

Análisis de los índices de vegetación y variabilidad climática en la cuenca alta del Río Guayllabamba para el periodo 1990 - 2023

Lizbeth Carvajal¹; Estefanía Paredes¹; Teresa Palacios¹

Resumen

Se realizó un monitoreo de vegetación y variabilidad climática en la cuenca alta del Río Guayllabamba para la temporada de estiaje y lluvia, utilizando los índices espectrales GNDVI, NDWI, NDVI en el periodo de 1990 a 2023. Los datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas se extrajeron de las estaciones meteorológicas obtenidas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), complementadas con la Red de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ) y el sensor remoto satelital de Google Earth Engine. Tras analizar las series de tiempo creadas con los datos de temperatura máxima, mínima y precipitación en los 33 años, como resultado, se evidenció que los valores obtenidos pueden proporcionar información para futuras investigaciones sobre la vulnerabilidad de la población ante desastres naturales como inundaciones. Además, la información estudiada permitirá implementar medidas preventivas frente a riesgos naturales y antrópicos.

Palabras clave: Precipitación, temperatura, vegetación, uso de suelo, variabilidad climática.

Analysis of the vegetation and climate variability indices in the upper basin of the Guayllabamba River for the period 1990 - 2023

Abstract

Vegetation and climate variability monitoring was carried out in the upper basin of the Guayllabamba River for the dry and rainy season, using the spectral indices GNDVI, NDWI, NDVI in the period from 1990 to 2023. Precipitation data, maximum and minimum temperatures were extracted from meteorological stations obtained from the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI), complemented by the Atmospheric Monitoring Network (REMMAQ) and the Google Earth Engine remote satellite sensor. After analyzing the time series created with the maximum, minimum temperature and precipitation data in the 33 years, as a result, it was evident that the values obtained can provide information for future research on the vulnerability of the population to natural disasters such as floods. In addition, the information studied will allow the implementation of preventive measures against natural and anthropogenic risks. Keywords: Precipitation, temperature, vegetation, land use, climate variability.

Keywords: Precipitation, temperature, vegetation, land use, climate variability.

Recibido: 14 de mayo de 2024
Aceptado: 14 de agosto de 2024

¹Escuela de Ingeniería Ambiental/ Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental/ Universidad Central del Ecuador

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el clima ha presentado alteraciones por el impacto del cambio y la variabilidad climática, lo que puede traer repercusiones al futuro. Según la IPCC, el cambio climático es una variación estadística importante en el estado medio del clima, que persiste durante un período prolongado con respecto a un historial climático, tanto a escala regional, global y sobre varios parámetros meteorológicos, puede darse por procesos como ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos (IPCC, 2018). Por su parte, la variabilidad climática son las variaciones del estado medio y características estadísticas como desviación típica, sucesos extremos del clima en todas las escalas espaciales y temporales que se genera por procesos internos naturales del sistema climático a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénicos (Fonseca, 2019).

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO), es cíclico, pero no periódicamente en el Océano Pacífico Ecuatorial Oriental y Central, que empiezan en diciembre y son la más importante variabilidad climática en Ecuador, por los efectos de este evento tropical en las condiciones meteorológicas sobre la temperatura, precipitación, circulación del viento, corrientes marinas y actividades humanas relacionadas con el tiempo meteorológico. Este ciclo tiene dos fases El Niño (fase cálida) es un calentamiento en las aguas superficiales de la porción oriental y central del océano Pacífico ecuatorial, ocurre entre 2 a 7 años, con duración de unos 9 a 18 meses, mientras que la Niña (fase fría) es fenómeno contrario, un enfriamiento, con similares períodos y duración (IPCC, 2018). Según Arellano y Ruiz, este fenómeno puede dejar inundaciones o sequías dependiendo de la fase e intensidad del evento (Arellano y Ruiz, 2019).

Los índices de vegetación proporcionan datos valiosos sobre la salud y la densidad de la vegetación, para monitorear sequías y evaluar el estrés hídrico en las plantas. Lo que permite comprender mejor los cambios ambientales y su relación con el clima. La salud de la vegetación es un indicador directo de las condiciones climáticas, ya que la disponibilidad de agua y la temperatura influyen en el crecimiento de las plantas, afectando a los ecosistemas.

La presente investigación tiene como objetivo realizar un análisis de índices de vegetación NDVI,

NDWI Y GNDVI para las épocas de verano e invierno y el impacto de la variabilidad climática, utilizando información de anuarios meteorológicos y datos extraídos de satélites, para los años de 1990 al 2023 de las variables temperatura y precipitación en la cuenca hidrográfica Guayllabamba ubicada en Pichincha-Quito.

II. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

La cuenca alta del río Guayllabamba está ubicada concretamente entre las provincias de Pichincha e Imbabura, siendo una de las zonas más pobladas del Ecuador con 2,5 millones de personas; esta cuenca tiene influencia de microcuencas de la región oriental (Oyacachi, Papallacta y Antisana), consideradas importantes ya que es la principal fuente de abastecimiento y drenaje de recursos hídricos para el Distrito Metropolitano de Quito. Esta cuenta presenta una superficie aproximada de 6300 [km²], que se extienden desde una cota máxima de 5893 m.s.n.m. (Volcán Cotopaxi), a su cota de cierre a 870 m.s.n.m., en la unión con el río Alambí (Caiza, 2022).

En cuanto a las características climáticas, la temperatura fluctúa de 12 a 18 °C en donde consta de varios tipos de ecosistemas de clima cálido como son los espacios agrarios (áreas de cultivos de rosas y pastos). (Tenelema, 2022)



Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca alta del Río Guayllabamba

2.2. Índices de Vegetación

Los cálculos en este artículo corresponden a los Índices de Vegetación Normalizado (NDVI), Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada verde GNDVI, los cuales fueron calculados a partir de la reflectividad en diferentes bandas, que indican

la abundancia y estado de la vegetación. La firma espectral característica de la vegetación sana muestra un fuerte contraste entre la baja reflectividad en el rojo y la alta reflectividad en el infrarrojo. Esta diferencia es tanto mayor cuanto mayor es la densidad de la vegetación y mejor su estado fitosanitario (Rouse et al., 1974).

2.2.1 Índice Vegetación Normalizado (NDVI):

Este índice varía entre -1 y 1, lo que facilita su interpretación. Puede señalarse como umbral crítico para cubiertas vegetales un valor de NDVI de 0.1 y para la vegetación densa de 0.5. Cualquier valor negativo implica ausencia de vegetación por lo que debieran reclasificarse a cero. (Zeng et al., 2022)

Donde:

NIR: Banda 5 de la imagen de Landsat 8 (reflectividad en el infrarrojo cercano)

VIS: Banda 4 de la imagen de Landsat 8 (reflectividad en el rojo)

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

2.2.2 El Índice Normalizado de Diferencia del Agua Verde (NDWI):

Los valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad. El cálculo para detectar el contenido de superficies de agua es con la siguiente ecuación. (Pereira et al., 2018)

$$NDWI = \frac{Banda\ verde - Banda\ NIR}{Banda\ verde + Banda\ NIR} \quad (2)$$

2.2.3 El Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GDVI)

GNDVI es muy sensible al cambio en el contenido de clorofila, que está relacionado con el contenido de nitrógeno perteneciente al efluente, este se encuentra a partir de la siguiente ecuación. (Revelo et al., 2020)

$$GNDVI = \frac{NIR - Verde}{NIR + Verde} \quad (3)$$

El cálculo para detectar el contenido de nitrógeno utiliza la siguiente fórmula:

$$GNVI_{Nitrogeno} = \frac{NIR - (690\ nm - 710\ nm)}{NIR - (690\ nm - 710\ nm)} \quad (4)$$

Por otro lado, después de muchos estudios realizados, se encontró que el uso del rayo verde para la detección del contenido de nitrógeno era más eficaz que el índice de vegetación normal. Por lo tanto, GNDVI usa la siguiente ecuación.

$$GNVI_{Nitrogeno} = \frac{NIR - (540\ nm - 570\ nm)}{NIR - (540\ nm - 570\ nm)} \quad (6)$$

La longitud de onda que se usó en la ecuación anterior se desplazó al borde verde en orden para obtener un resultado más claro de las imágenes de satélite, donde NIR es la banda del infrarrojo cercano del Landsat 8. Utilizando imágenes satelitales de los años 2022 y enero 2023 se trata de visualizar el contraste entre las clases de densidad de vegetación de la zona de estudio.

2.3. Variabilidad Climática

2.3.1 Recolección de datos

Los datos climatológicos de los anuarios de la Agencia Meteorológica Nacional del Ecuador (INAMHI), así como de los conjuntos de datos ERA 5 y REMMAQ, proporcionaron la información necesaria para la ejecución de estudios y proyectos. Se utilizaron datos de cinco estaciones de monitoreo, seleccionadas específicamente para este estudio. Los factores considerados para la selección de estas estaciones fueron la precipitación y la temperatura, de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Fuentes de obtención de datos climáticos

Variables	Fuentes
Temperatura	INAMHI / ERA 5 / REMMAQ
Precipitación	INAMHI / ERA 5 / REMMAQ

Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Validación de datos

Las estaciones meteorológicas presentan datos faltantes por este motivo se realiza el proceso de relleno mediante la implementación de los satélites TerraClimate y Era5 los cuales tienen una resolución de 4 y 11 km respectivamente en el que se empleó técnicas estadísticas y metodologías de interpolación mediante el diagrama de dispersión aplicado para cada estación, así como los valores del coeficiente de

determinación R2 y correlación de Pearson, lo cual dio la observación que el satélite TerraClimate se ajusta de mejor manera a los datos obtenidos de los anuarios de las estaciones meteorológicas.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas

Código	Nombre	Altitud	Longitud	Latitud
M0002	La Tola	2480	792709.73	9974351.84
M0003	Izobamba	3058	772144.9	9959527.4
M5041	Chillos	-	-782469	9966441
M5040	Tumbaco	-	-789174	9976398
M5037	Belisario	-	-779698.3	9980700
M5038	El Camal	2858	777624	9972341.1

El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar (Abuín, 2007). De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será. Mientras que el coeficiente de correlación es un valor sin unidades entre -1 y 1, pero si estos valores se aproximan a cero más débil es la relación lineal que existe entre las variables de interés, así mismo los valores positivos indican una correlación positiva, en la que los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos (López, 2017).

Sin embargo, autores mencionan que para el análisis estadístico de variables climatológicas un valor aceptable para una correcta correlación será mayores a 0.4, si existen valores inferiores al mencionado no se deberá realizar el relleno de datos faltantes, tal y como se muestra en la Tabla N°3.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas

Variable	Estación	Coefficiente de Correlación	R2
Precipitación	M0002	0.8524	0.7266
	M0003	0.8952	0.5272
	M5041	0.9763	0.9485
	M5040	0.9662	0.9336
	M5037	0.94019	0.884
	M5038	0.845	0.7224

Temperatura Máxima	M0002	0.7123	0.5074
	M0003	0.6997	0.4896
	M5041	0.723	0.5228
	M5040	0.17557	0.375
	M5037	0.4594	0.211
Temperatura mínima	M5038	0.5815	0.4516
	M0002	0.7522	0.5658
	M0003	0.6687	0.4471
	M5041	0.6519	0.482
	M5040	0.2138	0.0457
M5037	0.534	0.2852	
M5038	0.5598	0.2537	

Fuente: Elaboración propia

Las variables de la Tabla N°3 corresponden a precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, donde se observa los datos estadísticos de los coeficientes de correlación y coeficientes de determinación, como se mencionó anteriormente para que los datos sean aceptables estos deben tener valores mayores a 0.4 por tratarse de variables meteorológicas, sin embargo, en la estación meteorológica M5040 correspondiente a Tumbaco las variables de temperatura máxima y mínima presentan valores inferiores a lo esperado, debido a que dicha estación funciona de manera automática y esta es una de las razones por las que se obtuvieron valores erróneos de las variables meteorológicas.

Este defecto es muy visible en estaciones mal situadas, o con una débil protección de los sensores. Así, las temperaturas máximas y mínimas pueden sobrestimarse o subestimarse dependiendo de si los sensores están desprotegidos o están en lugares donde no hay insolación, o incluso si la protección disminuye la temperatura en comparación con los valores reales. Para los análisis de variabilidad climática no se considerará la estación meteorológica correspondiente a Tumbaco. (Lahura, 2003)

III. RESULTADOS

3.1 Índices espectrales de vegetación

En los mapas se determinó el método de Índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI), que muestra las actividades fotosintéticas y el consumo del agua en la vegetación, notándose que

la estación con mayor actividad es en verano, porque hay mayor captación de energía solar, además de mostrar mayor sensibilidad al contenido de clorofila a diferencia de invierno.

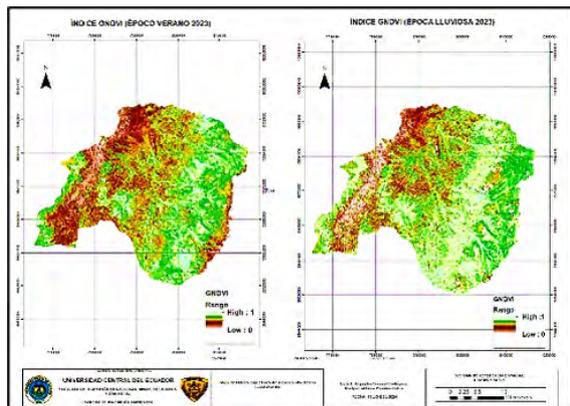


Figura 2. Comparación Índice GNDWI (Época Verano 2023) vs Índice GNDWI (Época Lluviosa 2023)

El Índice Normalizado de Diferencial del Agua (NDWI) es una herramienta eficaz para identificar y monitorear cuerpos de agua. En la (Fig. 3), el color celeste representa los cuerpos de agua, mientras que el verde indica vegetación saludable, indicador del contenido de humedad en el suelo y el café es el estrés hídrico de la zona.

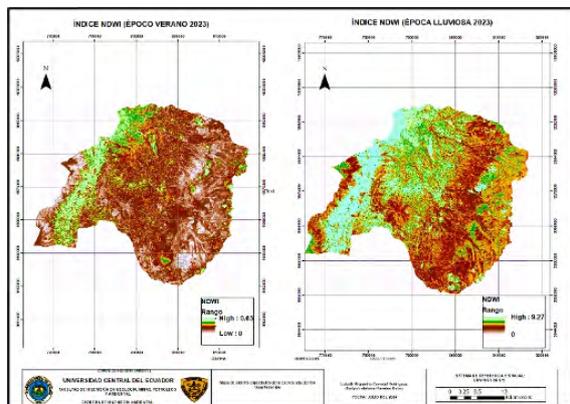


Figura 3. Comparación Índice NDWI (Época Verano 2023) vs Índice NDWI (Época Lluviosa 2023)

El índice diferencial de vegetación normalizado NDVI muestra la presencia de cobertura vegetal saludable en el lugar, donde se observa que en invierno posee una densa cobertura de vegetación, pero por la presencia de nubes se altera la sensibilidad del índice para captarla.

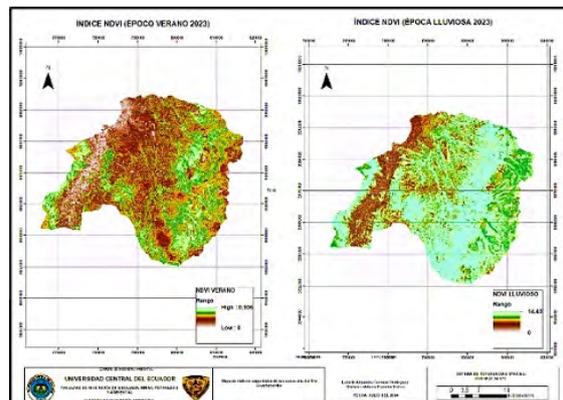


Figura 2. Comparación Índice NDVI (Época Verano 2023) vs Índice NDVI (Época Lluviosa 2023)

3.2 Variabilidad Climática

3.2.1 Temperatura

El tiempo de temperatura promedio de la Figura 2 representa el incremento de la temperatura que corresponde a una recopilación de datos de temperatura superficial elevado dado en temporadas y que varían según la estacionalidad presentada por años.

Entre septiembre y noviembre de 2009, se exponen valores medianamente altos de temperatura, y también se observa el aumento de temperatura entre marzo y mayo durante el año 2020. El valor más alto de temperatura en relación con todos se visualiza en marzo del año 1998 con un valor perteneciente de 15.8 °C. Desde el punto de vista de temperaturas bajas, se tiene que en los meses de julio y septiembre del año 2007 se expone los valores medianamente bajos de temperatura, en el que el valor más bajo se visualiza en el mes de mayo del año 1999 con un valor de 11,20 °C. Un tema para considerar es que la serie de tiempo muestra una tendencia creciente de temperatura y a partir del año 2013 va ascendiendo, excepto durante el período de años 2018 al 2019 donde se observa un decrecimiento de la temperatura.

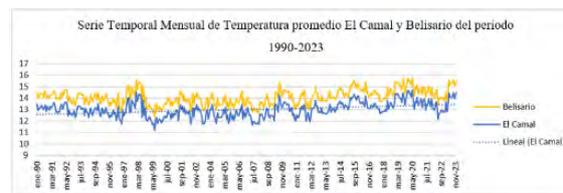


Figura 4. Serie Temporal Mensual de Temperatura promedio El Camal y Belisario

En la serie de tiempo de temperatura de la Figura 5, se observa que en abril y septiembre del 2009 se exponen valores medianamente altos de temperatura. De igual manera, se observa un aumento de temperatura considerable en enero de 1998. El valor más alto de temperatura se visualiza en mayo del 2020, al cual le corresponde una temperatura de 16,8 °C. En cuanto a las temperaturas bajas, se mantiene los valores bajos durante junio a diciembre del 2007, mientras que el valor más bajo se visualiza en el mes de julio del año 1999 con 13,35°C. Para la serie de tiempo se expone una tendencia creciente de temperatura, excepto durante el período de años de 1998 a 1999 donde se observa un decrecimiento de la temperatura, así como también en los años que va de 2006 a 2007 y la temperatura vuelve a ascender ya en el 2012.

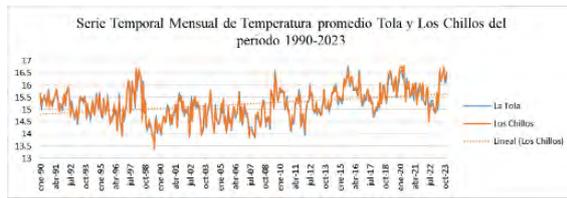


Figura 5. Serie Temporal Mensual de Temperatura promedio La Tola y Los Chillos

En el caso de la serie de tiempo de temperatura de la Figura 6 que corresponde a la estación la Izobamba, de plano se observa una tendencia decreciente con algunos períodos en el que no cumple, como es en los meses de enero del 1998 y enero del 2020 donde se registran los valores más altos de temperatura; mientras que el registro de valor menor de temperatura que se destaca se encuentra en el mes de marzo del 1999 donde se presenta 9,4 °C. Para efecto de los valores medianos se puede visualizar en el transcurso en los meses de los años 2001 y 2007.

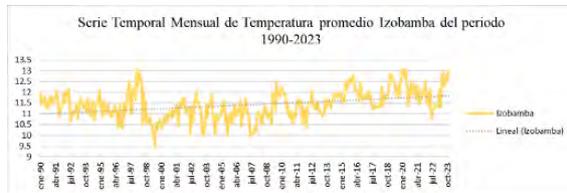


Figura 6. Serie Temporal Mensual de Temperatura promedio Izobamba

3.2.2 Precipitaciones

En la Figura 7, se aprecia el comportamiento de la precipitación en la cuenca alta del río Guayllabamba durante el período 1990-2023, donde se visualizan valores máximos y mínimos similares en cada

estación, salvo en 1998, 2002, 2003 y 2015 donde hay precipitaciones más elevadas. En la estación Los Chillos se registra la mayor precipitación con 439 mm en octubre de 2003, mientras que el valor menor registrado se presenta en la estación La Tola con 2 mm en julio de 2000.

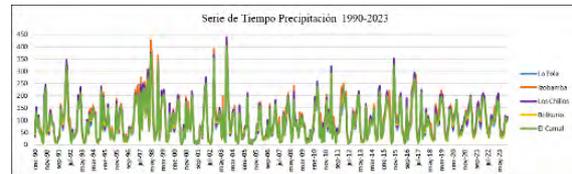


Figura 7. Serie Temporal Precipitaciones 1990-2023

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al analizar las series de tiempo temporal de la temperatura promedio en las cinco estaciones en el periodo de 1990-2023 se observó que los picos más altos fueron en la estación Los Chillos con 16.8 °C y la estación la Tola con 16.75 °C registrados en el año 2020 sin embargo tanto la estación Camal, Belisario, Chillo e Izobamba presentan una tendencia creciente con el pasar de los años a diferencia de la Izobamba la cual su tendencia a pesar de ser creciente predomina las temperaturas bajas alcanzando su pico más bajo en año 1999 con 9.4 °C

Esto nos lleva a que los patrones climáticos se alteran temporalmente de manera recurrente con las fases extremas de la variabilidad climática o pueden modificarse por largos períodos debido a los cambios climáticos. La alteración de tales patrones incide en la relación clima-ecosistema o clima - sociedad con efectos socioeconómicos que pueden ser adversos para esta.

Para analizar el comportamiento de la precipitación de la cuenca del río Guayllabamba, determinado por la variabilidad climática, donde se muestran los cambios en los valores totales anuales en la precipitación desde 1990 hasta 2023 y allí se observa que, en 2000, y 2005 se presentaron los valores anuales más bajos, comprendiendo 2 mm y 5 mm respectivamente, mientras que, en 1998, 2002, 2003 y 2015 se presentaron los valores anuales más altos, llegando a 426 mm, 366 mm, 421 mm y 338 mm respectivamente, de lo cual se desprende que fueron los meses con más lluvia de lo normal. Se puede determinar ciclos interanuales esto con el fin de identificar posibles señales como lo son los fenómenos de El Niño (aguas más cálidas que lo normal en el Pacífico tropical) y de La Niña (aguas

más frías que lo normal en el Pacífico tropical), los cuáles causan variaciones de presión atmosférica en el Pacífico tropical (conocidos como la Oscilación del Sur), lo que altera la circulación en la atmósfera tropical e induce anomalías climáticas (Milas, 2019).

El análisis de los índices NDVI, GNDVI y NDWI, determinan la salud de la vegetación y la disponibilidad de agua en un ecosistema. El NDVI mide la densidad de la vegetación, siendo un indicador de la productividad fotosintética, como se observa en la figura 4, de la izquierda los valores más cercanos a 0, indican menor vegetación relacionado con una baja disponibilidad de agua.

El índice GNDVI, proporciona una mayor sensibilidad a los cambios en el contenido de clorofila, permitiendo una evaluación más precisa del estrés hídrico en las plantas, los valores bajos son indicadores y el NDWI complementa estos índices al medir la cantidad de agua en la vegetación y en el suelo, lo que es crucial para comprender la disponibilidad de recursos hídricos en el área estudiada. Los índices NDVI y el GNDVI ofrecen una imagen completa de cómo la vegetación responde a las variaciones en la disponibilidad de agua y la calidad del suelo, permitiendo monitorear los cambios estacionales y las variaciones climáticas a largo plazo y cómo estos afectan la salud de los ecosistemas, proporcionando datos esenciales para la planificación de la gestión de recursos naturales.

V. CONCLUSIONES

Según los resultados de las series temporales analizadas, se expusieron patrones climáticos que varían con cierta frecuencia en sus fases extremas de la variabilidad climática, y su comportamiento se puede expandir por largos períodos por el cambio climático. Lo cual indica que en la Cuenca alta del río Guayllabamba en los últimos 33 años han existido actividades de gran impacto, que incidieron en el comportamiento del clima creando alteraciones en el ecosistema y facilitando la ocurrencia de eventos extremos como inundaciones o sequías. A su vez, se pudo evidenciar que para que un monitoreo de cambio y variabilidad climáticos tenga mayor exactitud, es necesario que las autoridades realicen una mejor recolección de datos en las estaciones meteorológicas.

Mediante los resultados de los índices espectrales

de vegetación en diferentes épocas del año se brinda una visión integral de la salud de la vegetación y la disponibilidad de agua. Estos resultados son cruciales para la planificación y gestión de recursos naturales, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático y promoviendo prácticas agrícolas y de conservación del medio ambiente.

VI. REFERENCIAS

Abuín, R. (2007). Regresión lineal múltiple. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25164w/M1CDN109_S2_Regresion_lineal_multiple.pdf

Amador, J., 2009. *Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático*. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, Volumen 11, pp. 39-52.

Arellano, J.; & Ruiz, L. (2019). Variabilidad climática y eventos extremos en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 249-274. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-10

Caiza Tintin, D. (2022). *Influencia de los cambios de uso del suelo sobre la disponibilidad de agua: el caso de la cuenca alta del Río Guayllabamba: análisis del cambio del uso del suelo en la cuenca alta del Río Guayllabamba* (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022

Fonseca, C. (2019). *Variabilidad climática*. Editorial AMA. http://ccc.insmet.cu/cambioclimaticoencuba/sites/default/files/resultados/03%20VARIABILIDAD%20CLIMATICA_o.pdf

Guevara, J (2008) «EL ABC DE LOS ÍNDICES USADOS EN LA IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN CUANTITATIVA DE EL NIÑO - OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO),» TERRA, vol. XXIV, n° 35, pp. 86140.

Hernández, R., & Barrios, H. (2017) Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac, Monterrey, 2017.

IPPC. (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento*

de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf

J. C. S. L. G. A. C. L. B. T. O. F. R. M. J. F. P. I. M. & R. J. F. Manuel, 2020 «LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA», 26 A [En línea]. Available:

Lahura, E. (2003). EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN Y CORRELACIONES ESPÚREAS . <https://core.ac.uk/download/pdf/6445817.pdf>

López, F. (2017). Coeficiente de determinación (R cuadrado). <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.htm>

Lopera-Pareja, E. (2017) *¿Esto es por el cambio climático? Los fenómenos meteorológicos extremos en la prensa española (2000-2010): ocurrencia y atención mediática*, Disertaciones, Madrid

Navas, M., Matovelle, C., Vélez, A., & Córdova, F. (2022) «Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña,» *Alfa publicaciones*, vol. 41.

Pereira, L. E., Amorim, G., Grigio, A. M., & Paranhos Filho, A. C. (2018). *Análise comparativa entre métodos*

de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em área úmida continental. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(2), 654-662.

Revelo Luna, D., Mejía Manzano, J., Montoya-Bonilla, B. P., & Hoyos García, J. (2020). *Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (Coffea arabica)*. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 298-312.

Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (No. E75-10354).

Talha M, K. Abdullah, M. Nawawi, N. Norulaini, Z. Ahmad, M. Syakir y M. Abdul, (2019) «Prioritization of Flood Vulnerability Zones Using Remote Sensing and GIS for Hydrological Modelling, Irrigation and Drainage, vol. 68, n° 2. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>.

Tenelema A. (2022). *Disponibilidad de agua en el futuro en base a escenarios de Cambio Climático y situaciones climáticas extremas observadas en el pasado: El caso de la cuenca alta del río Guayllabamba* (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022).

Zeng, Y., Hao, D., Huete, A., Dechant, B., Berry, J., Chen, J. M., ... & Chen, M. (2022). *Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally*. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(7), 477-493.