aplicación permite una comparación estandarizada de la calidad del agua a nivel global, aunque con adaptaciones locales para reflejar las condiciones ecológicas y de uso del agua en cada región. Es de resaltar que las actividades antropogénicas y agrícolas sigue siendo un factor decisivo en la calidad del agua.

Análisis de Correlación

Para explorar las relaciones entre el ICA y las variables independientes, se realizó un análisis de correlación de Pearson (ver Tabla 5). Este análisis permitió identificar la fuerza y dirección de las relaciones lineales entre las variables.

Las correlaciones entre el ICA y ciertas variables sugirieron cómo cada factor contribuyó a la calidad del agua en los ríos. La variable Fuente mostró una correlación positiva moderada (0.22), indicando que una mayor diversidad o cantidad de fuentes de agua podría haber mejorado el ICA al aportar agua fresca y saludable. De manera similar, el OTD presentó una correlación positiva (0.22) con el ICA, destacando su importancia en el mantenimiento de un ecosistema acuático equilibrado. La variable CA, con una fuerte correlación de 0.82, estuvo directamente relacionada con el ICA, ya que clasifica la calidad del agua como buena o

Tabla 5
Análisis de correlación de las variables

	Yaque	Fuente	pH	PO4	NO3	NO2	NH4	STD	CT	ODT	ICA	CA
Yaque	1.00	0.49	-0.08	0.26	-0.57	-0.01	-0.08	-0.52	0.17	-0.25	-0.12	-0.11
Fuente	0.49	1.00	-0.12	0.20	-0.27	0.09	-0.03	-0.22	0.05	0.28	0.22	0.17
pH	-0.08	-0.12	1.00	0.14	0.03	0.07	0.10	-0.02	-0.08	-0.10	0.16	0.13
PO4	0.26	0.20	0.14	1.00	-0.16	-0.12	0.03	-0.14	0.03	0.06	-0.09	-0.06
NO3	-0.57	-0.27	0.03	-0.16	1.00	0.09	0.01	0.40	-0.08	0.13	-0.08	-0.10
NO2	-0.01	0.09	0.07	-0.12	0.09	1.00	-0.01	-0.02	0.01	0.00	-0.20	-0.15
NH4	-0.08	-0.03	0.10	0.03	0.01	-0.01	1.00	0.00	-0.11	0.05	-0.06	-0.08
STD	-0.52	-0.22	-0.02	-0.14	0.40	-0.02	0.00	1.00	-0.04	0.18	-0.03	-0.03
CT	0.17	0.05	-0.08	0.03	-0.08	0.01	-0.11	-0.04	1.00	-0.09	-0.07	-0.07
ODT	-0.25	0.28	-0.10	0.06	0.13	0.00	0.05	0.18	-0.09	1.00	0.22	0.17
ICA	-0.12	0.22*	0.16	-0.09	-0.08	-0.20	-0.06	-0.03	-0.07	0.22*	1.00	0.82*
CA	-0.11	0.17	0.13	-0.06	-0.10	-0.15	-0.08	-0.03	-0.07	0.17	0.82	1.00

Fuente: Elaboración propia.

mala según los valores de este índice. Esto confirmó que el ICA reflejaba fielmente la calidad general del agua en los ríos evaluados.

Modelo Econométrico

Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple (ver Tabla 6) para evaluar el impacto de las variables independientes sobre el ICA.

La ecuación resultando del modelo fue la siguiente:

$$ICA = 45.38 + (0.66 \times \text{Fuente}) + (1.31 \times \text{pH}) + (-0.02 \times \text{NO}_2) + (-0.01 \times \text{PO}_4) + (-0.01 \times \text{NO}_3) + (-8.83 \times \text{Yaque})$$

Tabla 6
Reporte de regresión lineal múltiple

OLS Regresión Results						
Dep. Variable:	ICA		R-squared:	0.26		
Model:	OLS		Adj. R-squared:	0.24		
Method:	Least Squares		F-statistic:	14.40		
Log-Likelihood:	-898.48		Prob (F-statistic):	0.0000		
No. Observations:	253		AIC:	1811		
Df Residuals:	246		BIC:	1836		
Df Model:	6		Covariance Type:	nonrobust		
Variable	Coefficient	Std. Error	t-statistic	P-value	[0.025	0.975]
const	45.38	2.91	15.59	0.00	39.64	51.11
Fuente	0.66	0.09	6.78	0.00	0.47	0.85
pH	1.30	0.32	4.08	0.00	0.67	1.93
NO2	-0.02	0.00	-4.68	0.00	-0.03	-0.01
PO4	-0.01	0.00	-3.04	0.00	-0.01	-0.00
NO3	-0.01	0.00	-2.81	0.00	-0.01	-0.00
Yaque	-8.82	1.76	-5.01	0.00	-12.29	-5.36
Omnibus: 3.25 Durbin-Watson: 1.65 Prob (Omnibus): 0.19 Jarque-Bera (JB): 2.32 Skew: -0.03 Prob (JB): 0.31 Kurtosis: 2.53 Cond. No. 1.50e+03						

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación reveló que, manteniendo constantes todas las demás variables predictoras, el Índice de Calidad del Agua (ICA) en el río Yaque del Norte disminuye en promedio 8.82 unidades, situándose en la categoría de mala calidad según los criterios de clasificación establecidos. En contraste, para el río Yaque del Sur, esta variable no tiene un efecto significativo sobre el ICA, ya que el coeficiente asociado es igual a cero (8.82×0), lo que implica que no contribuye ni al aumento ni a la disminución del índice en este caso. Estos resultados sugirieron que el Yaque del Norte tiende a estar más contaminado, lo cual podría atribuirse a múltiples factores, entre ellos su mayor longitud y la mayor incidencia de contaminación de origen antropogénico en su cuenca.

Diagnóstico de Supuestos del Modelo de Regresión Múltiple

Para garantizar la validez y confiabilidad de las estimaciones, se evaluaron los supuestos fundamentales del modelo de regresión múltiple: independencia, homocedasticidad y normalidad de los residuos.

1. Supuesto de Independencia

Se verificó mediante el análisis de autocorrelación de los residuos, utilizando el estadístico de Durbin-Watson:

Yaque del Norte: Valor de 1.65, indicando que no hay autocorrelación significativa en los residuos.

Yaque del Sur: Valor de 1.14, sugiriendo una posible autocorrelación leve, aunque no lo suficientemente significativa como para invalidar el modelo. Se recomienda realizar pruebas adicionales en futuros estudios para confirmar estos resultados.

2. Supuesto de Homocedasticidad

La homocedasticidad fue evaluada mediante la prueba de Lagrange, obteniendo un valor de 10.54 y un p-valor de 0.10. Estos resultados indican que no hay evidencia significativa de heterocedasticidad, ya que el p-valor es mayor a 0.05. Por lo tanto, la varianza de los errores se considera constante, asegurando la eficiencia de las estimaciones y la validez de los errores estándar.

3. Supuesto de Normalidad

La normalidad de los residuos fue evaluada mediante las pruebas de Omnibus y Jarque-Bera:

Yaque del Norte: P-valores de 0.19 y 0.31, respectivamente.

Yaque del Sur: P-valores de 0.34 y 0.40, respectivamente.

Estos valores indican que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad de los residuos, confirmando que este supuesto se cumple en ambos modelos.

Discusión

La calidad del agua en los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur ha sido objeto de diversos estudios que analizan los factores que la afectan, especialmente en relación con actividades antropogénicas como la agricultura intensiva y la urbanización. Los resultados de estas investigaciones presentan tanto coincidencias como divergencias, lo que permite una discusión enriquecedora al confrontar los hallazgos obtenidos.

En el río Yaque del Sur las concentraciones elevadas de fosfatos (PO_4) y nitratos (NO_3) están asociadas a prácticas agrícolas intensivas y al uso excesivo de fertilizantes. Estos contaminantes impactan negativamente en el Índice de Calidad del Agua (ICA). Este hallazgo es consistente con lo reportado por Rodríguez et al. (2019), quienes también señalaron que la agricultura intensiva en las cuencas de estos ríos contribuye significativamente a la contaminación por nutrientes.

Por otro lado, en el río Yaque del Norte, se observó que la calidad del agua está más influenciada por la presencia de coliformes fecales y sólidos disueltos totales (SDT), lo cual se atribuye a una infraestructura de saneamiento insuficiente. Este resultado coincide con lo encontrado por Cabrera y Calmette (2022), quienes realizaron una evaluación fisicoquímica y microbiológica de las aguas del Yaque del Norte y destacaron la presencia de contaminantes microbiológicos debido a descargas de aguas residuales sin tratamiento adecuado.

A nivel internacional, estudios como el de Muñoz-Morales et al. (2024) en México han demostrado que el uso inadecuado de agroquímicos y prácticas de riego intensivo conducen a la degradación del suelo y la contaminación de cuerpos de agua, afectando la calidad hídrica de manera similar a lo observado en las cuencas de los ríos Yaque. Asimismo, investigaciones lideradas por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España han determinado que la agricultura intensiva a gran escala es una amenaza para las zonas áridas, debido a la sobreexplotación de recursos hídricos y la contaminación asociada (CSIC, 2023).

El estudio realizado por Fondo Agua Yaque del Norte (2015) reportó que, en ciertas áreas de la cuenca, los niveles de contaminación por nutrientes no eran tan elevados como se esperaba, lo que sugiere la existencia de factores locales que podrían estar mitigando la contaminación. Esta podría considerarse una discrepancia, sin embargo, sirve para confirmar que la diferencia en los periodos de estudio la calidad del agua va en deterioro constante y puede empeorar sin medidas ambientales adecuadas.

Los resultados de este estudio son, en general, coherentes con la literatura existente, tanto a nivel nacional como internacional, en cuanto a la influencia de la agricultura intensiva y la infraestructura de saneamiento en la calidad del agua.

El análisis de los supuestos muestra que los modelos de regresión múltiple para ambas cuencas cumplen con los criterios de independencia, homocedasticidad y normalidad de los residuos. Esto respalda la validez de los resultados obtenidos y garantiza la confiabilidad de las inferencias realizadas. Los hallazgos destacan diferencias importantes en los factores que influyen en la calidad del agua de los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur, proporcionando una base sólida para la formulación de políticas específicas para cada región.

Los resultados del estudio enfatizan la importancia de comprender las diferencias y similitudes entre ambas cuencas para implementar estrategias de conservación y mejorar la calidad del agua. Mientras el Yaque del Norte muestra problemas puntuales de contaminación, el Yaque del Sur enfrenta un desafío más complejo y extendido debido a contaminantes

agrícolas e industriales. Ambos ríos requieren atención, pero con enfoques específicos según sus características y fuentes de contaminación.

Validación de la Hipótesis

Los resultados confirmaron la hipótesis que planteó que la disminución en la calidad del agua en las cuencas de los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur entre 1990 y 2022 se debía a factores antropogénicos, cambios en el uso del suelo y fenómenos climáticos extremos, destacando que tanto los factores antropogénicos como los climáticos afectaron negativamente la calidad del agua, lo que subraya la necesidad urgente de implementar políticas ambientales efectivas y promover la educación comunitaria para mitigar el impacto de estas actividades y fenómenos en las cuencas hídricas.

Conclusiones

El análisis realizado evidenció que la urbanización y la agricultura intensiva han tenido un impacto significativo en la calidad del agua en los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur durante el período 1990-2022. En el Yaque del Sur, el uso intensivo de fertilizantes contribuyó a altas concentraciones de fosfatos y nitratos, mientras que en ambas cuencas, la urbanización aumentó la presencia de bacterias coliformes debido a la infraestructura de saneamiento insuficiente.

Los parámetros físicos, químicos y biológicos analizados, como pH, nitratos, fosfatos y coliformes fecales, mostraron una evolución desfavorable, evidenciando un incremento en la contaminación causada por prácticas agrícolas no sostenibles y la sedimentación por deforestación. Estos cambios afectaron tanto la calidad del agua para consumo humano como la salud de los ecosistemas acuáticos.

Además, los eventos climáticos extremos, como inundaciones y erosión del suelo, intensificaron la degradación ambiental en las cuencas fluviales. Estas condiciones no solo incrementaron la carga de sedimentos y contaminantes en los ríos, sino que también comprometieron la funcionalidad de las infraestructuras de tratamiento de aguas residuales.

A pesar de las políticas ambientales vigentes en la República Dominicana, se identificaron limitaciones significativas en la conservación de las cuencas. La falta de regulaciones estrictas en el uso de agroquímicos, la insuficiente inversión en conservación de ecosistemas y la debilidad en la gestión de residuos son factores que han exacerbado la problemática.

Los modelos econométricos confirmaron que la urbanización descontrolada, la agricultura intensiva, los fenómenos climáticos extremos y la falta de políticas efectivas han sido los principales impulsores de la contaminación y degradación de estos ríos. Se enfatiza la urgencia de implementar políticas ambientales más efectivas, fortalecer las infraestructuras de tratamiento de aguas, y promover prácticas agrícolas y urbanas sostenibles para mitigar los impactos negativos en estos recursos hídricos clave.

Referencias

- Cabrera, M., & Calmette, X. (2022). Parámetros fisicoquímicos y calidad microbiológica de las aguas del río Yaque del Norte, República Dominicana. *Revista de la Facultad de Ciencias Biológicas*, 29(1), 53-62.
- Carrillo Alvarado, M. S., & Urgilés Calle, P. D. (2016). Determinación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF de los ríos Mazar y Pindilig (Tesis de grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/2759/Guillermo-Velasquez-Ramos-Montesinos.pdf;jsessionid=D2CC13914206796246DBD81D62237844?sequence=4>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). (2023). Un estudio liderado por el CSIC determina que la agricultura intensiva a gran escala es una amenaza para las zonas áridas. <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/un-estudio-liderado-por-el-csic-determina-que-la-agricultura-intensiva-gran-escala-es-una-amenaza-para-las-zonas-aridas>
- Fondo Agua Yaque del Norte. (2015). Plan de conservación del Fondo Agua Yaque del Norte. <https://fondoaguayaque.org/wp-content/>

uploads/2017/02/Plan-de-conservacion_Fondoagua-Yaque-del-Norte_18-Jun-2015-2.pdf

- Guzmán, J., Garza, A., & Martínez, F. (2010). Análisis econométrico del consumo de agua subterránea en Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Economía Agrícola*. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181363107008/>
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos-INDRHI (2018). Impacto de los eventos climáticos extremos en las cuencas de los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25660>
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2010). Informe de Desarrollo Agrícola. Santo Domingo: Ministerio de Agricultura.
- Ministerio de Agricultura de la República Dominicana. (2020). Informe Anual de Producción Agrícola.
- Muñoz-Morales, M., et al. (2024). El impacto del uso inadecuado de agroquímicos y riego intensivo en la degradación del suelo y la disminución de yacimientos de agua. *Agua y Tierra*, 9(34), 65-70. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/0e326e09-1076-49f5-a2e2-4cdf6329ab8a/content>
- Oficina Nacional de Estadística (ONE). (2022). Estadísticas Demográficas y Censo Nacional de Población y Vivienda.
- Pérez, J., & Pineda, C. (2010). Gestión integrada de cuencas hidrográficas: Un enfoque para el desarrollo sostenible. *Revista de Recursos Hídricos en América Latina*. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181363107008/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). Informe sobre políticas ambientales y calidad del agua en la República Dominicana. PNUD República Dominicana. Disponible en: https://www.do.undp.org/content/dominican_republic/es/home/library/environment_energy/informe-sobre-politicas-ambientales-y-calidad-del-agua-en-la-rep.html
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2018). Informe sobre la situación ambiental de la República Dominicana. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Recuperado de: <https://www.pnuma.org/documentos/dominicana>

- Rodríguez, F., Fernández, L., & Pérez, M. (2019). Impacto de la agricultura intensiva en la calidad del agua de los ríos Yaque del Norte y Yaque del Sur. *Revista Dominicana de Gestión Ambiental*, 5(2), 45-60. Disponible en: <https://bvearmb.do/handle/123456789/3493>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). Water quality and its implications for sustainable development. Global Environment Outlook. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/report/global-environment-outlook-6>