

INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA MANTARO, PERÚ

Katheryne Priscilla Zambrano Delgadillo^{a*}, Manuel Alfredo Ñique Alvarez^b, Elvis Anthony Medina Dionicio^c

RESUMEN

En esta investigación se determinó la influencia de la cobertura vegetal, a través del NDVI, sobre la calidad del agua en la cuenca Mantaro, utilizando 27 puntos de monitoreo de categoría 3, establecidos por la ANA. Se consideraron 13 parámetros: DBO₅, DQO, OD, CT, pH, Ar, Al, Mn, Fe, Cd, Pb, B y Cu. Los datos del NDVI se descargaron del producto MOD13Q1 V6.1 disponible en Google Earth Engine. El análisis reveló que el comportamiento temporal de los parámetros de calidad del agua varía según la estación del año, siendo en verano donde se registran los máximos valores y en invierno los menores para todos los parámetros fisicoquímicos y orgánicos en las cuencas Alta y Baja del Mantaro. En la cuenca Media, para los CT, DBO₅ y DQO, los máximos se registraron en invierno y primavera. Se obtuvieron correlaciones muy fuertes positivas y negativas significativas (p-valor <0.05) entre el NDVI y los parámetros de calidad del agua, principalmente en invierno. Los resultados sugieren que el NDVI es un indicador potencial para analizar la calidad del agua, útil para la implementación de modelos predictivos.

Palabras clave: Calidad del agua, NDVI, Sensoramiento Remoto

INFLUENCE OF VEGETATION COVER ON THE WATER QUALITY OF THE MANTARO BASIN, PERÚ

ABSTRACT

This research determined the influence of vegetation cover, through the NDVI, on water quality in the Mantaro basin, using 27 monitoring points of category 3, established by the ANA. Thirteen parameters were considered: BOD₅, COD, DO, TC, pH, As, Al, Mn, Fe, Cd, Pb, B, and Cu. The NDVI data were downloaded from the MOD13Q1 V6.1 product available in Google Earth Engine. The analysis revealed that the temporal behavior of the water quality parameters varies by season, with maximum values recorded in summer and minimum values in winter for all physicochemical and organic parameters in the Upper and Lower Mantaro basins. In the Middle basin, the maximum values for TC, BOD₅, and COD were recorded in winter and spring. Strong positive and negative correlations (p-value <0.05) were obtained between the NDVI and the water quality parameters,

^a Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-11, Perú, 11-0058, E-mail: kprizambrano@gmail.com

^b Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cañete, Lima, Surco, Perú 15056.

^c Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Lima, Jesús María, Perú 15072

primarily in winter. The results suggest that NDVI is a potential indicator for analyzing water quality, useful for the implementation of predictive models

Key words: Water quality, NDVI, Remote sensing

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es uno de los principales problemas ambientales en el mundo, es así que, al año 1.4 millones de personas mueren por falta de agua potable, saneamiento e higiene adecuado¹. La contaminación de los cuerpos de agua en las cuencas hidrográficas, están originados por el crecimiento demográfico y las actividades económicas, tales como las malas prácticas de disposición de residuos sólidos, vertimientos de aguas residuales municipales e industriales, entre otros^{2,3}.

Para el año 2023 en la cuenca Mantaro se identificaron un total de 512 fuentes contaminantes, de los cuales 23 son de origen natural y 488 son de origen antropogénico. Asimismo, del total de fuentes contaminantes de origen antropogénico identificadas, 374 corresponden a aguas residuales, 86 residuos sólidos y 28 sustancias dispuestas “in situ”⁴. Por otro lado, según el registro datos abiertos del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, en el año 2022 se registraron 95 denuncias ambientales relacionadas al componente agua en la Cuenca del Mantaro⁵.

La calidad del agua en las cuencas es influenciada por la geología, el uso del suelo y las características de la cobertura del suelo⁶. Se ha demostrado a través de investigaciones relaciones fuertes entre la cobertura del uso del suelo, uso de suelos, composición del suelo, el cambio climático, índices espectrales como el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y la calidad del agua^{7,8,9}.

En ese sentido, actualmente se han implementado en la cuenca Mantaro 191 puntos de monitoreo por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) de los cuales 131 son de categoría 3, 56 de categoría 4, 1 de categoría 1 A1 y 3 de categoría 1 A2⁴. Sin embargo, la frecuencia de monitoreo no es continua o permanente en todos los puntos. Ahora bien, el monitoreo continuo de calidad del agua representa una limitación significativa, debido a los costos que implican. A pesar de ello, es información importante para la toma de decisión y la gestión de los recursos hídricos. Por ello es imperativo utilizar otras herramientas y fuentes de información, como es la generada por satélites, para complementar los monitoreos realizados en campo. En ese sentido, en la presente investigación se utilizará información satelital con la finalidad de determinar la influencia de la cobertura vegetal en la calidad del agua de la cuenca Mantaro.

PARTE EXPERIMENTAL

Base de datos de monitoreo de calidad del agua y NDVI

La base de datos de los monitoreos de calidad de agua, del periodo 2015-2022, se descargaron del Sistema de la plataforma Observatorio Nacional de Recursos Hídricos (ONRH) de la ANA, para lo cual se consideraron sólo 27 de los 131 puntos de muestreo de categoría 3, esto debido a que estos presentaron como mínimo 16 monitoreos.

Los datos del NDVI fueron obtenidos del producto MOD13Q1 V6.1, el cual es calculado a partir de la información del Instrumento Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) del Satélite Terra disponible en el catálogo de Google Earth Engine. Es así que, a través de un código implementado en el Lenguaje Programación JAVA se descargaron los datos de NDVI en la ubicación de cada punto de muestreo establecido por la ANA.

Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos (ICARHS)

Se realizó la determinación del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos (ICARHS), para ello se utilizó la metodología establecida por la Autoridad Nacional del Agua aprobada mediante la Resolución Jefatural 084-2020-ANA, considerando los siguientes periodos: 2015-10-27 al 2017-10-11 (Periodo 1), 2018-05-02 al 2019-02-27 (Periodo 2), 2019-02-28 al 2020-10-09 (Periodo 3) y 2021-05-31 al 2022-11-02 (Periodo 4).

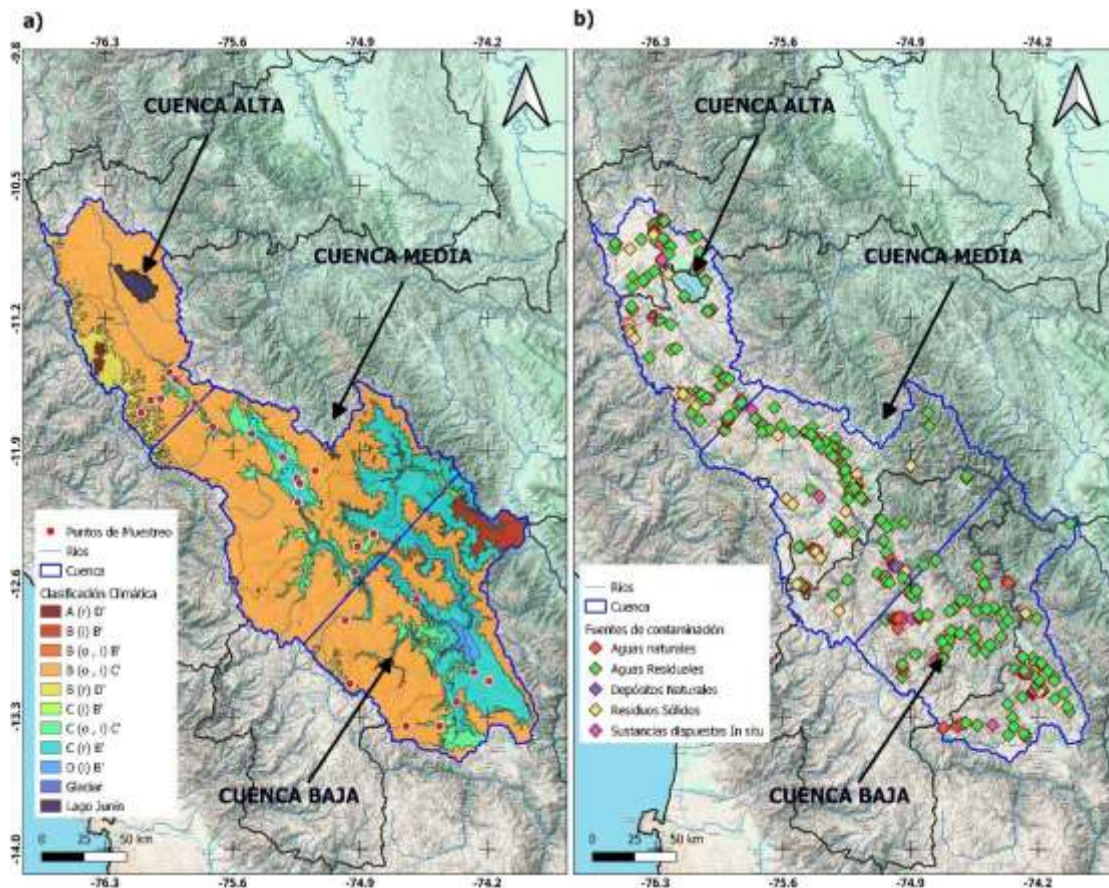


Figura 1. a) Sectores, Clasificación Climática y Puntos de Muestreo; b) Fuentes de contaminación

Análisis espacial

La cuenca Mantaro, tiene una extensión de 34 546,51 km² y posee 9 tipos de clima, siendo el clima de tipo lluvioso, frío y con otoño e invierno seco (B (o, i) C'), el cual ocupa la mayor área de la cuenca^{10, 11}(ver figura 1). Ahora bien, con la finalidad analizar la relación existente entre la cobertura vegetal y la calidad del agua de la cuenca Mantaro, se realizó la sectorización de la cuenca, en 3 tramos¹².

- El primer tramo (cuenca Alta) contenía, los siguientes puntos de monitoreo: RMant3, RMant4, RMant7, RMant9, RYaul1, RYaul4, RYaul6, RYaul7.
- El segundo tramo (cuenca Media) contenía, los siguientes puntos de monitoreo: RMant11, RMant12, RMant13, RMant14, RMant18, RMant19, RPam1, RPam2, RShul1, RShul2, RIchu2.
- El tercer tramo (cuenca Baja) contenía, los siguientes puntos de monitoreo: RMant22, RApac1, RApac2, RCach1, RDisp1, RPall2, RYuca1, RVinc1.

Tabla 1. Fuentes de contaminación en la cuenca Mantaro

Naturaleza/Tipo de fuente de contaminación	Tramo			Total
	Cuenca Alta	Cuenta Media	Cuenca Baja	
Aguas naturales	4	2	17	
Agua Minero-Medicinal (Mineral)			7	
Agua Minero-Medicinal (Termal)	3		2	
Agua Minero-Medicinal (Termo-Mineral)	1	2	8	
Aguas Residuales	94	127	153	
Agroindustriales		2	3	
Agropecuarias	12	2		
Domésticas	20	10	5	
Energéticas		1	1	
Industriales	2		2	
Minero Metalúrgicas	5	12	9	
Municipales	55	100	133	
Depósitos Naturales			1	
Depósitos no metálicos			1	
Residuos Sólidos	33	35	18	
Gestión Municipal	17	21	6	
Gestión no municipal - no peligrosos	2	4	10	
Gestión no municipal - peligrosos	14	10	2	
Sustancias dispuestas In situ	13	6	9	
Lavado de material no metálico	11	2	1	
Lavado de ropa	2	4	6	
Material de Acarreo			2	
Sub total	144	170	198	512

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se realizó la identificación de las fuentes de contaminación por tramo en la cuenca Mantaro, encontrando 512 fuentes, tal como se puede observar en la tabla 1 de los cuales se identificaron fuentes de aguas naturales, 17 en la cuenca baja, 4 en la cuenca alta y 2 en la cuenca media; respecto a la fuentes de aguas residuales, se identificó un mayor número en la cuenca baja de 153, en la cuenca media 127 y en la cuenca baja 94

fuentes; asimismo se identificó fuentes de residuos sólidos, de los cuales 35 se identificaron en la cuenca media, 33 en la cuenca alta y 18 en la cuenca baja; fuentes de sustancia dispuestas in situ que en su mayoría se identificaron en la cuenca alta y una fuente de depósitos naturales en la cuenca baja.

Normalización de datos

Con el propósito de facilitar el análisis de las variables, se realizó la normalización de los rangos de los datos, para lo cual se realizó el proceso de estandarización mediante la siguiente ecuación:

$$x_s = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde: X_s es el valor estandarizado de la variable; X es el valor original de la variable; μ es la media (o promedio) de la variable; y σ es la desviación estándar de la variable.

Análisis estadístico

Con la información del NDVI y de los parámetros de calidad del agua, se utilizó la prueba de Kolmogórov-Smirnov, con finalidad de determinar la distribución de los datos. Posteriormente se utilizó la prueba de correlación Spearman para determinar la relación entre las variables de la presente investigación.

Para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde: d_i^2 es la diferencia entre los rangos de cada par de datos del NDVI y de los parámetros de calidad del agua elevado al cuadrado; n es el número de datos.

En la tabla 2 se indican los rangos y el tipo de relación del coeficiente de correlación de Spearman.

Tabla 2. Grado de relación según coeficiente Spearman

Rango de Spearman <i>rho</i>	Relación
1 a 0.81	Correlación muy fuerte positiva
0.8 a 0.61	Correlación fuerte positiva
0.6 a 0.41	Correlación moderada positiva
0.40 a 0.21	Correlación débil positiva
0.20 a 0	Correlación negligible positiva
0	No existe correlación
0 a -0.2	Correlación negligible negativa
-0.21 a -0.4	Correlación débil negativa
-0.41 a -0.6	Correlación moderada negativa
-0.61 a -0.8	Correlación fuerte negativa
-0.81 a -1	Correlación muy fuerte negativa

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el periodo del 2015 al 2022, la Autoridad Nacional del Agua realizó monitoreos en la cuenca Mantaro. En la presente investigación se sistematizaron y seleccionaron 27 puntos de monitoreo de categoría 3, los cuales contaban con la misma cantidad de muestreos. Los estadísticos descriptivos de estos puntos de monitoreo se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las variables

Parámetro	Unidad	Media	Máximo	Mínimo
Fisicoquímicos y Orgánicos				
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	7.307	321	2
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	20.19	548	0.01
Coliformes Termotolerantes (CT)	mg/L	1781374	490000000	2
Oxígeno Disuelto (OD)	NMP/100ml	6.043	11.4	1.15
Inorgánicos				
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	8.098	9.8	3.3
Arsénico (Ar)	mg/L	0.034	0.299	0.0013
Aluminio (Al)	mg/L	1.35	43.07	0.002
Manganeso (Mn)	mg/L	9.04	823.25	0.0015
Hierro (Fe)	mg/L	6.00	364.8	0.0121
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0005174	0.0168500	0.0000100
Plomo (Pb)	mg/L	0.015861	0.856900	0.000200
Boro 5 (B5)	mg/L	0.45351	19.9000	0.00200
Cobre (Cu)	mg/L	0.017808	0.647000	0.000030
NDVI		3142	7843	23

En la cuenca Mantaro el comportamiento temporal del NDVI, es marcado según la estación del año, siendo en verano donde se registran los máximos valores y en invierno los menores valores de NDVI (ver figura 2 y 3).

Respecto a los parámetros de calidad del agua fisicoquímicos y orgánicos, también presentan un comportamiento temporal marcado según la estación del año y según el sector de la cuenca, para todos los parámetros en la cuenca Alta y Baja. Con respecto a la cuenca Media, para los CT, DBO₅ y DQO, se registraron los máximos valores en la estación de invierno y primavera.

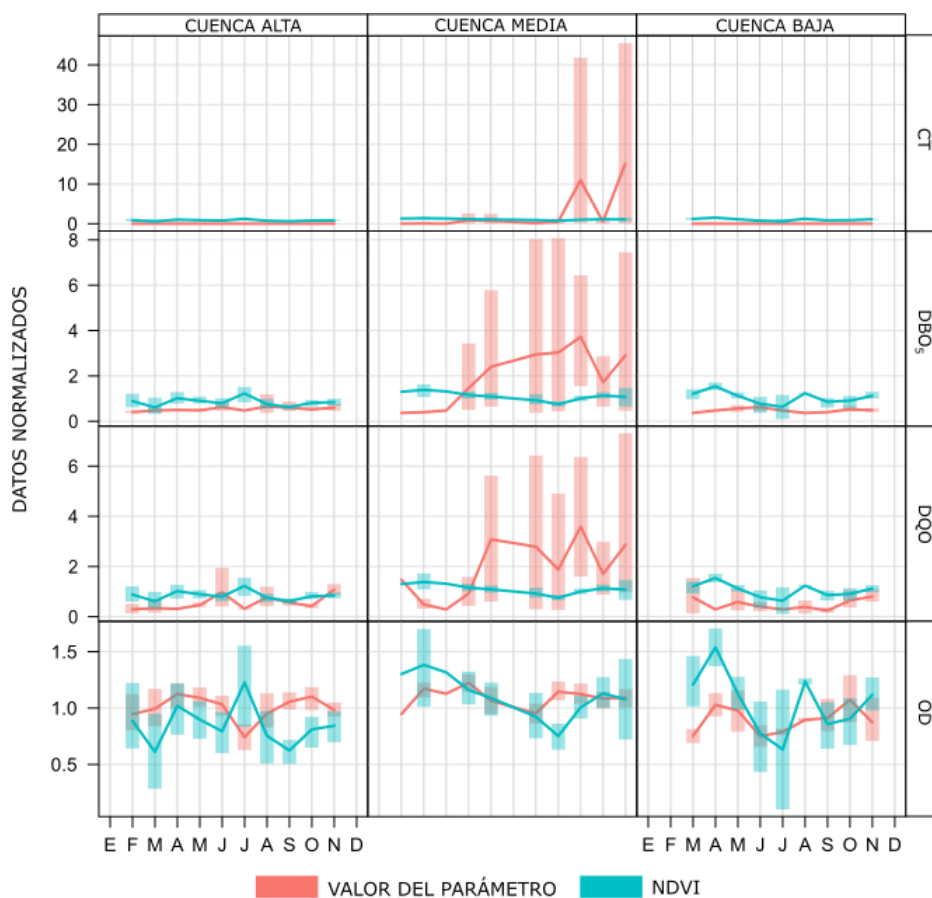


Figura 2. Comportamiento temporal normalizado – parámetros fisicoquímicos y orgánicos

Respecto a los parámetros de calidad del agua inorgánicos, también presentan un comportamiento temporal marcado según la estación del año y según el sector de la cuenca. Cabe destacar que, para estos parámetros, los máximos valores se registraron en la cuenca Alta y Baja (solo para Ar), tal como se puede observar en la figura 3.

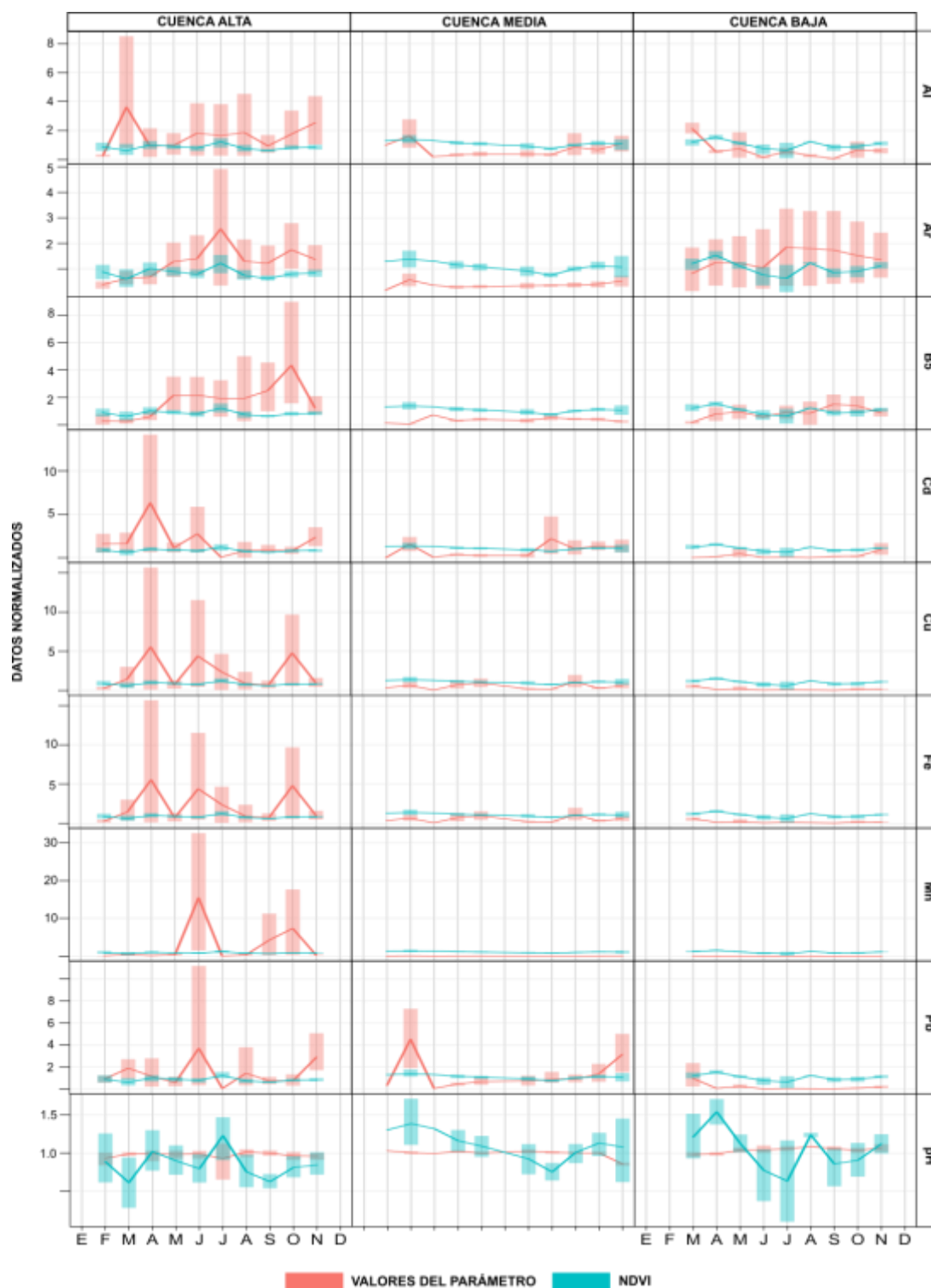


Figura 3. Comportamiento temporal normalizado – parámetros inorgánicos

Durante el periodo en estudio, los parámetros fisicoquímicos y orgánicos frecuentemente superaron sus Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-agua), siendo en el sector de la cuenca Media donde se registraron estos, tal como se puede observar en la Figura 4. En particular, los Coliformes Termotolerantes (CT) excedieron su ECA-agua de 20,000 NMP/100 mL, alcanzando valores de hasta 490,000,000 NMP/100 mL; la

Demanda Química de Oxígeno (DQO) superó su valor de ECA-agua de 30 mg/L, con un máximo de 548 mg/L; la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) superó su valor de ECA-agua de 10 mg/L, alcanzando 321 mg/L; y el Oxígeno Disuelto (OD) no cumplió con su ECA-agua de ≥ 4 mg/L, registrando un mínimo de 1.15 mg/l para los parámetros inorgánicos

Ahora bien, para determinar la calidad del agua de la cuenca Mantaro, se utilizó la metodología del ICARHS del ANA, considerando un mínimo de cuatro monitoreos. En los puntos de monitoreo RManta14, RMant18, RMant19, RShul2, RYaul1, RYaul4, RYaul6 y RYaul7, se alcanzó un ICARHS máximo de "Pésimo". Estos puntos fueron afectados principalmente por los componentes orgánicos, los cuales frecuentemente superaron sus ECA-agua.

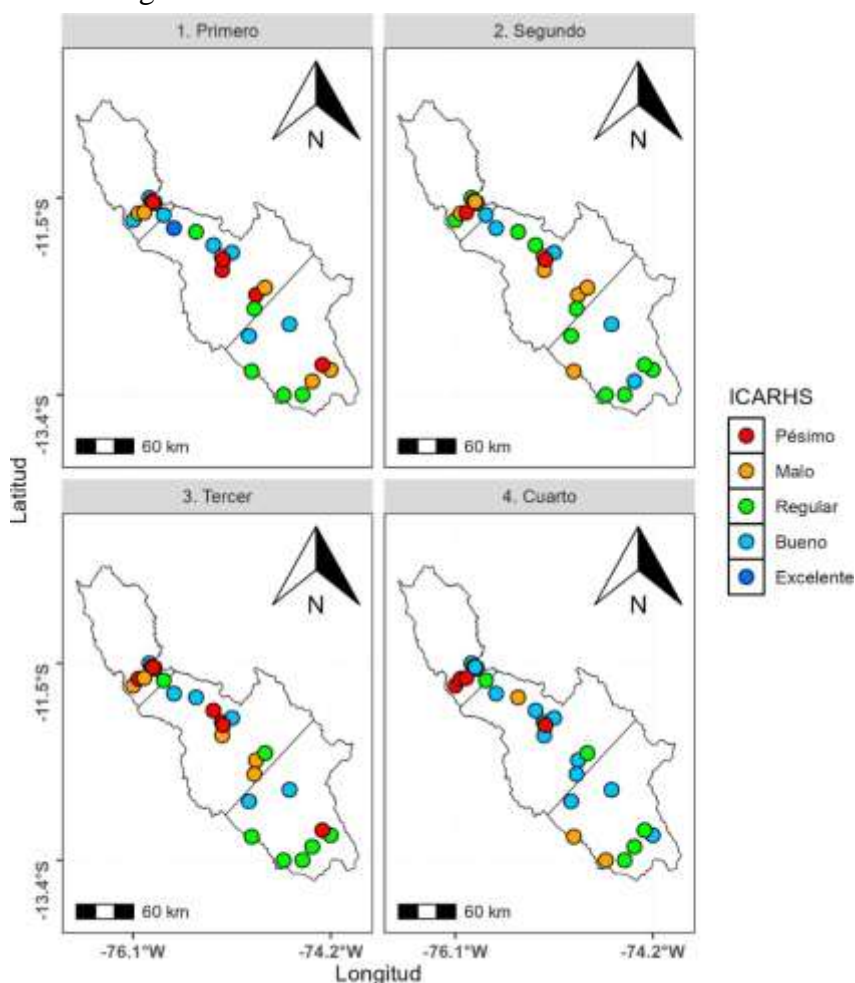


Figura 4. Determinación de ICARHS de los cuatro periodos

Dado que se quería determinar la influencia de la cobertura vegetal a través del NDVI en la calidad del agua, tanto temporal como espacial, inicialmente se realizó pruebas de normalidad para cada uno de los parámetros de calidad del agua y el NDVI utilizando la prueba de Kolmogórov-Smirnov. Al respecto, se obtuvo que ninguna de las variables presenta una distribución normal (ver tabla 4), por lo cual se optó por utilizar la prueba de Correlación de Spearman, la cual es una prueba no paramétrica.

Tabla 4. Prueba de normalidad

Parámetro	Kolmogórov-Smirnov	
	D	p-value
DBO ₅	0.17504	2.20E-16
DQO	0.2601	2.20E-16
OD	0.97178	5.52E-07
CT	0.044406	2.20E-16
pH	0.67751	2.20E-16
Ar	0.56033	2.20E-16
Al	0.35864	2.20E-16
Mn	0.10781	2.20E-16
Fe	0.17229	2.20E-16
Cd	0.30395	2.20E-16
Pb	0.26847	2.20E-16
B5	0.26845	2.20E-16
Cu	0.29514	2.20E-16
NDVI	0.049108	3.67E-12

Al respecto, luego de determinar el tipo de distribución de los datos se aplicó la prueba de correlación de Spearman y se encontraron altas correlaciones estadísticamente significativas (p -valor <0.05), indicando una relación relevante entre la cobertura vegetal y algunos de los parámetros de calidad del agua en la cuenca Mantaro.

En la figura N°5 se observa la variabilidad estacional del coeficiente de correlación de Spearman, destacándose que en invierno se registran los valores máximos de este coeficiente para todas las variables en relación con el NDVI, alcanzando una correlación muy alta positiva ($r=1$).

En términos de variabilidad espacial, para los Coliformes Termotolerantes (CT), los valores de correlación más altos se encontraron en la cuenca Alta (Tramo 1) y la cuenca Baja (Tramo 3), oscilando entre 0.48 (Correlación moderada positiva) y 1 (Correlación muy fuerte positiva). Para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la cuenca Alta (Tramo 1) presentó el valor de 0.97, la cual se clasifica como Correlación muy fuerte positiva, la cuenca media y baja presentaron valores de 0.01, las que se clasifican como Correlación negligible positiva.

En el caso de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cuenca Alta (Tramo 1) y la cuenca Baja (Tramo 3), se obtuvieron coeficientes de correlación de 0.97 y 1 respectivamente, las que se encuentran en el rango de Correlación muy fuerte positiva. Por último, respecto al Oxígeno Disuelto (OD), también fueron la cuenca Alta (Tramo 1) y la cuenca Baja (Tramo 3), donde se obtuvieron los mayores coeficientes de correlación de 0.97 y 1 respectivamente, las que se encuentran en el rango de Correlación muy fuerte positiva.

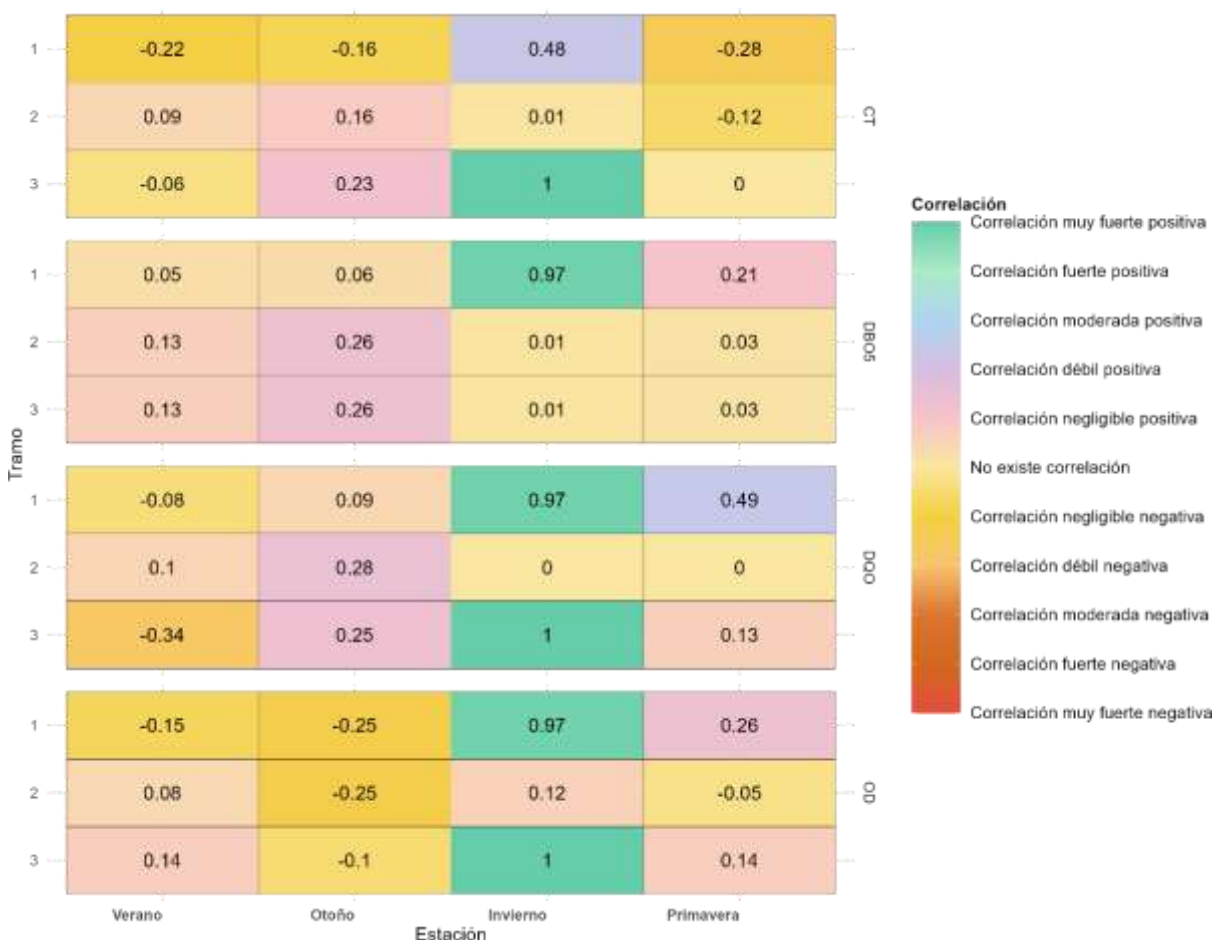


Figura 5. Parámetros Fisicoquímicos y Orgánicos – Coeficiente de correlación de Spearman.

En la figura N°6 se observa la variabilidad estacional del coeficiente de correlación de Spearman. Durante el invierno, se alcanzaron los valores máximos de correlación de Spearman, comprendidos entre -1 y 1, para todos los parámetros evaluados. Para el Aluminio (Al), el análisis espacial muestra una correlación fuerte negativa de -0.69 en la cuenca Alta (tramo 1) y una correlación muy fuerte negativa de -1 en la cuenca Baja (tramo 3). En el caso del Arsénico (Ar), se obtuvo una correlación máxima de 1 en la cuenca Alta (tramo 1) y de -1 en la cuenca Baja (tramo 3) durante el invierno. En verano, la cuenca Media (tramo 2) presentó una correlación fuerte negativa de -0.61. El Boro (B) mostró una correlación muy fuerte negativa de -1 en la cuenca Baja (tramo 3) durante el invierno. Para el Cadmio (Cd), se registraron correlaciones fuertes negativas en la cuenca Baja (tramo 3) y en la cuenca Alta (tramo 1), con valores entre -1 y -0.65, respectivamente. El Cobre (Cu) presentó correlaciones fuertes negativas en la cuenca Baja (tramo 3) y en la cuenca Alta (tramo 1), con valores de entre -1 y -0.7, respectivamente. El Hierro (Fe) también presentó correlaciones fuertes negativas en la cuenca Baja (tramo 3) y en la cuenca Alta (tramo 1), con valores entre -1 y -0.7. El Manganeso (Mn) mostró correlaciones fuertes negativas similares, con valores entre -1 y -0.7, tanto en la cuenca Baja (tramo 3) como en la cuenca Alta (tramo 1). El Plomo (Pb) alcanzó una correlación muy fuerte negativa de -1 durante el invierno en la cuenca Baja (tramo 3). Finalmente, para el pH, en la cuenca Media (tramo 2) se observó una correlación moderada negativa de -0.54 en verano, mientras que en invierno se alcanzaron

correlaciones muy fuertes negativas de -1 en la cuenca Alta (tramo 1) y en la cuenca Baja (tramo 3).

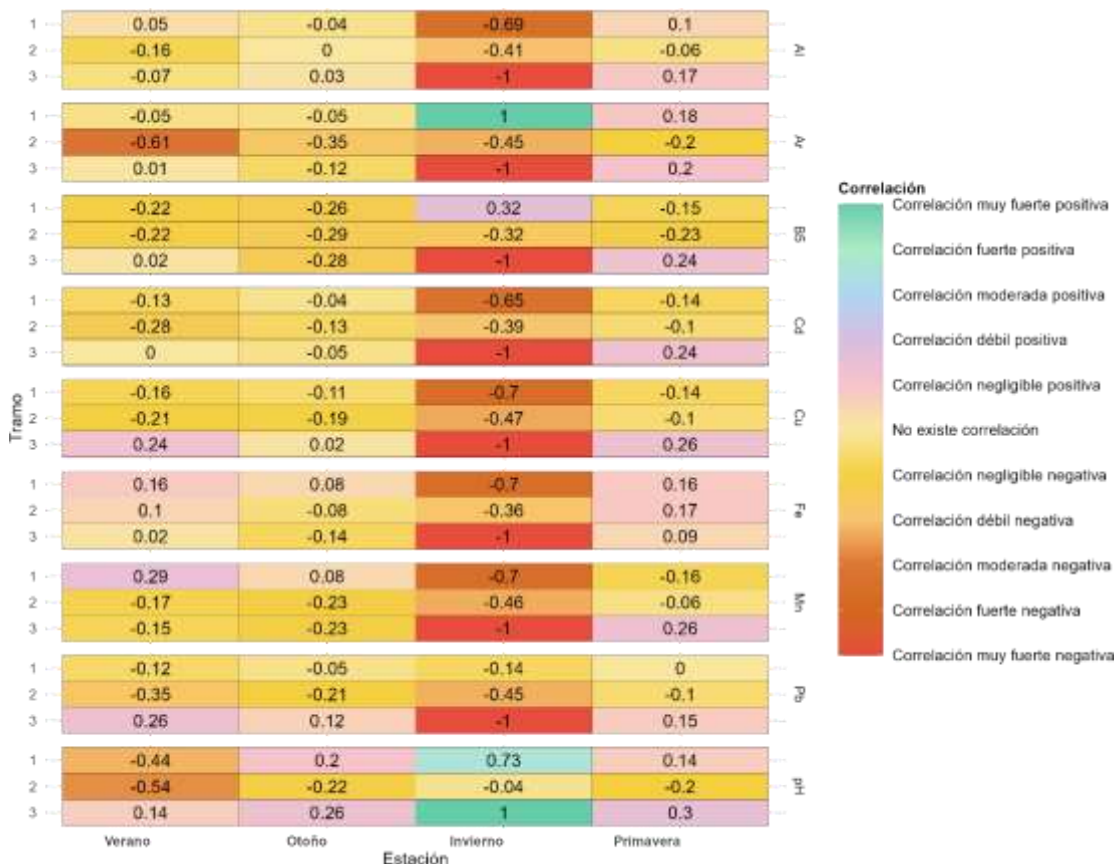


Figura 6. Parámetros Inorgánicos- Coeficiente de correlación de Spearman

Los resultados obtenidos indican que el NDVI, tiene un comportamiento temporal, que es marcado según la estación del año, es así que en verano se alcanzan los máximos valores y en invierno los mínimos valores. Al respecto, los parámetros fisicoquímicos y orgánicos de calidad del agua en la cuenca alta y baja, también presentan un comportamiento marcado por la estación del año, sin embargo, para el caso particular del OD en los tres tramos de la cuenca se cumple este comportamiento estacional. Por otro lado en el caso específico de los CT, DBO₅ y DQO se registraron los máximos valores en la estación de invierno y primavera ubicados en la cuenca Media, lo cual estaría ocasionado, por las fuentes de emisión que están localizadas en este tramo de la cuenca (ver Tabla 1), que por su naturaleza (principalmente aguas residuales) favorecen el incremento en los valores de los CT, DBO₅ y DQO¹³ y también por el descenso del caudal, lo que ocasiona poca dilución y dispersión de los efluentes^{14,15,16}. Por otro lado, respecto a los parámetros inorgánicos, estos alcanzaron sus máximos valores en la cuenca Alta, lo que estaría originado por las 5 fuentes de emisión de efluentes de aguas residuales Minero Metalúrgica¹⁷.

Existe correlación muy fuerte positiva y negativa entre la cobertura vegetal representada por el NDVI y los parámetros de calidad del agua en la cuenca Mantaro, tal como se observa en la figura 5 y figura 6. Al respecto, Vierira y Christófano¹⁸ encontraron una relación positiva entre seis de catorce parámetros de calidad del agua y el NDVI en una cuenca de clima de invierno seco y verano lluvioso, siendo estos los nitratos, color,

sólidos disueltos, sólidos suspendidos, turbidez y sólidos totales. En la presente investigación, al trabajar con puntos de monitoreo de categoría 3, se evaluaron 13 parámetros (DBO₅, DQO, OD, CT, pH, Ar, Al, Mn, Fe, Cd, Pb, B₅, Cu), todos los cuales mostraron correlaciones muy fuertes, tanto positivas como negativas, principalmente durante la estación de invierno. Este comportamiento podría deberse a que en invierno se registran los caudales mínimos y las precipitaciones más bajas en la cuenca del Mantaro, que presenta un clima lluvioso con otoño e invierno secos¹¹, por lo cual al haber menos caudales generan menos dispersión y dilución^{14,15,16}. Estas condiciones climatológicas son similares a las descritas en el estudio de Vierira y Christófano¹⁸, lo que explica por qué se obtuvieron las mejores correlaciones en invierno en la cuenca Mantaro. Además, el NDVI proporciona información sobre la distribución espacial y la dinámica temporal de la vegetación, factores clave que influyen en la calidad del agua^{18,19}.

Ahora bien, en la presente investigación, los parámetros fisicoquímicos, orgánicos e inorgánicos, para todos se obtuvieron correlaciones muy altas positivas y negativas en la estación de invierno, a diferencia por lo obtenido por Vierira y Christófano¹⁸ y Sanchez⁶, que solo obtuvieron mejores relaciones entre los parámetros fisicoquímicos. Al respecto, se debe indicar que en las mencionadas investigaciones no se incluyeron parámetros orgánicos de calidad del agua, por lo que no se tiene la certeza que en esos estudios hubieran obtenido similares o diferentes resultados que en la presente investigación.

Finalmente, es importante precisar, que el NDVI es un indicador potencial para analizar la calidad del agua, que podría utilizarse para la implementación de modelos para la predicción de la calidad del agua de un cuerpo de agua^{6,18,19,20}.

CONCLUSIONES

La cobertura vegetal, representada por el NDVI, influye significativamente en la calidad del agua de la cuenca del Mantaro. Se observó una correlación fuerte (positiva y negativa) entre el NDVI y los parámetros de calidad del agua (fisicoquímicos, orgánicos e inorgánicos), lo cual varía según la estación del año, particularmente en invierno.

Los resultados muestran que la calidad del agua en la cuenca del Mantaro varía estacionalmente, alcanzando máximos en verano y mínimos en invierno. Este comportamiento está influenciado por el NDVI, que refleja la dinámica estacional de la vegetación.

La calidad del agua presenta diferencias significativas en las distintas secciones de la cuenca Mantaro. Los parámetros fisicoquímicos y orgánicos alcanzaron sus valores más altos en la cuenca media, donde hay mayor impacto de fuentes de emisión de aguas residuales, mientras que los parámetros inorgánicos se concentraron en la cuenca alta debido a fuentes de efluentes minero-metalúrgicos. Estas variaciones espaciales demuestran cómo las condiciones de vegetación y fuentes de emisión influyen de manera diferenciada en la calidad del agua a lo largo de la cuenca del Mantaro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Organización Mundial de la Salud. Saneamiento. [Internet]. OMS; 22 de marzo 2024 [citado 18 jun 2024]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>.
2. Anh NT, Can LD, Nhan NT, Schmalz B, Luu TL. Influences of key factors on river water quality in urban and rural areas: A review. *Case Stud Chem Environ Eng.* 2023;8:100424. doi:10.1016/j.cscee.2023.100424.
3. Strokal M, Bai Z, Franssen W, Hofstra N, Koelmans AA, Ludwig F, et al. Urbanization: an increasing source of multiple pollutants to rivers in the 21st century. *npj Urban Sustain.* 2021;1(1):1-13.
4. Visor por Cuencas - ANA. [Internet]. (s. f.). Autoridad Nacional del Agua [citado 22 jul 2024]. Disponible en: <https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/>
5. Denuncias SINADA · OEFA - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental del Perú. [Internet]. (s. f.). OEFA - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental del Perú. [citado 10 jul 2024]. Disponible en: <https://datosabiertos.oefa.gob.pe/dataviews/250325/denuncias-sinada/>
6. Ferrer-Sánchez Y, Castillo AJR, Plasencia-Vázquez AH, Abasolo-Pacheco F. Impacto del uso de suelo y la fragmentación del paisaje sobre la calidad del agua del río Teaone en Ecuador. *Rev Int Contam Ambient.* 2024; 40:15-36.
7. Haidary A, Amiri BJ, Adamowski J, Fohrer N, Nakane K. Assessing the Impacts of Four Land Use Types on the Water Quality of Wetlands in Japan. *Water Resour Manage.* 2013;27(7):2217-29.
8. Hosseini N, Johnston J, Lindenschmidt KE. Impacts of Climate Change on the Water Quality of a Regulated Prairie River. *Water.* 2017;9(3):199. doi:10.3390/w9030199.
9. Torres-Bejarano F, Torregraza-Espinosa AC, Martínez-Mera E, González-Márquez LC. Impact of land cover changes on water quality: an application to the Guájaro reservoir, Colombia. *Int J Environ Sci Technol.* 2023;20(4):3577-90.
10. Autoridad Nacional del Agua. Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Mantaro. [Internet]. ANA; noviembre 2015. [Citado 23 set 2024]. Disponible en: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/36>
11. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Mapa climático del Perú. [Internet]. SENAMHI; 2020. [Citado 10 set 2024]. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/mapas/mapa-climatico-v2/>
12. EcuRed. Río Mantaro [Internet]. ECURED; 2022. [Citado 10 oct 2024]. Disponible en: https://www.ecured.cu/R%C3%ADo_Mantaro
13. Gqomfa B, Maphanga T, Shale K. The impact of informal settlement on water quality of Diep River in Dunoon. *Sustain Water Resour Manag.* 2022;8(1):27. doi:10.1007/s40899-022-00629-w
14. Hashemi Monfared SA, Dehghani Darmian M, Snyder SA, Azizyan G, Pirzadeh B, Azhdary Moghaddam M. Water Quality Planning in Rivers: Assimilative Capacity and Dilution Flow. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2017;99(5):531-41.
15. Tilahun AB, Dürr HH, Schweden K, Flörke M. Perspectives on total phosphorus response in rivers: Examining the influence of rainfall extremes and post-dry rainfall. *Sci Total Environ.* 2024 Aug 25;940:173677. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173677.
16. Bae HK. Changes of River's Water Quality Responded to Rainfall Events. *Environ Ecol Res.* 2013;1(1):21-5.

17. Qasem NAA, Mohammed RH, Lawal DU. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*. 2021;4(1):1-15.
18. Resende Vieira F, Christofaro C. Contributions of the vegetation index (NDVI) in water quality prediction models in a semi-arid tropical watershed. *J Arid Environ*. 2024;220:105122. doi:10.1016/j.jaridenv.2024.105122.
19. Griffith JA, Martinko EA, Whistler JL, Price KP. Interrelationships Among Landscapes, Ndvi, and Stream Water Quality in the U.s. Central Plains. *Ecol Appl*. 2002;12(6):1702-18.
20. Alberti M, Booth D, Hill K, Coburn B, Avolio C, Coe S, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Lands Urban Plan*. 2007;80(4):345-61.