



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Relación entre la vegetación nativa y la producción hídrica media en la  
subcuenca hidrográfica del Río Casacay, Provincia El Oro**

**MOROCHO MARTINEZ KEVIN XAVIER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**CUMBICOS LALANGUI DAYANNA DAMARIS  
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Relación entre la vegetación nativa y la producción hídrica media  
en la subcuenca hidrográfica del Río Casacay, Provincia El Oro**

**MOROCHO MARTINEZ KEVIN XAVIER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**CUMBICOS LALANGUI DAYANNA DAMARIS  
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Relación entre la vegetación nativa y la producción hídrica media  
en la subcuenca hidrográfica del Río Casacay, Provincia El Oro**

**MOROCHO MARTINEZ KEVIN XAVIER  
INGENIERO AMBIENTAL**

**CUMBICOS LALANGUI DAYANNA DAMARIS  
INGENIERA AMBIENTAL**

**VARGAS COLLAGUAZO LUIS ANGEL**

**MACHALA  
2024**

# Relación entre la vegetación nativa y la producción hídrica media en la subcuenca hidrográfica del Rio Casacay, Provincia El Oro.

*por* Dayanna Cumbicos Kevin Morocho

---

**Fecha de entrega:** 05-ago-2024 05:17p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2427856892

**Nombre del archivo:** a\_subcuenca\_hidrogr\_fica\_del\_Rio\_Casacay,\_Provincia\_El\_Oro..docx (6.65M)

**Total de palabras:** 18126

**Total de caracteres:** 97718

# Relación entre la vegetación nativa y la producción hídrica media en la subcuenca hidrográfica del Rio Casacay, Provincia El Oro.

## INFORME DE ORIGINALIDAD

3%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://manglar.uninorte.edu.co">manglar.uninorte.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
2	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1 %
3	<a href="http://www.meteorologica.org.ar">www.meteorologica.org.ar</a> Fuente de Internet	<1 %
4	<a href="http://vsip.info">vsip.info</a> Fuente de Internet	<1 %
5	<a href="http://app.sni.gob.ec">app.sni.gob.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
6	<a href="http://bibliotecadigital.usb.edu.co">bibliotecadigital.usb.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
7	Submitted to Universidad Técnica de Machala Trabajo del estudiante	<1 %
8	<a href="http://vdocuments.mx">vdocuments.mx</a> Fuente de Internet	<1 %

9

## Submitted to Escuela Politecnica Nacional

Trabajo del estudiante

<1 %

---

10

## Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

---

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 40 words

Excluir bibliografía

Activo

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, MOROCHO MARTINEZ KEVIN XAVIER y CUMBICÓS LALANGUI DAYANNA DAMARIS, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Relación entre la vegetación nativa y la producción hídrica media en la subcuenca hidrográfica del Río Casacay, Provincia El Oro, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

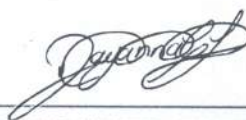
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



MOROCHO MARTINEZ KEVIN XAVIER

0704714179



CUMBICÓS LALANGUI DAYANNA DAMARIS

0706435708

## **Dedicatoria**

A mis queridos padres, *Marcia* y *Roberto*, por su amor y apoyo incondicional. A mis hermanos *Alisson* y *Kelvin* por su apoyo constante y palabras de aliento. A mi abuelita *Rosita*, mi ángel en el cielo, que espero se sienta muy orgullosa y feliz de este logro alcanzado, con su amor y ejemplo de perseverancia fue mi impulso para seguir adelante. Este trabajo con todo mi cariño se lo dedico a ustedes, mi familia.

*Dayanna Damaris Cumbicos Lalangui*

Dedico este trabajo de manera especial a mi familia, el tesoro más valioso que tengo en la vida. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, mi fuente de inspiración y la razón por la que sonrío cada día.

Esta tesis es un reflejo de su amor incondicional, de su apoyo inquebrantable y de los valores que me han inculcado desde pequeño/a. Dedico este trabajo a cada uno de ustedes, por ser parte fundamental de mi camino hacia el éxito.

*Kevin Xavier Morocho Martínez*



---

## Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme culminar esta meta. A mis padres, *Marcia* y *Roberto* por todos los sacrificios que han hecho por mí, este logro académico es tanto mío como de ustedes.

A mi compañero de trabajo de titulación *Kevin Morocho*, por depositar su confianza en mí y por su gran ayuda para la culminación de este trabajo.

A *Robert Bastidas*, agradezco por todo su apoyo, palabras de aliento y compañía que fueron esenciales para la culminación de esta travesía académica.

Finalmente agradezco a mi tutor de Titulación, *Ing. Luis Vargas* por orientación y conocimientos impartidos, su paciencia y dedicación fueron una pieza clave para la realización de este trabajo.

*Dayanna Damaris Cumbicos Lalangui*

A mis queridos padres *Xavier Morocho* y *Digna Martínez*, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido la piedra angular de mi éxito. Gracias por ser mi pilar fundamental en la vida y por creer en mí siempre.

A mis hermanos, especialmente a mi hermana menor *Odalys Morocho*, Cuya inquebrantable fe en mí y sus constantes palabras de aliento me han motivado a seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mis abuelitos, *Alfredo Martínez* y *Carmen Malacatus*, cuya presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable. Sus sacrificios y su fortaleza han sido una fuente constante de inspiración para mí. Este logro es un reflejo del amor y los valores que me han inculcado.

A mi compañera de Tesis, *Dayanna Cumbicos*, por ser un pilar fundamental en la realización de este trabajo.

Al *Ing. Luis Vargas*, mi tutor de tesis, por su invaluable guía, paciencia y por compartir su conocimiento conmigo. Gracias por creer en mi potencial y por ayudarme a convertir esta investigación en una realidad.

*Kevin Xavier Morocho Martínez*

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo el identificar, evaluar y relacionar a la vegetación nativa de la subcuenca del río Casacay con variables de precipitación y caudal medio. La metodología empleada involucra el modelar la cuenca mediante el sistema de información geográfica QGIS, hacer una clasificación supervisada con Semi-Automatic Classification Plugin y obtener los datos de las variables a correlacionar mediante el uso de lenguaje de programación Python en Google Earth Engine para extraer datos de MODIS y GPM. Los resultados obtenidos no fueron los esperados según la hipótesis planteada. El caudal medio de la subcuenca tiene una relación débil con el EVI de la subcuenca, dándonos a entender que probablemente existan otras variables que guarden una relación mucho más fuerte. Por otro lado, la precipitación y el EVI de la subcuenca mostraron una relación nula, esto debido a la fenología presente en la subcuenca. Finalmente, también se relacionaron las variables de precipitación y caudal en donde se demostró una correlación fuerte, demostrando la importancia de la precipitación sobre el caudal de los ríos.

***Palabras clave – Correlación, Cobertura nativa, Estado de la salud de la vegetación, Servicios ecosistémicos, Caudal medio, Precipitación.***

## ABSTRACT

The objective of this research work was to identify, evaluate and relate the native vegetation of the Casacay River sub-basin with precipitation and mean flow variables. The methodology used involved modeling the watershed using the QGIS geographic information system, performing a supervised classification with Semi-Automatic Classification Plugin and obtaining the data of the variables to be correlated by using Python programming language in Google Earth Engine to extract data from MODIS and GPM. The results obtained were not as expected according to the hypothesis. The sub-basin mean flow has a weak relationship with the sub-basin EVI, giving us to understand that there are probably other variables that have a much stronger relationship. On the other hand, precipitation and sub-basin EVI showed a null relationship, due to the phenology present in the sub-basin. Finally, the variables of precipitation and flow were also related and showed a strong correlation, demonstrating the importance of precipitation on river flow.

***Key words - Correlation, Native cover, Vegetation health status, Ecosystem services, Mean flow, Precipitation.***

## TABLA DE CONTENIDO

---

I. INTRODUCCIÓN .....	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
A. Antecedentes .....	14
III. JUSTIFICACIÓN.....	16
IV. OBJETIVOS .....	18
A. Objetivo general .....	18
B. Objetivos específicos .....	18
V. HIPÓTESIS .....	19
VI. MARCO TEÓRICO .....	20
A. Cuenca hidrográfica .....	20
B. Seguridad Hídrica.....	20
C. Recurso hídrico .....	20
1) Ciclo del agua .....	20
2) Escorrentía superficial .....	21
3) Caudal ecológico .....	22
4) Precipitación .....	22
a) Método de Thiessen .....	22
D. Cobertura Vegetal Nativa.....	23
E. Ecosistemas .....	23
1) Bosque semidecíduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo.....	23
2) Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo.....	23
3) Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo – Alamor.....	23
4) Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor .....	24
5) Bosque siempreverde montano alto del Catamayo – Alamor .....	24

---

6) Herbazal de páramo .....	24
F. Relación entre la vegetación y la producción hídrica .....	24
G. Servicios ecosistémicos .....	24
H. Capital Natural .....	25
I. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) .....	25
J. Biomasa .....	25
K. Teledetección .....	26
1) Sensores remotos .....	26
2) Google Earth Engine (GEE) .....	26
3) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) .....	27
a) Producto de MODIS para Índice de Vegetación Mejorado (MOD13A2 v061) .....	27
4) Producto para precipitación (GPM IMERG Precipitación final L3 1 mes 0,1 grados x 0,1 grados V07) .....	27
L. Coeficiente de Correlación de Pearson .....	28
M. Fenología .....	28
N. Índice de Vegetación .....	29
1) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) .....	29
2) Índice de Vegetación Mejorado (EVI) .....	30
VII. METODOLOGÍA .....	32
A. Descripción del área de estudio .....	32
B. Materiales y métodos .....	32
1) Delimitar la cuenca hidrográfica .....	33
a) Descarga de Modelo de elevación digital (DEM) .....	33
b) Modelado de la cuenca en QGIS .....	35
2) Delimitar las coberturas vegetales nativas .....	36
a) Descarga de imágenes satelitales SENTINEL-2 .....	36

---

b)	Reducción de la nubosidad mediante un mosaico de imágenes satelitales .....	36
c)	Determinación de puntos de interés .....	36
d)	Determinación de las regiones de interés .....	37
e)	Clasificación supervisada .....	38
3)	Obtener los datos de Índice de Vegetación Mejorada (EVI) .....	38
a)	Corrección de datos y promedios anuales de EVI.....	40
4)	Obtener datos de precipitación .....	40
5)	Datos de caudal promedio anual de la subcuenca Casacay .....	41
6)	Correlación entre variables .....	41
VIII.	RESULTADOS .....	43
A.	Caracterización del estado de la vegetación.....	43
1)	Delimitación de la cuenca hidrográfica .....	43
2)	Clasificación supervisada .....	43
3)	Resultados de EVI .....	44
B.	Caracterización de la producción hídrica .....	47
1)	Caudal.....	47
2)	Datos precipitación .....	49
C.	Correlaciones entre variables .....	50
1)	Correlación entre el EVI de la vegetación nativa y el caudal.....	50
2)	Correlación entre el EVI de la cuenca y el caudal.....	51
3)	Correlación entre el caudal y la precipitación de la cuenca.....	51
1)	Correlación entre la precipitación y el EVI .....	52
IX.	DISCUSIÓN .....	53
A.	Relación EVI – caudal.....	53
B.	Relación precipitación - caudal .....	54
C.	Relación Precipitación – EVI.....	55

---

X. CONCLUSIONES.....	57
XI. RECOMENDACIONES.....	59
X. REFERENCIAS.....	60
XI. ANEXOS.....	67

## LISTA DE TABLA

---

TABLA I. BANDAS ESPECTRALES DEL SENSOR MODIS.....	27
TABLA II. INTERPRETACIÓN DEL COEFICIENTE DE PEARSON.....	28
TABLA III. RANGOS DE CLASIFICACIÓN DE NDVI.....	30
TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	34
TABLA V. ÁREAS DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA .....	43
TABLA VI. DATOS EVI OBTENIDOS DE GOOGLE EARTH ENGINE.....	44
TABLA VII. DATOS MULTIANUALES PROCESADOS DE EVI EN CASACAY 2000-2020 .....	45
TABLA VIII. DATOS PROCESADOS DE EVI EN LA VEGETACIÓN NATIVA EN CASACAY CADA 16 DIAS - 2017-2019 .....	46
TABLA IX. DATOS PROCESADOS DE EVI EN CASACAY CADA 16 DIAS 2017-2019....	47
TABLA X . DATOS PROCESADOS DE CAUDAL EN TODA LA SUBCUENCA CADA 16 DIAS - 2017-2019.....	48
TABLA XI. DATOS MULTIANUALES PROCESADOS DE PRECIPITACIÓN EN TODA LA SUBCUENCA - 2017-2019 .....	48
TABLA XII. DATOS PRECIPITACIÓN OBTENIDOS DE GOOGLE EARTH ENGINE .....	49
TABLA XIII. DATOS MULTIANUALES PROCESADOS DE PRECIPITACIÓN EN CASACAY 2000-2020 (mm/h) .....	49
TABLA XIV. RESULTADOS DE CORRELACION EVI DE LA VEGETACION NATIVA- CAUDAL .....	67
TABLA XV. RESULTADOS DE CORRELACION EVI DE TODA LA CUENCA-CAUDAL	69
TABLA XVI. CORRELACION PRECIPITACIÓN - CAUDAL.....	71
TABLA XVII. CORRELACION INTERANUAL PRECIPITACIÓN EVI .....	73



---

 LISTA DE FIGURAS

Fig. 1: Diagrama del Ciclo del Agua.....	21
Fig. 2: Procesos y condiciones ecosistémicos que impulsan los eventos fenológicos.....	29
Fig. 3: Ubicación del área de estudio .....	32
Fig. 4: Diagrama de flujo para la metodología del estudio .....	33
Fig. 5: Sitio Web Alaska Satellite Facility .....	34
Fig. 6: Filtros de búsqueda .....	34
Fig. 7: Subcuenca en formato “Raster” .....	35
Fig. 8: Subcuenca en formato “shape” .....	35
Fig. 9: Combinación de productos satelitales de Sentinel.....	36
Fig. 10: Registro de coordenadas en campo.....	37
Fig. 11: Registro de regiones de interés en SCP .....	38
Fig. 12: Clasificación supervisada en formato *.tiff .....	38
Fig. 13: Malla de puntos para la subcuenca y la vegetación nativa .....	39
Fig. 14: Script para generar datos de EVI .....	39
Fig. 15: Malla de puntos para obtener datos de precipitación.....	40
Fig. 16: Script para generar datos de precipitación .....	41
Fig. 17: Correlaciones entre variables.....	42
Fig. 18: Resultado de Modelación de la cuenca en QGIS.....	43
Fig. 19: Resultado de clasificación supervisada.....	44
Fig. 20: Relación EVI de la vegetación nativa – Caudal.....	51
Fig. 21: Relación EVI de la cuenca – Caudal.....	51
Fig. 22: Relación EVI de la cuenca – Precipitación.....	52
Fig. 23: Relación EVI de la cuenca – Precipitación.....	52
Fig. 24: Relación EVI - precipitación (2000 - 2020) .....	55

---

**TABLA DE ECUACIONES**

$P_{mj} = i = 1j = 1nSi * P_{iji} = 1nSi$ <a href="#">(1)</a> .....	22
$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ <a href="#">(2)</a> .....	29
$EVI = 2.5 x (IR - R) / (IR + C1 x R - C2 x B + L)$ <a href="#">(3)</a> .....	30

---

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>DEM</b>	Modelo de Elevación Digital
<b>EVI</b>	Índice de vegetación mejorado
<b>GPM</b>	Medición de Precipitación Global
<b>MODIS</b>	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>NDVI</b>	Índice de vegetación de diferencia normalizada
<b>PPN</b>	Productividad primaria neta
<b>PPB</b>	Productividad primaria bruta
<b>PREDESUR</b>	Programa de Desarrollo del Sur
<b>SCP</b>	Semi-Automatic Classification Plugin
<b>SbN</b>	Soluciones basadas en la naturaleza

---

## I. INTRODUCCIÓN

Las coberturas vegetales nativas como bosques y páramo son de gran importancia, pues proporcionan servicios ecosistémicos que benefician tanto a la población como a la biodiversidad. Varios de estos servicios están relacionados con la producción, regulación y aprovisionamiento hídrico en una cuenca [1]. Alteraciones en este tipo de coberturas impulsadas por factores antrópicos como la ganadería, agricultura e introducción de especies exóticas [2], pueden deteriorar el estado de la salud de la vegetación. Una reducción en la salud conduciría a la disminución en la producción de servicios ecosistémicos relacionados con el ciclo hidrológico [3].

El agua es un recurso fundamental para la vida en nuestro planeta, desempeñando un papel insustituible en la supervivencia y el desarrollo de todos los seres vivos [4]. La conservación de este recurso es vital para la supervivencia del planeta y la humanidad. Sin embargo, la sobreexplotación, la contaminación y el cambio climático están amenazando su disponibilidad. Dada su importancia, es crucial estudiar su comportamiento en relación con variables como el estado de la vegetación. Diversos estudios han demostrado una correlación positiva entre una vegetación saludable y la producción hídrica [5].

La subcuenca del río Casacay es de gran importancia para muchas ciudades de la provincia del El Oro, ya que es la principal fuente de abastecimientos del recurso hídrico. Pese a la importancia de esta subcuenca, existen pérdidas en las coberturas vegetales nativas. Estas pérdidas afectan a los servicios ecosistémicos de regulación y aprovisionamiento del agua [6].

En este contexto, el objetivo de este estudio es determinar el estado de salud de la vegetación de las coberturas vegetales nativas y correlacionarlo con datos de caudal medio. El resultado de esta correlación nos permitirá observar si existe algún tipo de correspondencia entre ambas variables. Adicionalmente, se estudiará el comportamiento de la variable climática precipitación con el estado de la salud de la vegetación y con el caudal medio. El fin de esta correlación es comprender mejor las interacciones entre la vegetación, el clima y los recursos hídricos para así desarrollar en el futuro estrategias de manejo y conservación que optimicen la salud de los ecosistemas y aseguren la disponibilidad sostenible del agua.

---

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Subcuenca del río Casacay, es de gran importancia para la provincia de El Oro pues constituye la principal fuente de agua para consumo humano, riego y actividades industriales para las ciudades de Machala, Pasaje y El Guabo [7]. Además, alberga grandes extensiones de coberturas vegetales nativas [8] que desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo hidrológico y la regulación hídrica [9].

Dentro de la subcuenca se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas que afectan a la vegetación nativa [10]. Una alteración del estado primitivo de la vegetación significaría una reducción en el estado de la salud de la vegetación. Esto afectaría a la calidad y cantidad de los servicios ambientales; entre ellos los relacionados con el recurso hídrico, que benefician directamente a las comunidades dentro y fuera de la subcuenca.

Las coberturas vegetales nativas en la subcuenca albergan varios ecosistemas frágiles, entre ellos el ecosistema de páramo andino [8]. Este ecosistema es esencial por el servicio ambiental de provisión hídrica [11]. Las actividades humanas que generan un impacto negativo en el estado de la vegetación en este ecosistema son el pastoreo intensivo, agricultura y la plantación especies forestales exóticas [12]. Estas afectan a las propiedades hidrofísicas de suelo comprometiendo así la funcionalidad de los ecosistemas y provisión de servicios hidrológicos [13].

Si la degradación del estado de la vegetación continúa, varios servicios ecosistémicos se verán comprometidos. Las perturbaciones hacia este servicio afectarían a la seguridad hídrica de forma directa. La pérdida de seguridad hídrica no solo amenazaría la disponibilidad adecuada de agua para el abastecimiento humano, sino que también afectaría negativamente la capacidad de los ecosistemas para mantener su equilibrio natural [14]. La preservación de este servicio ecosistémico es esencial para garantizar la sostenibilidad del suministro de agua, así como para salvaguardar la integridad de los ecosistemas que dependen de él.

### ***A. Antecedentes***

En 1994 PREDESUR elaboró el plan de Ordenamiento y Manejo del Río Casacay [15]. Debido a la desaparición de la institución en el 2009, no es posible evidenciar el cumplimiento del plan de ordenamiento. Sin embargo, gracias a los datos cartográficos históricos proporcionados por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) es posible comprobar la mala ejecución del plan de ordenamiento. Entre 1990 y el 2022 las coberturas de bosque nativo y páramo

---

tuvieron una pérdida del 49% y 41% respectivamente, mientras que la cobertura de mosaico agropecuario, plantación forestal y pastizales aumentaron un 34%, 73 y 110% [8], [16].

Dentro del Plan de Ordenamiento Territorial de la subcuenca del río Casacay, PREDESUR implementó estrategias de reforestación en la cuenca alta con especies forestales exóticas como *Pinus patula* y *Eucalyptus longifolia* [17]. Estudios demuestran que los caudales pueden verse reducidos al introducir especies exóticas como el pino dentro de una cuenca hidrográfica [18] pues el suelo pierde su capacidad de infiltración y como consecuencia se producen aumentos del caudal en estaciones lluviosa [19].

La subcuenca Casacay fue declarada bosque y vegetación protector (BVP) mediante el Acuerdo Ministerial No. 02 el 7 de enero de 1997, publicado en el Registro Oficial No. 109 el 15 de enero de 1997. Esto, con el fin de conservar y proteger la subcuenca hidrográfica junto con sus recursos y servicios ambientales [20]. Además, de administrar correctamente el uso de suelo dentro de la subcuenca. Sin embargo, la ejecución de acciones para este propósito en la actualidad es casi nula.

La falta de planificación, ordenamiento y gestión dentro de la subcuenca condujeron hacia un escenario en donde las actividades productivas se expanden hacia áreas no aptas para tal fin [18]. En consecuencia, actividades como la ganadería y la agricultura produjeron problemas medioambientales, entre los cuales se destacan la deforestación y la expansión agrícola. Afectando principalmente al recurso hídrico y a quienes se benefician de la subcuenca.

---

### III. JUSTIFICACIÓN

El deterioro progresivo de la vegetación nativa en la subcuenca del río Casacay es una preocupación creciente debido a las actividades antrópicas dentro de la subcuenca. Los servicios ecosistémicos dependen ampliamente de la salud de los ecosistemas [6]. Por lo tanto, el deterioro de la vegetación nativa afecta negativamente la capacidad que tiene la subcuenca de proporcionar los servicios ecosistémicos importantes respecto al agua. Este deterioro de la vegetación repercute directamente en la calidad y cantidad del agua disponible, poniendo en riesgo la seguridad hídrica de las comunidades y la sostenibilidad de los ecosistemas.

Asegurar la disponibilidad de agua en calidad y cantidad óptima es esencial para el bienestar y desarrollo socioeconómico sostenible [14]. El agua desempeña un papel crucial en diversas áreas, desde satisfacer las necesidades básicas de la población, como el consumo humano y la higiene, hasta respaldar sectores clave como la agricultura, la industria y la generación de energía [1].

En este contexto, surge la importancia del estudio en la subcuenca del río Casacay. Ya que esta se encarga de provisionar agua a varios cantones dentro de la provincia de El Oro. Sin embargo, el aumento de las actividades antrópicas dentro de la subcuenca ha provocado pérdidas del bosque primario, transformando la cobertura nativa en pastos o cultivos [10]. Deteriorando así el estado de la salud de la vegetación.

Varios estudios sugieren una relación positiva entre el estado de la salud de la vegetación y los caudales medios en una cuenca [5]. Esta asociación positiva resalta la importancia de conservar y mejorar las coberturas vegetales para garantizar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico. Por lo tanto, comprender y estudiar el comportamiento de la vegetación nativa se presenta como una estrategia integral para garantizar la provisión sostenible de servicios hídricos.

El Índice de Vegetación Mejorada (EVI) es un indicador fundamental que nos permite evaluar la salud y el vigor de la vegetación [21]. Existen varios métodos que ayudan a estimar este parámetro. El uso de sensores remotos permite recopilar datos a diferentes escalas espaciales y temporales [22], facilitando así el relacionar variables como el EVI con otras variables climáticas. El Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) es un sensor remoto multiespectral cuyos productos permiten estimar índices de vegetación como el EVI [23]. Este enfoque basado en sensores remotos no solo mejora la eficiencia en la estimación del EVI, sino que también posibilita

el seguimiento a lo largo del tiempo, permitiendo evaluar patrones de cambio y respuestas de la vegetación a condiciones ambientales variables.

Una correlación positiva, indicaría que mientras más saludable sea la vegetación obtendremos mejores servicios ecosistémicos, en especial los relacionados con el recurso hídrico. Esto serviría como partida para implementar medidas que permitan recuperar el capital natural. La recuperación del capital natural implica implementar estrategias que promuevan la conservación de los recursos naturales, la restauración de ecosistemas degradados y la adopción de prácticas sostenibles, garantizando así la sostenibilidad ambiental y el bienestar social a largo plazo [24].



## IV. OBJETIVOS

### ***A. Objetivo general***

Analizar la relación entre el estado de la vegetación nativa y la producción hídrica promedio, a partir de series temporales de Índice de Vegetación Mejorado (EVI) con el caudal medio, para establecer la salud de la vegetación nativa y la provisión de servicios ecosistémicos e hidrológicos.

### ***B. Objetivos específicos***

- Caracterizar el estado de la vegetación nativa a partir de sensores remotos.
- Caracterizar la producción hídrica promedio de la subcuenca recopilando datos de caudal medio.
- Analizar la relación que existe entre el estado de la vegetación y la producción hídrica promedio.

## V. HIPÓTESIS

El buen estado de la salud de las coberturas vegetales nativas se relaciona positivamente con la producción hídrica promedio en la subcuenca del río Casacay, Provincia de El Oro.

---

## VI. MARCO TEÓRICO

### **A. Cuenca hidrográfica**

Una cuenca es un territorio natural donde el agua derivada de las lluvias genera un flujo principal de agua. Representa una unidad fisiográfica compuesta por la totalidad de los sistemas de cursos de agua determinados por la topografía. Los límites de la cuenca (divisoria de aguas) son establecidos de manera natural y coinciden con las áreas más elevadas del terreno que circunda un río [25]. Desde una perspectiva integral, los sistemas hidrográficos abarcan las fuentes de agua y sus afluentes, engloban todos los recursos naturales y humanos de la región, destinados a un uso racional por parte de la población local[26].

La cuenca hidrográfica se entiende como la unidad territorial más ideal para la gestión integral de los recursos hídricos, ya que el proceso natural del ciclo hidrológico se despliega dentro de una cuenca. El desafío surge cuando las divisiones político-administrativas no concuerdan con los límites de una cuenca, provocando una controversia en la toma de decisiones, y afectando el ciclo hidrológico, el aprovechamiento del agua, los drenajes y sobre los habitantes de la cuenca [27].

### **B. Seguridad Hídrica**

La seguridad hídrica es una estrategia para la gestión de los recursos hídricos, donde se reconoce el agua dulce limpia como el suministro idóneo y necesario para el sustento del ser humano y los ecosistemas, incluyendo aspectos como la cantidad adecuada y calidad aceptable, tomando en cuenta factores sociales y económicos [28].

El recurso hídrico representa un vínculo entre los aspectos del desarrollo humano, por lo que toma importancia en los sectores sociales, económicos y ambiental, para proteger los recursos naturales que sustentan el planeta [29].

### **C. Recurso hídrico**

#### **1) Ciclo del agua**

El ciclo del agua a nivel global refleja la ubicación del agua en la Tierra, como es su trayectoria, el uso antrópico de este recurso, y como los distintos factores, como el cambio climático, generan un impacto.

El agua fluye por la atmósfera, a través de las cuencas, por la superficie de la tierra e incluso debajo del suelo, en forma líquida, sólida, o gaseosa. El agua circula entre la atmósfera y la superficie terrestre mediante procesos como la evaporación, evapotranspiración, y la precipitación. En la superficie, fluye por medio del proceso de escorrentía, flujo de los ríos o a través del deshielo.

El agua llega a la parte inferior del suelo a través de la infiltración formando así acuíferos, esta agua subterránea fluye hasta ríos o océanos o manantiales, para continuar con el ciclo hidrológico [29]. En la Fig. 1 se observa cómo se desarrolla el ciclo global del agua, y como las actividades humanas han influido en este ciclo.

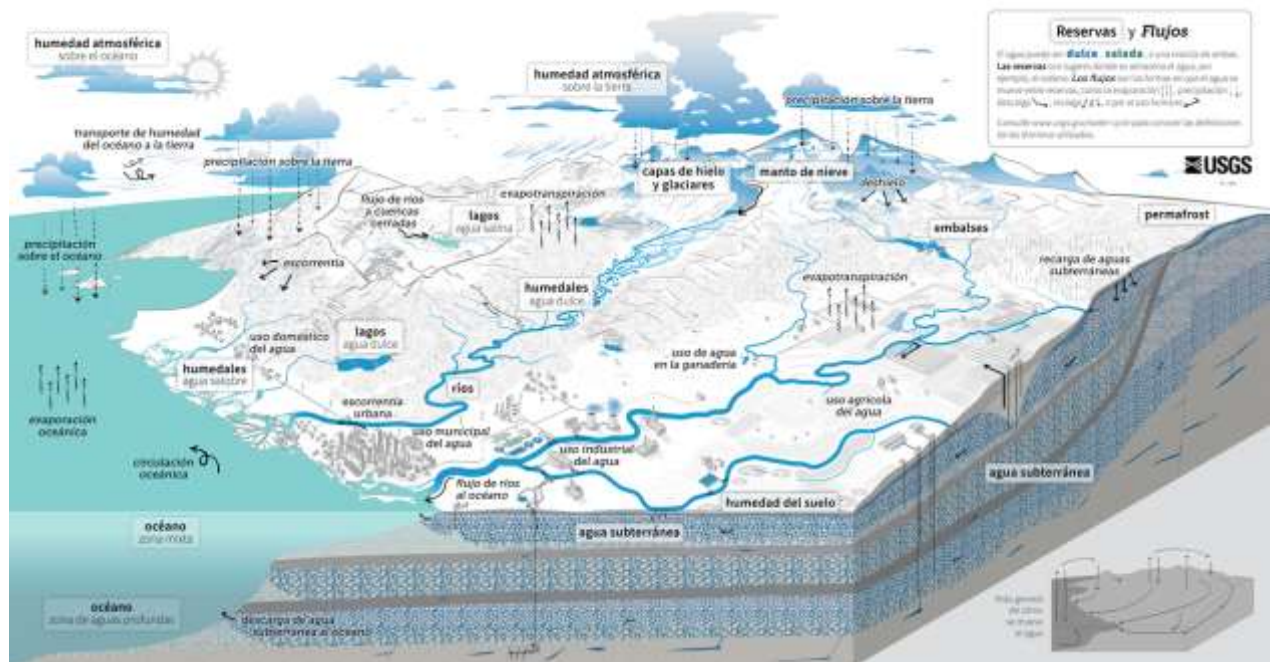


Fig. 1: Diagrama del Ciclo del Agua

Fuente: USGS Water Science School, 2022 [29].

La intervención del ser humano dentro del ciclo hidrológico es mediante la construcción de embalses o represas para el almacenamiento de agua, la redirección del flujo natural del agua hacia humedales, abastecimiento para el consumo en las comunidades, para el riego de plantaciones agrícolas, el uso en la ganadería, actividades industriales, generación de energía y las distintas actividades antrópicas [29].

## 2) *Escorrentía superficial*

La escorrentía superficial se conoce como el exceso de precipitación que no es infiltrado por el suelo, esta fracción de precipitación que permanece en la superficie terrestre fluye por la cuenca hasta llegar al cauce de los ríos [30].

La escorrentía representa una parte esencial dentro del ciclo hidrológico debido a que tiene una gran influencia en los recursos hídricos, la seguridad humana y la salud de los ecosistemas [31]. Factores como el cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo intervienen en la generación

de la escorrentía superficial [32]. Otros aspectos que influyen la generación de la escorrentía superficial son la textura, porosidad y contenido de materia orgánica del suelo [33].

### 3) *Caudal ecológico*

Es el volumen mínimo de agua necesario para conservar la salud y estabilidad de los ecosistemas fluviales [34]. La definición de caudal medio surge como una propuesta para disminuir la degradación que sufren los ecosistemas acuáticos a causa del uso excesivo del agua. Los principales conceptos relacionados con el caudal ecológico mencionan cierta cantidad de agua que se requiere en un ecosistema acuático para sostener tanto las necesidades de salud del ecosistema como el desarrollo económico y social [35]. El cálculo del caudal ecológico permite organizar e identificar cuáles son las necesidades de salud de un río, lo cual sirve como una herramienta para la gestión del agua con un enfoque ecológico [36].

### 4) *Precipitación*

Se entiende como precipitación al agua que se libera de las nubes en forma de lluvia, lluvia helada, nieve, granizo o aguanieve, la cual cae sobre la superficie terrestre o en el océano, esta precipitación sobre la superficie de la tierra es parte del flujo del ciclo hidrológico[29].

#### a) *Método de Thiessen*

El método de Thiessen es uno de los más utilizados para la obtención de la precipitación media de un área. El método consiste en ponderar los valores de precipitación de estaciones meteorológicas en función del área de influencia, por medio de la distribución proporcional de una cobertura de puntos para generar polígonos de áreas de influencia que son definidas a partir de cada punto. Esta metodología es muy utilizada para el estudio de las distribuciones espaciales y temporales de variables hidrológicas, además muy utilizada en aplicaciones ingenieriles [37].

El método de los polígonos de Thiessen establece una superficie a cada estación, la cual se obtiene de la representación de las estaciones en un plano para luego ser unidas a través de rectas. En estas rectas se trazan mediatrices para ser intersectadas entre sí para obtener límites del área geográfica estudiada y el límite que definen las mediatrices[38].

$$Pmj = \frac{\sum_{i=1}^n Si * Pij}{\sum_{i=1}^n Si} \quad (1)$$

Donde:

$Pmj$ : Precipitación media del área de estudio en el tiempo  $j$  (mm)

$Pij$ : Precipitación de la estación  $i$  en el tiempo  $j$  (mm)

---

*Si*: Superficie de influencia de la estación *i* (km<sup>2</sup>)

#### ***D. Cobertura Vegetal Nativa***

Los ecosistemas como los páramos andinos, bosques nativos y otros tipos de cobertura vegetal nativa, tienen un alto grado de importancia en el funcionamiento de los ecosistemas, debido a los servicios ecosistémicos que brindan, entre los que se encuentran: acumulación de carbono, hábitat de especies faunísticas, reservas de agua dulce y protección de los suelos [11], [39]. Además, estos ecosistemas también presentan otros tipos de beneficios debido a sus valores económicos, culturales y espirituales [40].

Por lo general se busca relacionar el fenómeno de la pérdida de cobertura vegetal nativa con el desarrollo económico, donde se destacan la industrialización, el desarrollo urbano y la sustitución de bosque nativo por plantaciones forestales de monocultivo como las principales causas [41].

#### ***E. Ecosistemas***

##### ***1) Bosque semidecídulo de tierras bajas del Jama-Zapotillo***

Bosque semidecídulo con un dosel que oscila entre los 20 y 25 metros de altura, y árboles emergentes que alcanzan los 30 metros. Este tipo de bosque se localiza en áreas de transición entre bosque decídulo y bosque siempreverde estacional. Otra de sus características es que entre el 25% y el 75% de las especies vegetales pierden sus hojas durante la estación seca [42].

##### ***2) Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo***

Bosques estratificados que poseen un dosel que varía entre 20 y 25 metros y con árboles emergentes de hasta 40 metros de altura. Este ecosistema mantiene su follaje verde durante todo el año, aunque una parte de sus hojas cae durante la temporada de menor precipitación. Sin embargo, estas hojas se reemplazan rápidamente por nuevas, lo que preserva el aspecto siempreverde del bosque [43].

##### ***3) Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo – Alamor***

Bosques multiestratificados que poseen un dosel que oscila entre los 20 y 25 metros, donde los árboles emergentes alcanzan hasta los 35 metros de altura. Estos bosques integran especies vegetales de bosques siempreverdes, decídulos y semidecídulos [44].

#### **4) *Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor***

Bosques siempreverdes con múltiples estratos y un dosel de 20 metros de altura, caracterizados por un sotobosque denso y una vegetación herbácea dominada principalmente por helechos, arbustos y árboles jóvenes. Este ecosistema posee remanentes ubicados en pendientes y vertientes disectadas con fuertes inclinaciones y quebradas [45].

#### **5) *Bosque siempreverde montano alto del Catamayo – Alamor***

Bosque siempreverde que posee un dosel cerrado que puede llegar hasta los 15 metros de altura, de vegetación achaparrada con arbustos muy ramificados con presencia de briofitas, líquenes y bromélias. Este bosque está ubicado en áreas con fuertes pendientes y sobre suelos pedregosos, con neblina persistente en época lluviosa. Representa un área de transición entre el bosque montano y el páramo [46].

#### **6) *Herbazal de páramo***

Herbazal denso donde predominan las gramíneas amacolladas que superan los 50 cm de alto. Este ecosistema constituye la mayor extensión de ecosistemas de montaña en Ecuador. Es típico del piso montano alto superior y generalmente se localiza en valles glaciares, laderas de vertientes disectadas y llanuras subglaciares a más de 3400 msnm. Entre sus características se destaca por contener suelos principalmente andosoles, ricos en materia orgánica, lo que, junto con las condiciones climáticas de alta humedad, le confiere una alta capacidad de retención de agua y una notable capacidad de regulación hídrica [47].

### ***F. Relación entre la vegetación y la producción hídrica***

La existencia de bosques cumple un papel transcendental dentro del ciclo del agua. Con la presencia de cobertura vegetal se reciclan las precipitaciones dando como resultado el retorno del agua a la atmósfera para continuar con el proceso natural del ciclo hidrológico. Sin embargo, existen ciertos factores como lo es el cambio de uso de suelo, que puede influir en el balance hídrico, en específico el reemplazo de bosque nativo por vegetación exótica con altas tasas de crecimiento afecta significativamente la producción de agua dentro de un territorio [48].

### ***G. Servicios ecosistémicos***

Los servicios ecosistémicos se refieren al provecho que obtienen los seres humanos de los ecosistemas. Entre los servicios que brindan los ecosistemas se encuentran dentro de cuatro

---

categorías las cuales: de regulación, aprovisionamiento, culturales y de apoyo [49]. Estos beneficios que se derivan de los ecosistemas constituyen la porción más valiosa del capital natural que tiene el ser humano.

### ***H. Capital Natural***

El capital natural comprende aquellos ecosistemas perdurables y paisajes culturales de los cuales el ser humano obtiene bienes y servicios que facilitan su sustento y bienestar, sin incluir los costos directos de producción [50]. Al realizar una restauración del capital natural, el propósito es restablecer la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, con el fin de que las comunidades puedan beneficiarse y aprovechar los servicios que estos ecosistemas ofrecen.

### ***I. Soluciones basadas en la naturaleza (SbN)***

Las SbN son acciones destinadas a la gestión, protección y restauración sostenible de los ecosistemas, aportando simultáneamente beneficios a los seres humanos y a la biodiversidad. Es el conjunto de acciones encaminadas a la restauración de la biodiversidad y combatir el cambio climático, dentro del contexto de desarrollo sostenible [51]. Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) son una de las opciones más efectivas para recuperar los servicios ecosistémicos que se han perdido y para aumentar la resiliencia de los ecosistemas ante los efectos del cambio climático.

### ***J. Biomasa***

La biomasa es considerada como una principal fuente para la obtención de energía renovable, esto debido a la posibilidad que ofrece para obtener materia orgánica y materia prima no energética, de la misma forma lo producen las fuentes no renovables [52]. La biomasa se puede obtener a partir de plantas vivas o muertas, desechos forestales u orgánicos, desechos de las industrias agrícolas o alimentarias, en otras palabras, se pueden definir como biorresiduos de la vegetación [53].

Actualmente la biomasa puede ser dividida en tres generaciones. La primera hace referencia a los cultivos destinados a consumo humano. La segunda permite mayores posibilidades de sostenibilidad al no ser para el consumo humano, tales como residuos domésticos, agrícolas,



---

industriales, etc. Por último, en la tercera generación hace enfoque al aprovechamiento de algas y microalgas debido a su mayor potencial energético [54].

En la segunda generación se encuentra la biomasa forestal, que además de proveer con los residuos que funcionan como materia orgánica, también generan un valor energético. Esto funciona a partir de la transformación de madera a gases combustibles (especialmente metano e hidrógeno) [55].

### ***K. Teledetección***

La teledetección es el uso de sensores remotos para la recopilación de datos e información de un objeto o fenómeno sin estar en contacto directo con él, mediante satélites, drones o aviones [56]. Una de las funciones que nos ofrece la teledetección, es el análisis de los tipos de cambios de la vegetación mediante sus variables biofísicas, que sirven como indicadores para determinar los cambios estructurales, funcionales y de diversidad [57].

Para gestionar el uso de la tierra, la teledetección permite procesar datos sobre el uso de la tierra, áreas inaccesibles y períodos retrospectivos [58]. Los sensores remotos presentan características que los convierten en una metodología ideal para la estimación de la salud de la vegetación, debido a sus bajos costos, alcance de extensiones de tierras y los resultados que ofrece dentro de determinados periodos de tiempo [58]. Uno de los productos obtenidos de los sensores remotos son los índices espectrales, y entre ellos el más usado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que permite estimar y evaluar el estado de la vegetación [59].

#### ***1) Sensores remotos***

Los sensores remotos son dispositivos o instrumentos diseñados para recopilar de manera eficiente información de un objeto, área o fenómeno sin necesidad de tener un contacto directo. Esta información se puede analizar y comprender eficazmente con Sistemas de Información Geográfica (SIG) [60]. Estos dispositivos pueden operar desde plataformas aéreas, como aviones y drones, o desde satélites en órbita alrededor de la Tierra. Funcionan registrando la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra en diferentes longitudes de onda, dependiendo del tipo de sensor y la aplicación específica [61].

#### ***2) Google Earth Engine (GEE)***

Es una herramienta tecnológica que hace posible el análisis y procesamiento de información geoespacial en la nube, caracterizándose por la facilidad de examinar bases de datos de imágenes satelitales de gran tamaño. GEE es una valiosa herramienta que facilita el procesamiento de datos en la nube, posee una óptima capacidad computacional y un catálogo muy amplio de datos que ha

logrado avances en la investigación científica en percepción remota como respuesta a problemas medioambientales a escalas globales [62].

### 3) *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*

Las imágenes satelitales de MODIS tienen un uso frecuente en el análisis de cobertura vegetal en la superficie terrestre [63]. Los sensores de MODIS están a bordo de los satélites AQUA y TERRA pertenecientes a National Aeronautics and Space Administration (NASA), donde permite obtener imágenes diarias de toda la superficie terrestre [23]. Sin embargo, aunque proporcione imágenes diarias, no todas las observaciones obtenidas son válidas debido a diversos factores como la contaminación por nubes, la sombra de las nubes, los fallos de los sensores u otras razones [64].

De manera general, MODIS genera productos con resolución espacial de 250m, 500m y 1000m. El sensor cuenta con un ángulo de visión de 110° y en su capacidad espectral cuenta con 36 bandas.

TABLA I. BANDAS ESPECTRALES DEL SENSOR MODIS

<b>Número de bandas</b>	<b>Ámbito de aplicación</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>
<b>1-7</b>	Terrestre	620-2155
<b>8-16</b>	Oceánica	405-877
<b>17-19</b>	Atmosférica	890-965
<b>20-36</b>	Infrarrojo térmico	3660-14385

Fuente: Mas, 2011 [65].

#### a) *Producto de MODIS para Índice de Vegetación Mejorado (MOD13A2 v061)*

La Versión 6.1 del producto MOD13A2 brinda información anual sobre índices de vegetación, entre ellos el EVI con una resolución de 1000m de píxeles. El algoritmo de este producto elige el mejor valor de píxel disponible entre todas las adquisiciones del período de 16 días [66].

### 4) *Producto para precipitación (GPM IMERG Precipitación final L3 1 mes 0,1 grados x 0,1 grados V07)*

El GPM es una misión colaborativa entre la NASA y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Esta misión tiene como objetivo principal el monitoreo global de las precipitaciones, incluyendo la lluvia, la nieve y el granizo [67]. Este es un producto que permite la estimación de las tasas de precipitación global a partir del año 2000 cada media hora con una resolución de 0,1°. Utiliza el satélite GPM Core Observatory para la combinación de observaciones

de precipitación de una constelación internacional de satélites por medio de técnicas avanzadas [68].

### *L. Coeficiente de Correlación de Pearson*

El coeficiente de correlación de Pearson representa un indicador de la fuerza de vinculación que tienen dos variables y la dirección de asociación lineal que estas poseen. Este coeficiente de correlación que mide la relación estadística entre dos variables es muy útil en diversas áreas del quehacer científico, sin embargo, factores como el tamaño de la muestra, la variabilidad en las características de interés o la falta de linealidad pueden afectar considerablemente la magnitud de los resultados de la medida [69].

El coeficiente de Pearson posee un rango de interpretación de magnitudes para analizar los resultados obtenidos [69]. A continuación, se presenta la **TABLA II** con el rango de valores y la interpretación del coeficiente:

TABLA II. INTERPRETACIÓN DEL COEFICIENTE DE PEARSON

<b>Rango de valores</b>	<b>Interpretación</b>
$0,00 \leq  r_{xy}  < 0,10$	Correlación nula
$0,10 \leq  r_{xy}  < 0,30$	Correlación débil
$0,30 \leq  r_{xy}  < 0,50$	Correlación moderada
$0,50 \leq  r_{xy}  < 1,00$	Correlación fuerte

Fuente: Lalinde et al., [69]

### *M. Fenología*

Se define como el estudio del tiempo en que se presentan los eventos biológicos de las plantas, lo que interfiere en ese tiempo con respecto a factores bióticos y abióticos y la interrelación entre las fases de la planta, ya sea de la misma especie o diferente [70]. También se la conoce como una variable que describe la aparición de etapas del desarrollo de la vegetación en función del tiempo, sin que exista un factor externo que pueda alterar este desarrollo, como el estrés hídrico o la deficiencia nutricional [71].

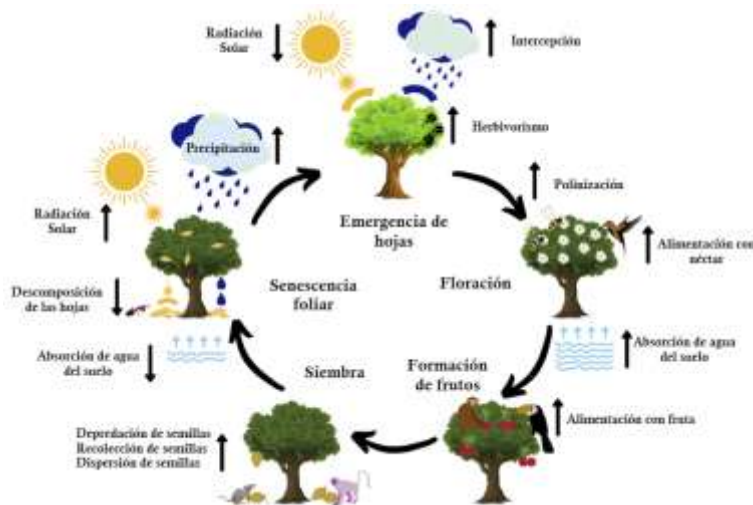


Fig. 2: Procesos y condiciones ecosistémicos que impulsan los eventos fenológicos.  
Fuente: Gray y Ewers, 2021 [72].

## N. Índice de Vegetación

Un índice de vegetación es un indicador cuantitativo de los ecosistemas, por lo que incluye el análisis de parámetros como el verdor de las plantas, la presencia de agua, y la tierra desnuda, a partir de datos obtenidos de sensores remotos colocados en satélites [73]. El índice de vegetación se constituye como un indicador clave para analizar la salud de la cobertura vegetal y de las funciones de los ecosistemas [74].

### 1) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI es un indicador utilizado en teledetección para evaluar la salud y densidad de la vegetación en una determinada zona [75]. Utiliza la información de reflectancia en el infrarrojo cercano y rojo para estimar la cantidad y el estado en que se encuentra la vegetación [76]. Se calcula restando el valor de reflectancia en el rojo por el valor de reflectancia en el infrarrojo cercano y dividiendo esta diferencia por la suma de ambos valores. La representación de este índice se expresa a partir de la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (2)$$

En donde NIR representa la reflectancia del infrarrojo cercano y Red representa la reflectancia en la banda roja del espectro electromagnético. El resultado del cálculo proporciona un valor que oscila entre -1 y 1 [77]. En la **TABLA III** se pueden observar los rangos de clasificación del NDVI según la cobertura y el uso del suelo [78].

TABLA III. RANGOS DE CLASIFICACIÓN DE NDVI

Valor NDVI	Cobertura y uso de tierra	Descripción
< -0.1	Clases no vegetales	Ríos, quebradas, lagunas, mar, áreas anegadas y nubes
0.1 - 0.15	Tierra desnuda	Tierras degradadas, asentamientos, infraestructura vial, suelos sin cobertura vegetal
0.15 - 0.25	Vegetación dispersa	Tierras cultivadas, pastizales, herbazales, arbustos dispersos, cultivos irrigados, tierras aradas por cultivar
0.25 - 0.40	Vegetación abierta	Cultivo arbóreo, vegetación leñosa, plantación arbustiva, plantación de escasos crecimiento
> 0.40	Vegetación cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo siempre verde, algunas especies deciduas y semi-deciduas

Fuente: Ríos et al., 2015 [78]

## 2) Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

Es un indicador del verdor y salud de la vegetación de la superficie de la tierra, a través de un píxel de imágenes satelitales. EVI se diferencia de los otros índices de vegetación por su sensibilidad y capacidad mejorada para el monitoreo de la vegetación por medio de la reducción de la influencia de la atmósfera y el desacoplamiento del fondo del dosel. Los resultados positivos de EVI reflejan mayor presencia de vegetación, mientras mayor sea el valor más robusta y saludable se considera la vegetación [79].

Este índice toma en cuenta los efectos atmosféricos por medio del cálculo de la diferencia entre la reflectancia de las bandas azul y rojo del espectro electromagnético. Este índice es de gran utilidad para el análisis de áreas con vegetación densa y gran concentración de clorofila, como por ejemplo en el caso de bosques tropicales, en especial regiones sin efectos topográficos [80]. La fórmula para el cálculo de este índice es la siguiente:

$$EVI = 2.5 \times (IR - R) / (IR + C1 \times R - C2 \times B + L) \quad (3)$$

Donde los símbolos R e IR representan la reflectancia en el rojo e infrarrojo del espectro, B representa la reflectancia corregida atmosféricamente del Azul perteneciente al espectro electromagnético. Mientras que C1 y C2 representan los coeficientes de la presencia de aerosoles,

donde utilizan la banda azul para poder corregir la reflectancia en la porción roja[81]. Los valores del índice van en un rango de -1 a +1, en condiciones de vegetación sana los valores oscilan entre 0.2 y 0.8 [80].

## VII. METODOLOGÍA

### A. Descripción del área de estudio

La subcuenca del Río Casacay se ubica en la parte baja de la cuenca del Río Jubones en la provincia de El Oro, entre los cantones Pasaje y Chilla. Cuenta con un área aproximada de 12 195,78 Ha, su rango altitudinal se encuentra entre los 60 y 3588 msnm.

La subcuenca experimenta un clima influenciado tanto por la corriente de Humboldt, que llega desde el Pacífico Sur, como por la corriente de El Niño, que proviene del Pacífico Norte. Este contexto climático provoca que la región reciba lluvias frecuentes y mantenga un alto nivel de nubosidad durante la mayor parte del año. [10] La temperatura media anual de la subcuenca es de aproximadamente 16°C.

Esta subcuenca se abastece de los ríos Quera, Dumarí, Tobar y las quebradas Pano, Mochata, Ringilo y Peña Negra, las cuales desembocan en el río Jubones. Las poblaciones que se encuentran dentro de los límites de la subcuenca son Casacay, Dumarí, Gallo Cantana, Nudillo, El Porvenir, Luz de América, Playas de San Tintín y Pano [10]



Fig. 3: Ubicación del área de estudio

Fuente: Los autores

### B. Materiales y métodos

Para el presente estudio se desarrolló un diagrama de flujo en donde se especifican los materiales y métodos correspondientes en cada etapa de la metodología Fig. 4. La metodología

correspondiente permitirá identificar las áreas de vegetación nativa, caudal, precipitación, y el EVI en la subcuenca del río Casacay.

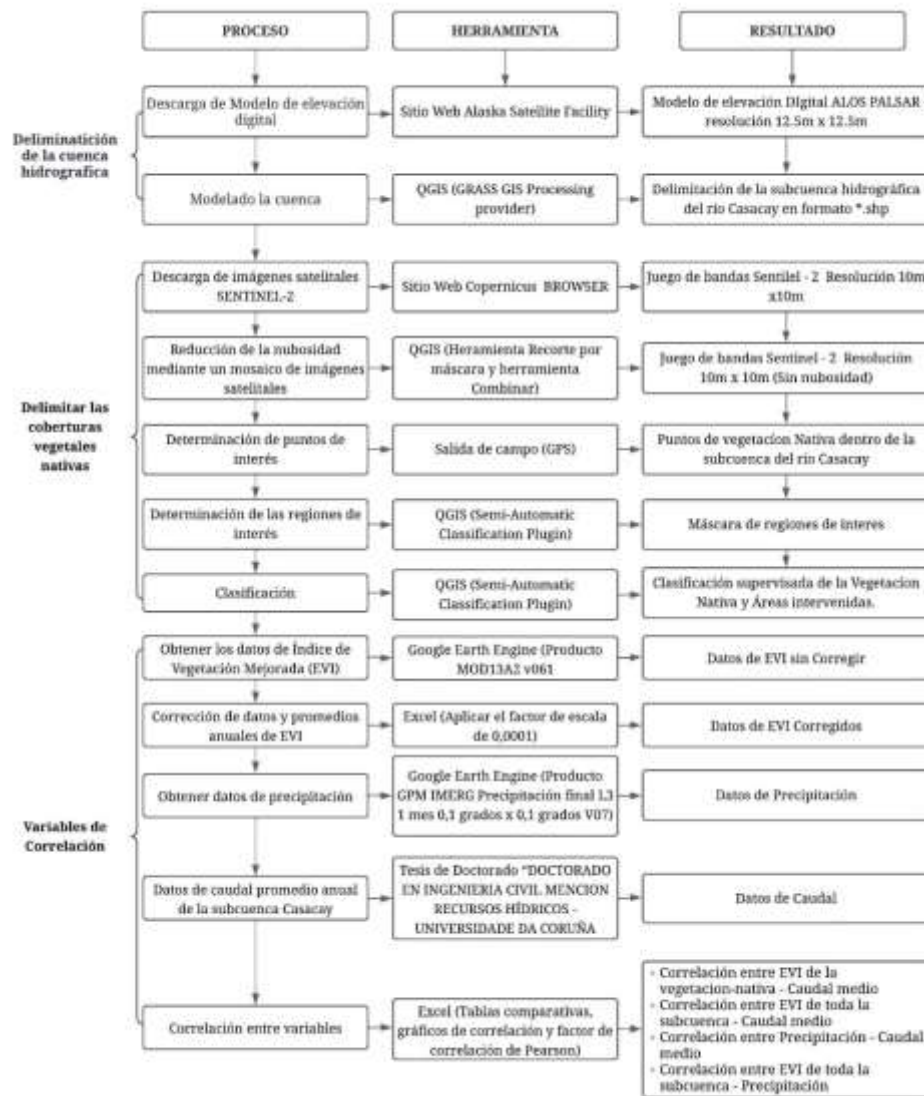


Fig. 4: Diagrama de flujo para la metodología del estudio

Fuente: Los autores

## 1) Delimitar la cuenca hidrográfica

### a) Descarga de Modelo de elevación digital (DEM)

Para el proceso de la delimitación de la subcuenca del río Casacay, primero se ingresó al portal web *Alaska Satellite Facility* Fig.5. En este portal se seleccionó el área de estudio y se configuraron los filtros de búsquedas únicamente para obtener resultados de alta resolución del satélite japonés ALOS del sistema independiente PALSAR.





Fig. 5: Sitio Web Alaska Satellite Facility  
Fuente: Los autores

Con los filtros aplicados se escogió el modelo de elevación digital (DEM) con la fecha más actualizada y se procedió a su descarga Fig.6. En la **TABLA IV** se pueden encontrar las especificaciones del producto descargado.

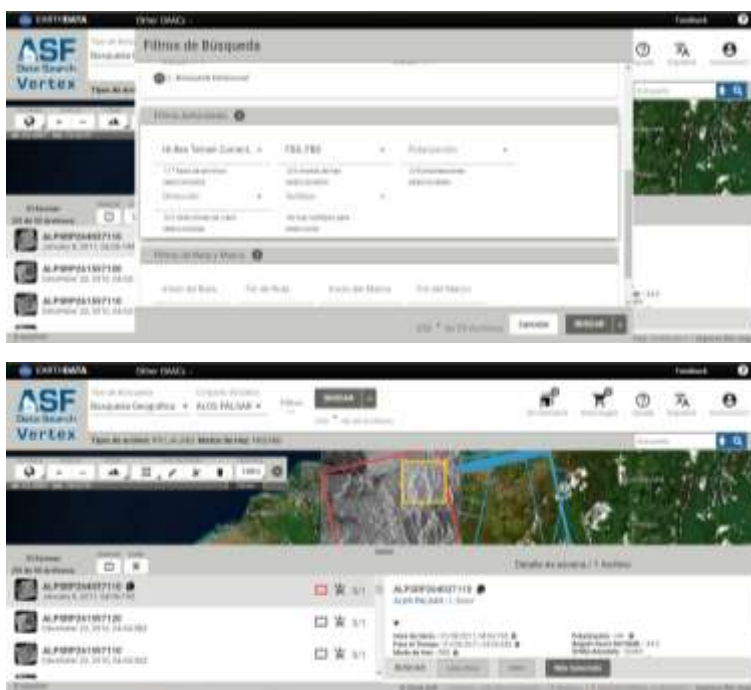


Fig. 6: Filtros de búsqueda  
Fuente: Los autores

TABLA IV. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Nombre del producto	Fecha	Tipo de archivo	Píxel
ALPSRP264037110	08/01/2011	DEM	12.5m X 12.5m

### b) Modelado de la cuenca en QGIS

Posterior a la descarga se proyectó el DEM en el sistema de información digital QGIS. En este programa se empleó el complemento GRASS GIS Processing provider. Primero se corrigió el DEM con la ayuda de la herramienta “r.fill.dir”. Luego utilizamos el DEM corregido en la herramienta “r.watershed” para poder obtener la dirección del drenaje y el flujo de acumulación. Después se utilizó la herramienta “r.water.outlet”. En donde se ingresó la capa dirección del drenaje y un punto de salida, el cual se identificó con el flujo de acumulación.

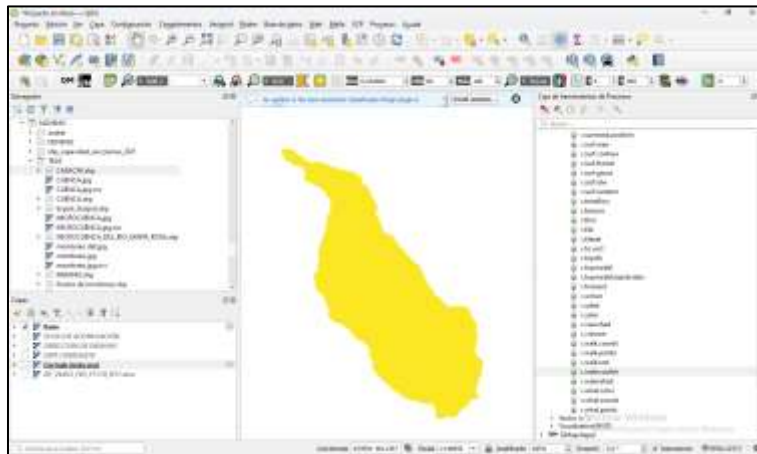


Fig. 7: Subcuenca en formato “Raster”

Fuente: Los autores

Finalmente, se utilizó la herramienta “r.to.vect” para transformar de formato ráster a formato \*.shp. Esta herramienta también permitió suavizar el contorno de la subcuenca.

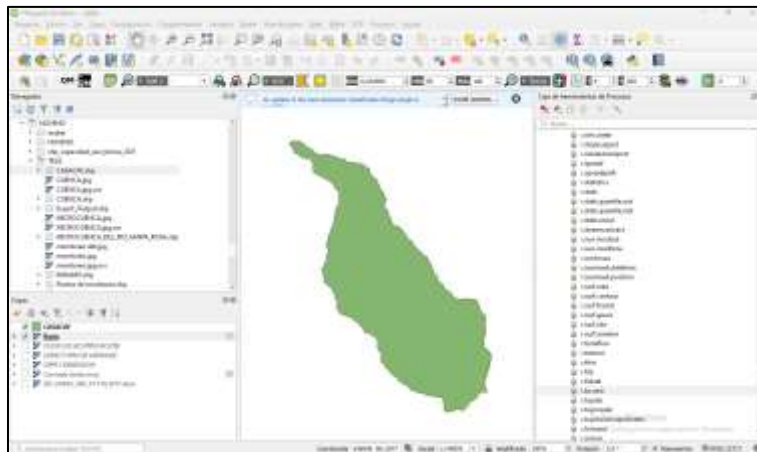


Fig. 8: Subcuenca en formato “shape”

Fuente: Los autores

## 2) *Delimitar las coberturas vegetales nativas*

### a) *Descarga de imágenes satelitales SENTINEL-2*

Primero se ingresó al portal web Copernicus BROWSER. Luego se delimito el área con ayuda de la herramienta “Create an area of interes”. Después se ingresó en el panel de búsqueda “SEARCH” en donde se aplicaron filtros para seleccionar las imágenes pertenecientes únicamente al satélite SENTINEL-2 del periodo 2022-2024. Finalmente, con las imágenes satelitales filtradas y seleccionadas se procedió a su descarga.

### b) *Reducción de la nubosidad mediante un mosaico de imágenes satelitales*

Como la nubosidad sobre el área de estudio es muy alta se procedió a crear un mosaico de imágenes satelitales para poder reducir la presencia de nubes. Para este proceso primero se tomaron dos productos de imágenes satelitales SENTINEL-2 de los años 2022 y 2023 respectivamente. Luego se creó un SHAPE de mascara para cortar ambas imágenes con la herramienta de corte en la pestaña Raster. Finalmente se unirían los juegos de bandas de ambas imágenes satelitales utilizando la herramienta “Combinar” obteniendo un nuevo juego de bandas. En la Fig. 9 se pueden apreciar el resultado de la unión de los juegos de bandas.

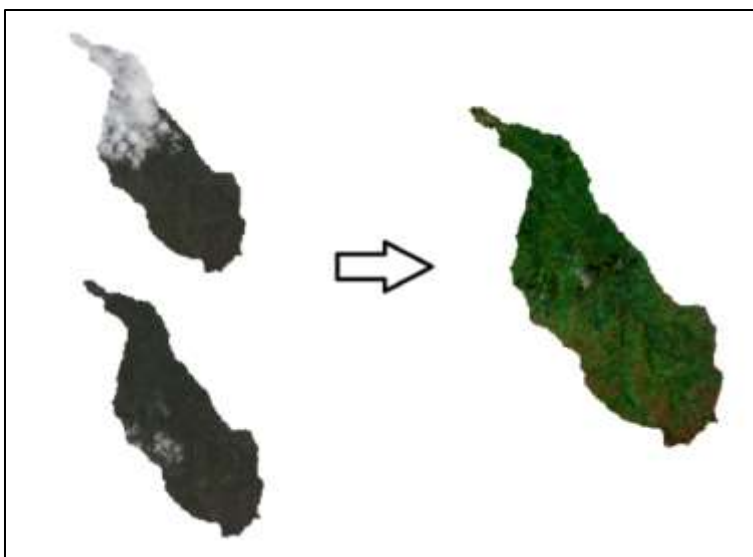


Fig. 9: Combinación de productos satelitales de Sentinel  
Fuente: Los autores

### c) *Determinación de puntos de interés*

Para clasificar de manera más precisa se hizo una visita *in situ* dentro de la subcuenca del Río Casacay. Primero se identificaron rutas y posibles puntos en donde exista vegetación nativa con la ayuda de la aplicación Google Maps. Esto proporciona una vista general y ayuda a planificar la visita de campo de manera más eficiente.

Ya en campo se procedieron a tomar las coordenadas de las coberturas vegetales nativas. Este enfoque directo asegura que los datos sean específicos y localizados. En la parte alta se tomaron coordenadas de las coberturas de páramo. Mientras que en la parte media y baja se tomaron coordenadas en áreas de bosque húmedo, el cual se adaptada a condiciones de menor altitud y diferentes regímenes de humedad. Estas coordenadas serán proyectadas en el sistema de información geográfica y nos ayudaron a generar las regiones de interés (ROIs).



Fig. 10: Registro de coordenadas en campo  
Fuente: Los autores

#### *d) Determinación de las regiones de interés*

Una clasificación supervisada requiere que se ingresen ROIs para poder crear las clases de cobertura de suelo. Estos son polígonos temporales que se crean sobre el juego de bandas. Para crear los ROIs lo que se debe hacer primero se debe descargar el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (CSP). Para nuestro proyecto de investigación se utilizó la versión 7.10.11. Con el complemento activado se procedió a ir al panel de control de CSP y crear un nuevo archivo de entrenamiento en la pestaña “Training input”. En este archivo se generarán nuestras regiones de interés. Con la ayuda de la barra de herramientas de CSP dibujamos los ROIs, tomando como referencia los puntos de interés tomados en campo.



Fig. 11: Registro de regiones de interés en SCP  
Fuente: Los autores

#### e) Clasificación supervisada

Con las regiones de interés establecidas se procedió a realizar la clasificación en la pestaña “band processing”. El resultado de la clasificación se la obtuvo en formato \*.tiff y se procedió a convertir en formato \*.shp con la herramienta “Rasterizar”. Finalmente, para poder tener una clasificación mucho más precisa se hicieron correcciones manuales utilizando el mapa base Google Satellite. En la Fig. 12 se puede apreciar el resultado de la clasificación en formato \*.tiff.



Fig. 12: Clasificación supervisada en formato \*.tiff  
Fuente: Los autores

### 3) Obtener los datos de Índice de Vegetación Mejorada (EVI)

Para obtener los datos de EVI se utilizó el producto MOD13A2 v061 el cual tiene una resolución por pixel de 1 km para lo cual se creó una serie de puntos a distancia de 500 metros en formato \*.shp con el fin que los datos extraídos sean precisamente del centro del pixel. Los puntos

se los realizaron para la superficie de la vegetación nativa y para toda la subcuenca. Para estos puntos se utilizó la herramienta “Create Fishnet” en ArcGis 10.2.

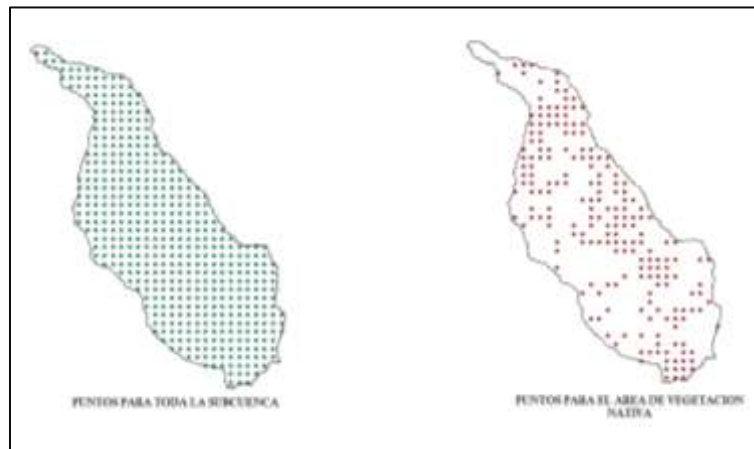


Fig. 13: Malla de puntos para la subcuenca y la vegetación nativa  
Fuente: Los autores

Seguidamente se procedió a cargar los puntos en la plataforma Google Earth Engine en la pestaña “Assets”. Con los puntos cargados nos dirigimos a la pestaña “Script” en donde se utilizará el código de programación de la Fig. 14.

```

1 // Definición de años
2 // Periodo de estudio
3 var year_min = 2010;
4 var year_max = 2020;
5
6 var SVI = ee.ImageCollection("MODIS/02/SVI");
7
8 // Definir la región de interés (la misma la que se usó en el estudio)
9 var ROI = ee.GeometryCollection("projects/ee-forestland/shapefile/ROI");
10
11 // Selección de imágenes SVI y conversión a ee
12 var SVI = SVI.filterDate(year_min, year_max, year_max);
13 var SVI = SVI.select(['SVI']);
14
15 // Mostrar precipitación mensual en
16 var monthPrecip = function(img) {
17   var start = ee.Date(img.get('system:time_start'));
18   var end = start.advance(1, 'month');
19   var monthIndex = ee.Date(start, 'YYYY-MM').getYearMonth();
20   return img.select(['SVI']).rename(['precip_' + monthIndex]);
21 };
22
23 var SVI = SVI.map(monthPrecip);
24 print('Cálculo de imágenes SVI por mes', SVI);
25
26 // Reducir la colección de imágenes a única y exportar a CSV
27 var reduceToPrecipitation = function(img) {
28   var precipitation = ee.ReduceMean(img);
29   collection = collection.add(precipitation);
30   return ee.ReduceMean(img);
31 };
32
33 // Reducir la colección de imágenes a única y exportar a CSV
34 var reduceToPrecipitation = function(img) {
35   var date = ee.Date(img.get('system:time_start'));
36   return ee.ReduceMean(img).rename(['precip_' + date.getYearMonth()]);
37 };
38
39 // Fin de la función
40 // Fin de la función
41
42 // Exportar los datos a CSV
43 export.table({filePath:
44   collection.reduceToPrecipitation(),
45   fileName: 'SVI_2010_2020'});
46
47 // Fin

```

Fig. 14: Script para generar datos de EVI  
Fuente: Los autores

El Script nos permitió obtener extraer los datos de la variable EVI en los puntos proyectados en la plataforma. También, podremos establecer el periodo de estudio. Para nuestro proyecto se tomó un periodo que va desde 2000 hasta 2020. Una vez ingresado el Script podremos darle al botón “run” para poder obtener los datos deseados. El Script está configurado para obtener el resultado anual en formato \*.scv, pero también se puede descargar en formato \*.shp.

*a) Corrección de datos y promedios anuales de EVI*

Los datos extraídos del sensor se transformaron con la ayuda de la hoja de cálculo “Excel”. Luego fueron corregidos con el factor de escala. Este factor se encuentra en las especificaciones del producto de MODIS. Para el producto MOD13A2 v061 el factor de corrección es de 0,0001. Tras corregir los datos, se realizaron los promedios anuales del periodo establecido en \*. xlsx.

**4) Obtener datos de precipitación**

Para obtener los datos de la precipitación sobre la cuenca se utilizó producto GPM IMERG Precipitación final L3 1 mes 0,1 grados x 0,1 grados V07. Para este producto se creó una malla de puntos a distancias de 5,5 Km tomando en consideración que la dimensión de cada píxel del producto es de 11 Km. En la figura 15 se puede observar la ubicación de cada píxel en la subcuenca.

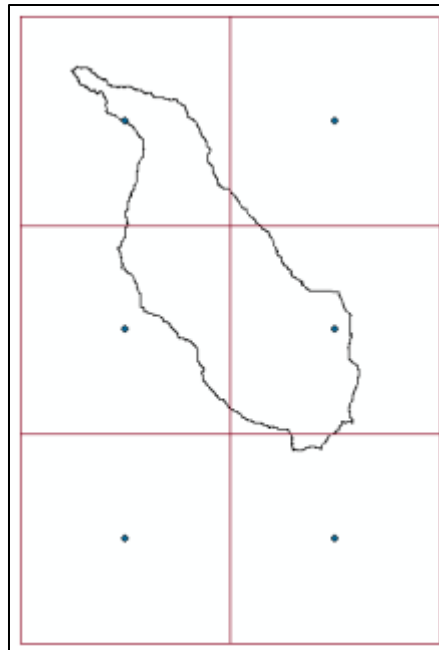


Fig. 15: Malla de puntos para obtener datos de precipitación

Fuente: Los autores

Con los puntos generados sobre la cuenca se procedió a cargarlo en la interfaz del programa online Google Earth Engine. Una vez generados los puntos para poder extraer datos, se utilizó el código de la Fig 16.

```

PRECIPITACIÓN *
1 // lista de años
2 // Período de estudio
3
4 var year_ini = 2019;
5 var year_fin = 2020;
6
7 var GPM = ee.ImageCollection("NASA/GPM_L3/DIERSG_MONTHLY_V02");
8
9 // Definir la región de interés (Se coloca la capa que se va a utilizar)
10 var RCasacay = ee.FeatureCollection('projects/ee-besinas/9/assets/puntos_casacay');
11
12
13 // Selección de imágenes GPM y conversión a mm
14 var GPM_mm = GPM.filter(ee.Filter.calendarRange(year_ini, year_fin, 'year'))
15 // .filter(ee.Filter.calendarRange(7, 9, 'month'))
16 .select('precipitation');
17
18 // Añadir precipitación mensual mm
19 var addMonthlyPrecip = function (img) {
20 var start = ee.Date(img.get('system:time_start'));
21 var end = start.advance(1, 'month');
22 var hoursInMonth = end.difference(start, 'hours');
23 return img.addBands(img.multiply(hoursInMonth).rename('precip_mm_month'));
24 };
25 var GPM_mm = GPM.select('precipitation').map(addMonthlyPrecip);
26 print('Colección de imágenes GPM por mes', GPM_mm);
27
28 Map.addLayer(GPM_mm.first().clip(RCasacay), {bands: 'precipitation', max: 1000}, 'Precip monthly mm ler mes');
29
30 Export.image.toDrive({
31 image: GPM_mm.select('precip_mm_month').toBands(),
32 folder: 'Test_Folder',
33 description: 'GPMmensual',
34 scale: 11000,
35 region: RCasacay,
36 crs: 'EPSG:32717'
37 });

```

Fig. 16: Script para generar datos de precipitación

Fuente: Los autores

El código genera un archivo en formato \*.csv el cual se proyectó en una hoja de Excel. Con el fin de obtener datos muchos más precisos en cuanto a precipitación se utilizó el método de Thessen. Este método toma en cuenta el área de influencia de cada punto dentro de la cuenca. se calcula multiplicando la precipitación media en cada punto por el área que esta cubre y luego se divide entre el área total de la cuenca.

### 5) *Datos de caudal promedio anual de la subcuenca Casacay*

Los datos de caudal fueron suministrados por el Ingeniero Civil Jesús Enrique Espinoza Correa, en el desarrollo de su Tesis de Doctorado “DOCTORADO EN INGENIERIA CIVIL MENCION RECURSOS HÍDRICOS - UNIVERSIDADE DA CORUÑA”. Estos datos de caudal fueron se promediaron con la ayuda de la hoja de cálculo Excel.

### 6) *Correlación entre variables*

En la Fig. 17 se detallan las correlaciones y los periodos de estudio que se utilizaron para el presente estudio. Para cada una de las correlaciones se hicieron las tablas comparativas y los gráficos de correlación. Para conocer el grado de correlación entre variables, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.





Fig. 17: Correlaciones entre variables  
Fuente: Los autores

Para la interpretación de los rangos de la correlación de Pearson se utilizaron los valores sugeridos por Cohen, considerados y respetados a nivel de la comunidad científica [82].

## VIII. RESULTADOS

### A. Caracterización del estado de la vegetación

#### 1) Delimitación de la cuenca hidrográfica

Los resultados obtenidos después de la modelación en QGIS se pueden apreciar en la Fig. 18. La subcuenca presenta una forma alargada, comprende un área 12 191,27 ha y una longitud del cauce principal de 129,106 km. También se puede apreciar como la subcuenca drena de sureste a noroeste.

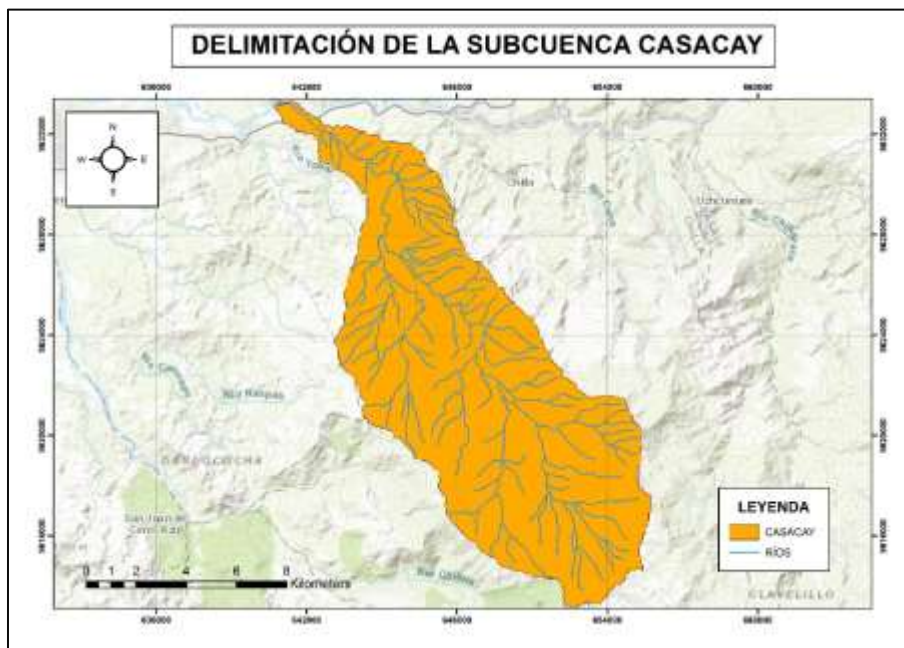


Fig. 18: Resultado de Modelación de la cuenca en QGIS

Fuente: Los autores

#### 2) Clasificación supervisada

Los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada en QGIS se muestran en la **TABLA V**. En esta, se puede apreciar que la subcuenca cuenta con un área de 4 667.84 ha (38,27%) de cobertura nativa, mientras que el área intervenida ocupa 7 527,94 ha (61,73%).

TABLA V. ÁREAS DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Tipo de Cobertura	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)
Área de Vegetación		
Nativa	4667,84	38,27
Área intervenida	7527,94	61,73

Área Total de la Subcuenca	12195,78	100,00
----------------------------	----------	--------

En la Fig. 19 se pueden apreciar las áreas en toda la subcuenca del Río Casacay en donde existe vegetación nativa. En la parte noreste es en donde podemos encontrar más áreas con vegetación nativa mientras que en el suroeste se puede apreciar una mayor cantidad de área intervenidas.

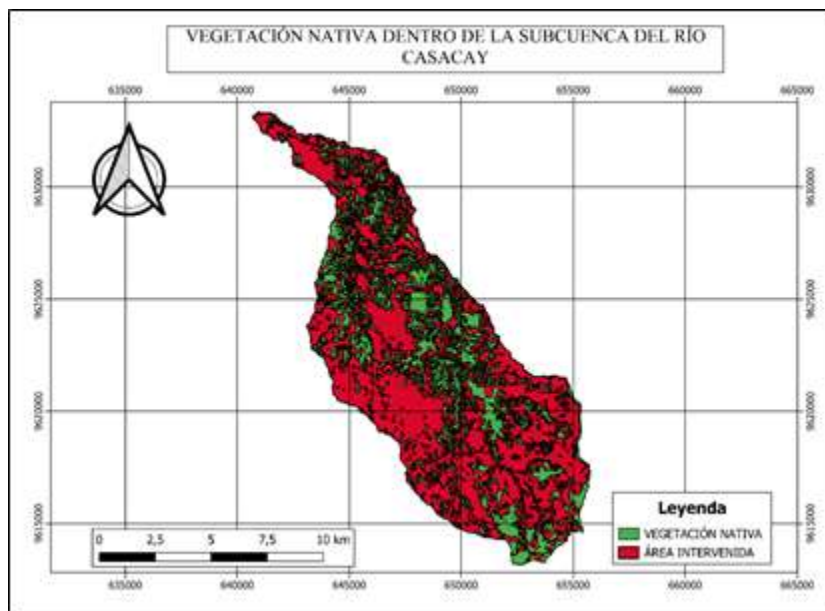


Fig. 19: Resultado de clasificación supervisada  
Fuente: Los autores

### 3) Resultados de EVI

En la TABLA VI se puede observar un ejemplo de datos mensuales obtenidos del producto MODIS MOD13A1 v061. Se obtuvieron 32 523 datos para la variable de EVI en la cobertura de vegetación nativa y 34 018 datos para la variable de EVI en toda la subcuenca.

TABLA VI. DATOS EVI OBTENIDOS DE GOOGLE EARTH ENGINE

system:index	EVI	month	year	.geo
2017_01_01_00000000000000000000	3815.0	1	2017	{"type":"Point","coordinates":[-79.62581843154348,-3.4968201503132224]}
2017_01_01_000000000000000000001	2246.0	1	2017	{"type":"Point","coordinates":[-79.62131483633041,-3.496813518157357]}
2017_01_01_000000000000000000002	2246.0	1	2017	{"type":"Point","coordinates":[-79.6168157175653,-3.4968068709300644]}

2017_01_01_0000000000000000000003	3249.0	1	2017	{ "type": "Point", "coordinates": [-79.62582501667406, -3.4922947526695687]}
2017_01_01_0000000000000000000004	2285.0	1	2017	{ "type": "Point", "coordinates": [-79.62132144302576, -3.4922881291171417]}
2017_01_01_0000000000000000000005	2285.0	1	2017	{ "type": "Point", "coordinates": [-79.61682234580383, -3.4922814905128376]}
2017_01_01_0000000000000000000006	2285.0	1	2017	{ "type": "Point", "coordinates": [-79.61232325720098, -3.492274830296609]}
2017_01_01_0000000000000000000007	3692.0	1	2017	{ "type": "Point", "coordinates": [-79.63482978102016, -3.487786996075317]}

La **TABLA VII** muestran los resultados interanuales de EVI en toda la cuenca desde el 2000 hasta el 2022. Los valores máximos en mayo del 2002 y 2005 con valores de 0,51 para cada uno. Los valores mínimos se aprecian en enero de 2008 y 2013 con valores de 0,08 y 0,11 respectivamente.

TABLA VII. DATOS MULTIANUALES PROCESADOS DE EVI EN CASACAY 2000-2020

Año/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000						0,39	0,44	0,42	0,32	0,37	0,37	0,22
2001	0,13	0,15	0,43	0,26	0,43	0,35	0,34	0,38	0,33	0,30	0,23	0,20
2002	0,20	0,28	0,33	0,23	0,51	0,43	0,33	0,35	0,29	0,21	0,22	0,17
2003	0,12	0,18	0,44	0,40	0,30	0,43	0,40	0,35	0,35	0,28	0,27	0,29
2004	0,35	0,26	0,30	0,36	0,44	0,45	0,44	0,36	0,28	0,26	0,27	0,32
2005	0,28	0,23	0,34	0,39	0,51	0,48	0,38	0,38	0,28	0,24	0,27	0,23
2006	0,23	0,19	0,35	0,33	0,40	0,38	0,36	0,41	0,33	0,35	0,23	0,25
2007	0,19	0,18	0,50	0,30	0,23	0,40	0,38	0,34	0,33	0,24	0,24	0,19
2008	0,08	0,27	0,39	0,38	0,37	0,37	0,39	0,36	0,41	0,24	0,32	0,26
2009	0,17	0,18	0,43	0,33	0,40	0,50	0,44	0,35	0,41	0,29	0,35	0,20
2010	0,22	0,23	0,20	0,38	0,33	0,38	0,44	0,44	0,42	0,27	0,31	0,26
2011	0,21	0,24	0,35	0,31	0,49	0,33	0,33	0,43	0,46	0,30	0,25	0,27
2012	0,12	0,23	0,38	0,47	0,34	0,38	0,45	0,39	0,38	0,30	0,35	0,28
2013	0,11	0,18	0,34	0,47	0,38	0,37	0,43	0,37	0,37	0,22	0,33	0,31
2014	0,13	0,18	0,28	0,24	0,28	0,38	0,41	0,45	0,40	0,36	0,41	0,32
2015	0,22	0,21	0,30	0,28	0,31	0,41	0,33	0,37	0,28	0,26	0,29	0,29
2016	0,21	0,19	0,20	0,38	0,43	0,44	0,43	0,39	0,34	0,35	0,46	0,27
2017	0,25	0,23	0,36	0,37	0,37	0,36	0,39	0,35	0,35	0,29	0,28	0,14
2018	0,23	0,17	0,26	0,40	0,37	0,48	0,43	0,37	0,28	0,28	0,25	0,26
2019	0,20	0,21	0,29	0,36	0,28	0,29	0,42	0,44	0,33	0,29	0,22	0,17

---

2020	0,21	0,26	0,25	0,34	0,41	0,38	0,40	0,44	0,38	0,29	0,41	0,22
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

---

En la **TABLA VIII** se pueden apreciar los datos ya corregidos y procesados para la variable de EVI en la vegetación nativa cada 16 días. Los valores máximos se presentan en la primera mitad de junio de 2018 y la primera mitad de mayo en 2017, con valores de 0,50 y 0,49 respectivamente. En cambio, los valores más bajos de EVI se presentaron en la primera mitad del mes de diciembre del año 2017 y 2018 con valores de 0,11 para ambas fechas.

TABLA VIII. DATOS PROCESADOS DE EVI EN LA VEGETACIÓN NATIVA EN CASACAY CADA 16 DIAS - 2017-2019

Mes – Año	2017	2018	2019
Enero	0,16	0,27	0,20
	0,34	0,22	0,23
Febrero	0,31	0,12	0,13
	0,18	0,24	0,33
Marzo	0,31	0,26	0,30
	0,42	0,28	0,34
Abril	0,41	0,48	0,38
	0,42	0,36	0,39
Mayo	0,49	0,38	0,25
	0,24	0,33	0,27
Junio	0,30	0,50	0,20
	0,36	0,46	0,32
Julio	0,36	0,45	0,39
	0,37	0,41	0,43
Agosto	0,31	0,40	0,43
	0,35	0,32	0,45
Septiembre	0,40	0,30	0,33
	0,27	0,21	0,29
Octubre	0,29	0,26	0,27
	0,29	0,29	0,20
Noviembre	0,23	0,20	0,21
	0,18	0,43	0,13
Diciembre	0,11	0,11	0,24

La **TABLA IX** muestra los valores del EVI en toda la cuenca cada 16 días en el periodo 2017-2019. Los valores máximos se presentan en la primera mitad de junio del 2018 y en la primera mitad de mayo del 2017 con valores de 0,51 y 0,50. En cuanto a los valores más bajos estos se

presentaron en la primera mitad de diciembre del 2017 y 2018 con valores de 0,11 y 0,10 respectivamente.

TABLA IX. DATOS PROCESADOS DE EVI EN CASACAY CADA 16 DIAS 2017-2019

Mes – Año	2017	2018	2019
Enero	0,15	0,26	0,20
	0,34	0,19	0,21
Febrero	0,30	0,12	0,12
	0,17	0,22	0,30
Marzo	0,30	0,23	0,27
	0,41	0,28	0,32
Abril	0,36	0,48	0,34
	0,39	0,33	0,38
Mayo	0,50	0,39	0,28
	0,25	0,36	0,29
Junio	0,34	0,51	0,24
	0,38	0,46	0,34
Julio	0,40	0,45	0,41
	0,39	0,42	0,43
Agosto	0,34	0,39	0,44
	0,35	0,34	0,45
Septiembre	0,41	0,32	0,35
	0,28	0,24	0,31
Octubre	0,29	0,28	0,29
	0,32	0,29	0,22
Noviembre	0,24	0,22	0,23
	0,17	0,43	0,14
Diciembre	0,11	0,10	0,21

## ***B. Caracterización de la producción hídrica***

### ***1) Caudal***

Los resultados corresponden a aforos realizados en el periodo 2017-2019. Los datos de caudal cada 16 días en la subcuenca de Casacay se pueden apreciar en la **TABLA X**. En la primera parte de abril y en la segunda parte de marzo se registraron los datos con mayor caudal con valores de 9,06 m<sup>3</sup>/s y 8,00 m<sup>3</sup>/s. Por otro lado, los datos de menor caudal se registraron a lo largo del mes de septiembre del 2019 con valores entre 1,80 m<sup>3</sup>/s y 1,84 m<sup>3</sup>/s.

TABLA X . DATOS PROCESADOS DE CAUDAL EN TODA LA SUBCUENCA CADA 16 DIAS - 2017-2019

<b>Año-  Mes</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Enero	3,90	3,90	2,14
	5,10	3,76	2,46
Febrero	5,31	3,61	2,42
	5,05	3,07	2,51
Marzo	6,19	3,20	2,95
	8,00	3,02	2,85
Abril	9,06	3,58	3,27
	7,82	3,45	2,95
Mayo	7,92	3,39	2,70
	7,53	3,92	2,45
Junio	5,89	3,19	2,24
	5,42	2,60	2,14
Julio	4,60	2,56	2,15
	4,35	2,37	1,99
Agosto	3,91	2,42	1,90
	3,92	2,27	1,84
Septiembre	3,61	2,29	1,80
	3,44	2,23	1,84
Octubre	3,42	2,28	1,92
	3,26	2,20	1,96
Noviembre	3,20	2,16	1,96
	3,26	2,40	2,03
Diciembre	3,29	2,35	2,24

La **TABLA XI** permite visualizar los resultados de los datos de caudal multianuales en el periodo 2017-2019. En marzo y abril del año 2017 se registraron los valores de mayor caudal en el río Casacay con valores de 8,9 m<sup>3</sup>/s y 8,06 m<sup>3</sup>/s. En cambio, los datos con menor caudal son los de septiembre y octubre del 2018 con 1,8 m<sup>3</sup>/s y 1,9 m<sup>3</sup>/s. La producción hídrica promedio en toda la cuenca durante los 3 años fue de aproximadamente 3,51 m<sup>3</sup>/s.

TABLA XI. DATOS MULTIANUALES PROCESADOS DE PRECIPITACIÓN EN TODA LA SUBCUENCA - 2017-2019

<b>Año/Mes</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
2017	5,2	5,5	8,2	8,1	7,3	5,4	4,4	6,6	3,5	3,3	3,2	3,3
2018	3,7	3,1	3,2	3,4	3,7	2,8	2,4	3,1	2,3	2,2	2,3	2,3
2019	2,4	2,6	3,0	3,1	2,4	2,2	2,1	2,5	1,8	1,9	2,0	2,1

## 2) Datos precipitación

En la **TABLA XII** se puede observar un ejemplo de datos mensuales obtenidos del producto GPM vRelease 07. En total se obtuvieron un total 1483 datos para la variable de precipitación en toda la subcuenca.

TABLA XII. DATOS PRECIPITACIÓN OBTENIDOS DE GOOGLE EARTH ENGINE

<b>system:index</b>	<b>Precip</b>	<b>Month</b>	<b>Year</b>	<b>.geo</b>
20000601_0000000000000	45.36	6	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.70806141943143,-3.54107508951871]}
20000601_0000000000001	49.68	6	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.60904771460146,-3.540931199709891]}
20000601_0000000000002	44.64	6	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.70819739225745,-3.441584818486623]}
20000601_0000000000003	49.68	6	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.60919410043887,-3.4414449809007897]}
20000601_0000000000004	43.20	6	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.70832947340826,-3.342089844686356]}
20000601_0000000000005	48.24	6	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.60933629657286,-3.3419540587025063]}
20000701_0000000000000	20.08	7	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.70806141943143,-3.54107508951871]}
20000701_0000000000001	23.06	7	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.60904771460146,-3.540931199709891]}
20000701_0000000000002	20.08	7	2000	{"type":"Point","coordinates":[-79.70819739225745,-3.441584818486623]}

En la **TABLA XIII** se pueden observar los datos multianuales de precipitación corregidos con el método Thiessen. Los meses en donde se registraron los valores de mayor precipitación son en febrero del año 2008 y 2012 con valores de 71,87 mm/h y 68,01 mm/h respectivamente. Los valores bajos en cambio se registran en noviembre del 2013 y octubre de 2020 con 2,09 mm/h y 1,73 mm/h respectivamente.

TABLA XIII. DATOS MULTIANUALES PROCESADOS DE PRECIPITACIÓN EN CASACAY 2000-2020 (mm/h)

<b>Año/Mes</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
2000						9,3	4,3	5,0	9,7	3,1	2,9	12,6



2001	38,2	32,3	67,9	26,7	11,3	7,9	4,9	5,0	4,3	3,3	9,0	12,0
2002	14,9	45,7	63,4	38,4	10,9	5,5	4,7	3,5	2,4	8,9	9,9	18,4
2003	18,5	25,4	24,7	21,9	11,2	6,7	4,3	3,5	3,5	6,0	8,3	17,7
2004	16,0	28,5	29,7	32,4	13,5	9,1	8,1	4,1	8,6	10,2	7,2	11,2
2005	15,3	29,5	52,5	22,9	8,2	7,5	3,7	3,4	3,1	7,1	4,2	14,7
2006	24,0	58,4	51,1	23,9	8,6	6,2	3,1	3,0	3,7	5,4	16,9	23,8
2007	29,4	18,2	46,1	31,9	14,7	10,8	2,8	6,2	3,3	6,5	11,6	14,3
2008	48,7	71,9	62,4	46,7	17,4	8,0	7,1	6,0	4,9	13,5	11,4	10,6
2009	49,1	47,2	35,5	23,2	16,2	5,9	4,5	4,3	3,2	5,8	6,1	19,9
2010	26,8	48,9	44,0	37,6	17,0	11,6	7,3	3,6	5,1	6,3	7,8	21,3
2011	29,2	39,9	16,9	49,9	9,3	7,6	9,7	11,0	7,0	5,0	8,3	22,1
2012	60,4	68,0	43,9	45,9	20,0	7,4	4,8	3,3	3,1	7,9	12,7	12,2
2013	35,1	39,3	37,6	13,6	23,5	8,1	6,6	4,5	3,1	10,3	2,1	9,8
2014	27,2	29,0	31,9	16,0	46,0	14,9	5,8	5,5	4,5	11,8	5,5	12,3
2015	26,1	24,3	59,2	30,8	22,8	11,1	8,2	4,0	2,9	11,2	8,7	7,3
2016	29,7	40,4	41,7	27,8	11,8	8,9	4,2	3,4	8,0	3,4	5,3	17,0
2017	42,6	41,4	60,0	38,8	23,8	8,1	3,8	5,6	2,7	3,5	4,5	17,5
2018	22,3	33,6	24,1	19,0	20,9	5,4	3,3	3,2	3,2	3,9	16,8	13,3
2019	31,2	33,3	31,5	28,7	14,3	5,4	4,7	4,4	2,4	7,9	7,6	20,4
2020	22,7	43,0	25,9	24,1	10,1	4,2	6,1	3,5	5,5	1,7	2,8	13,8

### C. Correlaciones entre variables

#### 1) Correlación entre el EVI de la vegetación nativa y el caudal

A continuación, se muestran en la Fig. 20 los valores obtenidos de EVI de la vegetación nativa y el caudal de la subcuenca en 16 días desde 2017 hasta 2019. En donde la variable dependiente representa al caudal y la independiente al EVI, los valores más altos se reflejan en mayo del año 2017 con 0,49 y en junio del 2018 con un valor de 0,50, mientras que en diciembre del 2017 y 2018 se refleja el valor más bajo con 0,11. En los resultados de caudal los valores más altos están entre los meses de marzo y abril del año 2017 con valores de 8,00 m<sup>3</sup>/s y 9,06 m<sup>3</sup>/s respectivamente, posteriormente los valores disminuyen hasta llegar al resultado de 1,80 m<sup>3</sup>/s en septiembre del 2019.

Para analizar la relación entre ambas variables se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, donde se obtuvo un valor de 0,23, es decir existe una correlación débil según los rangos de interpretación del coeficiente.



Fig. 20: Relación EVI de la vegetación nativa – Caudal  
Fuente: Los autores

## 2) *Correlación entre el EVI de la cuenca y el caudal*

En la Fig. 21 se observan los resultados del EVI de toda la cuenca y el caudal a partir del año 2017 hasta el 2019, en periodos de 16 días. En los resultados del EVI de toda la cuenca los valores más altos se evidencian en mayo de 2017 con un valor de 0,50 y en junio del 2018 con un valor de 0,51, mientras que los más bajos son en diciembre de 2017 con un valor de 0,11 y en diciembre del 2018 con un valor de 0,10. El coeficiente de correlación entre el EVI de toda la cuenca y el caudal es interpretado como una correlación débil con un valor de 0,19.



Fig. 21: Relación EVI de la cuenca – Caudal  
Fuente: Los autores

## 3) *Correlación entre el caudal y la precipitación de la cuenca*

En la Fig. 22 se muestran los datos mensuales de precipitación y caudal desde el año 2017 al 2019. En donde la variable dependiente es el caudal y la independiente es la precipitación. Dentro del periodo analizado, a partir de enero hasta mayo de 2017 se evidencia un aumento de

precipitaciones, registrando el valor más alto en el mes de marzo del mismo año con 60 mm/hr, en los años posteriores se observa el mismo patrón de aumento de precipitaciones. En cuanto al caudal, los datos más altos registran entre los meses de marzo, abril y mayo de 2017. El coeficiente de correlación que se ha determinado entre ambas variables es de 0,54, es decir existe una correlación fuerte entre la precipitación y el caudal de la cuenca de Casacay.

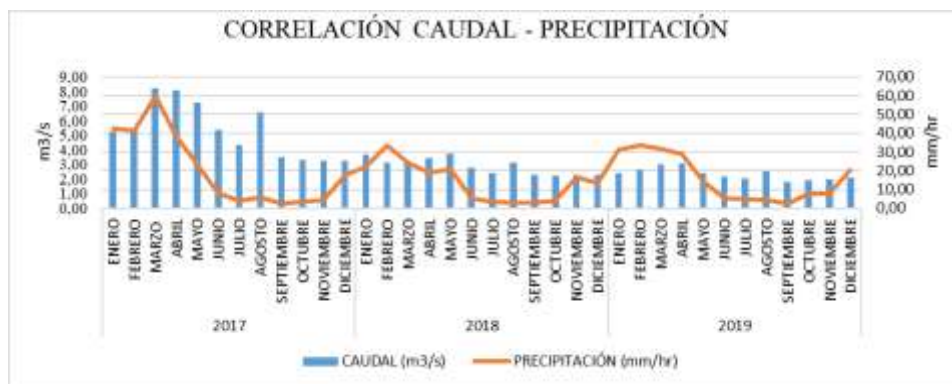


Fig. 22: Relación EVI de la cuenca – Precipitación

Fuente: Los autores

### 1) Correlación entre la precipitación y el EVI

Los resultados de la correlación se realizaron en periodos interanuales. Es decir que se analizó cada mes en su respectivo año. La variable independiente es la precipitación, mientras que la dependiente es el EVI. En la Fig. 23 se muestran los años con mayor y menor correlación obtenida. Cabe recalcar que todas las correlaciones obtenidas entre el periodo 2000-2020 fueron negativas con excepción del año 2007 en donde hubo una correlación positiva.

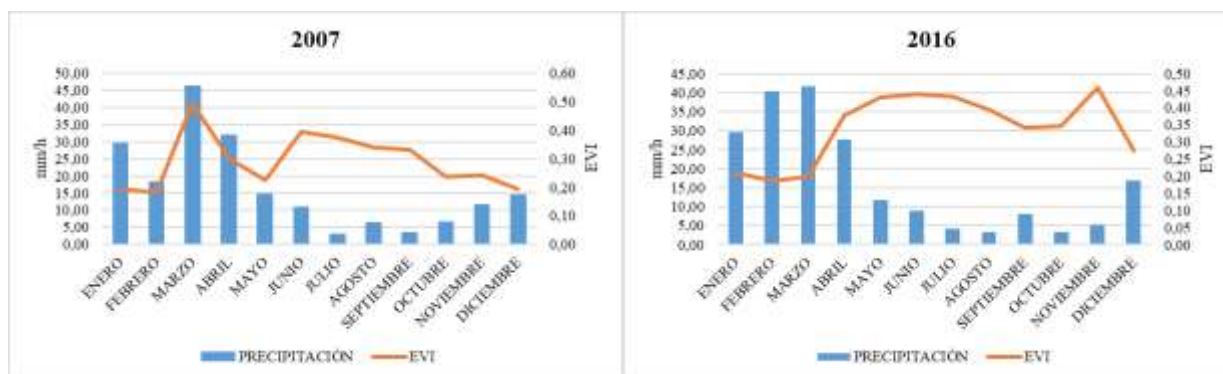


Fig. 23: Relación EVI de la cuenca – Precipitación

Fuente: Los autores

---

## IX. DISCUSIÓN

### A. *Relación EVI – caudal*

La correlación entre el EVI de la vegetación nativa y el caudal medio en la subcuenca del río Casacay es una correlación débil. De igual manera se obtuvo el mismo resultado con la variable del EVI total de la cuenca. Los cambios en la salud de las vegetaciones nativas no repercuten significativamente sobre el caudal medio del río Casacay. La variabilidad de la salud de los ecosistemas analizadas o monitoreadas a través del EVI parecen no influir de manera directa en el promedio de caudal disponible. Una correlación baja entre el EVI y el caudal medio en una cuenca puede deberse a varios factores.

La baja correlación puede atribuirse a las complejas interacciones entre los procesos geofísicos e hidrológicos que rigen la formación de caudal en los ríos [83]. El régimen de temperatura del suelo, las características de la superficie del paisaje y el tipo de vegetación se identifican como factores que rigen sobre la escorrentía superficial en una cuenca hidrográfica [13]. Estos factores no solo afectan la cantidad de agua que fluye superficialmente hacia los ríos, sino también la cantidad de agua que se infiltra en el suelo. La distribución espacial de estos factores puede variar significativamente dentro de una cuenca, lo cual introduce una gran variabilidad en los procesos hidrológicos locales y, por lo tanto, puede explicar la baja correlación observada entre el índice de vegetación y el caudal medio.

Es posible que la correlación entre EVI y caudal sea más evidente para ciertos tipos de vegetación que juegan un papel más importante en la regulación del ciclo hidrológico. Las plantas leñosas, como árboles y arbustos, tienen un impacto significativo en el caudal y rendimiento de una cuenca hidrográfica principalmente a través del proceso de evapotranspiración. Este proceso, que involucra la evaporación del agua del suelo y la transpiración del agua a través de las hojas [84]. En las fases iniciales de sucesión ecológica o durante el establecimiento de una plantación, el flujo de agua es mayor, ya que las plantas jóvenes aún no absorben tanta agua del suelo [85]. Sin embargo, a medida que el bosque crece y las plantas maduran, su capacidad para extraer y transpirar agua aumenta, lo que resulta en una disminución del caudal de agua en la cuenca. Por lo tanto, el impacto de las plantas leñosas en el rendimiento hídrico varía con el tiempo, siendo más notable durante las etapas tempranas de crecimiento y disminuyendo conforme el bosque se desarrolla plenamente.

---

En el estudio [86] se comparan la respuesta del caudal ante una microcuenca con cobertura de paramo y otra con pinos. Se observó que el coeficiente de escorrentía promedio para la microcuenca con pajonal es mayor que la microcuenca con pinos. Esto indica que el caudal producido en la cuenca con pajonal es considerablemente mayor, siendo aproximadamente tres veces más alto en términos de caudal específico mínimo en comparación con la cuenca con pinos. Esta diferencia se atribuye principalmente al mayor consumo de agua por evapotranspiración de los árboles en la cuenca con pinos, lo que resulta en una disminución del contenido volumétrico de agua en el suelo bajo esta cobertura vegetal

### ***B. Relación precipitación - caudal***

Los resultados de este estudio demuestran que la correlación entre el caudal y la precipitación es fuerte, lo que significa que mientras una variable aumenta la otra también tiende a aumentar. Evidenciando que las precipitaciones tienden a concentrarse en los meses de invierno, es consecuente esperar que ocurra un aporte adicional a los caudales ya existentes en estos mismos meses. Esto se relaciona con el estudio de [87], donde también analizan la relación entre las dos variables ya mencionadas de forma mensual. Sus resultados reflejan una relación fuerte entre las precipitaciones generadas en la cuenca del Alto Paraná y los caudales presentados en la ciudad de Corrientes, en Argentina. Así mismo, en este estudio menciona que los mayores caudales del río Paraná en la sección estudiada está asociada principalmente a las fases del Fenómeno del Niño (ENOS), a causa del aumento de las precipitaciones en el área por este efecto.

A su vez el estudio de Ferraz [88], demuestra que las tasas más altas de precipitación generan un aumento en los caudales de los ríos en las cuencas analizadas en su estudio. De esta manera se respalda la idea de Molina et al [89], donde mencionan que la precipitación es el componente principal de entrada en el ciclo hidrológico, impulsando los flujos de agua en los cuerpos hídricos, ya que el flujo de agua de una cuenca dependerá de su interacción tanto directa como indirecta de la precipitación.

Como ya se evidenció, el caudal aumenta en los mismos meses en que se presentan los picos más altos de precipitaciones, sin embargo, también se observan meses en donde el caudal aumenta sin la presencia significativa de precipitaciones, esto puede ocurrir debido a otros factores, tal como lo mencionan Want et al [90], donde indican que existen otros factores que determinan la variabilidad del caudal dentro de un ecosistema. Este estudio describe que la combinación de bosque y topografía escarpada puede producir una mayor escorrentía superficial que la

combinación de pastizales y topografía plana debido a la repelencia del agua del suelo superficial boscoso y la pendiente pronunciada.

En el caso de [91], donde realiza un análisis de la precipitación y el caudal de forma diaria y seccionando la cuenca en alta, media y baja, obtuvo que el caudal medio diario en la parte media/alta de la cuenca estudiada es más susceptible a las precipitaciones diarias. Este resultado lo justifica con la topografía que presenta dicha cuenca, debido a que posee una mayor altura del terreno en la cuenca alta, lo que permite un mayor escurrimiento del agua en esta región.

### C. Relación Precipitación – EVI



Fig. 24: Relación EVI - precipitación (2000 - 2020)

Fuente: Los autores

Los resultados obtenidos en el periodo 2000-2020 muestran una correlación negativa entre la variable dependiente EVI (Índice de Vegetación Mejorado) y la variable independiente precipitación. Los valores de correlación obtenidos varían entre  $-0.82437705$  y  $0.21945633$ , lo que indica una relación que va desde correlaciones nulas hasta bajas. Esta variabilidad en los valores de correlación puede deberse a factores adicionales que influyen en la dinámica de la vegetación y las precipitaciones.

Los estudios de [92], [93] explican que los comportamientos en el ciclo de vida de las plantas pueden estar ampliamente relacionados con factores climáticos. Entre esos factores se encuentra la precipitación, la cual, aunque es un componente crucial en el estudio de la fenología, no siempre muestra una relación positiva. Esto se debe a que las plantas tienen diferentes fases fenológicas. Dependiendo de la fase de desarrollo en la que se encuentren las plantas pueden responder de distintas maneras a la precipitación.

En los estudios de [92], [94], [95] se pueden ver reflejadas correlaciones negativas entre la precipitación y la fenología de plantas tropicales en fases fenológicas de floración y fructificación similares a los resultados obtenidos. [94] Explica que el comportamiento fenológico de la *Cordia alliodora* ante variables climáticas como la temperatura y precipitación, demostrando datos irregulares en cuanto a la cantidad de precipitación y el creciente de frutos y el periodo de floración.

Sin embargo, existen especies en zonas áridas en donde la fenofase de fructificación tiene una correlación positiva con la precipitación, es decir entre más lluvia mejor rendimiento tendrá la planta [96]. Esto quiere decir que las respuestas fenológicas a la precipitación pueden variar entre especies y ecosistemas. Sobre todo, si son ecosistemas áridos, semiáridos y húmedos.

Dentro de la subcuenca existen varios ecosistemas en diferentes pisos bioclimáticos con una gran variedad de especies florísticas. Es importante considerar la variabilidad espacial y temporal de las relaciones entre EVI y precipitación. Los distintos pisos bioclimáticos dentro de la subcuenca del río Casacay presentan condiciones ambientales y ecológicas que influyen en la respuesta fenológica de las especies vegetales. Por lo tanto, las correlaciones negativas observadas podrían no ser uniformes a lo largo de la cuenca. El análisis detallado por zonas (alta, media y baja) permitiría identificar patrones más específicos y comprender mejor las dinámicas locales de la vegetación.

La capacidad del suelo para retener agua es otra variable que puede afectar cómo y cuándo la vegetación responde a la precipitación. Suelos con alta capacidad de retención de agua pueden proporcionar un suministro constante de agua a las plantas, permitiendo una respuesta más gradual. Esto concuerda con Rousta et al [97], estudio destaca que no todos los años con niveles altos de precipitación representan cambios significativos en la fenología de la vegetación, atribuyendo este suceso a otros factores ambientales como la topografía, la composición del suelo y la salinidad.

---

## X. CONCLUSIONES

Mediante el uso de la plataforma Google Earth Engine, con el producto MOD13A2 v061 se logró la recopilación de datos del Índice de Vegetación Mejorado (EVI), con un total de 32523 de datos para la vegetación nativa de la cuenca en el periodo de 2017 a 2019. Dichos datos permitieron realizar el análisis del estado de la vegetación de la subcuenca del río Casacay donde se evidenció el EVI en un rango de 0,11 y 0,50, es decir se encuentra en un rango de vegetación saludable. Analizando la variabilidad en los datos multianuales de EVI, se observó un patrón de aumento en junio y mayo, y una disminución en diciembre. Esta variabilidad estacional en el EVI refleja la respuesta natural de la vegetación a los cambios en disponibilidad de agua y temperatura, subrayando un ciclo de crecimiento alineado con las estaciones del año.

La producción hídrica promedio de la subcuenca del río Casacay, basada en los datos de caudal medio en el periodo 2017-2019, es de aproximadamente 3,51 m<sup>3</sup>/s. Este promedio se ha mantenido estable en los últimos dos años del periodo de estudio. La variabilidad estacional sugiere que los picos de caudal no son extremos, lo cual puede ser indicativo de un régimen hidrológico estable. Esta estabilidad podría deberse a factores como la constancia en los patrones de precipitación, la capacidad de retención de agua del suelo y la vegetación de la cuenca. Esta información es crucial para la planificación y gestión de recursos hídricos, ya que permite prever la disponibilidad de agua y realizar estudios que permitan tomar decisiones informadas sobre su uso y conservación.

La hipótesis propuesta no tuvo el resultado esperado. La relación entre el caudal y el estado de la vegetación nativa según el índice de correlación de Pearson es débil. Lo que indica que el estado de la vegetación nativa no repercute como una variable dependiente sobre el caudal. Es decir que probablemente existan otros factores que influyan en producción del caudal medio en la subcuenca del Río Casacay.

La precipitación es una variable que tiene una correlación fuerte con el caudal según los resultados obtenidos. Además, varios autores coinciden en la importancia que tienen las precipitaciones sobre la producción hídrica en una cuenca hidrográfica. Por ende, los resultados respaldan dichos estudios y corroboran el hecho de que mientras más precipitación hay mayor caudal disponible. Sin embargo, no todo el caudal disponible se puede usar ya que dentro de la subcuenca existen problemas erosivos que disminuyen la calidad del agua.

Finalmente, los resultados de la relación entre la precipitación y el EVI es casi nula con excepción del año 2007. Lo cual indica que la precipitación no tiene efecto alguno sobre la salud



de la vegetación. Varios autores coinciden que esto se debe a la fenología de las plantas. Dado que los comportamientos de las plantas están estrechamente relacionados con varios factores climáticos que interaccionan entre sí en un área en específico.

## XI. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda estudiar la fenología de las plantas. La fenología es una variable que estudia el comportamiento de las plantas ante variables climáticas. Por ende, un estudio de las especies predominantes de la zona permitiría identificar las variables climáticas más influyentes sobre la vegetación de la subcuenca del río Casacay. Entre las variables climáticas más importantes encontramos la temperatura, la precipitación y la humedad.

La subcuenca se compone por varios ecosistemas. Es recomendable seccionar la cuenca de acuerdo a las características de cada ecosistema. Así mismo, se recomienda crear varios puntos de monitoreo del caudal medio sobre la subcuenca. Tener un mejor conocimiento espacial de ambos factores permitiría explicar el comportamiento de la vegetación nativa con la producción hídrica promedio de manera más eficiente.

Una variable mucho más precisa y eficiente para el estudio de la salud de la vegetación podría ser la productividad primaria neta. Este proceso es fundamental para el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como para la producción de biomasa. Una alta PPN indica una vegetación saludable, es decir mucho más activa en cuanto a factores biológicos.

Finalmente, se recomienda ampliar el periodo de tiempo estudiado para todas las correlaciones en donde intervengan la variable de caudal. Esto nos permitiría tener registros en donde probablemente existieron fenómenos naturales significativos como el Fenómeno del Niño o el Fenómeno de la Niña. Estos eventos climáticos extremos pueden tener un impacto sustancial en el caudal de los ríos y las variables climáticas que intervienen.

## X. REFERENCIAS

- [1] C. N. Meynard *et al.*, “La integración de la ciencia, la economía y la sociedad: servicios ecosistémicos en la ecoregión de los bosques lluviosos valdivianos en el cono sur de Sudamérica”, *Gaceta Ecológica*, n.º 84-87, pp. 39-38, jul. de 2007.
- [2] F. A. Gutiérrez, “Efectos negativos de las plantas exóticas maderables sobre el bosque nativo andino”, *RLCT*, vol. 3, n.º 1, jul. 2011, doi: 10.22335/rlct.v3i1.108.
- [3] A. C. Guzmán-Guaraca, V. B. Morales-León, J. D. Córdova-Lliquin, y R. F. Peña-Murillo, “Characterization of vegetation cover and its provision of ecosystem services through remote sensing in a hydrographic basin”, *Dom. Cien*, vol. 9, pp. 1657-1674, jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i2>.
- [4] E. A. Marinero-Orantes, J. I. Vargas-Cañas, y T. Geles-Roffe, “El agua como recurso esencial para la vida y el cual hay que garantizar su sostenibilidad ante la adversidad del cambio climático”, *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, vol. 1, n.º 2, pp. 149-155, jul. 2016, doi: 10.5377/ribcc.v1i2.2482.
- [5] H. Zheng, L. Zhang, P. Wang, y Y. Li, “The NPP-Based Composite Indicator for Assessing the Variations of Water Provision Services at the National Scale”, *Water*, vol. 11, n.º 8, ago. 2019, doi: 10.3390/w11081628.
- [6] A. McMurray, F. Casarim, B. Bernal, y T. Pearson, “Los servicios ecosistémicos de los bosques tropicales y un marco propuesto para evaluarlos”, *WINROCK INTERNATIONAL*, feb. 2017, [En línea]. Disponible en: <https://winrock.org/wp-content/uploads/2018/02/Marco-servicios-ecosistemas-28122917.pdf>
- [7] D. González-Romero, J. Jaén, A. Vera, E. Armijos, y C. Garzón Santomaro, “AMENAZAS Y OPORTUNIDADES DE CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO NATURAL DE EL ORO”, en *ANFIBIOS, REPTILES Y AVES DE LA PROVINCIA DE EL ORO: Una guía para la identificación de especies del páramo al manglar*, Segunda., Quito, Ecuador: GADPEO-INABIO, 2019, pp. 209-219.
- [8] MAATE, “Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra (CUT 2022)”. 2023. [En línea]. Disponible en: <http://certificacionpuntoverde.ambiente.gob.ec/libraries/EAlfresco/?doc=workspace://SpaceStore/dc2b45b5-0949-426b-912d-e9099c5fe2ec>
- [9] J. Cerrón, J. Del Castillo, V. Bonnesoeur, M. Peralvo, y S.-L. Mathez-Stiefel, “Relación entre árboles, cobertura y uso de la tierra y servicios hidrológicos en los Andes Tropicales: Una síntesis del conocimiento”, World Agroforestry Centre, sep. 2019. doi: 10.5716/OP19056.PDF.
- [10] F. Cabrera-Torres, A. Araujo, G. Jacome, y M. Cruz, “PROPUESTA DE UN PLAN DE MANEJO INTEGRAL DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CASACAY, UBICADA EN EL CANTÓN PASAJE Y CHILLA, PROVINCIA DE EL ORO – ECUADOR MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG”, *Revista Geoespacial*, vol. 6, pp. 47-60, nov. 2009.
- [11] D. Pinos-Morocho, O. Morales-Matute, y M. E. Durán-López, “Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador”, *Rev. Ambientales*, vol. 55, n.º 2, pp. 157-179, jul. 2021, doi: 10.15359/rca.55-2.8.
- [12] M.-P. Ledru, O. Aquino-Alfonso, W. Finsinger, P. Samaniego, y S. Hidalgo, “Changes in the vegetation and water cycle of the Ecuadorian páramo during the last 5000 years”, *The Holocene*, vol. 32, n.º 9, pp. 950-963, sep. 2022, doi: 10.1177/09596836221101251.

- 
- [13] S. E. Patiño-Gutiérrez, I. C. Domínguez-Rivera, M. C. Daza-Torrez, B. F. Ochoa-Tocachi, y E. R. Oviedo-Ocaña, “Effects of rainfall seasonality and land use change on soil hydrophysical properties of high-Andean dry páramo grasslands”, *CATENA*, vol. 238, p. 107866, abr. 2024, doi: 10.1016/j.catena.2024.107866.
- [14] J. Rojas Hernández y R. Barra Ríos, *Seguridad hídrica: derechos de agua, escasez, impactos y percepciones ciudadanas en tiempos de cambio climático*, Primera. Santiago de Chile: RIL editores, 2020.
- [15] PREDESUR, *Plan de ordenamiento y manejo del río Casacay*. Machala, 1994.
- [16] MAATE, “Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra 1990 (MCUT 1990)”. 2016. [En línea]. Disponible en: <http://certificacionpuntoverde.ambiente.gob.ec/libraries/EAlfresco/?doc=workspace://SpaceStore/5d90d448-8c86-48a0-8f14-76dd37aae676>
- [17] L. Vargas, “Bases para elaborar el Plan de Manejo de la subcuenca del río Casacay (Bosque y Vegetación Protectora) Ecuador”, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.fvet.uba.ar/sites/default/files/archivos/orden\\_dia/829.pdf](https://www.fvet.uba.ar/sites/default/files/archivos/orden_dia/829.pdf) Bosques y Vegetación Protectores – Gestión y gobernanza.
- [18] L. K. Rowe y A. J. Pearce, “Hydrology and related changes after harvesting native forest catchments and establishing pinus radiata plantations. Part 2. The native forest water balance and changes in streamflow after harvesting”, *Hydrological Processes*, vol. 8, n.º 4, pp. 281-297, agosto de 1994. doi: 10.1002/hyp.3360080402.
- [19] S. Patiño *et al.*, “Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering”, *CATENA*, vol. 202, p. 105227, jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>.
- [20] Ministerio del Ambiente del Ecuador, *Bosques y Vegetación Protectores – Gestión y gobernanza*, Primera. Quito: Gestión y gobernanza, 2018.
- [21] M. Vasco Lucio, D. Cushquicullma Colcha, G. Ati Cutiupala, y L. M. Orna Puente, “Monitoreo de la vegetación del páramo mediante la intersección de los índices NDVI y EVI de la microcuenca del río Cebadas, provincia de Chimborazo, periodo 2021”, *DC*, vol. 9, n.º 4, pp. 988-1006, oct. 2023, doi: 10.23857/dc.v9i4.3632.
- [22] G. Parra-Henao, “Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores”, *CES Medicina*, vol. 24, pp. 75-89, jul. 2010.
- [23] S. Sanchez, M. Grilli, M. Karlin, R. Fachinetti, y A. Ravelo, “Determinación de regímenes de incendios y sequías usando información satelital y meteorológica para Córdoba, Argentina”, *AgriS*, vol. 39, n.º 1, pp. 1-13, jun. 2022, doi: 10.31047/1668.298x.v39.n1.33798.
- [24] J. Aronson, D. Renison, J. Rangel, S. Levy, C. Ovalle, y A. Del Pozo, “Restauración del Capital Natural: sin reservas no hay bienes ni servicios”, *Ecosistemas*, vol. 16, n.º 3, pp. 15-24, ene. 2008.
- [25] B. Ramakrishna, *Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias*. en Serie Investigación y educación en desarrollo sostenible, no. 3. San José, Costa Rica: IICA : BMZ/GTZ, 1997.
- [26] F. J. Gaspari, A. M. Rodríguez Vagaría, G. E. Senisterra, M. I. Delgado, y S. Besteiro, *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*, 2.<sup>a</sup> ed. La Plata: EDULP, 2013. Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877>

- 
- [27] A. Dourojeanni, A. S. Jouravlev, y G. Chávez, *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. en Serie recursos naturales e infraestructura, no. 47. Santiago de Chile: Naciones Unidas, CEPAL, Div. de Recursos Naturales e Infraestructura, 2002.
- [28] T. Gunda, D. Hess, G. M. Hornberger, y S. Worland, “Water security in practice: The quantity-quality-society nexus”, *Water Security*, vol. 6, p. 100022, mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2018.100022>.
- [29] USGS Water Science School, “El Ciclo del Agua - The Water Cycle, Spanish (PNG)”, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish-png>
- [30] L. Maderey, *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. en Geografía para el siglo XXI, no. 1. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2005. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/9554226/Principios\\_de\\_hidrogeograf%C3%ADa\\_estudio\\_del\\_ciclo\\_hidrol%C3%B3gico\\_2005\\_Laura\\_Elena\\_Maderey\\_Rasc%C3%B3n](https://www.academia.edu/9554226/Principios_de_hidrogeograf%C3%ADa_estudio_del_ciclo_hidrol%C3%B3gico_2005_Laura_Elena_Maderey_Rasc%C3%B3n)
- [31] N. Gulahmadov, Y. Chen, A. Gulakhmadov, M. Rakhimova, y M. Gulakhmadov, “Quantifying the Relative Contribution of Climate Change and Anthropogenic Activities on Runoff Variations in the Central Part of Tajikistan in Central Asia”, *Land*, vol. 10, n.º 5, p. 525, may 2021, doi: 10.3390/land10050525.
- [32] J. Luo, X. Zhou, M. Rubinato, G. Li, Y. Tian, y J. Zhou, “Impact of Multiple Vegetation Covers on Surface Runoff and Sediment Yield in the Small Basin of Nverzhai, Hunan Province, China”, *Forests*, vol. 11, n.º 3, p. 329, mar. 2020, doi: 10.3390/f11030329.
- [33] T. Fu, J. Liu, H. Gao, F. Qi, F. Wang, y M. Zhang, “Surface and subsurface runoff generation processes and their influencing factors on a hillslope in northern China”, *Science of The Total Environment*, vol. 906, p. 167372, ene. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167372>.
- [34] S. Liu, Q. Zhang, Y. Xie, P. Xu, y H. Du, “Evaluation of Minimum and Suitable Ecological Flows of an Inland Basin in China Considering Hydrological Variation”, *Water*, vol. 15, n.º 4, p. 649, feb. 2023, doi: 10.3390/w15040649.
- [35] Y. Fu *et al.*, “Quantitative calculation and optimized applications of ecological flow based on nature-based solutions”, *Journal of Hydrology*, vol. 598, p. 126216, jul. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126216.
- [36] Y. Meng, W. Xu, X. Guan, M. Guo, X. Wang, y D. Yan, “Ecology-habitat-flow modular simulation model for the recommendation of river ecological flow combination”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 169, p. 105823, nov. 2023, doi: 10.1016/j.envsoft.2023.105823.
- [37] A. Cuza Sorolla, M. L. Hernández Aguilar, y M. Á. Barrera Rojas, “Aplicación de polígonos Thiessen para la definición y análisis de áreas de influencia del sistema de salud en ciudades costeras del estado de Quintana Roo”, *Quívera*, vol. 23, n.º 1, p. 49, abr. 2021, doi: 10.36677/qret.v23i1.14504.
- [38] R. Pizarro T, C. Ramirez B, y J. P. Flores V, “Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos”, *Bosque (Valdivia)*, vol. 24, n.º 3, dic. 2003, doi: 10.4067/S0717-92002003000300003.
- [39] V. Rika Kubota *et al.*, “Efectos de diferentes sistemas de uso de suelo sobre la diversidad de árboles, almacenamiento de carbono y calidad del suelo en el Bosque Atlántico del Alto Paraná, Paraguay”, *Rev. Ambientales*, vol. 55, n.º 2, pp. 19-44, jul. 2021, doi: 10.15359/rca.55-2.2.

- 
- [40] C. Chuncho y G. Chuncho, “Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión”, *Bosques Latitud Cero*, vol. 9, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2019.
- [41] F. J. Vázquez Pinillos, J. A. Chica Ruiz, y G. O. Martínez González, “La gestión costera en la isla y el mar de Chiloé (Chile): Un diagnóstico de los problemas operativos desde la GIAL y su relación con el cambio climático”, *Rev. geogr. Norte Gd.*, n.º 85, pp. 1-27, 2023, doi: 10.4067/S0718-34022023000200114.
- [42] M. Á. Chinchero, J. Santiana, J. Iglesias, y D. Neill, “Bosque semideciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo”, en *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, pp. 56-58.
- [43] J. Iglesias y J. Santiana, “Bosque siempreverde estacional de tierras bajas del Jama-Zapotillo”, en *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, pp. 55-56.
- [44] M. Á. Chinchero, J. Santiana, y J. Iglesias, “Bosque siempreverde estacional piemontano del Catamayo-Alamor”, en *Sistemas de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, pp. 93-95.
- [45] C. Aguirre, J. Iglesias, y M. Á. Chinchero, “Bosque siempreverde montano del Catamayo-Alamor”, en *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, pp. 105-106.
- [46] Z. Aguirre, “Bosque siempreverde montano alto del Catamayo-Alamor”, en *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, pp. 106-107.
- [47] S. Salgado, F. Cuesta, S. Báez, B. MedinaTorres, C. Josse, y K. Romoleroux, “Herbazal del Páramo”, en *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*, Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013, pp. 139-141.
- [48] S. Rodríguez y M. Delgado, “Los Bosques como Reguladores del Ciclo del Agua para disminuir los Riesgos de Inundaciones”, en *Ciencia y Tecnología Forestal en la Argentina*, 1a ed., Buenos Aires: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), 2021, pp. 243-248.
- [49] S. Tang, Z. Liu, Y. Li, y M. Zhou, “Enhancing Sustainability through Ecosystem Services Evaluation: A Case Study of the Mulberry-Dyke and Fish-Pond System in Digang Village”, *Sustainability*, vol. 16, n.º 5, p. 1875, feb. 2024, doi: 10.3390/su16051875.
- [50] J. Aronson, D. Renison, J. O. Rangel-Ch, S. Levy-Tacher, C. Ovalle, y A. D. Pozo, “Restauración del Capital Natural: sin reservas no hay bienes ni servicios”, *Ecosistemas*, vol. 16, n.º 3, Art. n.º 3, 2007.
- [51] Á. Amaya y S. Rodríguez, “Hacia un nuevo marco de protección de la biodiversidad en Colombia: Consideraciones para una ley de biodiversidad nacional”, *RDA*, vol. 2, n.º 18, pp. 307-343, dic. 2022, doi: 10.5354/0719-4633.2022.68227.
- [52] Y. Vargas-García, J. Pazmiño-Sánchez, y J. Dávila-Rincón, “Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión”, *RP*, vol. 48, n.º 2, pp. 7-20, nov. 2021, doi: 10.33333/rp.vol48n2.01.
- [53] A. Kumar, N. Kumar, P. Baredar, y A. Shukla, “A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 530-539, may 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.007.
- [54] J. Pazmiño Sánchez, Y. Vargas García, y J. Dávila Rincón, “Perspectivas de las biorrefinerías y situación actual de los biocombustibles en Ecuador como país emergente.”, nov. 2017, Accedido: 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espoeh.edu.ec/handle/123456789/9370>

- 
- [55] M. E. Durán-García y R. A. Ruiz-Navas, “Simulador de propiedades termodinámicas en la conversión de la biomasa forestal de aserrín de pino”, *Maderas, Cienc. tecnol.*, n.º ahead, pp. 0-0, 2020, doi: 10.4067/S0718-221X2020005000309.
- [56] M. A. Peña, “Propiedades del primer sistema de teledetección hiperespectral chileno”, *Revista de geografía Norte Grande*, n.º 46, pp. 159-163, sep. 2010, doi: 10.4067/S0718-34022010000200011.
- [57] R. Hernandez y A. Hornero, “Monitoring and assessment of desertification using remote sensing”, *ECOS*, vol. 30, n.º 3, p. 2240, dic. 2021, doi: 10.7818/ECOS.2240.
- [58] F. Gallego *et al.*, “Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: Un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay”, *Agrociencia*, vol. 21, n.º 1, pp. 120-130, jun. 2017, doi: 10.31285/AGRO.21.1.14.
- [59] N. Flores, I. Castro, H. Aponte, N. Flores, I. Castro, y H. Aponte, “Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos De Villa (Lima, Perú) mediante sistemas de información geográfica y teledetección”, *Arnaldoa*, vol. 27, n.º 1, pp. 303-321, ene. 2020, doi: 10.22497/arnaldoa.271.27119.
- [60] J. Veneros, L. García, E. Morales, V. Gómez, M. Torres, y F. López-Morales, “Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua”, *Idesia*, vol. 38, n.º 4, pp. 99-107, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-34292020000400099.
- [61] J. Larrosa, “Un Resumen sobre Aspectos Fundamentales de la Teledetección y sus Aplicaciones”, feb. 2000, [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/23805191\\_Un\\_Resumen\\_sobre\\_Aspectos\\_Fundamentales\\_de\\_la\\_Teledeteccion\\_y\\_sus\\_Aplicaciones](https://www.researchgate.net/publication/23805191_Un_Resumen_sobre_Aspectos_Fundamentales_de_la_Teledeteccion_y_sus_Aplicaciones)
- [62] G. A. Perilla y J.-F. Mas, “Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube”, *Investigaciones Geográficas*, n.º 101, mar. 2020, doi: 10.14350/rig.59929.
- [63] National Aeronautics and Space Administration NASA, “The Earth Observer”, vol. 35, n.º 1, 2023.
- [64] J. Lizundia-Loiola, G. Otón, R. Ramo, y E. Chuvieco, “A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 236, p. 111493, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>.
- [65] J.-F. Mas, *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 2011. doi: 10.22201/ciga.9786077908555e.2011.
- [66] K. Didan y A. Barreto, “MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V061”. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021. doi: 10.5067/MODIS/MOD13A2.061.
- [67] D. Watters y A. Battaglia, “The NASA-JAXA Global Precipitation Measurement mission – part I: New frontiers in precipitation”, *Weather*, vol. 76, n.º 2, pp. 41-44, feb. 2021, doi: 10.1002/wea.3865.
- [68] G. J. Huffman, E. F. Stocker, D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, y T. Jackson, “GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V07”. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2023. doi: 10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/07.
- [69] J. D. Hernández, F. Espinosa, y J. E. Rodríguez, “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones”, vol. 37, 2018.

- 
- [70] H. Lieth y American Institute of Biological Sciences, Eds., *Phenology and seasonality modeling*. en *Ecological studies*, no. Volume 8. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1974.
- [71] E. Sifuentes Ibarra, J. D. R. Ruelas Islas, J. Macías Cervantes, I. Talamantes Castorena, C. A. Palacios Mondaca, y B. E. Valenzuela López, “Fenología y tiempo en el manejo de riego y fertilización del cultivo de papa”, *BT*, vol. 17, n.º 3, p. 42, dic. 2015, doi: 10.18633/bt.v17i3.218.
- [72] R. E. J. Gray y R. M. Ewers, “Monitoring Forest Phenology in a Changing World”, *Forests*, vol. 12, n.º 3, p. 297, mar. 2021, doi: 10.3390/f12030297.
- [73] N. Robinson *et al.*, “A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States”, *Remote Sensing*, vol. 9, n.º 8, p. 863, ago. 2017, doi: 10.3390/rs9080863.
- [74] Y. Zeng *et al.*, “Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally”, *Nat Rev Earth Environ*, vol. 3, n.º 7, pp. 477-493, may 2022, doi: 10.1038/s43017-022-00298-5.
- [75] Z. Liu, Y. Chen, y C. Chen, “Analysis of the Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of the NDVI Based on the GEE Cloud Platform and Landsat Images”, *Remote Sensing*, vol. 15, n.º 20, p. 4980, oct. 2023, doi: 10.3390/rs15204980.
- [76] C. J. Tucker, “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, n.º 2, pp. 127-150, may 1979, doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- [77] P. Girimonte y J. García Fronti, “El índice NDVI y la clasificación de áreas sembradas aprendizaje automático no supervisado “K-Means””, *Universidad de Buenos Aires*, vol. 7, n.º 1, pp. 39-53, junio de 2020.
- [78] S. Cartaya Ríos, S. Zurita Alfaro, E. Rodríguez Ríos, y V. Montalvo Párraga, “Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador”, *UD y la geomática*, n.º 9, pp. 9-17, dic. 2015, doi: 10.14483/23448407.7883.
- [79] K. Didan, A. B. Munoz, y A. Huete, “MODIS Vegetation Index User’s Guide (MOD13 Series)”, 2015.
- [80] A. T. Gomez Choquejahuá, E. Pino Vargas, G. Huayna Felipe, J. L. Espinoza Molina, K. Y. Acosta Caipa, y F. C. Cabrera Olivera, “Machine Learning para la Clasificación y Análisis de los Índices de Biomasa y su relación con el Cambio Climático, Desierto de Atacama”, *Manglar*, vol. 21, n.º 1, pp. 95-106, abr. 2024, doi: 10.57188/manglar.2024.010.
- [81] B. Klimisch, D. Maglione, P. Paredes, y J. Soto, “Análisis del Comportamiento de la Vegetación a partir de Índices del Sensor MODIS en Santa Cruz, Argentina”, *ICTUNPA*, vol. 14, n.º 3, pp. 69-90, dic. 2022, doi: 10.22305/ict-unpa.v14.n3.895.
- [82] J. D. H. Lalinde, F. E. Castro, y J. E. Rodríguez, “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones”, *AVFT*, vol. 37, n.º 5, abr. 2019.
- [83] T. Iliopoulou *et al.*, “A large sample analysis of European rivers on seasonal river flow correlation and its physical drivers”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 23, n.º 1, pp. 73-91, ene. 2019, doi: 10.5194/hess-23-73-2019.
- [84] G. Alemán-Sancheschülz, E. Solano, T. Terrazas, y J. López-Portillo, “La arquitectura hidráulica de las plantas vasculares terrestres, una revisión”, *MYB*, vol. 25, n.º 3, dic. 2019, doi: 10.21829/myb.2019.2531828.



- 
- [85] J. Fernando Patiño, J. León Peláez, L. Montes, y L. Hernández, “PROPUESTA METODOLÓGICA PARA COMPARAR EL EFECTO DE DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES EN LA REGULACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS. APLICACIÓN EN LA MICROCUENCA DE LA QUEBRADA LA MURCIÉLAGO, ANTIOQUIA”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, pp. 89-89-100, may 2007.
- [86] R. C. Alvear, B. D. Biévre, y V. Iñiguez, “Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de páramo”, *CONDESAN*, 2004.
- [87] I. A. Camilloni y V. R. Barros, “Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing”, *Journal of Hydrology*, vol. 278, n.º 1-4, pp. 94-106, jul. 2003, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00133-1.
- [88] F. Ferraz, S. Zanetti, R. Cecílio, D. De Carvalho, y F. De Oliveira, “Method for the analysis of the relationship between forest cover and streamflow in watersheds”, *iForest*, vol. 14, n.º 4, pp. 344-352, ago. 2021, doi: 10.3832/ifor3536-014.
- [89] C. I. Molina *et al.*, “Caudal ecológico, una herramienta de desarrollo integral: proyecto FERRIA”, *Ecología en Bolivia*, vol. 57, pp. 51-56, 2022.
- [90] C. Wang *et al.*, “Integrated Effects of Land Use and Topography on Streamflow Response to Precipitation in an Agriculture-Forest Dominated Northern Watershed”, *Water*, vol. 10, n.º 5, p. 633, may 2018, doi: 10.3390/w10050633.
- [91] C. G. Cerrudo, G. M. Díaz, S. H. Juárez, y L. J. Ferreira, “Análisis de la relación espacio temporal entre la precipitación estimada por el satélite TRMM (3B42RT) y el caudal medio diario en la cuenca del Río Iguazú”, *Meteorologica*, vol. 42, n.º 1, pp. 39-52, jun. 2017.
- [92] N. Ramirez, “Correlaciones entre la fenología reproductiva de la vegetación y variables climáticas en los altos Llanos Centrales Venezolanos”, *Acta Botánica Venezuelica*, vol. 32, pp. 333-362, dic. 2009.
- [93] I. Rousta, F. Shakiba, H. Olafsson, E. R. M. Vargas, A. Siedliska, y J. Krzyszcak, “Investigating the Relationship between Precipitation and Vegetation Dynamics with Emphasis on Agricultural Land Cover in the Atrak Basin Area”, *Atmosphere*, vol. 15, n.º 4, p. 489, abr. 2024, doi: 10.3390/atmos15040489.
- [94] S. D. M. Yela Lara, A. L. Calzada Valencia, K. D. Angulo Cabezas, y H. R. Ordoñez Jurado, “Estudio fenológico de las especies forestales *Cedrela odorata* L (Meliaceae) y *Cordia Alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken (Boraginaceae) en el municipio de Tumaco, Colombia”, *Rev. Fac. Cienc. Básicas*, vol. 17, n.º 2, pp. 55-70, jun. 2023, doi: 10.18359/rfcb.5606.
- [95] L. E. Urrego y J. I. del Valle, “Relación fenología-clima de algunas especies de los humedales forestales (guandales) del pacífico sur colombiano”, *Interciencia*, vol. 26, n.º 4, pp. 150-156, 2001.
- [96] A. P. Carvajal-Muñoz, M. E. Morales-Puentes, P. A. Gil-Leguizamón, y A. C. Reyes-Duarte, “Feno-morfología de dos especies de páramo de *Miconia* (Melastomataceae): optimización de la floración y fructificación para mejorar la dispersión”, *Rev. Biol. Trop.*, vol. 70, n.º 1, nov. 2022, doi: 10.15517/rev.biol.trop..v70i1.51043.
- [97] N. Brunzell, “Characterization of land-surface precipitation feedback regimes with remote sensing”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 100, n.º 2, pp. 200-211, ene. 2006, doi: 10.1016/j.rse.2005.10.025.

## XI. ANEXOS

TABLA XIV. RESULTADOS DE CORRELACION EVI DE LA VEGETACION NATIVA-CAUDAL

<b>FECHA</b>	<b>EVI</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>
1/1/2017	0,16	3,90
17/1/2017	0,34	5,10
2/2/2017	0,31	5,31
18/2/2017	0,18	5,05
6/3/2017	0,31	6,19
22/3/2017	0,42	8,00
7/4/2017	0,41	9,06
23/4/2017	0,42	7,82
9/5/2017	0,49	7,92
25/5/2017	0,24	7,53
10/6/2017	0,30	5,89
26/6/2017	0,36	5,42
12/7/2017	0,36	4,60
28/7/2017	0,37	4,35
13/8/2017	0,31	3,91
29/8/2017	0,35	3,92
14/9/2017	0,40	3,61
30/9/2017	0,27	3,44
16/10/2017	0,29	3,42
1/11/2017	0,29	3,26
17/11/2017	0,23	3,20
3/12/2017	0,18	3,26
19/12/2017	0,11	3,29
1/1/2018	0,27	3,90
17/1/2018	0,22	3,76
2/2/2018	0,12	3,61
18/2/2018	0,24	3,07
6/3/2018	0,26	3,20
22/3/2018	0,28	3,02
7/4/2018	0,48	3,58

---

23/4/2018	0,36	3,45
9/5/2018	0,38	3,39
25/5/2018	0,33	3,92
10/6/2018	0,50	3,19
26/6/2018	0,46	2,60
12/7/2018	0,45	2,56
28/7/2018	0,41	2,37
13/8/2018	0,40	2,42
29/8/2018	0,32	2,27
14/9/2018	0,30	2,29
30/9/2018	0,21	2,23
16/10/2018	0,26	2,28
1/11/2018	0,29	2,20
17/11/2018	0,20	2,16
3/12/2018	0,43	2,40
19/12/2018	0,11	2,35
1/1/2019	0,20	2,14
17/1/2019	0,23	2,46
2/2/2019	0,13	2,42
18/2/2019	0,33	2,51
6/3/2019	0,30	2,95
22/3/2019	0,34	2,85
7/4/2019	0,38	3,27
23/4/2019	0,39	2,95
9/5/2019	0,25	2,70
25/5/2019	0,27	2,45
10/6/2019	0,20	2,24
26/6/2019	0,32	2,14
12/7/2019	0,39	2,15
28/7/2019	0,43	1,99
13/8/2019	0,43	1,90
29/8/2019	0,45	1,84
14/9/2019	0,33	1,80
30/9/2019	0,29	1,84
16/10/2019	0,27	1,92
1/11/2019	0,20	1,96
17/11/2019	0,21	1,96
3/12/2019	0,13	2,03
19/12/2019	0,24	2,24

---

**COEFICIENTE DE PEARSON** 0,24

---

TABLA XV. RESULTADOS DE CORRELACION EVI DE TODA LA CUENCA-CAUDAL

<b>FECHA</b>	<b>EVI</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
1/1/2017	0,15	3,90
17/1/2017	0,34	5,10
2/2/2017	0,30	5,31
18/2/2017	0,17	5,05
6/3/2017	0,30	6,19
22/3/2017	0,41	8,00
7/4/2017	0,36	9,06
23/4/2017	0,39	7,82
9/5/2017	0,50	7,92
25/5/2017	0,25	7,53
10/6/2017	0,34	5,89
26/6/2017	0,38	5,42
12/7/2017	0,40	4,60
28/7/2017	0,39	4,35
13/8/2017	0,34	3,91
29/8/2017	0,35	3,92
14/9/2017	0,41	3,61
30/9/2017	0,28	3,44
16/10/2017	0,29	3,42
1/11/2017	0,32	3,26
17/11/2017	0,24	3,20
3/12/2017	0,17	3,26
19/12/2017	0,11	3,29
1/1/2018	0,26	3,90
17/1/2018	0,19	3,76
2/2/2018	0,12	3,61
18/2/2018	0,22	3,07
6/3/2018	0,23	3,20
22/3/2018	0,28	3,02
7/4/2018	0,48	3,58

---

23/4/2018	0,33	3,45
9/5/2018	0,39	3,39
25/5/2018	0,36	3,92
10/6/2018	0,51	3,19
26/6/2018	0,46	2,60
12/7/2018	0,45	2,56
28/7/2018	0,42	2,37
13/8/2018	0,39	2,42
29/8/2018	0,34	2,27
14/9/2018	0,32	2,29
30/9/2018	0,24	2,23
16/10/2018	0,28	2,28
1/11/2018	0,29	2,20
17/11/2018	0,22	2,16
3/12/2018	0,43	2,40
19/12/2018	0,10	2,35
1/1/2019	0,20	2,14
17/1/2019	0,21	2,46
2/2/2019	0,12	2,42
18/2/2019	0,30	2,51
6/3/2019	0,27	2,95
22/3/2019	0,32	2,85
7/4/2019	0,34	3,27
23/4/2019	0,38	2,95
9/5/2019	0,28	2,70
25/5/2019	0,29	2,45
10/6/2019	0,24	2,24
26/6/2019	0,34	2,14
12/7/2019	0,41	2,15
28/7/2019	0,43	1,99
13/8/2019	0,44	1,90
29/8/2019	0,45	1,84
14/9/2019	0,35	1,80
30/9/2019	0,31	1,84
16/10/2019	0,29	1,92
1/11/2019	0,22	1,96
17/11/2019	0,23	1,96
3/12/2019	0,14	2,03
19/12/2019	0,21	2,24

---

<b>COEFICIENTE DE PEARSON</b>	<b>0,19</b>
-------------------------------	-------------

---

TABLA XVI. CORRELACION PRECIPITACIÓN - CAUDAL

AÑO	MES	PRECIPITACIÓN (mm/hr)	CAUDAL (m3/s)
2017	ENERO	42,62	5,22
	FEBRERO	41,43	5,46
	MARZO	60,00	8,19
	ABRIL	38,79	8,06
	MAYO	23,77	7,26
	JUNIO	8,12	5,37
	JULIO	3,75	4,36
	AGOSTO	5,63	6,56
	SEPTIEMBRE	2,66	3,50
	OCTUBRE	3,51	3,34
	NOVIEMBRE	4,52	3,23
	DICIEMBRE	17,45	3,27
2018	ENERO	22,33	3,70
	FEBRERO	33,57	3,11
	MARZO	24,07	3,21
	ABRIL	19,02	3,41
	MAYO	20,91	3,71
	JUNIO	5,39	2,78
	JULIO	3,35	2,41
	AGOSTO	3,20	3,11
	SEPTIEMBRE	3,20	2,26
	OCTUBRE	3,89	2,24
	NOVIEMBRE	16,78	2,28
	DICIEMBRE	13,31	2,30
2019	ENERO	31,25	2,42
	FEBRERO	33,34	2,63
	MARZO	31,49	3,03
	ABRIL	28,70	3,05

---

MAYO	14,26	2,40
JUNIO	5,36	2,17
JULIO	4,75	2,06
AGOSTO	4,42	2,55
SEPTIEMBRE	2,44	1,82
OCTUBRE	7,89	1,94
NOVIEMBRE	7,58	1,99
DICIEMBRE	20,44	2,13
COEFICIENTE DE PEARSON		0,54

---

TABLA XVII. CORRELACION INTERANUAL PRECIPITACIÓN EVI

MESES	AÑO	PRECIPITACIÓN	EVI
JUNIO		9,33	0,39
JULIO		4,26	0,44
AGOSTO		5,04	0,42
SEPTIEMBRE	2000	9,68	0,32
OCTUBRE		3,12	0,37
NOVIEMBRE		2,94	0,37
DICIEMBRE		12,61	0,22
ENERO		38,22	0,13
FEBRERO		32,28	0,15
MARZO		67,88	0,43
ABRIL		26,69	0,26
MAYO		11,31	0,43
JUNIO	2001	7,93	0,35
JULIO		4,85	0,34
AGOSTO		5,04	0,38
SEPTIEMBRE		4,30	0,33
OCTUBRE		3,34	0,30
NOVIEMBRE		9,04	0,23
DICIEMBRE		11,97	0,20
ENERO		14,87	0,20
FEBRERO		45,71	0,28
MARZO		63,40	0,33
ABRIL		38,45	0,23
MAYO		10,90	0,51
JUNIO	2002	5,52	0,43
JULIO		4,75	0,33
AGOSTO		3,52	0,35
SEPTIEMBRE		2,44	0,29
OCTUBRE		8,86	0,21
NOVIEMBRE		9,94	0,22
DICIEMBRE		18,36	0,17



---

ENERO		18,48	0,12
FEBRERO		25,42	0,18
MARZO		24,66	0,44
ABRIL		21,90	0,40
MAYO		11,24	0,30
JUNIO	2003	6,70	0,43
JULIO		4,30	0,40
AGOSTO		3,52	0,35
SEPTIEMBRE		3,48	0,35
OCTUBRE		6,05	0,28
NOVIEMBRE		8,32	0,27
DICIEMBRE		17,69	0,29
ENERO		16,04	0,35
FEBRERO		28,48	0,26
MARZO		29,70	0,30
ABRIL		32,35	0,36
MAYO		13,50	0,44
JUNIO	2004	9,11	0,45
JULIO		8,12	0,44
AGOSTO		4,08	0,36
SEPTIEMBRE		8,64	0,28
OCTUBRE		10,19	0,26
NOVIEMBRE		7,18	0,27
DICIEMBRE		11,16	0,32
ENERO		15,27	0,28
FEBRERO		29,48	0,23
MARZO		52,52	0,34
ABRIL		22,88	0,39
MAYO		8,23	0,51
JUNIO	2005	7,49	0,48
JULIO		3,74	0,38
AGOSTO		3,41	0,38
SEPTIEMBRE		3,12	0,28
OCTUBRE		7,12	0,24
NOVIEMBRE		4,24	0,27
DICIEMBRE		14,66	0,23
ENERO		24,04	0,23
FEBRERO		58,37	0,19
MARZO	2006	51,09	0,35
ABRIL		23,87	0,33
MAYO		8,60	0,40

---

JUNIO		6,25	0,38
JULIO		3,08	0,36
AGOSTO		2,97	0,41
SEPTIEMBRE		3,66	0,33
OCTUBRE		5,41	0,35
NOVIEMBRE		16,89	0,23
DICIEMBRE		23,82	0,25
<hr/>			
ENERO		29,39	0,19
FEBRERO		18,20	0,18
MARZO		46,11	0,50
ABRIL		31,89	0,30
MAYO		14,68	0,23
JUNIO	2007	10,84	0,40
JULIO		2,85	0,38
AGOSTO		6,15	0,34
SEPTIEMBRE		3,33	0,33
OCTUBRE		6,52	0,24
NOVIEMBRE		11,59	0,24
DICIEMBRE		14,28	0,19
<hr/>			
ENERO		48,69	0,08
FEBRERO		71,87	0,27
MARZO		62,36	0,39
ABRIL		46,74	0,38
MAYO		17,43	0,37
JUNIO	2008	7,97	0,37
JULIO		7,08	0,39
AGOSTO		6,00	0,36
SEPTIEMBRE		4,88	0,41
OCTUBRE		13,50	0,24
NOVIEMBRE		11,45	0,32
DICIEMBRE		10,60	0,26
<hr/>			
ENERO		49,08	0,17
FEBRERO		47,20	0,18
MARZO		35,50	0,43
ABRIL		23,23	0,33
MAYO	2009	16,18	0,40
JUNIO		5,89	0,50
JULIO		4,49	0,44
AGOSTO		4,27	0,35
SEPTIEMBRE		3,22	0,41
OCTUBRE		5,82	0,29

---

NOVIEMBRE		6,06	0,35
DICIEMBRE		19,88	0,20
<hr/>			
ENERO		26,80	0,22
FEBRERO		48,93	0,23
MARZO		44,05	0,20
ABRIL		37,58	0,38
MAYO		17,03	0,33
JUNIO	2010	11,58	0,38
JULIO		7,31	0,44
AGOSTO		3,56	0,44
SEPTIEMBRE		5,13	0,42
OCTUBRE		6,26	0,27
NOVIEMBRE		7,78	0,31
DICIEMBRE		21,26	0,26
<hr/>			
ENERO		29,21	0,21
FEBRERO		39,92	0,24
MARZO		16,95	0,35
ABRIL		49,85	0,31
MAYO		9,30	0,49
JUNIO	2011	7,61	0,33
JULIO		9,68	0,33
AGOSTO		11,02	0,43
SEPTIEMBRE		6,96	0,46
OCTUBRE		5,00	0,30
NOVIEMBRE		8,29	0,25
DICIEMBRE		22,09	0,27
<hr/>			
ENERO		60,40	0,12
FEBRERO		68,01	0,23
MARZO		43,88	0,38
ABRIL		45,87	0,47
MAYO		19,96	0,34
JUNIO	2012	7,36	0,38
JULIO		4,78	0,45
AGOSTO		3,30	0,39
SEPTIEMBRE		3,08	0,38
OCTUBRE		7,90	0,30
NOVIEMBRE		12,71	0,35
DICIEMBRE		12,23	0,28
<hr/>			
ENERO		35,08	0,11
FEBRERO	2013	39,33	0,18
MARZO		37,62	0,34

---

ABRIL		13,63	0,47
MAYO		23,52	0,38
JUNIO		8,11	0,37
JULIO		6,60	0,43
AGOSTO		4,49	0,37
SEPTIEMBRE		3,12	0,37
OCTUBRE		10,28	0,22
NOVIEMBRE		2,09	0,33
DICIEMBRE		9,83	0,31
<hr/>			
ENERO		27,21	0,13
FEBRERO		29,01	0,18
MARZO		31,92	0,28
ABRIL		15,98	0,24
MAYO		45,97	0,28
JUNIO	2014	14,94	0,38
JULIO		5,79	0,41
AGOSTO		5,52	0,45
SEPTIEMBRE		4,52	0,40
OCTUBRE		11,84	0,36
NOVIEMBRE		5,53	0,41
DICIEMBRE		12,31	0,32
<hr/>			
ENERO		26,06	0,22
FEBRERO		24,31	0,21
MARZO		59,24	0,30
ABRIL		30,78	0,28
MAYO		22,83	0,31
JUNIO	2015	11,06	0,41
JULIO		8,16	0,33
AGOSTO		4,04	0,37
SEPTIEMBRE		2,87	0,28
OCTUBRE		11,24	0,26
NOVIEMBRE		8,65	0,29
DICIEMBRE		7,27	0,29
<hr/>			
ENERO		29,70	0,21
FEBRERO		40,39	0,19
MARZO		41,71	0,20
ABRIL	2016	27,76	0,38
MAYO		11,81	0,43
JUNIO		8,94	0,44
JULIO		4,16	0,43
AGOSTO		3,35	0,39

---

SEPTIEMBRE		8,02	0,34
OCTUBRE		3,42	0,35
NOVIEMBRE		5,28	0,46
DICIEMBRE		16,99	0,27
<hr/>			
ENERO		42,62	0,25
FEBRERO		41,43	0,23
MARZO		60,00	0,36
ABRIL		38,79	0,37
MAYO		23,77	0,37
JUNIO	2017	8,12	0,36
JULIO		3,75	0,39
AGOSTO		5,63	0,35
SEPTIEMBRE		2,66	0,35
OCTUBRE		3,51	0,29
NOVIEMBRE		4,52	0,28
DICIEMBRE		17,45	0,14
<hr/>			
ENERO		22,33	0,23
FEBRERO		33,57	0,17
MARZO		24,07	0,26
ABRIL		19,02	0,40
MAYO		20,91	0,37
JUNIO	2018	5,39	0,48
JULIO		3,35	0,43
AGOSTO		3,20	0,37
SEPTIEMBRE		3,20	0,28
OCTUBRE		3,89	0,28
NOVIEMBRE		16,78	0,25
DICIEMBRE		13,31	0,26
<hr/>			
ENERO		31,25	0,20
FEBRERO		33,34	0,21
MARZO		31,49	0,29
ABRIL		28,70	0,36
MAYO		14,26	0,28
JUNIO	2019	5,36	0,29
JULIO		4,75	0,42
AGOSTO		4,42	0,44
SEPTIEMBRE		2,44	0,33
OCTUBRE		7,89	0,29
NOVIEMBRE		7,58	0,22
DICIEMBRE		20,44	0,17
<hr/>			
ENERO	2020	22,71	0,21

---

FEBRERO	42,95	0,26
MARZO	25,93	0,25
ABRIL	24,07	0,34
MAYO	10,07	0,41
JUNIO	4,16	0,38
JULIO	6,12	0,40
AGOSTO	3,50	0,44
SEPTIEMBRE	5,49	0,38
OCTUBRE	1,73	0,29
NOVIEMBRE	2,77	0,41
DICIEMBRE	13,81	0,22

---