



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

INCIDENCIA DE LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS COBERTURAS VEGETALES DE LA CUENCA DEL RÍO GUAPÉ DEL PÁRAMO SUMAPAZ

Impact of variability and climate change on vegetation cover in the Guapé River basin in the Sumapaz páramo

MILTON AUGUSTO GARCÍA MORA¹, KATERIN PAOLA RAMÍREZ GÓMEZ², YULIA IVANOVA³

Recibido: 8 de julio de 2024. Aceptado: 17 de julio de 2024

DOI: <https://doi.org/10.21017/rimci.1059>

RESUMEN

Los páramos son ecosistemas que no solo tienen importancia hidrológica, sino, también, son esenciales en el ámbito ambiental, social, cultural, entre otros. Una de las características que define su integralidad son sus coberturas vegetales, siendo producto de variabilidad climática y actividad antrópica. La última genera cambios importantes en los paisajes y los ecosistemas de páramo en Colombia son afectados por esta. El objetivo del presente estudio consiste en determinar el impacto de los factores climáticos en la variabilidad de las coberturas de la tierra de la cuenca del río Guapé del páramo de Sumapaz. Para dicho fin se construyen los mapas del balance hídrico – climático y se calculó la tendencia de los componentes de este. Paralelo a esto y, con base de las herramientas de teledetección, se interpretó la variabilidad de las coberturas vegetales a través del índice NDVI. A través del análisis regresivo se determinó la dependencia de las coberturas respecto a las variables hidrometeorológicas. Los resultados demuestran que, aunque existe una tendencia hacia el crecimiento de la variabilidad de las coberturas de la tierra, esta no depende del régimen hidroclimático, razón por la cual esta se asocia a la actividad antrópica. Esta conclusión permite hacer un llamado a monitorear y controlar las actividades productivas desarrolladas en la cuenca del río Guapé para conservar y restaurar sus coberturas naturales.

Palabras clave: Clima; cuenca; desarrollo agrícola; ecosistema terrestre; paisaje.

ABSTRACT

The moorlands are ecosystems that not only have hydrological importance, but are also essential in the environmental, social, and cultural spheres, among others. One of the characteristics that define their integrality is their vegetation cover, which is a product of climatic variability and anthropic activity. The latter generates important changes in the landscapes and the páramo ecosystems in Colombia are affected by it. The objective of this study is to determine the impact of climatic factors on land cover variability in the Guapé river basin of the Sumapaz páramo. For this purpose, the water-climate balance maps were constructed and the trend of the water-climate balance components was calculated. Parallel to this, and based on remote sensing tools, the variability of vegetation cover was interpreted through the NDVI index. Through regression analysis, the dependence of land cover on hydrometeorological variables was determined. The results show that, although there is a tendency for land cover variability to increase, it does not depend on the hydroclimatic regime, which is why it is associated with anthropic activity. This conclusion allows us to make a call to monitor and control the productive activities developed in the Guapé river basin to conserve and restore its natural land cover.

Key words: Climate; watershed; agricultural development; terrestrial ecosystem; landscape.

1 Departamento de ingeniería civil. Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). Grupo de investigación en Procesos hidrológicos. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3360-9599> Correo electrónico: est.milton.garcia@unimilitar.edu.co

2 Departamento de ingeniería civil. Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). Grupo de investigación en Procesos hidrológicos. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4258-4266> Correo electrónico: est.katerin.ramirez@unimilitar.edu.co

3 Departamento de ingeniería civil. Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8836-5175> Correo electrónico: yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

LOS PAISAJES naturales se han visto afectados en el último tiempo a causa de la actividad antrópica y producto también del cambio climático, uno de los ecosistemas más afectados son los páramos, y el páramo de Sumapaz no es la excepción, producto de que este se caracteriza por su amplia biodiversidad y riqueza hídrica.

Con el pasar del tiempo, los recursos del planeta se van diluyendo y se van industrializando más los paisajes, esto lo explica Menchú en *“En muchos lugares del planeta es posible encontrar las transformaciones del paisaje natural con las construcciones de caminos, viviendas, campos cultivados y las represas. La ocupación territorial realizada por los hombres, ya sea para la instalación de ciudades o para su explotación económica, ha hecho que gran parte del paisaje natural vaya disminuyendo”*.

La relevancia de los páramos como fuentes hídricas fundamentales para gran parte del territorio es incuestionable. Sin embargo, la falta de regulación por parte de entidades competentes ha propiciado prácticas irresponsables, como el cultivo descontrolado de productos como plátanos, yuca, caña panelera, trigo y cebada, así como actividades pecuarias y ganaderas destinadas principalmente al autoconsumo. Esta ausencia de regulación ha llevado a la sobreexplotación del suelo, generando problemas serios para la sostenibilidad y productividad agropecuaria, según detalla un informe de la Corporación Autónoma Regional de Santander [1].

Ante este panorama crítico, resulta imperativo que las entidades gestoras del territorio establezcan medidas concretas para su conservación. La falta de intervención efectiva puede ocasionar serios problemas para la sostenibilidad de los ecosistemas, afectando negativamente su integralidad. Algunos referentes nacionales [2] y [3] estipulan la creación de zonificación ambiental incluyendo zonas de protección, conservación y de uso sostenible para el desarrollo de las diferentes actividades socioeconómicas. Las entidades territoriales apoyan sus esfuerzos para hacer efectivas estas medidas. No obstante, la expansión de la frontera agrícola a la zona de alta montaña y los efectos del cambio climático global hacen que estas medidas no sean siempre efectivas.

En esta oportunidad se examinó la afectación de las coberturas vegetales de la cuenca del río Guapé perteneciente al páramo de Sumapaz por los factores relacionados con diferentes componentes del balance hídrico. Este estudio se justifica porque varios autores [4] y [5] alertan sobre la sensibilidad de estos frente a los fenómenos de variabilidad y cambio climático.

II. METODOLOGÍA

El páramo de Sumapaz se localiza a 4.650 metros sobre el nivel del mar en Bogotá en la localidad número 20. La Resolución 065 de 1968 el páramo es declarado como Parque Nacional Natural, es identificado como área protegida del país. En el páramo nacen distintos cuerpos de agua y sirve a su vez como fuente de captación de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) para el agua que se distribuye hacia la ciudad de Bogotá [6]. Sin embargo, expertos ambientales e hidrometeorológicos advierten acerca de las distintas problemáticas que afronta este páramo producto de la actividad antrópica y los efectos del cambio climático global [7]. Justamente por esto, se hace necesario investigar acerca de la variabilidad de las coberturas de la tierra a causa de estas dos variables.

La importancia del páramo desde el punto de vista hidrológico radica en que es la fuente hídrica de los municipios de La Calera, Choachí, Ubaque, Une y Gutiérrez, a su vez el consumo de agua de este ecosistema alimenta las actividades económicas agrícolas, ganaderas, minero-energéticas y rurales de los municipios de Cundinamarca [7], siendo las primeras dos las que generan impactos negativos sobre los servicios ecosistémicos del páramo. Para esta investigación se priorizó la cuenca del río Guapé que nace en zona montañosa del municipio de Lejanías (Meta) y se sitúa cerca de la localidad Puerto Chorizo y vereda El Triunfo, comprendiendo también la vereda La Cubillera, El Delirio, Puerto Caldas, Los Naranjos, El Silencio y Hacienda La Unión [8]. El cañón del Guapé a su vez es un destino de naturaleza, turismo e importancia ecológica que desciende por todo el río y que representa una oportunidad para la conservación de los atractivos naturales [9].

A continuación, se presenta la ubicación de la cuenca del río Guapé dentro del páramo de

Sumapaz en compañía de las estaciones hidrometeorológicas usadas en la zona de estudio. Actualmente, este escenario natural ofrece una diversidad de usos antrópicos. Los habitantes locales han empleado sus aguas para la ganadería y el cultivo de papas, lo que ha sido fundamental para el sustento de la población a lo largo del tiempo. Además, en la parte baja de la cuenca, donde finaliza en el departamento del Meta, específicamente en el municipio de Lejanías, se ha convertido en un atractivo turístico. Esta convergencia de usos, desde la agricultura hasta el turismo, destaca la versatilidad y la importancia de la cuenca del río Guapé en la vida de las comunidades locales y en la preservación del ecosistema [10].

A pesar de su pertenencia al páramo de Sumapaz y su importancia ecosistémica, según todo lo mencionado anteriormente, la cuenca del río Guapé se encuentra bajo los efectos del cambio climático, variabilidad climática y presiones antrópicas que modifican sus coberturas naturales que pueden afectar la integralidad ecosistémica de esta. Por este motivo, en el estudio se pretende hacer el diagnóstico si las coberturas vegetales de la cuenca del río Guapé se encuentran bajo la influencia de estos factores.

Para llevar a cabo dicho estudio, se desarrolló la metodología del estudio que consta de tres fases que se exponen en la Fig. 2.

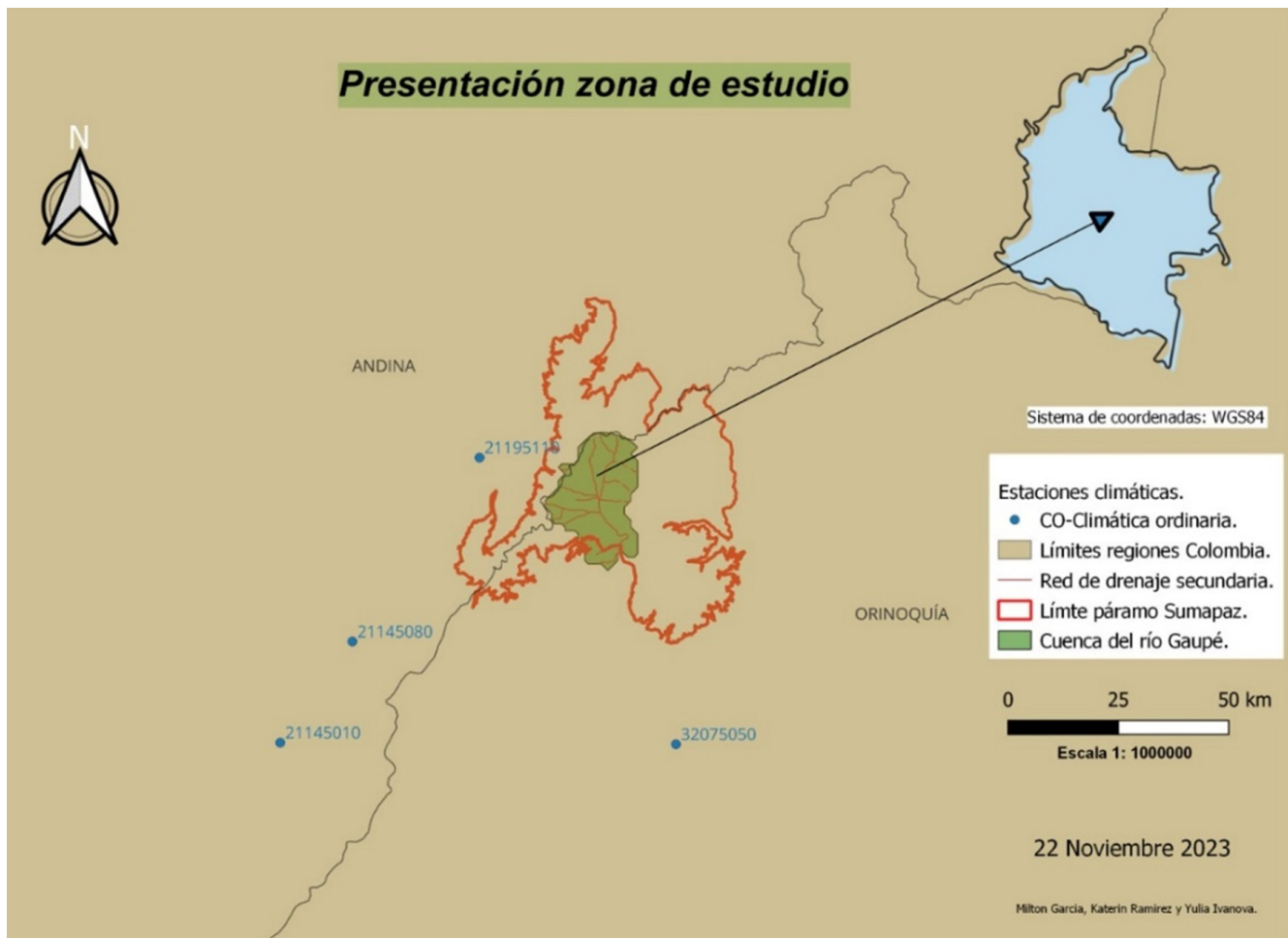


Fig. 1. Localización de las estaciones hidrometeorológicas en la región de la cuenca del río Guapé. Fuente: Elaboración propia.

4 Institución pública de apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental Colombiano [20]

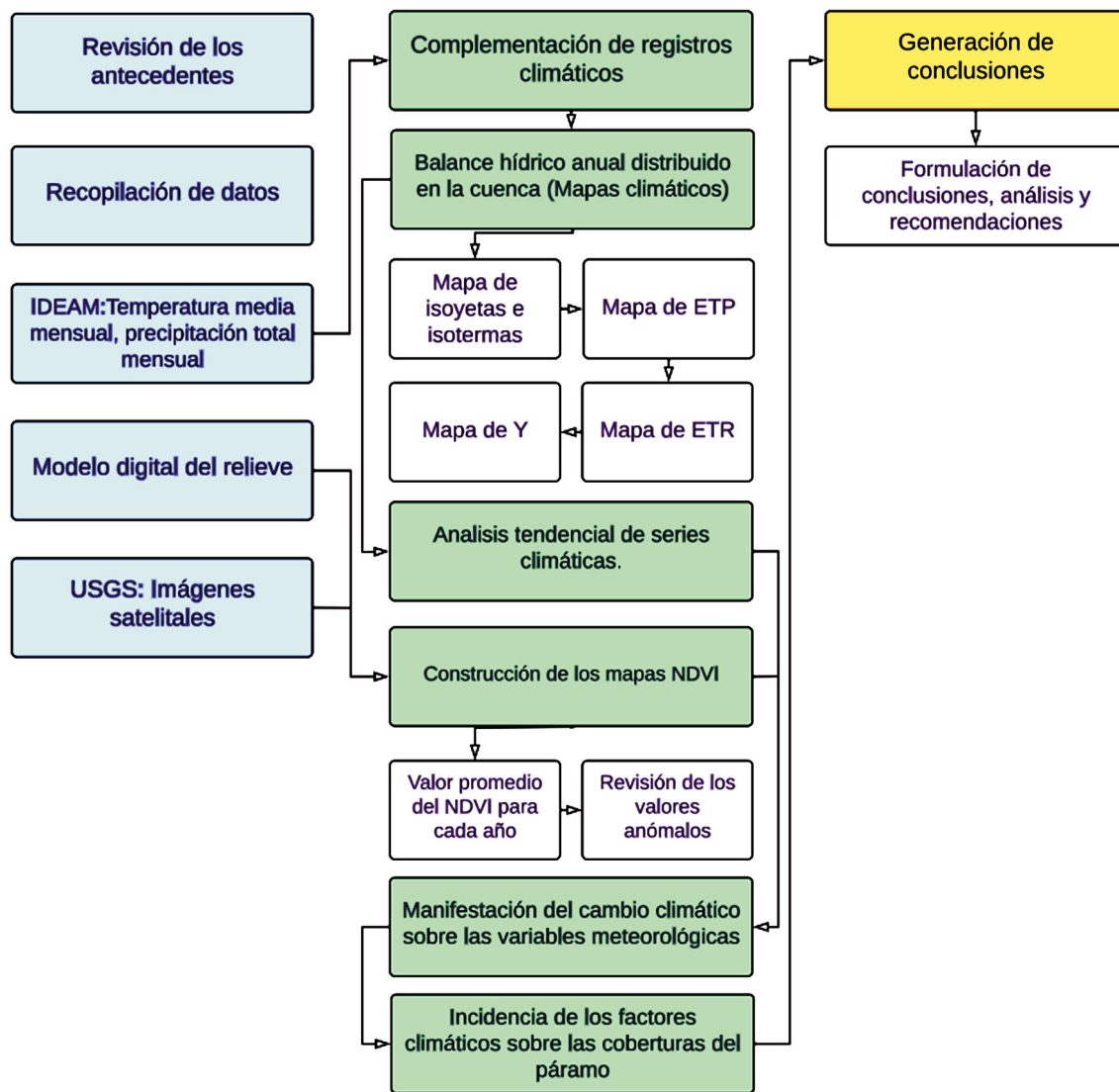


Fig. 2. Marco metodológico de la investigación. Fuente: Elaboración propia.

En la primera fase, se recopilan registros climáticos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM^[4]) de series de temperatura media mensual y precipitación total mensual de las estaciones meteorológicas expuestas en la Fig 1. Adicionalmente, a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en su dirección <https://earthexplorer.usgs.gov/>, se recopilan las imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2 en un período anual y los modelos digitales del relieve necesarios que alberguen toda la zona de estudio. Las imágenes satelitales seleccionadas corresponden a las de menor nubosidad en la zona dado el período de registro anual.

Inicialmente, se complementan las series de temperaturas y precipitaciones con datos faltantes en el registro climático por medio del promedio estadístico de los datos presentes. Posteriormente se construye el balance hídrico – climático, para esto se elaboran los mapas de isoyetas totales para cada año de análisis, y se construyen los mapas de isothermas. La construcción de estos últimos se obtiene con base en la relación altitudinal de temperaturas. Para dicho fin se calcula una ecuación de regresión lineal entre temperaturas medias anuales de las estaciones climáticas y la altitud en msnm para cada una de estas, y el siguiente paso es utilizar el modelo digital de relieve para la

construcción de los mapas a través de la herramienta Qgis⁵. Después, aplicando el método de Turc [11], se obtienen los mapas de evapotranspiración potencial (ETP) anuales en la cuenca. Para la ejecución de este paso se utiliza la siguiente ecuación de Turc:

$$ETP = 300 + 25T + 0,05T^3 \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

ETP= Evapotranspiración potencial anual (mm)
T = Temperatura media anual (°C), la cual es el resultado de los mapas de isotermas

Posteriormente, se elaboran los mapas de evapotranspiración real (ETR) anuales de la cuenca, esto se logra al continuar aplicando el método de Turc, empleando la siguiente ecuación:

$$ETR = \frac{P}{\left(0,9 + \left(\frac{P}{ETP}\right)^2\right)^{0,5}} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

ETR= Evapotranspiración real anual (mm)
P = Precipitación total anual (mm), la cual es el resultado de los mapas de isoyetas
ETP= Evapotranspiración potencial anual (mm), calculada en el paso anterior
T = Temperatura media anual (°C), producto de los mapas de isotermas

Por último, del análisis climático, se procede a la elaboración de los mapas de escurrentía (Y) de la cuenca a partir de la ecuación del balance hídrico ($Y = P - E - I$) y de sus componentes; todo esto permitirá evaluar la variación espacial y multitemporal en la oferta hídrica.

Como último paso en la etapa anterior, se lleva a cabo un análisis tendencial en los valores promedio de temperaturas, precipitación, evapotranspiración real y escurrentía de la cuenca. Normalmente, la manifestación de tendencia y/o

cambio en variabilidad de las series hidrometeorológicas se asocian a los efectos del cambio climático global. Cordero: señaló el concepto de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y se suma a la variabilidad natural del clima observado durante periodos de tiempo comparables” (p. 229). Por su parte denota al término del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) como al “cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, persistiendo durante un periodo prolongado, generalmente de decenios o periodos más largos” (p. 229). Las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad hacen referencia al cambio climático [11]. Este análisis se hace utilizando pruebas estadísticas como el criterio T-Student⁶ y la prueba de Fisher⁷ con nivel de significancia de 0,05.

El siguiente paso de la metodología corresponde al análisis de la evolución de las coberturas vegetales en la cuenca, el cual se realizó a través del valor promedio del Índice de vegetación por diferencia normalizada (NDVI) ya que ha demostrado ser históricamente uno de los más representativos en la identificación de las características de las coberturas vegetales. Este es un indicador espectral de la radiación propuesto por Rouse et al en 1973 como un descriptor de la presencia, características y condiciones de la vegetación; relaciona algebraicamente la región de rojo (RED) y la alta reflectividad en el rango del infrarrojo cercano (NIR) por medio de la siguiente ecuación [15]:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \text{ (Ecuación 3)}$$

Seguidamente, se detallan las bandas referentes al infrarrojo cercano (NIR) y a la región de rojo (RED) para las imágenes Landsat [16] y Sentinel-2[17]:

5 Aplicación profesional de Sistema de Información Geográfica (SIG) construida sobre Software libre [12]

6 Utilizado para determinar si hay diferencia significativa entre las medias de dos grupos [13]

7 Cuando se tienen dos variables nominales y se desea saber si las proporciones son diferentes [14]

Tabla I. Bandas relacionadas al NIR y RED según el tipo de imagen satelital.

Espectro/Imagen	Landsat 4-7	Landsat 8	Sentinel-2
NIR	Banda 4	Banda 5	Banda 8
RED	Banda 3	Banda 4	Banda 4

Fuente: Montoya[16] y Pech-May et al. [17].

Aplicando la ecuación 3 se calculan los mapas NDVI anuales y se obtienen los valores promedio de este para cada año de estudio como característica integral de las coberturas de la tierra en la cuenca.

El paso siguiente consiste en la identificación de los valores anómalos del índice NDVI a través de la prueba de Grubb's [18] para eliminarlos posteriormente del periodo de estudio. Lo anterior teniendo en cuenta que las imágenes satelitales pueden tener algún tipo de interferencia aleatoria por nubosidad o cualquier condición atmosférica que interfieran en los mapas de coberturas vegetales a través del índice NDVI.

Como penúltimo paso de la fase 2 se construye la tendencia de los valores promedio del índice NDVI donde la significancia estadística se comprueba nuevamente por medio del criterio T-Student y la prueba de Fisher. Este análisis se hace con el objetivo de mirar si las coberturas vegetales en la cuenca presentan algún patrón de cambio tanto en su valor promedio como en su variabilidad.

Como último paso en el desarrollo metodológico, se evalúa si las coberturas vegetales son afectadas por la variabilidad de las variables hidrometeorológicas mencionadas anteriormente. Para realizar este paso, se construyen regresiones entre la serie del índice NDVI y los valores promedios de las variables hidro climatológicas de la cuenca. El valor

del coeficiente de correlación refleja el grado de dependencia e influencia de las coberturas vegetales del páramo con respecto a los factores climáticos. El porcentaje restante del coeficiente de correlación indica sobre la incidencia de otros factores, diferentes del clima (actividades antrópicas), sobre las coberturas de la Tierra de la cuenca.

En la fase final, se aborda el análisis de los resultados obtenidos, junto con las conclusiones y recomendaciones relacionadas con las temáticas que han sido exploradas a lo largo de la investigación:

- Impacto del cambio climático sobre las series de las variables hidrometeorológicas.
- Incidencia del cambio climático y de variabilidad climática sobre las coberturas de la cuenca.
- Influencia de otros factores, diferentes de los climáticos, sobre las coberturas vegetales en la cuenca.
- A partir de los resultados obtenidos se formularán recomendaciones pertinentes para ejecutar futuras investigaciones relacionadas con el tema.

III. RESULTADOS

Como primer paso se descargaron los registros climáticos de las estaciones meteorológicas localizadas en la Fig. 1, la recopilación y la información de estas se presenta en la tabla II.

A continuación, se procedió a la descarga de imágenes satelitales para llevar a cabo un análisis de la evolución temporal de las coberturas vegetales. La información correspondiente a estas imágenes se presenta en detalle en la tabla III.

Tabla II. Estaciones de temperaturas (T) y precipitaciones (P) utilizadas en el estudio.

Código de la estación	Nombre de la estación	Fecha de instalación	Altitud (m.s.n.m)	Registros obtenidos	Periodo de registro usado
21195110	Penas blancas	15/11/1986	2.050	T	1987-2021
32075050	Mesetas	15/12/1983	556	T y P	1987-2021
21145080	Santa Ana - AUT	15/11/1986	1.410	T y P	1987-2021
21145010	Banquito EL	15/08/1963	800	P	1987-2021

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III. Sensor de las imágenes y fecha de descarga.

Tipo de imagen	Años
Landsat 4	1987,1988,1989,1990,1992
Landsat 5	1986, 1991,1996, 1997, 1998 ,2001
Landsat 7	1999,2000,2002, 2003,2004,2005, 2006,2007,2008,2009,2010,2011,2012
Landsat 8	2013,2014
Sentinel 2A	2015, 2016,2017,2018,2019,2020,2021

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los años de 1993, 1994 y 1995 no registran imágenes satelitales descargadas, la razón radica en que en esos años todas las imágenes presentaban interferencia notoria y pronunciada por nubosidad dentro del área de estudio. Por lo tanto, el nuevo periodo de registro usado en el estudio data del intervalo de los años de 1987-1992 y de 1996-2021. En el estudio se ma-

neja la hipótesis que las imágenes satelitales descargadas y sus coberturas son representativas para todo el año.

En la segunda fase de la metodología del estudio, se procede con el desarrollo metodológico, que implica la creación del balance hídrico-climático anual mediante la generación de mapas climáticos para cada año del nuevo período de registro utilizado a través del método de Turc. A partir de estos mapas, se calculan los valores promedio para varios parámetros dentro de la cuenca, que incluyen la precipitación (P), la temperatura (T), la evapotranspiración potencial (ETP), la evapotranspiración real (ETR) y la escorrentía (Y).

Para las series en mención se construyó la tendencia lineal y se evaluó su significancia estadística a través de las pruebas T-Student y Fisher con un nivel de significancia del 5 %. Los resultados de este análisis se resumen de manera estadística en las tablas IV y V.

Tabla IV. Resumen estadístico de la significancia de la tendencia de los componentes del balance hídrico - climático por medio del criterio T-Student.

Parámetro	Media variable 1	Media variable 2	P (T<=t)	Conclusión
P (mm)	670,90	709,46	0,09	Tendencia creciente no significativa
T (°C)	6,85	7,88	0,00	Tendencia creciente significativa
ETP (mm)	500,44	529,55	0,00	Tendencia creciente significativa
ETR (mm)	409,87	426,83	0,04	Tendencia creciente significativa
Y (mm)	261,16	282,98	0,19	Tendencia creciente no significativa

Fuente: Elaboración propia.

Tabla V. Resumen estadístico de la significancia de la tendencia de los componentes del balance hídrico-climático por medio de la prueba de Fisher.

Variable	Varianza variable 1	Varianza variable 2	P (F<=f)	Conclusión
P (mm)	5.523,28	7.252,55	0,30	Serie heterogénea, incremento en la varianza
T (°C)	1,04	0,36	0,02	Serie homogénea por la varianza
ETP (mm)	778,38	410,01	0,11	Serie homogénea por la varianza
ETR (mm)	935,89	448,51	0,08	Serie homogénea por la varianza
Y (mm)	4.748,71	4.535,01	0,47	Serie homogénea por la varianza

Fuente: Elaboración propia.

Donde la variable 1 hace referencia al rango de valores del parámetro de 1987 a 2005 y la variable 2 representa el rango de valores de 2006 a 2021.

Los resultados arrojados por la prueba de T-Student demuestran un aumento en el valor medio de todas las series. Sin embargo, solo la serie de temperatura y evapotranspiración reflejan una tendencia significativa, mientras que otras series climáticas no reflejan ningún tipo de tendencia. Esto indica que los efectos del cambio climático global en la zona del estudio se evidencian solo en el régimen de temperaturas y de su variable dependiente que es la evapotranspiración.

Los resultados de la prueba de Fisher indican que la única serie heterogénea por la varianza es la de precipitaciones, hecho, que se refleja en un incremento de esta. Las demás series demostraron ser homogéneas por la varianza, tal como se observa en la tabla V.

El análisis conjunto de las pruebas de T-Student y de Fisher muestran que las series de temperaturas y evapotranspiración tienen una tendencia creciente, mientras que la serie de precipitaciones experimenta un incremento de su variabilidad.

Al haber realizado el análisis estadístico de las series hidroclimáticas se procedió a la construcción de los mapas del índice NDVI. Para el análisis de la evolución de las coberturas vegetales se elaboraron los mapas NDVI y se calcularon los respectivos

valores promedio para cada año. Se construyeron 32 mapas correspondientes a los periodos de 1987-1992 y 1996-2021. En las figuras 3 y 4 se ilustran los ejemplos de los mapas de los años 1987 y 2021.

Finalmente, en la tabla VI, se observan los valores promedio del índice NDVI para el periodo de estudio.

Tabla VI. Resumen de los valores promedio del índice NDVI para cada año de estudio.

Año	Valor NDVI	Año	Valor NDVI
1987	0,222	2006	0,017
1988	0,124	2007	0,114
1989	0,222	2008	0,212
1990	0,183	2009	0,102
1991	0,190	2010	0,264
1992	0,102	2011	0,125
1996	0,108	2012	-0,046
1997	0,198	2013	0,096
1998	0,198	2014	0,207
1999	0,142	2015	0,322
2000	-0,167	2016	-0,421
2001	0,350	2017	0,194
2002	0,079	2018	0,474
2003	0,032	2019	0,411
2004	0,130	2020	0,000
2005	0,140	2021	0,370

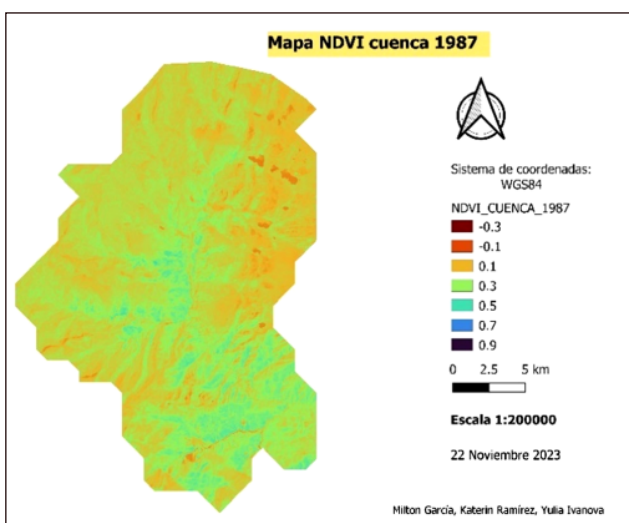


Fig 3. Mapa NDVI cuenca 1987. Fuente: Elaboración propia

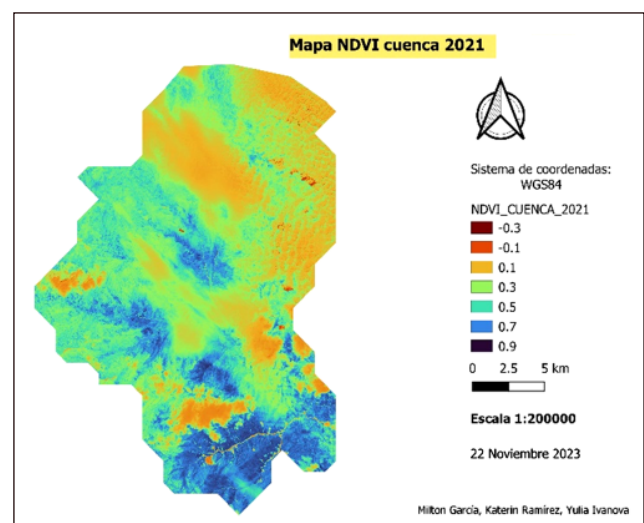


Fig 4. Mapa NDVI cuenca 2021. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta una alta variabilidad presentada en la serie de los índices NDVI, esta se revisó a la presencia de los valores anómalos, posiblemente asociados a las interferencias atmosféricas. Para este fin se utilizó la prueba de Grubb's con un nivel de significancia del 0,05 [19]. Los límites dentro de los cuales los valores del índice NDVI se consideran como verdaderos se presentan a continuación:

Valor límite superior del índice NDVI = 0.575
Valor límite inferior del índice NDVI = 0.289

Como resultado final, se obtuvo que el valor promedio del índice NDVI del año 2016 se consideró anómalo y se eliminó de la serie temporal.

Finalmente, para la serie del índice NDVI se realizó el análisis tendencial y de la varianza, cuyos resultados se exponen en las tablas VII y VIII.

Tabla VII. Resumen estadístico de la significancia de la tendencia del índice NDVI aplicando el criterio T-Student.

Parámetro	P (T<=t)	Conclusión
Valor promedio índice NDVI	0,13	Tendencia estadísticamente no significativa

Fuente: Elaboración propia.

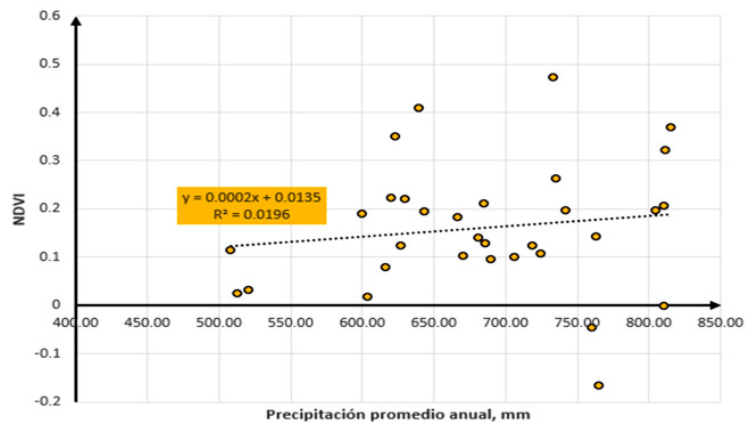
Tabla VIII. Resumen estadístico del análisis de varianza del índice NDVI aplicando la prueba de Fisher.

Parámetro	P (F<=f)	Conclusión	Varianza variable 1	Varianza variable 2
Valor promedio índice NDVI	0,1	Varianza creciente heterogénea	0,012	0,024

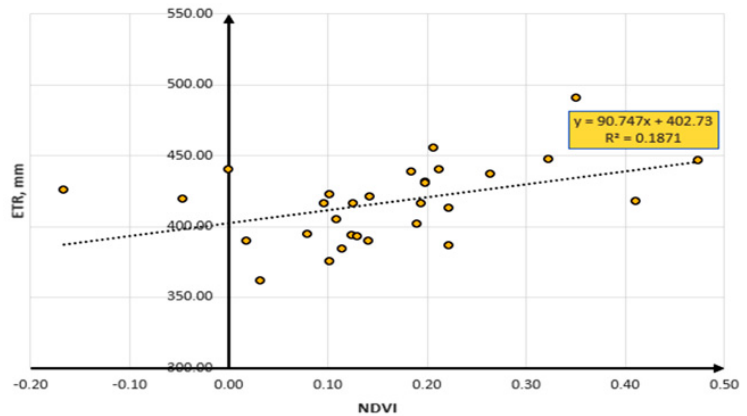
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados presentados en las tablas VII y VIII indican que la serie del índice NDVI no presenta una tendencia estadísticamente significativa, pero sí presenta un incremento en su variabilidad estadísticamente significativa.

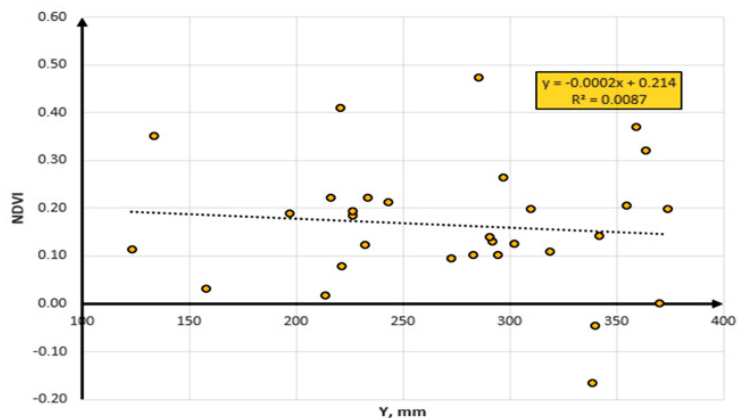
En la investigación se maneja la hipótesis de que los factores climáticos inciden en las coberturas vegetales del



A) Regresión entre valores promedio del índice NDVI y precipitación total anual promedio.



(B) Regresión entre valores de la ETR y el índice NDVI



(C) Regresión entre valores promedio del índice NDVI y escorrentía media anual.

Fig 5. Resumen gráfico de las correlaciones entre las variables climáticas y el índice NDVI. Fuente: Elaboración propia.

páramo. Para corroborar esta premisa se procede a correlacionar los componentes del balance hídrico con los valores medios del índice NDVI. La Fig. 5 ilustra las correlaciones lineales conjunto con sus respectivos valores del coeficiente de determinación [20].

Los resultados gráficos y estadísticos, presentados en la figura anterior, indican que no se observa una correlación significativa entre las coberturas vegetales del páramo versus variables hidroclimatológicas. Así, el análisis correlativo entre el índice NDVI y las precipitaciones totales en la cuenca indica que, aunque la relación entre las dos variables es creciente, no es significativa y el régimen de precipitaciones en casi 2 % afecta el índice NDVI. La relación entre la ETR versus NDVI indica que en un 18,7 % la tasa de evapotranspiración se afecta por las coberturas vegetales del páramo. Esta conclusión es coherente, teniendo en cuenta que el proceso de evapotranspiración depende de un conjunto de los factores atmosféricos y de la superficie terrestre, donde una de las variables es el tipo de coberturas de la tierra [21]. El resultado del análisis de correlación entre el índice NDVI y de la escorrentía superficial no encontró una correlación significativa entre las dos variables.

De todo lo mencionado anteriormente se resume que en la cuenca del río Guapé hay tendencia hacia un incremento de la variabilidad del índice NDVI que caracteriza las coberturas vegetales. No obstante, el análisis de correlación entre el índice NDVI y las variables hidroclimatológicas no indican una relación significativa, hecho, que demuestra la independencia de las coberturas vegetales del régimen hidroclimático. Posiblemente, el cambio de coberturas de la tierra en la cuenca se produce por la actividad antrópica.

IV. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en los análisis estadísticos de las series hidroclimatológicas se identifica que, hasta la fecha, las series de temperaturas medias y, como variable independiente, la serie de evapotranspiración, indican un crecimiento en sus valores promedios - efecto del cambio climático global. La serie de precipitaciones no pre-

sentan ningún tipo de tendencia estadísticamente significativa, pero si un incremento en su variabilidad temporal. Eso indica, posiblemente, que el cambio climático global incide sobre la varianza de esta variable climática. Como conclusión general de estos análisis se afirma que el efecto del cambio climático global es multifocal y afecta tanto los valores medios como la varianza de los parámetros mencionados.

Con relación a la evaluación del comportamiento del índice NDVI, se concluye, que este en los últimos años no ha experimentado una tendencia estadísticamente significativa, mientras que la variabilidad experimenta un incremento, lo que significa que la serie presenta un comportamiento más irregular que en las décadas anteriores.

Con el fin de verificar si esta mayor variabilidad en los valores del índice NDVI se encuentra asociada a mayor variabilidad en el régimen pluviométrico, se construyó el análisis regresivo entre las dos variables, arrojando que tan solo en 1,96 % el régimen del índice NDVI se ve afectado por esta variable climática, impacto, que se puede considerar como no significativo. Al no encontrar dicha relación, se procedió a la construcción de la relación entre el índice NDVI y la escorrentía superficial que tampoco demostró ser significativa. No obstante, se encontró que la evapotranspiración en la cuenca depende directamente del índice NDVI hasta un 18,71 %.

Según todo lo mencionado anteriormente, se demostró que en la cuenca del río Guapé hay incidencia del cambio climático sobre las variables hidrometeorológicas, pero estas no tienen una incidencia significativa sobre las coberturas vegetales. Esto indica que el cambio en la variabilidad del índice NDVI, que caracteriza las coberturas de la tierra, se asocia a unos factores diferentes de los climáticos. Entre estos factores, se pueden encontrar las actividades antrópicas, como la actividad agricultora, pecuaria y ganadera, presentes en la extensión de toda la cuenca [22]

Esta conclusión abre la perspectiva del estudio del monitoreo multitemporal de las coberturas vegetales en la cuenca del río Guapé con fines de un adecuado ordenamiento y zonificación de la misma para garantizar una adecuada gestión.

REFERENCIAS

- [1] Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS), *informe de sostenibilidad*, 2024.
- [2] Junta directiva del instituto colombiano de la Reforma agraria, Resolución número 65 de 1968 24 de junio de 1968. <http://buscadorjuridico.minambiente.gov.co/document/file/6608?token=WJI566Fy6fgVQnsaqRLz9k2DLmEtf2XKkVu03AmyZs1s0DTrKsflggItNE8oN6wj2GSLX3VWp/fVTbgdfrsvgpHehTLsmSKxkFMnRGbK8GRL3u4I4dy1/IXa/BmNs7Um50yjcUTBHDkUNb2kinqJn>.
- [3] Función Pública, Ley 1930 de 2018, 27 de julio 2018. [En línea]. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87764>.
- [4] J. C. Alarcón Hincapié y J. D. Pabón Caicedo, El cambio climático y la distribución espacial de las formaciones vegetales en Colombia, *revistas.udistrital.edu.co*, pp. 171-185, 2013.
- [5] L. A. Ávila-R y O. Vargas Ríos, Riesgos y Efectos del Cambio Climático en la Región Altoandina., *researchgate*, pp. 65 - 75, 2018.
- [6] EAAB-ESP, 2023. https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/agua/informacion-basica/!ut/p/z1/tVTRboIwFP0VffCR9BYq8oqEzJmJOodKX0xbO8cCLWLVbV8_MEuWPYhZ1L40tzn3nNvTnCKKlogqdkg3zKRasayqE-qu3GkA2AM7AmIHMJ1N-s_jOBjgLqDFCQBnlg-Inu3Hfuj89DcAaLP-HFFEC5GuUeLZDIRDpCU.
- [7] ucundinamarca, 2022. [En línea]. <https://www.ucundinamarca.edu.co/index.php/component/content/article/127-investigacion/3561-paramo-de-sumapaz-el-tesoro-verde-de-cundinamarca#:~:text=%E2%80%9CLos%20p%C3%A1ramos%20como%20Sumapaz%20han,malas%20pr%C3%A1cticas%20agr%C3%ADcolas%2C%20deforesta>.
- [8] ucundinamarca, 2022. Investigación [En línea]. <https://www.ucundinamarca.edu.co/index.php/component/content/article/127-investigacion/3561-paramo-de-sumapaz-el-tesoro-verde-de-cundinamarca>.
- [9] mapcarta, «mapcarta» 2023. Available: <https://mapcarta.com/es/19708692>.
- [10] TRAVELGRAFÍA, «TRAVELGRAFÍA» 2023. [En línea]. Available: <https://travelgrafia.co/blog/canon-del-guape/>.
- [11] V. Marín valencia, Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de cundinamarca y valle del cauca, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2010.
- [12] GIS, «<https://qgis.org/>» 3.34. [En línea]. <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>.
- [13] Osteopaths, «Prueba “t” de Student» <https://www.scientific-european-federation-osteopaths.org/>, 2019.
- [14] J. H. McDonald, «LibreTexts» 2022. [En línea]. [https://espanol.libretexts.org/Estadisticas/Estadistica_Aplicada/Libro%3A_Estadisticas_Biologicas_\(McDonald\)/02%3A_Pruebas_para_variables_nominales/2.07%3A_Prueba_Exacta_de_Fisher](https://espanol.libretexts.org/Estadisticas/Estadistica_Aplicada/Libro%3A_Estadisticas_Biologicas_(McDonald)/02%3A_Pruebas_para_variables_nominales/2.07%3A_Prueba_Exacta_de_Fisher).
- [15] W. Santaella, Modelos espaciales de la dinámica de la vegetación en escenarios de cambio climático en el «Timberline» selva nublada - paramo de la vertiente norte de la Sierra Nevada de Mérida (Venezuela); escenario B1 y situacion constante, *Revista de Teledetección*, pp. 63-82, 2013.
- [16] S. Montoya, gidahatari, 2018. <https://gidahatari.com/ih-es/calculo-del-indice-de-vegetacion-ndvi-de-imagenes-landsat-8-con-qgis>.
- [17] F. Pech-May, J. V. Sánchez Hernández, H. G. Sánchez Jacinto y J. M. Govea, Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2, *Lámpsakos*, pp. 48-59, 2020.
- [18] G. Delgado, N. Hernández, L. Méndez, Rojas Abad y Á. Sol-Sanchez, Modelo de publicación sin fines de lucro para conservar la naturaleza académica y abierta de la comunicación científica PDF generado a partir de XML-JATS4R903Aplicación de la estadística robusta en la identificación de valores “OUTLIERS” en análisis de resid, *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, pp. 903-915, 2018.
- [19] IGAC, «Elaboración, análisis y evaluación cartas control y duplicados» IGAC, 2015.
- [20] Estrategias de Inversión, Estrategias de inversion, diccionario, 2018. [En línea]. <https://www.estrategiasdeinversion.com/herramientas/diccionario/fondos/r2-r-cuadrado-o-coeficiente-de-determinacion-t-1163>.
- [21] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. «Evapotranspiración» www.mapa.gob.es, 2017.
- [22] M. Morales Rivas, J. Otero García, T. van der Hammen, A. Torres Perdigón, C. E. Cadena Vargas, C. A. Pedraza Peñaloza, N. Rodríguez Eraso, C. A. Franco Aguilera, J. C. Betancourth Suárez, É. Olaya Ospina, É. Posada Gilede y L. Cárdenas Valencia, Atlas de Páramos de Colombia, Atlas de Páramos de Colombia, 2018.

