



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Estimación de impactos ambientales por incendios forestales en la cuenca  
alta del río Casacay aplicando series temporales de NDVI**

**ESPINOSA MERCHAN LUIS OSWALDO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**BASTIDAS VEINTIMILLA ROBERTH HUMBERTO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Estimación de impactos ambientales por incendios forestales en la  
cuenca alta del río Casacay aplicando series temporales de NDVI**

**ESPINOSA MERCHAN LUIS OSWALDO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**BASTIDAS VEINTIMILLA ROBERTH HUMBERTO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Estimación de impactos ambientales por incendios forestales en la  
cuenca alta del río Casacay aplicando series temporales de NDVI**

**ESPINOSA MERCHAN LUIS OSWALDO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**BASTIDAS VEINTIMILLA ROBERTH HUMBERTO  
INGENIERO AMBIENTAL**

**VARGAS COLLAGUAZO LUIS ANGEL**

**MACHALA  
2024**

# ESTIMACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES POR INCENDIOS FORESTALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY APLICANDO SERIES TEMPORALES DE NDVI

*por Robert Bastidas Luis Espinosa*

---

**Fecha de entrega:** 06-ago-2024 09:46a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2428182728

**Nombre del archivo:** POR\_INCENDIOS\_FORESTALES\_EN\_LA\_CUENCA\_ALTA\_DEL\_RIO\_CASACAY.docx (6.78M)

**Total de palabras:** 19960

**Total de caracteres:** 106029

# ESTIMACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES POR INCENDIOS FORESTALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY APLICANDO SERIES TEMPORALES DE NDVI

## INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://qdoc.tips">qdoc.tips</a> Fuente de Internet	1%
2	<a href="http://app.sni.gob.ec">app.sni.gob.ec</a> Fuente de Internet	1%
3	<a href="http://www.empresaactual.com">www.empresaactual.com</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="http://repositorio.unesum.edu.ec">repositorio.unesum.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="http://bibliotecadigital.exactas.uba.ar">bibliotecadigital.exactas.uba.ar</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://www.uncuyo.edu.ar">www.uncuyo.edu.ar</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://comunidadpmpca.uaslp.mx">comunidadpmpca.uaslp.mx</a> Fuente de Internet	<1%

9	<a href="http://aprenderly.com">aprenderly.com</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://repositorio.espe.edu.ec">repositorio.espe.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://repositorio.unicach.mx">repositorio.unicach.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://biblio.ugent.be">biblio.ugent.be</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://repositorio.utn.edu.ec">repositorio.utn.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to UNAPEC Trabajo del estudiante	<1 %
15	<a href="http://revistas.unl.edu.ec">revistas.unl.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 40 words

Excluir bibliografía

Activo

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

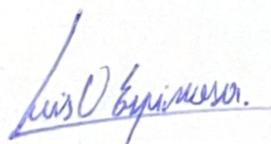
Los que suscriben, ESPINOSA MERCHAN LUIS OSWALDO y BASTIDAS VEINTIMILLA ROBERTH HUMBERTO, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Estimación de impactos ambientales por incendios forestales en la cuenca alta del río Casacay aplicando series temporales de NDVI, otorgan a la Universidad 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.

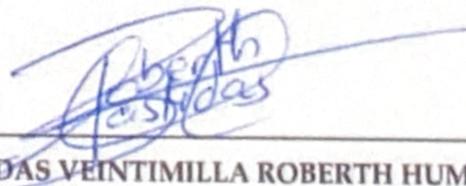
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

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.



ESPINOSA MERCHAN LUIS OSWALDO

0707020236



BASTIDAS VEINTIMILLA ROBERTH HUMBERTO

0706264447

## **Dedicatoria**

Primero quiero dedicarles esta tesis a mis padres Galo Bastidas y Jacqueline Veintimilla que me han apoyado desde el primer día que nací en cada uno de los objetivos que me he propuesto en mi vida, y que sin sus enseñanzas no estuviera en estas instancias en las que me encuentro. Sus enseñanzas y ejemplo de vida han sido una fuente de inspiración constante para mí.

A mis hermanos Galo y Evelyn que me han guiado en cada paso que doy, dándome sus mejores consejos no solo en la universidad sino también para la vida.

Finalmente, a mis abuelos paternos que siempre me consienten y por su sabiduría, cariño y apoyo a lo largo de mi vida. Y también a mi Mami Nati que, aunque ya no se encuentre conmigo, sé que su amor y sabiduría continúan guiándome desde el cielo. Siempre estarás en mi corazón.

**Roberth H. Bastidas Veintimilla**

Dedico este proyecto de tesis, en primer lugar, a mi madre, la Ing. Moramay Cumanda Merchan Valdivieso, cuyo apoyo incondicional y sacrificio han sido fundamentales para mi éxito, su amor, esfuerzo y guía constante han sido la fuerza motriz que me ha permitido superar los desafíos y alcanzar este importante logro.

A la memoria de mi padre, el Ing. Luis Oswaldo Espinosa Gonzales, que siempre soñó con verme convertido en profesional, cuyo deseo y motivación han sido una luz que me ha guiado a través de los momentos más difíciles, este logro es también tuyo.

Por último, quiero dedicar este proyecto a mis hermanos, cuyo amor y cariño han sido un pilar a lo largo de este camino, sus palabras de aliento y su fe en mi han sido cruciales para mantenerme enfocado y motivado. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

**Luis O. Espinosa Merchán**

## **Agradecimientos**

Primero quiero agradecerle a Dios que me ha dado la fuerza necesaria para poder realizar cada una de mis actividades diarias.

A mis padres que desde muy pequeño me enseñaron el valor del estudio y la importancia de dar mi máximo esfuerzo en todo lo que haga, les agradezco por nunca dejarme rendir y ser la pieza fundamental en mi vida.

A mis hermanos que me han demostrado su apoyo todos los días y confianza que tienen sobre mí. Les agradezco por todas las veces que me ayudaron por un deber o que se quedaron hasta tarde solo para no dejarme solo.

Quiero agradecerle también a Dayanna Cumbicos, por su amor, comprensión y paciencia inagotables. Su apoyo emocional y sus palabras de aliento fueron esenciales para mantenerme motivado y enfocado durante este arduo camino.

A mi tutor de tesis, Ing. Luis Vargas por su guía y paciencia durante este proceso. Sus conocimientos y dedicación fueron esenciales para el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos de la universidad, quienes me brindaron su apoyo y compartieron conmigo sus experiencias y conocimientos, a pesar de cualquier diferencia siempre me mostraron su apoyo y les deseo éxitos en su vida. En especial a mi compañero de tesis, Luis Espinosa, que sabe cuáles fueron las dificultades que tuvimos para este trabajo, gracias por tu colaboración y tu sacrificio constante.

**Roberth H. Bastidas Veintimilla**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por brindarme la fortaleza y sabiduría necesaria para alcanzar este importante logro. A mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante, ellos quienes han sido mi mayor inspiración y motivación para salir adelante.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado y por esas palabras de aliento que me han motivado a seguir luchando.

Agradezco a mi novia Cristina Tela por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional que me ha brindado en toda mi carrera universitaria, sin ella este logro tampoco sería posible.

Agradezco profundamente a mis profesores de la carrera de Ing. Ambiental, quienes con su dedicación y conocimientos me han guiado y formado a lo largo de estos años, en especial, a mi profesor el Ing. Amb. Luis Vargas, mi tutor de tesis, por su invaluable orientación y apoyo en la realización de este trabajo.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros, quienes me apoyaron y acompañaron en este largo camino y mi compañero de tesis Roberth Bastidas por su colaboración y esfuerzos conjunto en este proyecto.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por su apoyo y por ser parte de este importante logro en mi vida.

**Luis O. Espinosa Merchán**

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>UTMACH</b>	Universidad Técnica De Machala
<b>NDVI</b>	Normalized difference vegetation index
<b>EVI</b>	Enhanced Vegetation Index
<b>MODIS</b>	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>RR</b>	Rango relativo
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>m.s.n.m.</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>SIG</b>	Sistema de información geográfica
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>EE</b>	Earth Explorer
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>DEM</b>	Digital Elevation Model
<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>*shp.</b>	Shaperfile

## RESUMEN

El estudio se centró en la estimación de los impactos ambientales que ocurrieron en la cuenca alta del río Casacay durante un período de tiempo de 2003 hasta el 2022, esto mediante el análisis de los cambios en la tendencia del NDVI y su relación con los incendios forestales ocurridos en la región. Mediante una revisión bibliográfica se obtuvieron que han ocurrido seis incendios forestales en la cuenca alta del río Casacay. Se utilizó la plataforma de Google Earth Engine para la descarga de datos aplicando el producto de MODIS: Índice de Vegetación y la plataforma de Earth Explorer para el producto de MODIS: Anomalías Térmicas/Incendios para la descarga de las imágenes satelitales de los incendios forestales identificados. Para la estimación de impactos se utilizó la metodología de Hunt y Johnson que valoriza cuantitativamente los criterios de frecuencia de aparición, probabilidad de pérdida de control y severidad. Los resultados muestran que el incendio forestal con mayor impacto es el ocurrido en septiembre de 2012, el segundo ocurrido ese año, lo que demuestra que a mayor frecuencia se agravaran los impactos en el ecosistema. El estudio demostró que los incendios pueden provocar tanto aumentos como disminuciones de RR, dependiendo de la severidad y la magnitud del evento. En particular, se observó que la vegetación en la cuenca alta del río Casacay tiene una tendencia de presentar rebrotes de la especie de *Pinus patula*, teniendo un efecto negativo ya que tiende a colonizar las áreas donde había vegetación nativa

***Palabras clave* — Incendios forestales, Anomalías térmicas, NDVI, MODIS, Servicios ecosistémicos, rango relativo, series temporales.**

## ABSTRACT

The study focused on the estimation of the environmental impacts that occurred in the upper watershed of the Casacay River during a period of time from 2003 to 2022, by analyzing the changes in the NDVI trend and its relationship with wildfires occurred in the region. Through a bibliographic review, six forest fires were obtained in the upper watershed of the Casacay River. The Google Earth Engine platform is used to download data by applying the MODIS product: Vegetation Index and the Earth Explorer platform for the MODIS product: Thermal Anomalies/Fires to download satellite images of the identified wildfires. To estimate impacts, the Hunt and Johnson methodology was used, which quantitatively assesses the criteria of frequency of occurrence, probability of loss of control and severity. The results show that the wildfire with the most impact is the one that occurred in September 2012, the second that occurred that year, which shows that a greater frequency will worsen the impacts on the ecosystem. The study demonstrated that fires can cause both increases and decreases in RR, depending on the severity and magnitude of the event. In particular, it will be observed that the vegetation in the upper watershed of the Casacay River has a tendency to present regrowth of the *Pinus patula* species, having a negative native effect since it tends to colonize areas where there was vegetation.

**Keywords** — Wildfires, Thermal anomalies, NDVI, MODIS, Ecosystem services, relative range, time series

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	6
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
A. Antecedentes .....	3
III. JUSTIFICACIÓN.....	4
IV. OBJETIVOS .....	6
A. Objetivo general .....	6
B. Objetivos específicos.....	6
V. HIPÓTESIS .....	6
VI. MARCO TEÓRICO.....	7
A. Importancia ecológica y socioeconómica.....	7
1) Ecosistemas .....	7
a) Bosque Siempreverde Estacional De Tierras Bajas Del Jama-Zapotillo .....	7
b) Bosque Siempreverde Estacional Piemontano Del Catamayo-Alamor .....	7
c) Bosque Siempreverde Montano Bajo del Catamayo-Alamor .....	7
d) Bosque Siempreverde Montano del Catamayo-Alamor.....	7
e) Bosque Siempreverde Montano Alto del Catamayo-Alamor .....	7
f) Arbustal Siempreverde y Herbazal del Paramo .....	8
2) Servicios ecosistémicos .....	8
3) Servicios ecosistémicos de la cuenca .....	8
4) Importancia de los servicios ecosistémicos .....	8
B. Impactos ambientales en la vegetación .....	9
1) Impacto de los incendios forestales .....	10

2) Efecto en los servicios ecosistémicos.....	10
C. Estimación de impactos ambientales.....	11
1) Metodología para estimar los impactos ambientales.....	11
D. Sistemas de información geográfica.....	12
1) ArcGIS.....	12
2) Earth Explorer.....	12
3) Google Earth Engine .....	13
4) MODIS .....	13
5) Productos de Índices de Vegetación (NDVI – EVI).....	14
6) Anomalías Térmicas/Incendios .....	15
E. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	18
F. Fenología.....	19
G. Rango relativo. ....	20
H. Series temporales.....	21
VII. METODOLOGÍA.....	22
A. Descripción del área de estudio.....	22
B. Materiales y métodos .....	23
1) Revisión bibliográfica sobre eventos de incendios forestales .....	24
2) Delimitación del área de estudio.....	24
a) Dirección de flujo.....	25
b) Acumulación de flujo .....	26
c) Generación de la cuenca hidrográfica .....	26
d) Delimitación de la cuenca alta.....	27
3) Levantamiento de información in situ .....	27
4) Extracción de datos en Google Earth Engine .....	28

a)	Creación de mallado y puntos de sondeo .....	28
b)	Obtención de datos .....	30
5)	Descarga de imágenes satelitales.....	31
a)	Anomalías térmicas/incendios.....	31
6)	Procesamiento de datos .....	31
7)	Correlación de datos con eventos extremos.....	32
8)	Estimación de impactos .....	33
VIII.	RESULTADOS .....	34
A.	Revisión bibliográfica sobre eventos extremos.....	34
B.	Delimitación del área de estudio .....	34
C.	Levantamiento de información In situ.....	37
D.	Extracción de datos Google Earth Engine.....	40
1)	NDVI .....	40
E.	Descarga de imágenes satelitales .....	41
1)	Anomalías terminas/incendios.....	41
F.	Procesamiento de datos .....	46
G.	Correlación de datos.....	47
1)	Rango relativo.....	47
a)	Evento septiembre 2003 .....	47
b)	Evento noviembre 2005 .....	48
c)	Evento julio y septiembre de 2012.....	49
d)	Evento noviembre 2017 .....	51
e)	Noviembre 2020.....	52
H.	Estimación de impactos.....	53
IX.	DISCUSIÓN .....	54

A. Análisis de datos.....	54
B. Estimación de impactos.....	55
X. CONCLUSIONES.....	59
XI. RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS.....	62
ANEXOS.....	72

## CONTENIDO DE TABLAS

TABLA I PONDERACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE IMPACTOS. ....	12
TABLA II DETALLE DE LOS PRODUCTOS DE MODIS .....	14
TABLA III DETALLE DE PRODUCTOS DE MODIS .....	15
TABLA IV CAPAS Y VARIABLES DEL MODIS .....	17
TABLA V CLASE DE PÍXELES DEL PRODUCTO DE MODIS DE ANOMALÍAS TÉRMICAS/INCENDIOS .....	17
TABLA VI COORDENADAS DE EVENTOS CHILOLA Y RUSIACOCHA .....	28
TABLA VII CORRECCIÓN DE DATOS APLICANDO EL FACTOR DE ESCALA DEL NDVI .....	32
TABLA VIII PONDERACIONES DE IMPACTOS DE INCENDIOS FORESTALES .....	33
TABLA IX CATEGORÍA DE LOS IMPACTOS .....	34
TABLA X FECHAS DE LAS IMÁGENES SATELITALES MOD14A2V061 Y MYD14A2V061 .....	34
TABLA XI ECOSISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO CASACAY CON SU ÁREA .....	36
TABLA XII ECOSISTEMAS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY .....	37
TABLA XIII DATOS DE LA VARIABLE DE NDVI OBTENIDOS DEL GOOGLE EARTH ENGINE PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY .....	40
TABLA XIV PRODUCTO MODIS: MOD13Q1V061.....	46
TABLA XV CORRECCIÓN DE DATOS APLICANDO EL FACTOR DE ESCALA 250/500M 16 DAYS NDVI .....	46
TABLA XVI PROMEDIOS MENSUALES DE NDVI - CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY (2003 - 2022).....	47
TABLA XVII RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2003 .....	48
TABLA XVIII RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2005. .....	49
TABLA XIX RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO JULIO DE 2012.....	50

TABLA XX RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO SEPTIEMBRE DE 2012 .....51

TABLA XXI RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2017 .....52

TABLA XXII RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2020 .....53

TABLA XXIII RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DE INCENDIOS FORESTALES .....53

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Imagen del producto de MODIS: MOD1A1 de Anomalías Térmicas/Incendios del 04 de septiembre de 2011, Australia. ....	16
Fig. 2. Imagen del producto de MODIS: MOD14A2 de 8 días del 29 de agosto al 5 de septiembre de 2011, Australia .....	16
Fig. 3. Patrones fenológicos de diferentes comunidades vegetales de la región central de México .....	20
Fig. 4. Cálculo de tendencias de NDVI para un año típico de un bosque caducifolio .....	21
Fig. 5. Subcuenca del río Casacay.....	22
Fig. 6. Cuenca alta del río Casacay. ....	23
Fig. 7. Diagrama de flujo de los procesos empleados. ....	24
Fig. 8. Diagrama de flujo para la obtención de los límites de la Cuenca Casacay.....	25
Fig. 9. Flow Direction de la cuenca del río Casacay.....	25
Fig. 10. Flow Accumulation de la cuenca del río Casacay. ....	26
Fig. 11. Raster de la cuenca del río Casacay.....	27
Fig. 12. Coordenadas de eventos extremos: Chilola y Rusiacocha.....	28
Fig. 13. Generación de mallado y puntos de sondeo.....	29
Fig. 14. Puntos de sondeo de la cuenca alta del río Casacay. ....	29
Fig. 15. Subida de productos en la plataforma de Google Earth Engine. ....	30
Fig. 16. Script de NDVI mensual del periodo de 2003 a 2022. ....	31
Fig. 17. Ecosistemas de la cuenca del río Casacay .....	35
Fig. 18. Cuenca alta del río Casacay .....	36
Fig. 19. Coordenadas de la visita In Situ a la cuenca alta del rio Casacay .....	38
Fig. 20. Toma de coordenada del sitio 1 .....	39
Fig. 21. Toma de coordenadas del sitio 2.....	39
Fig. 22. Evento de quema de septiembre de 2003 cuenca alta de Casacay .....	41
Fig. 23. Evento de quema de noviembre de 2005 cuenca alta del río Casacay.....	42
Fig. 24. Evento de quema de julio de 2012 cuenca alta del río Casacay .....	43
Fig. 25. Evento de quema de septiembre de 2012 cuenca alta del río Casacay .....	44
Fig. 26. Evento de quema de noviembre de 2017 en la cuenca alta del río Casacay .....	44

Fig. 27. Evento de quema de noviembre de 2020 en la cuenca alta del río Casacay .....	45
Fig. 28. Serie temporal del Incendio Forestal de septiembre de 2003 .....	48
Fig. 29. Serie temporal del Incendio Forestal de noviembre de 2005 .....	49
Fig. 30. Serie temporal del Incendio Forestal de julio y septiembre de 2012 .....	50
Fig. 31. Serie temporal del Incendio Forestal de noviembre de 2017 .....	51
Fig. 32. Serie temporal del Incendio Forestal de noviembre 2020 .....	52
Fig. 33. Rebrote de <i>Pinus Patula</i> en la cuenca alta del río Casacay .....	57

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Fórmula para estimar los impactos ambientales.....	11
Ecuación 2 Formula del Índice de vegetación mejorada 2 bandas para productos MODIS VI.....	14
Ecuación 3. Formula del NDVI.....	18
Ecuación 4. Rango relativo de NDVI.....	32
Ecuación 5. Integral de NDVI.....	32

## I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, los incendios forestales han generado grandes problemas en los ecosistemas, ya sea que se den de manera natural o antrópica. Las afectaciones en el ecosistema se verán reflejados en la frecuencia y la severidad de estos incendios, sobre todo porque se verán influenciados por los patrones estacionales, como el aumento de las temperaturas y épocas de sequías [1].

Por eso es importante considerar los efectos de los incendios forestales dado su potencial impacto devastador que tiene en vegetación y los ecosistemas circundantes, dado que la presencia de incendios puede alterar drásticamente la cobertura vegetal, afectando la biodiversidad de los ecosistemas y sus servicios ecosistémicos [2]. Existen muchos factores que inciden en el nivel de afectación de un incendio forestal, siendo los fenómenos meteorológicos una de las causas más frecuentes de la aparición de incendios [3], a esto se le suman otros factores como la humedad relativa, la temperatura, la topografía, las variables vegetativas, la dirección y velocidad del viento, la edad de la masa forestal, el dosel de la masa forestal, factores socioeconómicos, entre otros [4], [5].

Un ejemplo de esto es que los efectos del fuego han generado grandes cambios en el ecosistema, alterando de manera significativa las propiedades de los suelos, afectando procesos hidrológicos e incluso participando en los cambios atmosféricos. Además de que se suman varios agentes climáticos como vientos fuertes, sequías, trayendo grandes consecuencias para biodiversidad y para la sociedad en general [6].

Por lo tanto, llevar a cabo una evaluación de los impactos ambientales en la vegetación es crucial para lograr una buena conservación de los ecosistemas y tener una buena gestión ambiental, ya que se ha evidenciado que, en la actualidad, las diferentes actividades humanas afectan los ecosistemas vegetales y entender eso esencial para garantizar la preservación a largo plazo del entorno natural [7]. Por ende, este estudio se centra en estimar los impactos ambientales de los incendios forestales en la vegetación de la cuenca alta del río Casacay, utilizando series temporales de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), obtenidas mediante la plataforma Google Earth Engine y datos del sensor MODIS, buscando comprender la dinámica de la vegetación en esta región.

Al analizar las series temporales de NDVI, se busca identificar los patrones temporales en la vegetación, incluyendo cambios significativos en la cobertura vegetal en el tiempo, analizando

la relación entre estos cambios y las actividades humanas en la región, con especial atención a los incendios forestales. Luego, se implementará un modelo matemático para realizar el análisis cuantitativo cuales son los efectos de los incendios forestales, mediante el uso de criterios que se consideren importantes para conocer el nivel de impacto provocado [8], donde se aplicará una metodología propuesta por Hunt & Johnson (1996) para la evaluación de los impactos ambientales [9].

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cuenca del río Casacay es un área de gran importancia social y ecológica, alberga una gran cantidad de biodiversidad de especies vegetales, animales y varios ecosistemas que nos brindan diferentes tipos de servicios ecosistémicos [10].

La cuenca alta del río Casacay se ha visto afectada por una serie de problemas de origen antrópicos y/o natural. El más frecuente es la quema de cobertura vegetal debido a los incendios forestales. Estos incendios forestales se convierten en una gran amenaza sobre la biodiversidad y la cobertura vegetal, ocasionando impactos en la salud humana y provocando la pérdida de bienes y servicios que nos brinda el ecosistema [11].

En el periodo de 2005 al 2022 se han registrado 13 incendios forestales en el cantón de Chilla, siendo afectadas grandes extensiones de terreno lo que ha generado un impacto significativo en el estado de la cuenca [12]. Principalmente afecta su biodiversidad y su cobertura vegetal, modificando su estructura y la dinámica de la vegetación generando una alteración en el hábitat y el paisaje de la cuenca [13]. Además, después de un incendio forestal el componente con mayores alteraciones es el suelo, causando cambios en sus propiedades físicas como color, textura y la capacidad de retención de agua [13]. En tanto, a las propiedades químicas generando la pérdida de nutrientes, minerales y microorganismos esenciales para la fertilidad del suelo [14].

Esta situación es preocupante, por un lado, las alteraciones físicas, químicas y biológicas del suelo dan paso a la generación de la erosión de los suelos siendo uno de los principales problemas de la cuenca, por otro lado, se ven afectados los servicios ecosistémicos asociados al aprovisionamiento de agua potable a causa del desgaste de la calidad y cantidad de agua en los sistemas hídricos [15].

Por lo tanto, es importante evaluar los impactos ambientales de los incendios forestales en la vegetación de la cuenca alta del río Casacay, para dar respuesta a una problemática que se genera frecuentemente cada año y afecta los habitantes, el ecosistema y al desarrollo del turismo [16].

### *A. Antecedentes*

El elevado crecimiento demográfico a nivel mundial ha provocado una búsqueda constante de nuevas tierras para la expansión agrícola y de otras actividades económicas provocando un desgaste del suelo por las rotaciones de cultivo de alta intensidad, el uso de agroquímicos y alteraciones en los patrones climáticos [17]. Este crecimiento desmesurado se puede relacionar al aumento de las demandas biofísicas y humanas, que no nacen de las necesidades vitales, sino de las interacciones naturales, económicas y políticas de una región en específico. Así, se impulsa una rápida transformación del uso de suelo y de su cobertura vegetal [18].

El aprovechamiento del suelo para actividades agrícolas genera opiniones contrarias. Por un lado, los sectores industriales y comerciales, solo se fijan en el desarrollo del mapa agrícola y los ingresos generados. En cambio, las entidades protectoras del medio ambiente advierten sobre los riesgos como alteraciones al clima, ciclo del agua, emisiones de GEI, pérdidas de hábitats naturales, aumento de plagas y enfermedades [18]

El cambio de cobertura del suelo causa impactos negativos en un ecosistema, como gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad, alteración de la calidad del agua, erosión del suelo [19]. Los cambios en la cobertura vegetal, vinculadas a la deforestación y expansión urbana, provocan deterioros en la calidad y la disponibilidad de agua dulce en los cuerpos hídricos, generando así un aumento de los eventos extremos [20].

A partir de la década de los 70, las actividades antropogénicas han tenido mayor fuerza con la expulsión de aborígenes hacia las partes altas, debido a la reforma agraria de esa época. Dichas actividades provocan deforestación, avance de frontera agrícola, sobrepastoreo, pastoreo en zonas indebidas, construcción inadecuada y desordenada de la infraestructura vial, entre otras. En consecuencia, a esto, poco a poco se pierden los servicios y funciones de estos ecosistemas, en especial de los servicios hidrológicos [19].

A nivel local, la falta de conocimiento sobre el impacto de las actividades antropogénicas a la cuenca como un sistema ocasiona una ineficiente gestión de los recursos naturales de la misma [21]. Se ha observado construcción de infraestructuras sin estudios previos sobre posibles afectaciones a los hábitats, la falta de conocimiento sobre prácticas agrícolas sostenibles, deforestación y urbanización descontrolada puede conducir a la erosión del suelo, pérdida de la fertilidad y aumento del riesgo de deslizamientos de tierra [22].

En la cuenca del río Casacay, no se cuenta con estudios necesarios que identifiquen las actividades antropogénicas a lo largo de los años y cuáles son sus impactos en toda la cuenca [23]. Una de las perturbaciones antrópicas de mayor impacto son aquellas asociadas a incendios forestales [24]. Además de la pérdida de cobertura vegetal, los incendios forestales traen consigo otras afectaciones como la alteración de la capacidad del suelo para la retención del agua, vulnerabilidades a inundaciones y deslizamientos, liberación de grandes cantidades de carbono que se almacenan en la vegetación, entre otros [24].

### III. JUSTIFICACIÓN

La cuenca del río Casacay es uno de los espacios naturales más importante de la provincia de El Oro, jugando un papel crucial ante la sociedad generando varios servicios ambientales como el abastecimiento de agua potable a las ciudades de Pasaje, Machala y El Guabo, adicionalmente la cuenca se ha vuelto de gran importancia para el sector productivo, generando un impacto positivo en las zonas agropecuarias para los cantones de Chilla, Pasaje, Machala y El Guabo [10].

Los bosques proporcionan diferentes tipos de servicios ecosistémicos, pero que a la larga son muy propensos a las alteraciones generadas por los incendios forestales [25]. Si bien los servicios ecosistémicos se definen por ser aquellos beneficios que una población puede obtener del ecosistema, hasta comprender el cómo esos servicios se conectan entre sí y los beneficios que nos brindan, es importante mantener una gestión integral de la cuenca para prevenir la pérdida de estos servicios [26].

Según Garzón et al. [10] identifican 8 servicios ecosistémicos principales de los ecosistemas de la cuenca del río Casacay, clasificándolos en tres categorías provisión (producción agropecuaria, abastecimiento de agua potable), regulación (mitigación de los efectos del cambio climático, regulación de las fuentes de agua) y servicios culturales (turismo, recreación educación, producción ancestral, soberanía alimentaria) [10].

Otro de los servicios que nos ofrece la vegetación es la regulación del intercambio de energía, la respiración, la transpiración, los ciclos de carbono, el albedo superficial, además de influir en el cambio climático a través de la fotosíntesis [27]. La vegetación presenta varios cambios continuos, los cuales se atribuyen a evento de escala espacial o temporal, funcionando como indicadores de cambios ambientales [27].

La cuenca alta del río Casacay cuenta con una vegetación que se la puede considerar como uno de los componentes de mayor importancia para poder mantener el equilibrio del sistema ambiental debido sus servicios ecosistémicos [28]. Sin embargo, estudios anteriores han evidenciado como los incendios forestales generan impactos negativos sobre estos servicios, especialmente en ambientes secos [25]. Los principales servicios ecosistémicos perdidos tras los efectos negativos de estos incendios se ven reflejados en la pérdida de infiltración del agua, aumenta la capacidad de escorrentía superficial y altera la calidad del agua, provocando uno de los problemas que mayores afectaciones ha provocado en la cuenca (la erosión) [28].

Aunque estos problemas estimulan la resiliencia del ecosistema, aplicar una gestión activa también puede traer consecuencias a largo plazo para los servicios ecosistémicos, en especial el de hábitat para las especies de vida silvestre que necesitan un sistema forestal denso. Estos mismos bosques ayudan a absorber los gases para el proceso de fotosíntesis, además de que con sus hojas atrapan a los contaminantes como las partículas de polvo suspendidas [29].

De esta manera, la aplicación del Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) calculado mediante imágenes satelitales, al funcionar como un indicador nos permite reconocer como se encuentra la actividad y el estado de la vegetación [30]. Estos métodos de teledetección satelital han permitido monitorear el estado de la vegetación y su relación con las características que los rodea. Las imágenes satelitales permiten mediciones constantes, periódicas y de suma importancia que nos ayuda a detectar la degradación en la cubierta vegetal que causan procesos naturales y antrópicos y evaluar e identificar los impactos ambientales generados por eventos extremos como los incendios forestales [31].

El NDVI permite analizar los cambios de cobertura vegetal debido a la fuerte correlación existente entre ambas [30]. Existen las series temporales de datos MODIS NDVI que se han aplicado con éxito para identificar la fenología y medir la dinámica de la vegetación [30].

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Estimar los impactos ambientales en la vegetación de la cuenca alta del río Casacay mediante el análisis de series temporales de NDVI para determinar el estado de la vegetación y su evolución durante el periodo 2003 – 2022.

### *B. Objetivos específicos*

- Realizar una revisión bibliografía sobre eventos de incendios forestales durante el periodo 2003-2022 en la cuenca alta del río Casacay.
- Recopilar datos de los productos de MODIS del Índice de Vegetación, NDVI del periodo de 2003 a 2022 de la cuenca alta del río Casacay, mediante la plataforma de Google Earth Engine.
- Recopilar datos de imágenes satelitales del producto MODIS de Anomalías Térmicas/Incendios del periodo de 2003 a 2022 de la cuenca alta del río Casacay, mediante la plataforma de Earth Explorer.
- Analizar los cambios en la tendencia del NDVI durante el periodo de 2003 a 2022 relacionándolos con los incendios forestales de estas fechas.

## V. HIPÓTESIS

- ¿La vegetación de la cuenca alta del río Casacay ha sufrido cambios como resultado de los incendios forestales ocurridos en el periodo 2003-2022?

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. *Importancia ecológica y socioeconómica.*

#### 1) *Ecosistemas*

##### a) *Bosque Siempreverde Estacional De Tierras Bajas Del Jama-Zapotillo*

Son bosques que se desarrollan en relieves colinados y terrazas que van desde los 0 hasta los 400 msnm. Sus especies de flora pueden alcanzar hasta los 40 m de altura, aunque por lo general, el promedio de su dosel oscila entre los 20 y 25 m [32].

##### b) *Bosque Siempreverde Estacional Piemontano Del Catamayo-Alamor*

Ecosistema con bosques cuyo dosel promedio entre los 20 y 25 m, con individuos que han alcanzado los 35 m de altura. En este ecosistema se pueden encontrar especies de flora que provienen de bosques siempreverdes, bosques deciduos o semideciduos. Se caracterizan por ser de un suelo no inundable y encontrarse a un nivel altitudinal de 400 a 1600 msnm [32].

##### c) *Bosque Siempreverde Montano Bajo del Catamayo-Alamor*

Se encuentran a una altitud de 1600 a 2200 msnm, caracterizados por la existencia de poblaciones de palmas, con dosel semicerrado de hasta 25 m. A esto se incluye individuos emergentes que superan los 35 m de altura.

La mayoría de su flora herbácea cuenta con helechos y rubiáceas; la vegetación arbustiva y árboles juveniles son relativamente escasos; son pocos los casos de epífitas que crecen sobre las ramas y troncos y corresponden principalmente a bromélias, ciclantáceas y aráceas [32].

##### d) *Bosque Siempreverde Montano del Catamayo-Alamor*

Son bosques siempreverdes cuyo dosel alcanza los 20 m de altura, con vegetación herbácea que se encuentra mayormente dominada por helechos, arbustos y árboles juveniles. Se suelen encontrar remanentes de este bosque en pendientes escarpadas y vertientes disectadas de inclinación fuerte y quebradas. Su rango altitudinal va desde los 2200 hasta los 2900 msnm. Además cuentan con una gran cantidad de briofitos y epífitas de bromélias, helechos y aráceas que crecen sobre las ramas [32].

##### e) *Bosque Siempreverde Montano Alto del Catamayo-Alamor*

Con un rango altitudinal de 2900 a 3400 msnm, este ecosistema se caracteriza por ser parte de la zona de transición entre el bosque montano y el páramo. Debido a esto, se suelen frecuentar deslizamientos y variación del ecosistema por lo que se encuentran parches de vegetación en diferente estado de sucesión [32].

Poseen un dosel cerrado que alcanza los 15 m de altura, con una vegetación que consta de arbustos y arbolitos muy ramificados cubiertos por briofitas, líquenes y bromélias. Este ecosistema se encuentra en una zona con fuertes pendientes y un suelo pedregoso, además de que en las épocas de lluvia se observa la presencia de una neblina constante [32].

*f) Arbustal Siempreverde y Herbazal del Paramo*

Cuenta con un piso altitudinal de 3300-3900 msnm N- 2800 a 3600 msnm S. Se caracteriza por tener parches en la que frecuentan arbustales de hasta 3 m de altura. Según se vaya bajando se observa un aumento en la diversidad de especies, así como en la altura promedio de los arbustos y en la cantidad de árboles jóvenes [32].

*2) Servicios ecosistémicos*

Son todos aquellos servicios que se obtienen de los ecosistemas y que pueden ser o bien tangibles o intangibles y son aprovechados por los seres humanos [33]. Estos servicios pueden agruparse en cuatro categorías principales: provisión, regulación, soporte y culturales. Los servicios de provisión, como alimentos y agua potable, son vitales para la subsistencia humana [34]. Los servicios de regulación, como el control del clima y la purificación del aire y el agua, contribuyen al equilibrio ambiental [29]. Los servicios de soporte, como los ciclos de nutrientes y la formación de suelos, sustentan la vida en la Tierra [34]. Mientras tanto, los servicios culturales, pueden tener un valor estético, enriquecen la experiencia humana y promueven el bienestar psicológico, además puede ser usado con recreativos [31].

*3) Servicios ecosistémicos de la cuenca*

En la cuenca alta del río Casacay, la vegetación desempeña un papel crucial al proporcionar diversos servicios ecosistémicos. Entre estos, se incluye la regulación del ciclo del agua, que ayuda a mantener la disponibilidad de este recurso vital para las comunidades locales y la biodiversidad [34]. Además, la vegetación actúa como un sumidero de carbono, ya que absorbe el CO<sub>2</sub> que se encuentra presente en la atmósfera, para así disminuir los efectos del cambio climático [35]. Asimismo, la vegetación protege el suelo contra la erosión, preservando su fertilidad y evitando la degradación del paisaje [36].

*4) Importancia de los servicios ecosistémicos*

Los servicios ecosistémicos son esenciales para el funcionamiento y la sustentabilidad de la vida en la tierra. A través de su clasificación en cuatro categorías principales: provisión, regulación, soporte y culturales, podemos comprender mejor la amplia gama de beneficios que los ecosistemas

proporcionan [34]. Los de provisión, ayudan al abastecimiento de materia prima para los alimentos y agua potable, son fundamentales para la supervivencia humana, asegurando la disponibilidad de recursos básicos para nuestra subsistencia [34].

También existen servicios que ayudan a regular el ecosistema, mediante el control del clima y la purificación del aire, son vitales para mantener un entorno habitable y equilibrado, combatiendo las consecuencias negativas causadas por el cambio climático y la contaminación [37].

Además, los servicios de soporte, como los ciclos de nutrientes y la formación de suelos, sustentan la vida en la Tierra al proporcionar las condiciones necesarias para el crecimiento y la reproducción de las especies [34]. Finalmente, los servicios culturales, como la recreación y el valor estético, enriquecen nuestras vidas y fortalecen nuestra conexión con la naturaleza, contribuyendo al bienestar emocional y espiritual de las personas [38].

La importancia de los servicios ecosistémicos radica en su contribución fundamental a la vida humana y al bienestar, así como en su papel crucial en la conservación de la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas [39].

### *B. Impactos ambientales en la vegetación*

Los impactos ambientales son las consecuencias, tanto negativas como positivas, que resultan de las acciones humanas o de fenómenos naturales sobre el entorno natural [40]. En el caso de este estudio, nos enfocamos en comprender los efectos provocados por los incendios forestales en la cuenca alta del río Casacay. Estos eventos representan una de las principales amenazas para la integridad de los ecosistemas en esta región, con impactos que van más allá de la pérdida de cobertura vegetal [41].

Los incendios pueden desencadenar impactos adversos, como la degradación del suelo por la pérdida de materia orgánica y la erosión, la alteración de los ciclos naturales del agua y nutrientes, y la pérdida de hábitats y la disminución de la biodiversidad [27]. Además, es importante destacar que estos impactos no se limitan solo al ámbito ecológico, sino que pueden tener repercusiones socioeconómicas significativas [42]. Por ejemplo, la pérdida de cobertura vegetal puede afectar la disponibilidad de recursos naturales y servicios ecosistémicos clave para las comunidades locales, como la provisión de agua, la regulación del clima y la recreación [42].

### *1) Impacto de los incendios forestales*

Los incendios forestales representan una de las principales amenazas para los ecosistemas naturales en todo el planeta, generando una serie de impactos ambientales significativos. Estos eventos, caracterizados por la combustión descontrolada de la vegetación, pueden tener consecuencias devastadoras tanto a corto como a largo plazo [43].

En primer lugar, los incendios forestales provocan la pérdida directa de hábitats naturales, destruyendo la vegetación y alterando los ecosistemas locales [44]. Esta pérdida de biodiversidad afecta a la fauna y la flora que dependen de estos ecosistemas para su supervivencia, lo que puede conducir a la extinción de especies y a la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación del ciclo del agua y la captura de carbono [41].

Además, los incendios forestales emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero y partículas finas, contribuyendo significativamente a la contaminación atmosférica y al cambio climático [46]. Estos contaminantes pueden tener efectos adversos en la salud humana, aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como afectando la calidad del aire y la visibilidad [46].

Otro impacto importante de los incendios forestales es el deterioro de la calidad del suelo, ya que la capa orgánica se quema, dejando expuesta la tierra a la erosión. Posteriormente, las precipitaciones que ocurren inmediatamente en la etapa de post-incendio determinan el aumento de escorrentía y de erosión, provocando el desgaste de ciertos elementos de la capa del suelo, tales como la materia orgánica, nutrientes, microelementos que son esenciales en los procesos de recuperación de las áreas quemadas [47]. De esta manera altera ciertos procesos hidrológicos como la escorrentía, aumentos de caudales de lluvia y el arrastre de sedimentos, lo que a su vez puede aumentar el riesgo de inundaciones y caudales máximos extremos [48].

### *2) Efecto en los servicios ecosistémicos.*

Los incendios forestales ejercen un efecto significativo en los servicios ecosistémicos, los beneficios tangibles e intangibles que los ecosistemas proporcionan a los seres humanos y otras formas de vida. Estos servicios, que incluyen la provisión de alimentos, agua, aire limpio, regulación climática, control de enfermedades y recreación, entre otros, pueden ser gravemente afectados por la destrucción y alteración causada por los incendios [49].

Los incendios forestales pueden comprometer la capacidad de los ecosistemas para regular el ciclo del agua. La pérdida de vegetación y la alteración del suelo pueden disminuir la capacidad

de retención de agua, aumentando el riesgo de erosión, inundaciones y deslizamientos de tierra [50]. Esto puede afectar negativamente la disponibilidad de agua dulce, tanto para el consumo humano como para otros usos, y alterar los patrones de flujo de los ríos y arroyos, afectando la biodiversidad acuática y los ecosistemas ribereños [51].

Además, a través de los cambios de uso de suelo se puede comprometer la capacidad de los ecosistemas para capturar y almacenar carbono, ya que este proceso será uno de los principales impulsores que ocasionan tanto la desertificación, el cambio climático y los incendios forestales [52]. La pérdida de biomasa vegetal y la liberación de gases de efecto invernadero durante la combustión aumentan la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, exacerbando el calentamiento global y sus efectos asociados, como el aumento de las temperaturas, los eventos climáticos extremos y la acidificación de los océanos.

### *C. Estimación de impactos ambientales.*

Los impactos ambientales que pueden generar un evento, como lo es un incendio forestal, varían entre: pérdida de servicios ecosistémicos, introducción de especies invasoras, aumento de las amenazas para las especies en peligro de extinción, cambios en las estructuras físicas y biológicas de los bosques y consecuencias por la emisión de gases de efecto invernadero [53].

Una evaluación se centra en valorizar los posibles impactos ambientales que pueda generar cierta actividad [54]. Existen diferentes criterios que se puedan asignar para evaluar un impacto ambiental, como la incidencia, la forma de afectación, ubicación, duración o persistencia, asimilación del impacto, ocurrencia y ambiente afectado. Además, se evalúa la significancia ambiental, que evalúa la severidad continua del impacto [54].

Para la evaluación de estos impactos existen distintas metodologías como métodos de listas, redes de interacciones, matrices de interacciones, sistemas cartográficos, indicadores, análisis multicriterio, simulación y predicción y software[55].

#### *1) Metodología para estimar los impactos ambientales.*

Se utilizará la metodología de ponderación de un sistema de gestión ambiental, adaptada hacia la estimación de los impactos ambientales por incendios forestales [9]. La ponderación para la estimación de impactos se puede observar en la **TABLA I**.

$$C = F \times P \times S \quad (1)$$

Ecuación 1. Fórmula para estimar los impactos ambientales

TABLA I  
PONDERACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE IMPACTOS.

<b>Frecuencia de aparición (F)</b>	1 (muy rara) a 5 (continua)
<b>Probabilidad de pérdida de control (P)</b>	1 (muy improbable) a 5 (muy probable)
<b>Severidad (S)</b>	1 (leve degradación al ecosistema) a 5 (severa degradación al ecosistema)

Nota: Criterios para la estimación de un impacto ambiental [9].

La estimación de impactos ambientales nos permite identificar y evaluar los posibles efectos que se pueden generar en los componentes físicos, químicos y biológicos, culturales, económicos y sociales que conforman una cuenca [54]. Así se pueden considerar las medidas preventivas y se preparan los planes de contingencia o corrección de los efectos causados por las alteraciones ambientales [56].

#### *D. Sistemas de información geográfica*

##### *1) ArcGIS*

Es una herramienta que funciona como un sistema completo para el trabajo de información geográfica y su aplicación gratuita. Sus distintas herramientas de análisis, tareas y flujos de trabajo, permiten al usuario realizar distintas tareas como: Análisis espacial y ciencia de datos, operaciones de campo, representación cartográfica, SIG 3D, teledetección y captura y gestión de datos [57].

La creación de mapas en ArcGIS, aparte de mostrar información de un producto final de SIG, permite su uso para la consulta, la administración, el análisis y la planificación. Además, no sirven solo para mostrar datos, sino también para la comprensión de datos, seguimiento de estado, planes y diseños [58]. Esto gracias su extenso conjunto de mapas base integrado que incluyen topografía, imágenes, calles, terreno, océanos, hidrología, uso de suelo o geología, además el usuario puede crear sus propios mapas con información externa [58].

##### *2) Earth Explorer*

El USGS Earth Explorer (EE) es una herramienta que permite a sus usuarios la capacidad de consultar, buscar y ordenar imágenes satelitales, fotografías aéreas y productos cartográficos de varias fuentes. Además de los datos de las misiones Landsat y una variedad de otros proveedores de datos, EE ahora brinda acceso a los productos de datos terrestres MODIS de las misiones Terra y Aqua de la NASA, y a los productos de datos ASTER nivel 1B sobre Estados Unidos y los territorios de la misión ASTER de la NASA [59].

### 3) *Google Earth Engine*

Es una plataforma gratuita y de fácil acceso que facilita la obtención de recursos informáticos de alto valor que procesan varios conjuntos de datos geoespaciales, y ayuda a muchos investigadores a publicar o divulgar los resultados de sus investigaciones entre otros investigadores e incluso al público [60].

Una de las características más destacadas de Google Earth Engine es su extensa biblioteca de imágenes satelitales de diversos archivos, como Landsat, Sentinel, MODIS y muchas otras misiones satelitales. Estas imágenes cubren todo el planeta y están disponibles en una variedad de resoluciones espaciales y espectrales, lo que permite a los usuarios monitorear cambios en la tierra a lo largo del tiempo y realizar análisis comparativos a escala global, regional o local [60].

En este sentido, Google Earth Engine ofrece una serie de herramientas de procesamiento y análisis que permiten a los usuarios realizar una variedad de tareas, como la clasificación de imágenes, la detección de cambios en la tierra, la estimación de la cobertura vegetal, el cálculo de índices de vegetación, y mucho más. Estas herramientas están diseñadas para ser rápidas y eficientes, aprovechando la potencia de computación en la nube de Google para realizar análisis a escala global en cuestión de segundos o minutos [60].

### 4) *MODIS*

El espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada conocido como MODIS es un sensor remoto de gran importancia que se encuentra a bordo de dos satélites, Terra MODIS y Aqua MODIS de la NASA. Estos dos satélites observan la superficie de la tierra cada dos días, haciendo la adquisición de datos espectrales de 36 bandas o grupos de longitudes de onda [61].

La obtención de las 36 bandas espectrales se divide en imágenes de dos bandas con una resolución de 250 m, cinco bandas a 500 m y 29 bandas a 1 km, completando las 36 bandas de datos espectrales obtenidos por los dos satélites. Actualmente, MODIS juega un papel fundamental porque, gracias a sus funciones, permite a investigadores desarrollar sistemas globales capaces de anunciar cambios globales, en la temperatura de la tierra o los índices de vegetación que permiten a los científicos identificar la densidad y salud de la vegetación de una región o área determinada [62].

Por ejemplo, MODIS nos proporciona la información necesaria que permite a los científicos rastrear los cambios de cobertura terrestre, ayudando a determinar las áreas donde hubo

deforestación, donde se produjo un incendio o quema de tierras y donde las tierras que antes se quemaron vuelven a su estado natural [62].

##### 5) *Productos de Índices de Vegetación (NDVI – EVI)*

Los productos del índice de vegetación generado en intervalos de 16 días ofrecen comparaciones de las condiciones globales del estado de la vegetación mediante el análisis de series temporales que nos permiten monitorear la actividad fotosintética de la vegetación en una zona de interés. Este producto es muy importante, ya que comprende la fenología de la vegetación y determina los cambios en la cobertura vegetal [63]. En la **TABLA II** se observa los productos el detalle de productos de MODIS: Índice de vegetación

TABLA II  
DETALLE DE LOS PRODUCTOS DE MODIS

<b>Nombre del producto</b>	<b>MODIS Terra Prod ID</b>	<b>MODIS Aqua Prod ID</b>
Índices de vegetación 16 días L3 Global 250 m	MOD13Q1	MYD13Q1
Índices de vegetación 16 días L3 Global 500 m	MOD13A1	MYD13A1
Índices de vegetación 16 días L3 Global 1 km	MOD13A2	MYD13A2

Nota: Detalle de los productos de MODIS: NDVI y EVI [64].

A nivel mundial se fabrican dos productos del Índice de Vegetación, el primero es el índice de vegetación de diferencia normalizada conocido como (NDVI) cuyos valores van desde el -1 al +1.

El otro producto es el índice de vegetación mejorado o también conocido como (EVI), este índice ayuda a minimizar las variaciones en el monitoreo de la vegetación gracias a que separa la influencia del suelo y la atmosfera de la señal de la vegetación [63].

La ecuación del índice de vegetación mejorada de 2 bandas a 250 m utilizada en los productos MODIS VI es:

$$EVI2 = 2.5 \frac{NIR - Red}{NIR + 2.4Red + 1} \quad (2)$$

Ecuación 2 Formula del Índice de vegetación mejorada 2 bandas para productos MODIS VI

**NIR:** es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

**Red:** es la reflectancia en la banda roja.

6) *Anomalías Térmicas/Incendios*

La utilización de este producto nos permite ver la ocurrencia de un incendio, su ubicación, su detección, la potencia del fuego y muchas otras variables que se describen en los atributos de los píxeles de fuego. Esta información proporcionada permite a los investigadores monitorear la distribución espacial y temporal de un incendio forestal en diferentes ecosistemas. En la **TABLA III** se observa los productos el detalle de productos de MODIS: Anomalías Térmicas/Incendios

TABLA III  
DETALLE DE PRODUCTOS DE MODIS

<b>Nombre del producto</b>	<b>MODIS Terra Prod ID</b>	<b>MODIS Aqua Prod ID</b>
Anomalías Térmicas/Incendio Diario L3 Global 1 km	MOD14A1	MYD14A1
Anomalías Térmicas/Incendio 8 Días L3 Global 1 km	MOD14A2	MYD14A2

Nota: Detalle de los productos de MODIS: Anomalías Térmicas/Incendios [64].

Ejemplo en la **Fig. (1) y (2)** de Anomalías Térmicas/Incendio, de Australia. El agua está representada con el color azul, las nubes de color violeta, las áreas sin incendios de color gris y los píxeles de color blanco representan los incendios. En este caso los píxeles que se encuentran de color negro se deben a la carencia de datos.

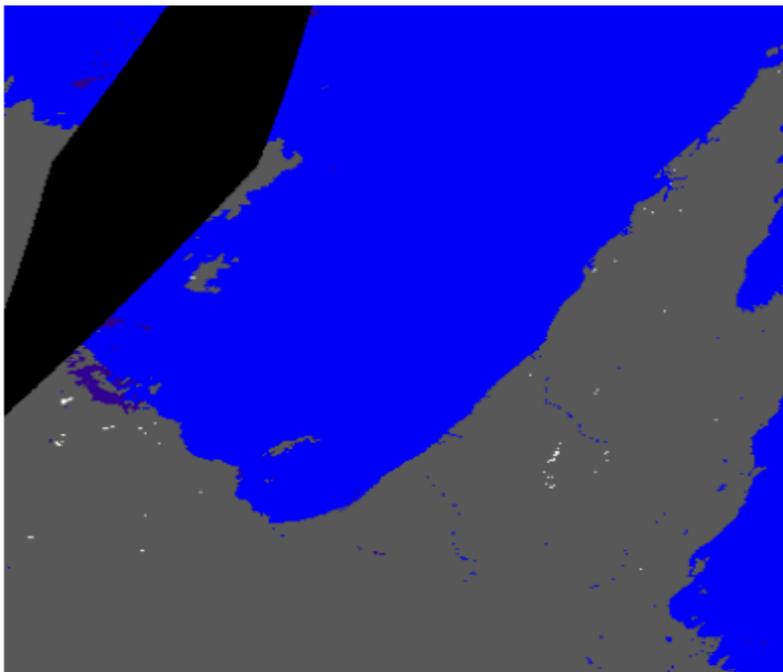


Fig. 1. Imagen del producto de MODIS: MOD1A1 de Anomalías Térmicas/Incendios del 04 de septiembre de 2011, Australia.

Nota: Productos contra incendios compuestos diarios de 8 días de nivel 3: MOD14A1 (Terra) [65].

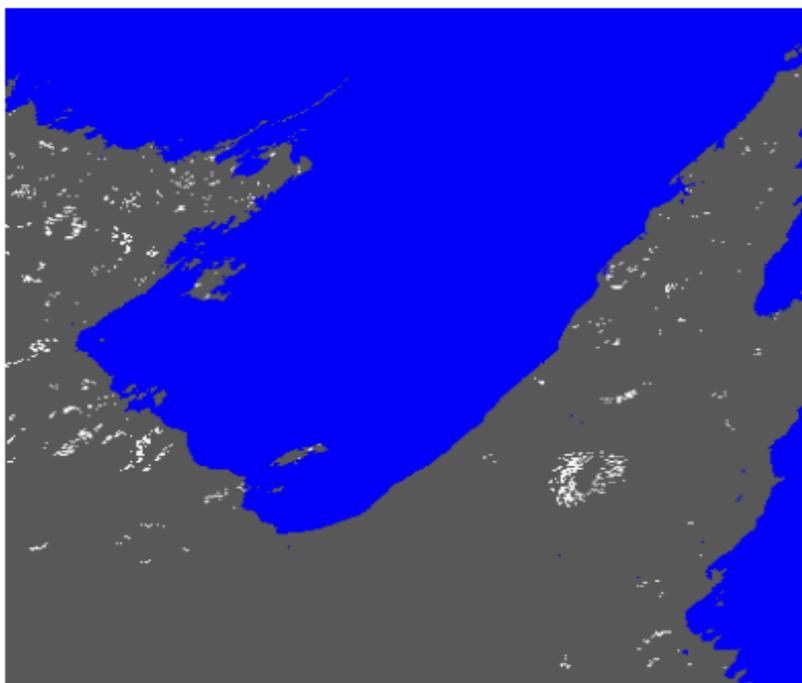


Fig. 2. Imagen del producto de MODIS: MOD14A2 de 8 días del 29 de agosto al 5 de septiembre de 2011, Australia

Nota: Productos contra incendios compuestos diarios de 8 días de nivel 3: MOD14A1 (Terra) [65].

Los datos del Terra-MODIS de anomalías terminas/incendios 8 days MOD14A2v061 y del Aqua-MODIS 8 days MYD14A2v061, generan a una resolución espectral de 1 km donde encontramos dos capas visibles **TABLA IV** al momento de descargar las imágenes satelitales.

TABLA IV  
CAPAS Y VARIABLES DEL MODIS

Nombre de SDS	Descripción	Rango válido
<b>Fire Mask</b>	Confianza en el fuego	1 a 9
<b>QA</b>	Indicadores de calidad de píxeles	0 a 6

Nota: Capas y variables del producto de MODIS: MYD14A2v061 [65]

La capa utilizada para la identificación del incendio es la de la máscara de fuego (Fire Mask) donde nos da un rango valido de 1 a 9, cada uno de estos valores representa una categoría en específico que describe el estado del pixel en relación a si hay o no presencia de fuego, **TABLA V**.

TABLA V  
CLASE DE PÍXELES DEL PRODUCTO DE MODIS DE ANOMALÍAS TÉRMICAS/INCENDIOS

<b>CLASES DE PÍXELES DE MOD14A2-MYD14A2 FIRE MASK</b>	
Valor	Descripción
0	No procesado (faltan datos de entrada)
1	No procesado (obsoleto; no utilizado desde la Colección 1)
2	No procesado (otro motivo)
3	Píxel de agua sin fuego
4	Nube (tierra o agua)
5	Píxel de tierra sin fuego
6	Desconocido (tierra o agua)
7	Fuego (baja confianza, tierra o agua)
8	Fuego (confianza nominal, tierra o agua)
9	Fuego (alta confianza, tierra o agua)

Nota: clase de píxeles del producto de MODIS de anomalías térmicas/incendios "FIRE MASK" [65].

### E. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El Índice de vegetación de diferencia normalizada es una medida utilizada para evaluar la salud y densidad de la vegetación en la superficie terrestre con datos de imágenes satelitales. Este índice se calcula a partir de la reflectancia de la luz en dos bandas espectrales, generalmente en el rango del rojo y el infrarrojo cercano, que son sensibles a la clorofila presente en las hojas de las plantas [56].

El NDVI se calcula mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (3)$$

Ecuación 3. Formula del NDVI

Donde:

- NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.
- Red es la reflectancia en la banda roja.

Dicho esto, el NDVI proporciona un valor numérico que varía entre -1 y 1. Los valores más altos de NDVI indican una mayor densidad y salud de la vegetación, mientras que los valores más bajos están asociados con áreas de suelo desnudo, cuerpos de agua u otras formas de cobertura no vegetal [66].

El NDVI se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluida la monitorización de la salud de los cultivos agrícolas, la evaluación de la degradación del suelo, la detección de cambios en la cobertura vegetal y la modelización de la distribución de la vegetación en diferentes escalas espaciales y temporales [66].

Una de las ventajas del NDVI es su capacidad para proporcionar información sobre la vegetación a escala global y regional utilizando datos de imágenes satelitales, lo que permite monitorear y evaluar la distribución y la dinámica de la vegetación en áreas extensas de manera eficiente y asequible [56].

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el NDVI tiene algunas limitaciones, incluida su sensibilidad a factores como la contaminación atmosférica, la geometría de iluminación y la presencia de otras formas de cobertura terrestre que pueden afectar la precisión de las estimaciones de la vegetación [56].

### *F. Fenología*

Los cambios estacionales en la vegetación han llamado el interés del ser humano desde tiempos históricos. De manera periódica observamos como la vegetación de los ecosistemas tienen ligeros cambios en su aspecto en diferentes tipos de estaciones y este fenómeno se repite casi de manera igual cada año [67]. En este contexto es donde nace la fenología la cual está encargada en estudiar el comportamiento de la vegetación a lo largo de una serie de tiempo en todas sus fases (foliación, floración y fructificación), relacionándolos con cambios tanto de origen bióticos (fauna herbívora, polinizadores, comedores de fruta, etc.) y abióticos (temperatura, precipitación, cantidad de radiación solar, entre otros) [67].

La vegetación presenta un comportamiento espectral muy particular, que se encuentra determinado en gran parte por el dosel, en función de su estado fenológico, contenido de humedad y la densidad de la cobertura. Esto nos permite distinguir entre dos estados de la vegetación: el primero hace referencia a una fase de crecimiento donde el desarrollo de la vegetación es óptimo y vigorosa, y la otra la fase de senescencia donde la vegetación se seca [67].

El NDVI si bien no es un buen indicador para estimar la cantidad fotosintética [68]. El NDVI se encuentra asociado elocuentemente al índice de área foliar y a la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada, en donde la fenología de la cubierta vegetal también se encuentra relacionada al NDVI por lo cual es posible analizar la fenología de un ecosistema a través de una serie temporal donde se podrán observar diferentes etapas del ciclo fenológico del ecosistema [69].

Las series temporales de NDVI nos facilitan en análisis cuantitativo de los cambios fenológicos que un ecosistema haya sufrido, por ejemplo, en la **Fig. 3** se observa una serie temporal de NDVI de un periodo de tiempo de 3 años (1997 a 1999), la pendiente positiva de la curva en su fase ascendente se relaciona con la fase de crecimiento y producción de biomasa, mientras que la pendiente negativa o descendente se presenta la fase de maduración, senescencia y caída del follaje [67].

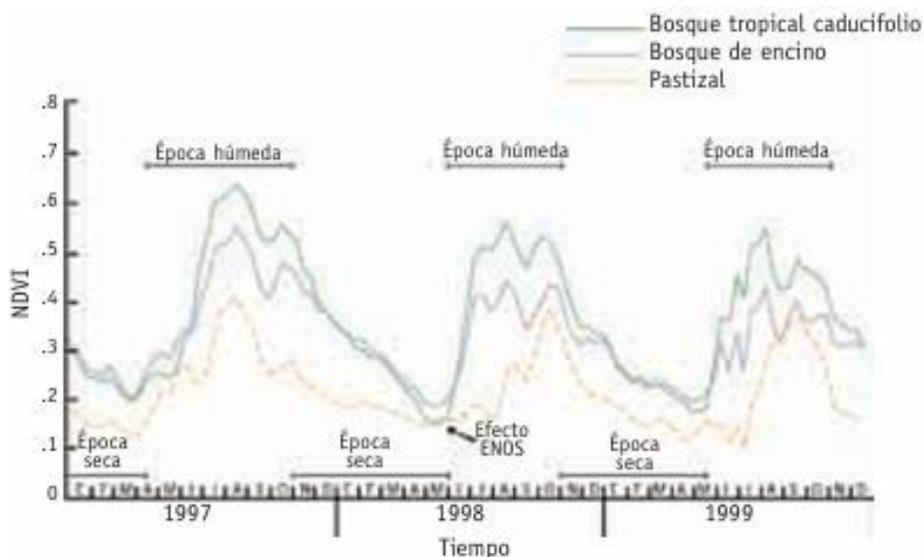


Fig. 3. Patrones fenológicos de diferentes comunidades vegetales de la región central de México

Nota: Patrones fenológicos de diferentes comunidades vegetales de la región central de México, obtenidos a partir de las series de tiempo NDVI-AVHRR para el periodo 1997 a 1998 [67].

### G. Rango relativo.

El rango relativo funciona como un indicador de estacionalidad, en donde se define la diferencia entre el valor mínimo y el máximo de cada índice o periodo de interés, dividida por su integral anual. [70]. Esta métrica permite realizar comparaciones de estacionalidad y es sensible a falsos rangos debidos a "outliers" [71]. Al reflejar las fluctuaciones en la vegetación, el rango relativo es una herramienta útil para identificar cambios significativos en el ecosistema a lo largo del tiempo [71].

Los valores máximos se especializan en los suelos pobres o de recursos limitados, detectando cambios en su uso de suelo, como el uso de fertilizantes o humedecimiento del suelo [72]. En cambio, los mínimos son muy perceptivos al cambio de vegetación natural, especialmente por cultivos [72]. Esta característica describe la variación intra-anual del NDVI, el cual captura los patrones de crecimiento, desarrollo y declive de la vegetación, lo cual nos permite la variación de la productividad primaria anual [72].

La integral anual de NDVI es una medida que suma los valores de NDVI a lo largo de un año para proporcionar una estimación de la productividad total de la vegetación en ese período, la cual se obtiene mediante la suma de los productos entre la multiplicación del NDVI mensual y la proporción del año que haya cubierto ese mes [73].

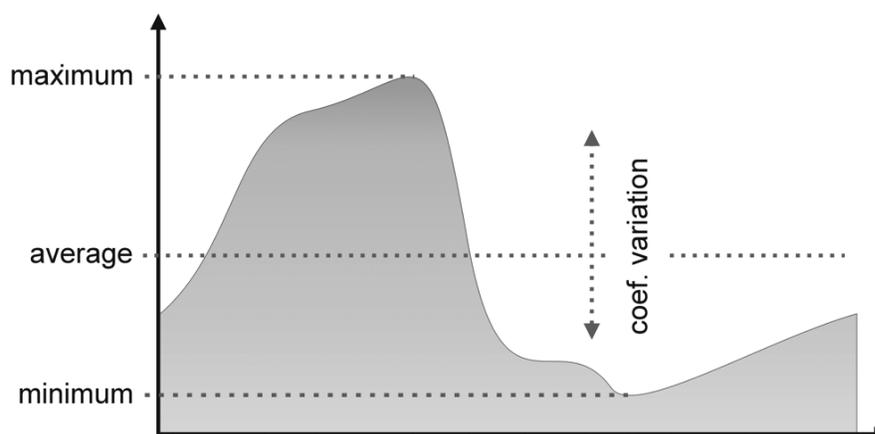


Fig. 4. Cálculo de tendencias de NDVI para un año típico de un bosque caducifolio

Nota: Esquema del comportamiento del NDVI para un año típico de un bosque caducifolio, mostrando las variables seleccionadas para describir los cambios funcionales [73].

#### H. Series temporales

Las series temporales son el resultado de la recopilación de datos, ordenados cronológicamente, lo que permite obtener tendencias desde el punto de vista del comportamiento de la información en un momento específico del tiempo [74]. Al poder determinar estas tendencias, se permite el análisis del comportamiento de la vegetación en términos de incremento o descenso de la actividad [74].

Las series temporales de NDVI de alta calidad son fundamentales para la fenología de la vegetación, el monitoreo dinámico y el cambio global [75]. Desde la década de 1960, los productos NDVI derivados de AVHRR (Radiómetro avanzado de muy alta resolución), MODIS (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) y SPOT-VEGETATION han proporcionado series temporales de NDVI de resolución moderada a baja a nivel mundial y han sido de gran importancia en diversos estudios científicos [75].

Sin embargo, estas suelen verse afectada por dos factores: el ruido (suele ser provocada por contaminación atmosférica o de inconsistencias en las geometrías del sensor, el objetivo y el sol) y los valores faltantes o lagunas (se debe a la nubosidad, sensores defectuosos y observaciones ausentes en las imágenes) [76].

## VII. METODOLOGÍA

### A. Descripción del área de estudio

La cuenca del río Casacay como se observa en la **Fig. 5** se encuentra en la parte sur del Ecuador en los cantones de Pasaje y Chilla pertenecientes a la provincia de El Oro. Cuenta con una superficie de 12.193 ha, y su altitud oscila desde los 60 m.s.n.m. hasta los 3550 m.s.n.m.

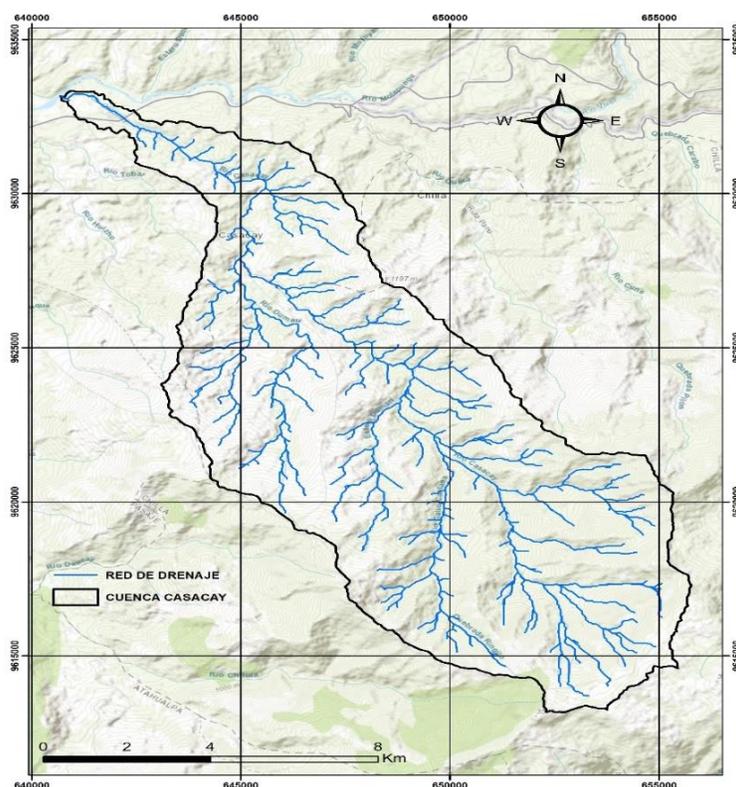


Fig. 5. Subcuenca del río Casacay.

La cuenca representa un área de gran importancia, debido a los servicios ecosistémicos que ofrecen, en lo que destaca el servicio de aprovisionamiento de agua potable para los cantones de Machala, Pasaje y El Guabo. Sin embargo, nuestra investigación no se centra en toda la cuenca, si no en una parte en específico, la cuenca alta (**Fig. 6**), esto debido a que mediante la revisión bibliográfica se determinó que, durante el periodo de estudio, el mayor número de incendios forestales se centran en la cuenca alta.

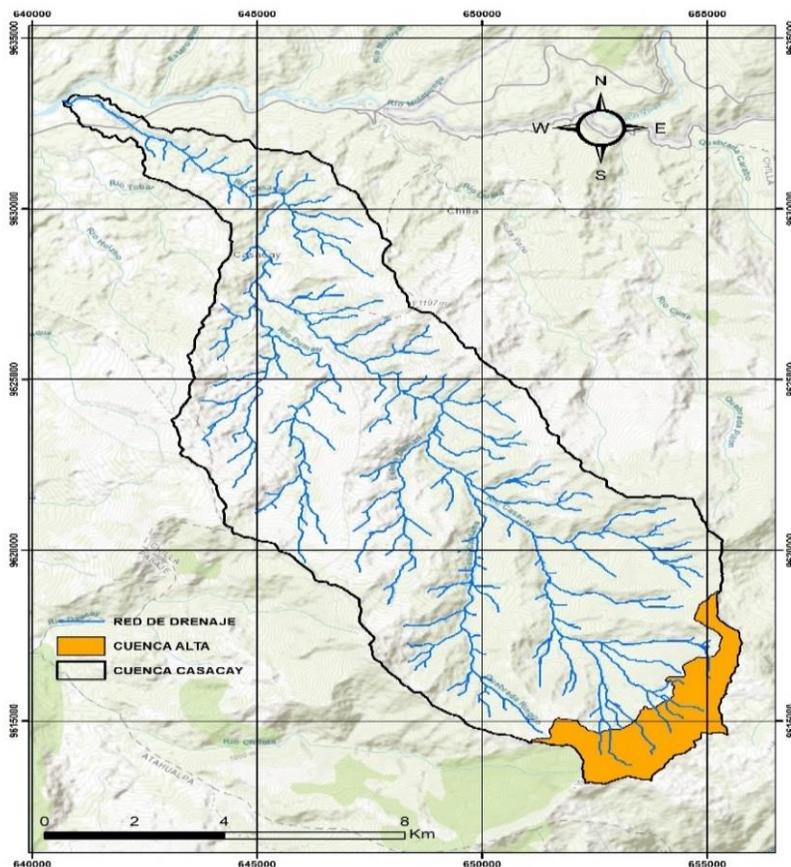


Fig. 6. Cuenca alta del río Casacay.

### B. Materiales y métodos

La metodología adoptada en esta investigación comenzó con una revisión bibliográfica, enfocada en la recopilación exhaustiva de información de las fechas de eventos de incendios forestales ocurridos en la cuenca del río Casacay.

A través de la evaluación de esta información se obtuvo información detallada de las fechas de incendios forestales, que incluye su distribución temporal y geográfica, en la que se analizaron factores de frecuencia, intensidad, ocurrencia, entre otros. Además, se buscó analizar la recuperación del ecosistema posterior al incendio y su estado actual mediante las visitas de campo.

Luego, se realizó la extracción de datos e imágenes satelitales a través de la plataforma Google Earth Engine y Earth Explorer, en función a los criterios específicos de resolución temporal y espacial obtenidos en la revisión bibliográfica. Esto para una posterior correlación de datos con los eventos de incendio y la evaluación cuantitativa del impacto ambiental generado. A

continuación, en la **Fig. 7**, se presenta el diagrama de flujo para ilustrar el proceso de cómo realizamos nuestra respectiva investigación.

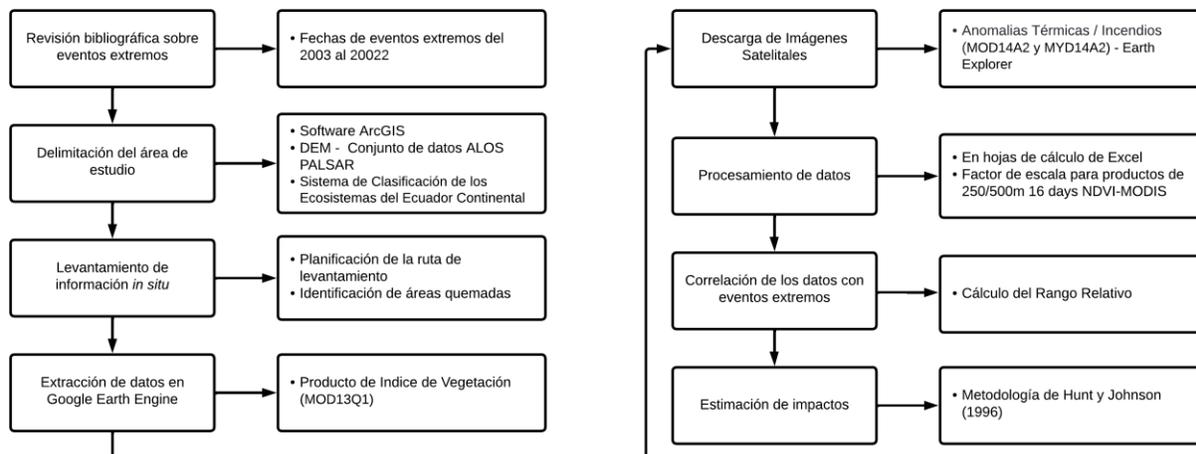


Fig. 7. Diagrama de flujo de los procesos empleados.

### 1) *Revisión bibliográfica sobre eventos de incendios forestales*

Para poder identificar los eventos extremos en la cuenca alta del río Casacay se utilizó la plataforma de “Fire Information for Resource Management System” de la NASA, donde gracias a su interfaz se identificó el número de eventos de quemas que ocurrieron en la cuenca alta, el año, el mes del evento.

### 2) *Delimitación del área de estudio*

La delimitación del área de estudio se realizó con la ayuda de un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido en la plataforma de “Alaska Satellite Facility” con el conjunto de datos de ALOS PALSAR. Para poder hacer la delimitación de la subcuenca del río Casacay se utilizó el archivo “Dem” en el software ArcMap versión 10.4.1. **Fig. 8.**

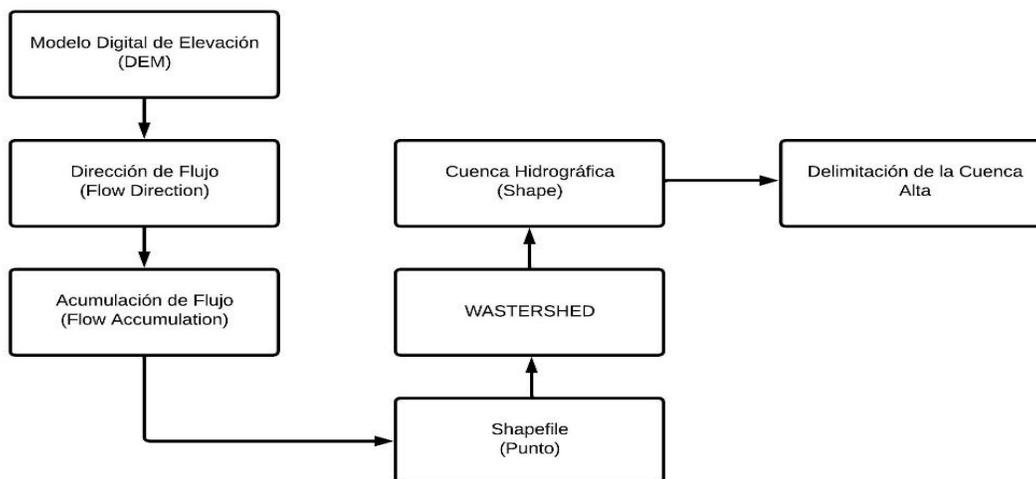


Fig. 8. Diagrama de flujo para la obtención de los límites de la Cuenca Casacay.

### a) Dirección de flujo

Con la ayuda de la caja de herramientas del software, una vez insertado del Dem el siguiente paso fue obtener la capa ráster de la dirección de flujo el Flow Direction: ArcToolBox > SAT > Hydrology > Flow Direction, como resultado se muestra en la **Fig. 9**.

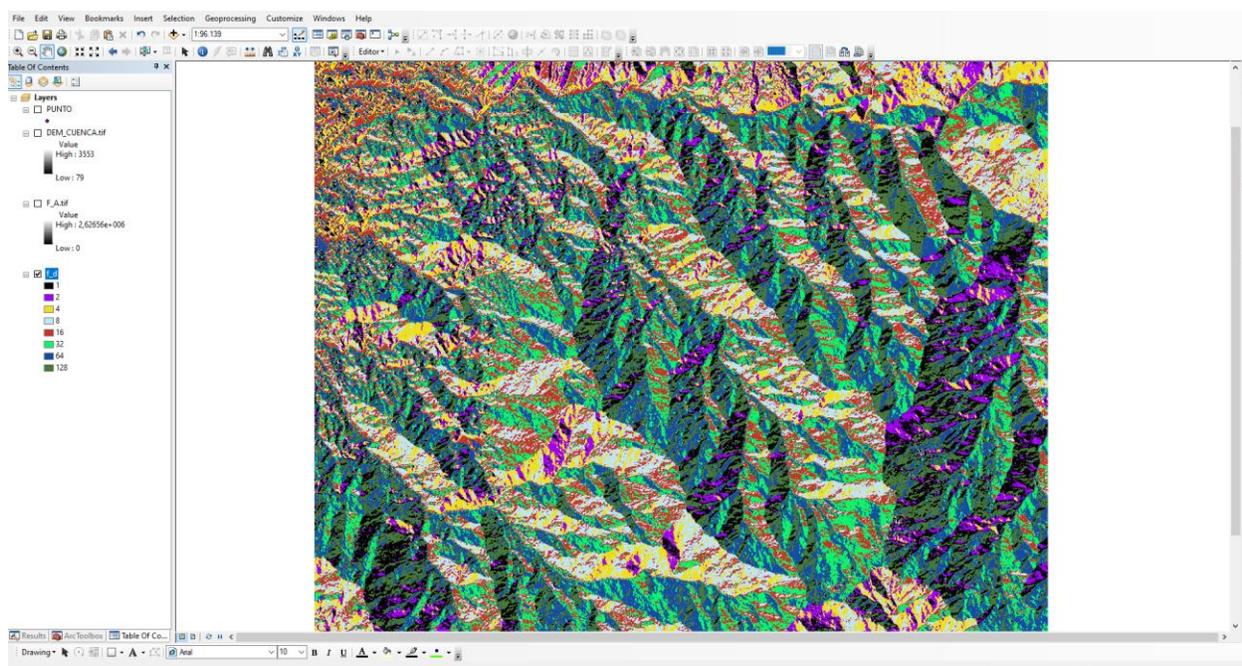


Fig. 9. Flow Direction de la cuenca del río Casacay.

### b) Acumulación de flujo

La generación del ráster de la acumulación de flujo se obtuvo a partir del ráster creado anteriormente de dirección de flujo, para ello se utilizó la caja de herramientas ArcToolBox > SAT > Hydrology > Flow Accumulation donde se obtuvo como resultado la **Fig. 10**.

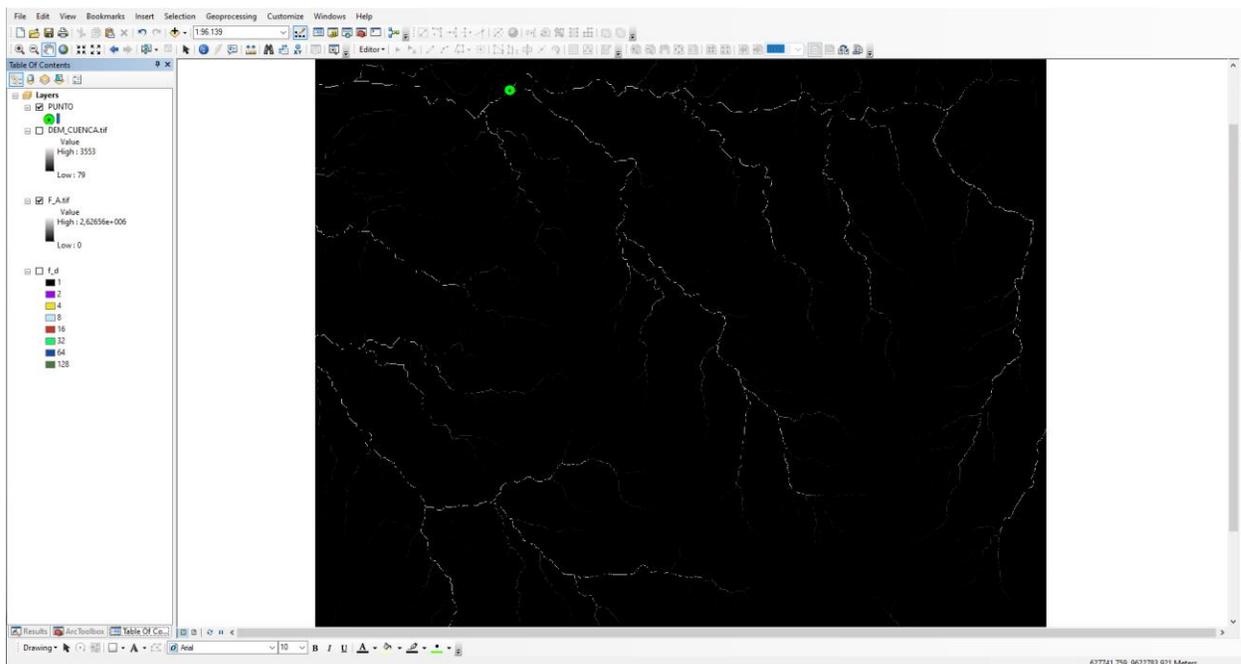


Fig. 10. Flow Accumulation de la cuenca del río Casacay.

### c) Generación de la cuenca hidrográfica

El proceso para la generación de la cuenca hidrográfica del río Casacay se utilizó la caja de herramientas mediante el algoritmo “watershed” donde una vez de haber generado previamente el ráster de Flow direction y un Shapefile de punto, el cual colocando los dos productos nos ayudó obtener la cuenca en ráster y poderlo convertir en formato \*.shp **Fig. 11**.

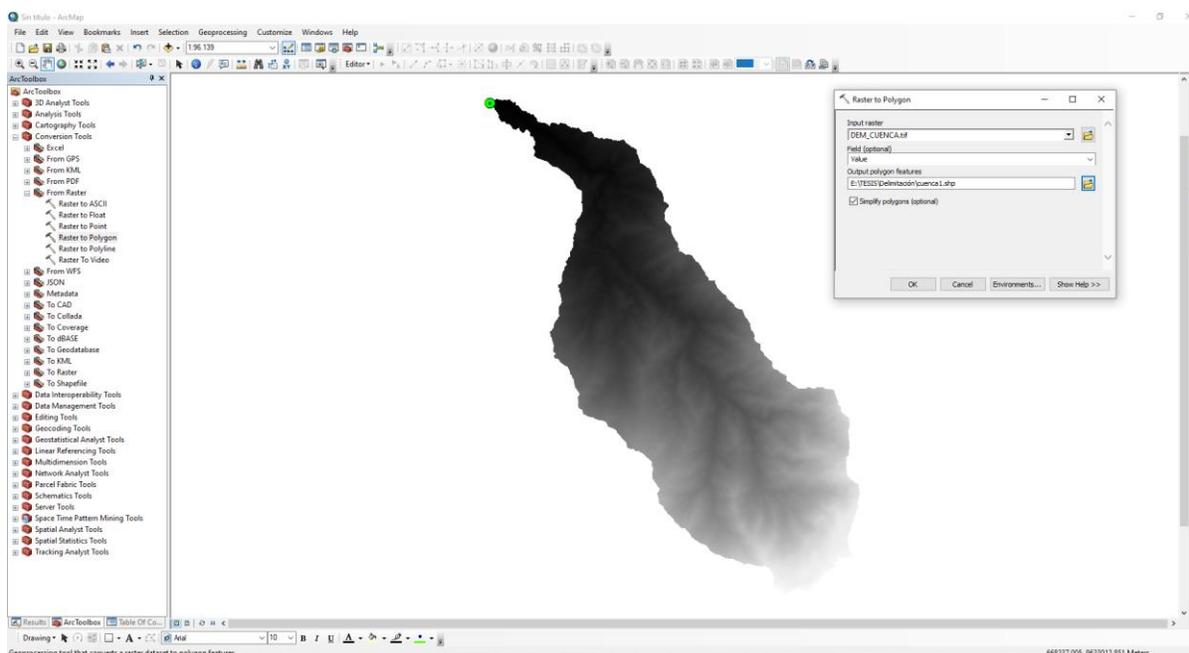


Fig. 11. Raster de la cuenca del río Casacay.

#### d) Delimitación de la cuenca alta

En la delimitación de la cuenca alta del río Casacay se utilizó dos herramientas, el archivo DEM para generar curvas de nivel y el Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental elaborado por el Ministerio del Ambiente donde se puede identificar los ecosistemas de la subcuenca.

Esta información permitió delimitar el área de estudio. Además, de acuerdo con el sistema de clasificación de ecosistemas del Ecuador continental, se consideró que el Bosque Siempreverde Montano Alto de Catamayo - Alamor se sitúa sobre los 2900 m.s.n.m., formando parte de la cuenca alta del río Casacay [32].

#### 3) Levantamiento de información *in situ*

En este proceso tras haber hecho una evaluación de la cuenca alta hemos identificado según los datos propuestos por [12], cuatro puntos de quema, localizados en los sectores de Rusiacocha y Chilola, como se observa en la Ilustración 12. Una vez identificado los puntos, se realizó una visita *in situ* para evaluar el estado actual de cada punto y se tomaron nuevas coordenadas de cualquier zona que continúe afectada o haya sido afectada por eventos similares, con la finalidad de tener un registro actualizado de la situación en el área de estudio, **TABLA V**.

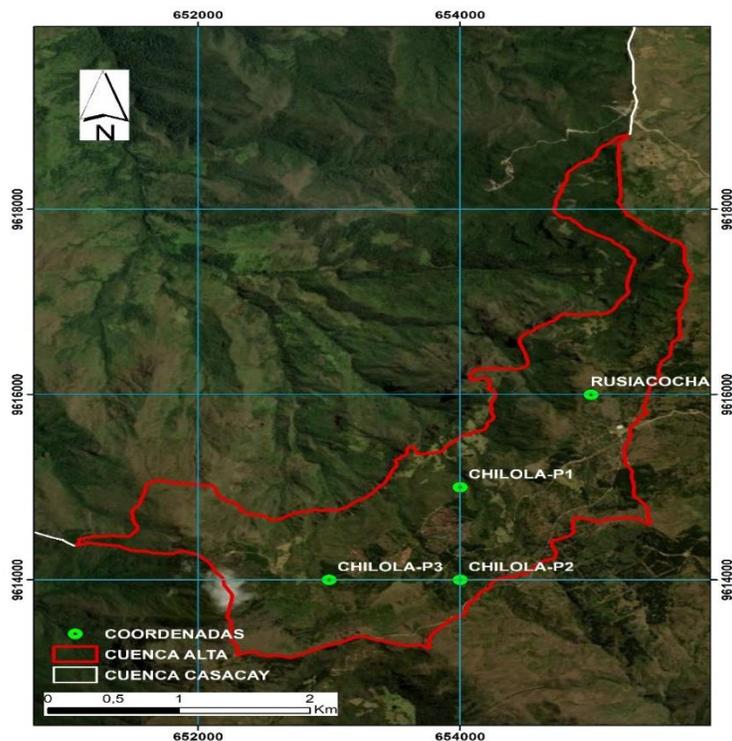


Fig. 12. Coordenadas de eventos extremos: Chilola y Rusiacocho

Nota: coordenadas de eventos de incendios forestales en Chilola y Rusiacocho [12]

TABLA VI  
COORDENADAS DE EVENTOS CHILOLA Y RUSIACOCHA

Coordenadas		Sector
X	Y	
654000	9615000	Chilola – P1
654000	9614000	Chilola – P2
653000	9614000	Chilola – P3
655000	9616000	Rusiacocho

Nota: coordenadas de eventos de incendios forestales en Chilola y Rusiacocho [12]

#### 4) Extracción de datos en Google Earth Engine

##### a) Creación de mallado y puntos de sondeo

Para la generación del mallado y los puntos de sondeo se utilizó el software de ArcGIS y su la caja de herramientas de ArcToolbox siguiendo el siguiente proceso, ArcToolbox > Data Management Tools > Sampling > Create Fishnet, ver **Fig. 13**.

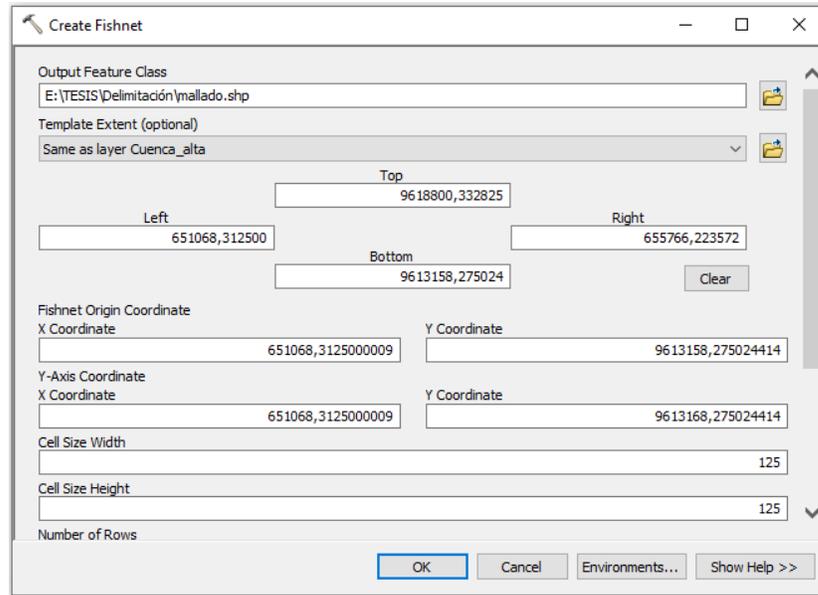


Fig. 13. Generación de mallado y puntos de sondeo.

Al ser de una resolución espectral de 250 m el producto de Índice de Vegetación de MODIS, se utilizó un tamaño de las celdas en la creación del mayado y los puntos de sondeo de 125 metros, por último, se hace el recorte de los puntos de sondeo con el archivo formato \*.shp de la cuenca alta para la extracción de los puntos de solo el área de estudio, ver **Fig. 14**.

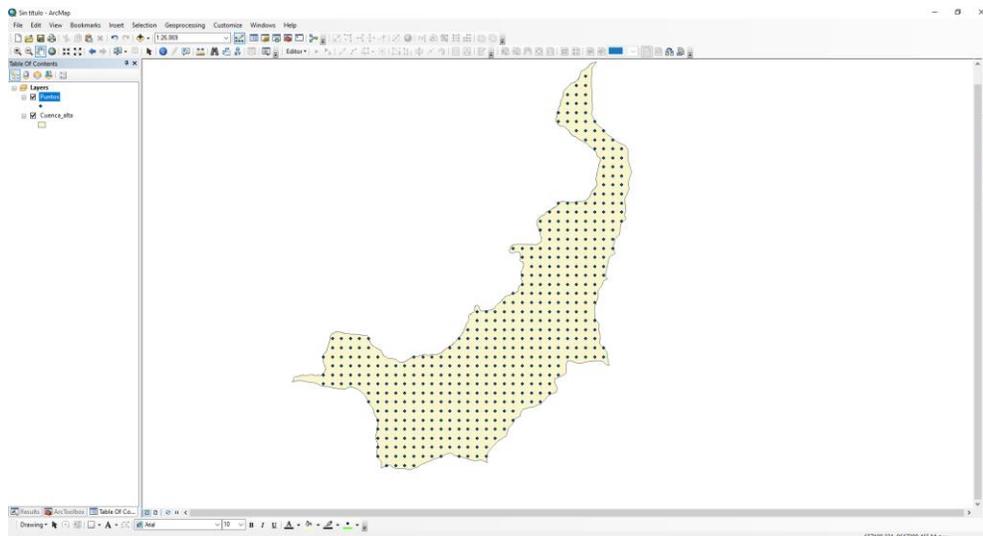


Fig. 14. Puntos de sondeo de la cuenca alta del río Casacay.

*b) Obtención de datos*

Para la obtención de los datos, una vez de haber generado los puntos de sondeo, se los subió a la nube de la plataforma de Google Earth Engine, tanto los puntos como el área de estudio por separado. Para cargar los dos productos entramos a la opción de Assets > New > Shape Files, seleccionamos todos los archivos con la excepción del archivo terminado en “.sbx” y le damos Upload, ver **Fig. 15**.

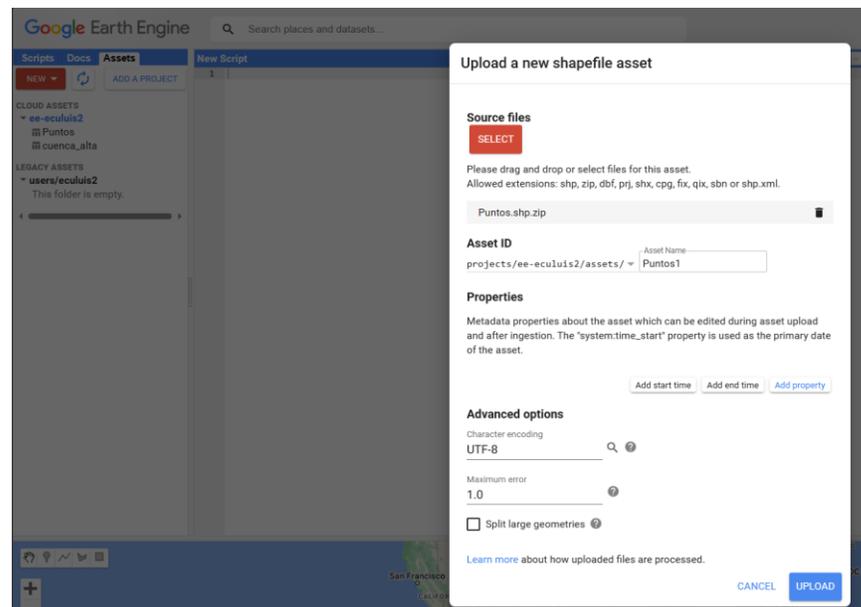


Fig. 15. Subida de productos en la plataforma de Google Earth Engine.

*c) Índice de vegetación*

En la obtención del Índice de Vegetación se utilizó el producto de MODIS “MOD13Q1v061”. Como se observa en la **Fig. 16** se ocupó un “script” para obtener los valores del índice de vegetación, en un periodo de tiempo en específico que va desde el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2022. La cantidad de datos de la variable de NDVI que se obtuvieron en la cuenca alta del río Casacay fue de 116640.

```

NDVI-Mensual
1 // Importar el Shape de puntos
2 var puntos = ee.FeatureCollection('projects/ee-eculuis2/assets/Puntos');
3 print('puntos', puntos);
4 Map.addLayer(puntos, null, 'puntos');
5 Map.centerObject(puntos, 5);
6
7 // Importar el Producto de MODIS y seleccionar el periodo de estudio
8 var MOD13Q1 = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD13Q1')
9   .select('NDVI')
10  .filterDate('2003-01-01', '2022-12-31');
11
12 // Funcion para reducir la resolucio temporal a compuesto mensual
13 var años = ee.List.sequence(2003,2022,1);
14 print('lista de años', años);
15 var meses = ee.List.sequence(1,12,1);
16 print('lista de meses', meses);
17
18 var CompMens = ee.ImageCollection(
19   años.map(function(y) {
20     return meses.map(function(m){
21       var start = ee.Date.fromYMD(y, m, 1)
22       var stop = start.advance(1, 'month')
23
24       return MOD13Q1
25         .filterDate(start, stop)
26         .mean()
27         .rename('NDVI_Mensual')
28         .set({'system:time_start': start.millis(), 'fecha': ee.Date(start.millis())});
29     });
30   }).flatten()
31 );
32 print('Total de imagenes en el periodo seleccionado', MOD13Q1.size(), 'Numero de imagenes mensuales', CompMens.size())
33
34 // Funcion para agregar las fechas de exportación
35 var addDate = function(image) {
36   var year = ee.Date.constant(ee.Date(image.get('fecha')).get('year')).rename('anio')
37   var month = ee.Date.constant(ee.Date(image.get('fecha')).get('month')).rename('mes')
38   return image.addBands(year). addBands(month)
39 }
40
41 // Agregar banda de mensual
42 var CompMensDate = CompMens.map(addDate)
43
44 // Funcion para extraer puntos en bucle
45 var datos = CompMensDate.map(function(i){
46   return i.reduceRegions(puntos, 'first', 463.3127165275)
47 })
48
49 var extract = ee.FeatureCollection(datos.flatten());
50
51 // Exportar resultados en formato CSV
52 Export.table.toDrive({
53   collection: extract,
54   folder: 'resultadosNDVI',
55   description: 'NDVI_mensual',
56   fileFormat: 'CSV'
57 });
58

```

Fig. 16. Script de NDVI mensual del periodo de 2003 a 2022.

## 5) Descarga de imágenes satelitales

### a) Anomalías térmicas/incendios

En la obtención de las anomalías térmicas/incendios se utilizó el producto de MODIS “MOD14A2v061” y “MYD14A2v061”, utilizando la plataforma de “Earth Explorer” del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

Las imágenes de las Anomalías térmicas/incendios se descargaron de manera manual, haciendo una búsqueda sistemática de las imágenes con las fechas donde ocurrieron los incendios forestales en la cuenca alta del río Casacay.

### b) Procesamiento de datos

Obtenidos los datos de los productos de MODIS, se procesaron en una hoja de cálculo de Excel. Existen valores que no se encuentran dentro del rango del -1 al 1, por lo que se necesita un factor de escala para la corrección de los datos de NDVI obtenidas anteriormente.

Por lo que se debe multiplicar todos estos datos por un factor de escala de 0.0001 para los productos de 250/500m 16 days NDVI [63], **TABLA VII.**

TABLA VII  
CORRECCIÓN DE DATOS APLICANDO EL FACTOR DE ESCALA DEL NDVI

NDVI_Mensual	Factor De Escala	Conversión	Año	Mes
2173,50	0,0001	0,22	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1
2173,50	0,0001	0,22	2003	1
2173,50	0,0001	0,22	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1
3050,00	0,0001	0,31	2003	1

### 7) *Correlación de datos con eventos extremos*

Para la obtención del rango relativo del NDVI se utilizó la fórmula propuesta por [73]. Esta metodología mide la variabilidad intra-anual en productividad, lo que permite realizar comparaciones de estacionalidad, proporcionando una herramienta eficaz para evaluar cómo los incendios y otros factores afectan la consistencia de la vegetación a lo largo del tiempo [71]. Al analizar el rango relativo del NDVI, podemos identificar patrones de variación que indican cambios en la cobertura vegetal y entender mejor las dinámicas ecológicas post-incendio.

$$\text{Rango relativo de NDVI} = \frac{\text{Máximo de NDVI} - \text{Mínimo de NDVI}}{NDVI_I} \quad (4)$$

Ecuación 4. Rango relativo de NDVI

En donde  $NDVI_I$  significa la integral de NDVI, que está determinada por:

$$NDVI_I = \sum^n NDVI_i \times T_i \quad (5)$$

Ecuación 5. Integral de NDVI

En este caso:

- $n$ = Número total de composiciones por año
- $NDVI_i$ = Es la  $i$ th composición
- $T_i$ = Es la proporción de año cubierta por la  $i$ th composición.

#### 8) Estimación de impactos

Para evaluar cuantitativamente los impactos de los incendios forestales en la cuenca alta del río Casacay, se utilizarán tres criterios clave: frecuencia de aparición (F), probabilidad de pérdida de control (P) y severidad (S). Cada criterio se puntuará en una escala del 1 al 5, donde 1 indica el menor impacto y 5 el mayor. En la **TABLA VIII** se presentan las ponderaciones utilizadas y en la **TABLA IX** la categoría de los impactos.

TABLA VIII  
PONDERACIONES DE IMPACTOS DE INCENDIOS FORESTALES

	<b>Frecuencia de aparición</b>	<b>Probabilidad de pérdida de control</b>	<b>Severidad</b>
<b>1</b>	Muy rara (menos de una vez al año)	El incendio se controló en menos de un día (menos de 24 horas).	Rango Relativo (RR) $\leq 0.25$
<b>2</b>	Rara (una vez al año)	El incendio se controló entre 1 y 2 días.	$0.25 < RR \leq 0.50$
<b>3</b>	Ocasional (varias veces al año)	El incendio se controló entre 2 y 5 días.	$0.50 < RR \leq 0.75$
<b>4</b>	Frecuente (mensualmente)	El incendio se controló entre 5 y 7 días.	$0.75 < RR \leq 0.85$
<b>5</b>	Continua (semanalmente)	El incendio tardó más de 7 días en ser controlado.	$RR > 0.85$

TABLA IX  
CATEGORÍA DE LOS IMPACTOS

<b>Categoría de Impacto</b>	<b>Valores</b>
Impacto bajo	1 - 10
Impacto moderado	11 – 30
Impacto alto	31 - 50
Impacto extremo	>50

## VIII. RESULTADOS

### A. Revisión bibliográfica sobre eventos extremos

En la utilización de la plataforma de “Fire Information for Resource Management System” de la NASA se identificó seis eventos de quemas que interceptan dentro de la cuenca alta del río Casacay desde el año 2003 al 2022, posteriormente a esto se descargó las imágenes satelitales en la plataforma de Earth Explorer de los productos de MODIS de Anomalías Térmicas/Incendios: MOD14A2 y MYD14A2 de las fechas identificadas en la **TABLA X**.

TABLA X  
FECHAS DE LAS IMÁGENES SATELITALES MOD14A2V061 Y MYD14A2V061

<b>Fecha de los eventos</b>		<b>Fecha de las imágenes satelitales</b>
<b>Año</b>	<b>Mes</b>	
2003	Sep	27-Sep-2003
2005	Nov	2-Dic-2005
2012	Jul	3-Agos-2012
2012	Sep	12-Sep-2012
2017	Nov	16-Nov-2017
2020	Nov	07-Nov-2020

### B. Delimitación del área de estudio

Mediante la descarga del Modelo Digital de Elevación proporcionado por la plataforma de “Alaska Satellite Facility” con los conjuntos de datos de ALOS PALSAR se determinó la extensión y el perímetro de la subcuenca del río Casacay, posteriormente como se observa en la Ilustración

17 con base en la información del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica en su mapa interactivo del Ecuador y el Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental se determinó que la cuenca del río Casacay posee 6 tipos de ecosistemas.

El *Bosque Siempreverde Estacional de Tierras Bajas del Jama-Zapotillo* con 990,25 ha (8,12%), el *Bosque Siempreverde Estacional Piemontano Del Catamayo-Alamor* con 6218,9 ha (51%) siendo el *Ecosistema De Mayor Área, Bosque Siempreverde Montano Bajo Del Catamayo-Alamor* con 2650,98 ha (21,74%) siendo el segundo con mayor área, el *Bosque Siempreverde Montano Del Catamayo-Alamor* con 1581 ha (12,97%), *Bosque Siempreverde Montano Alto Del Catamayo-Alamor* con 605,99 (4,97%) y *Arbustal Siempreverde Y Herbazal Del Páramo* con 145,88 ha (1,2 %) siendo el ecosistema con menor área dentro de la cuenca del río Casacay, **TABLA XI.**

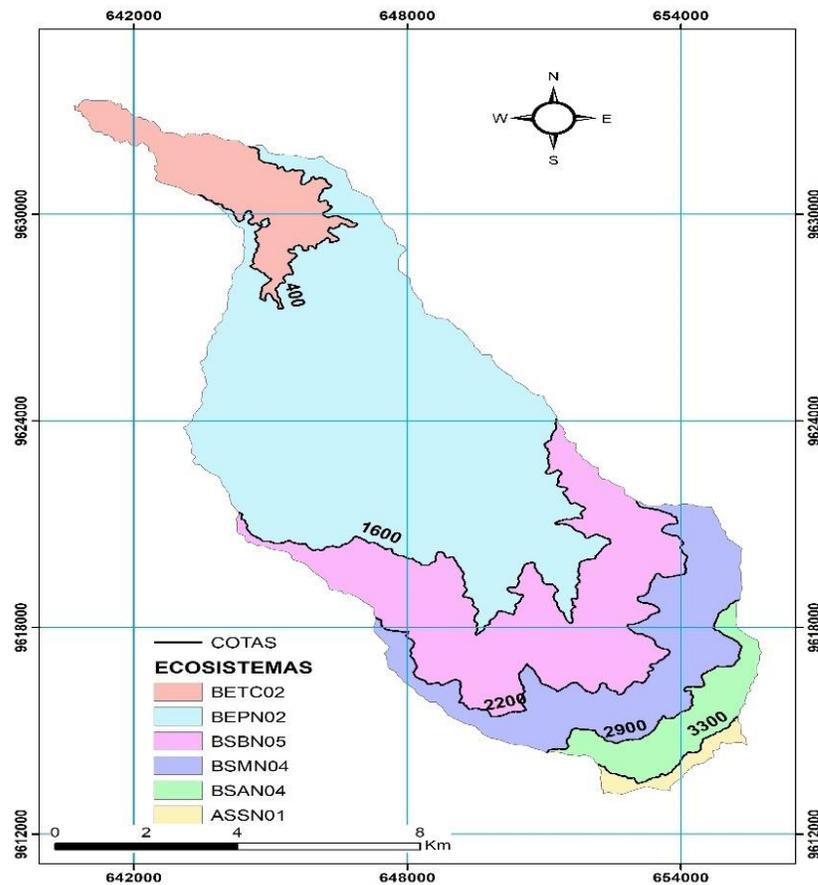


Fig. 17. Ecosistemas de la cuenca del río Casacay

TABLA XI  
ECOSISTEMA DE LA CUENCA DEL RÍO CASACAY CON SU ÁREA

ECOSISTEMAS	CODIGO	ÁREA (ha)	PORCENTAJE (%)
Bosque Siempreverde Estacional De Tierras Bajas Del Jama-Zapotillo	BETC02	990,25	8,12
Bosque Siempreverde Estacional Piemontano Del Catamayo-Alamor	BEPN02	6218,9	51
Bosque Siempreverde Montano Bajo Del Catamayo-Alamor	BSBN05	2650,98	21,74
Bosque Siempreverde Montano Del Catamayo-Alamor	BSMN04	1581	12,97
Bosque Siempreverde Montano Alto Del Catamayo-Alamor	BSAN04	605,99	4,97
Arbustal Siempreverde Y Herbazal Del Paramo	ASSN01	145,88	1,2

En cuanto a la cuenca alta (**Fig. 18**) se estableció que comienza desde los 2900 m.s.n.m donde encontramos dos ecosistemas el Bosque Siempreverde Montano Alto del Catamayo-Alamor y el Arbustal Siempreverde y Herbazal del Páramo dando como resultado una extensión de la cuenca de 751,87 ha o 6,17% del área de toda la cuenca del río Casacay, **TABLA XII**.

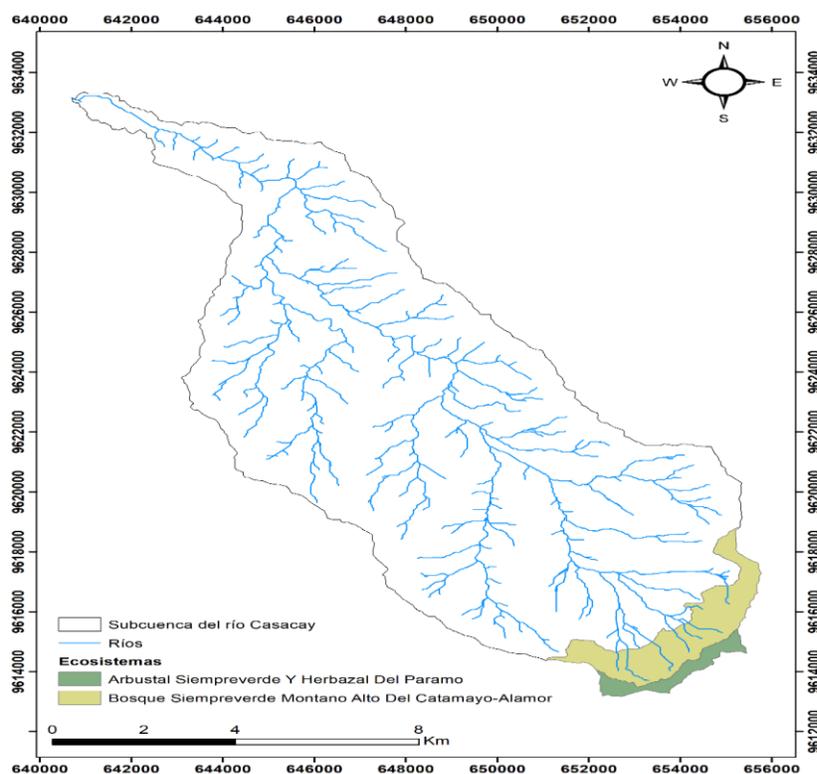


Fig. 18. Cuenca alta del río Casacay

TABLA XII  
ECOSISTEMAS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY

	ECOSISTEMAS	ÁREA (ha)	Porcentaje (%)
CUENCA ALTA	Bosque Siempreverde Montano Alto Del Catamayo-Alamor	605,99	4,97
	Arbustal Siempreverde Y Herbazal Del Paramo	145,88	1,2

*C. Levantamiento de información In situ*

De acuerdo con el estudio de [12], hay cuatro puntos de quema dentro de la cuenca alta del río Casacay, por lo que se realizó una visita *In Situ* de los puntos identificados. El objetivo principal de la visita fue la verificación del estado actual de estas zonas que fueron afectadas por el fuego. Durante la visita, se evaluaron las condiciones de la vegetación, además, se identificaron otros puntos de afectación (**Fig. 19**), que no se detectaron inicialmente. El trabajo de campo permitió obtener información más detallada y actualizada del terreno, que se complementó a la información obtenida de imágenes satelitales y otras fuentes secundarias.

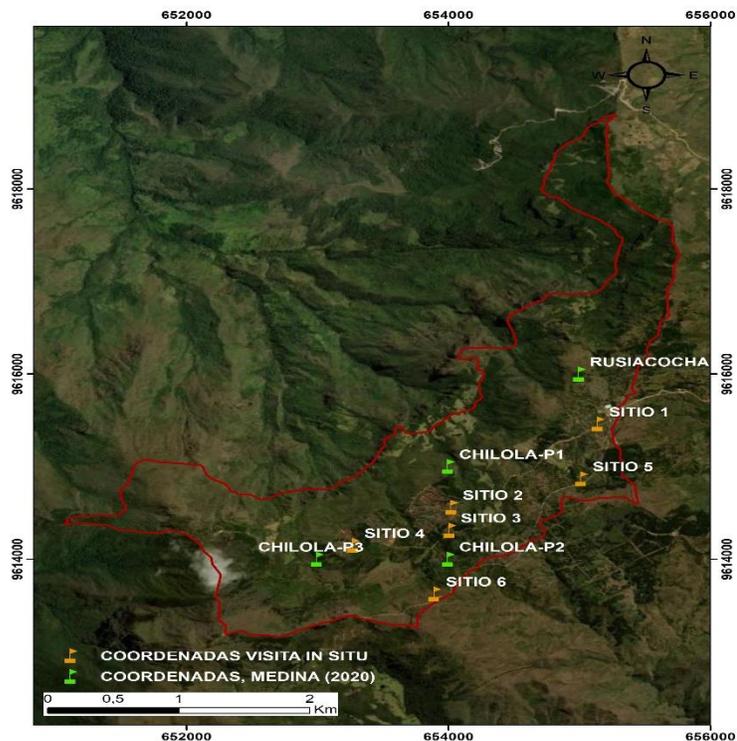


Fig. 19. Coordenadas de la visita In Situ a la cuenca alta del río Casacay

En la imagen se puede observar que se tomaron un total seis puntos nuevos de referencia de áreas quemadas. En el sitio 1, **Fig. 20** se observa un área en la que hubo un evento de quema, pero que ya se había recuperado. Sin embargo, se observó que el bosque de *Pinnus patula* había sido deforestada recientemente, además de que se podía observar el grado de afectación al suelo que había tenido el evento de quema.



Fig. 20. Toma de coordenada del sitio 1

En la **Fig. 21** se muestra el sitio 2 donde se pudo observar que, aproximadamente a unos 100 o 200 metros de la ladera, se encontraba un área que había sufrido un incendio, pero se observó que había ciertos individuos de *Pinnus patula* que estaban volviendo a brotar en el lugar.



Fig. 21. Toma de coordenadas del sitio 2

Para los sitios 3, 4, 5 y 6 se observó que aún quedaban residuos y cenizas a causa de los incendios, además de árboles que estaban despojados de hojas o calcificados debido al fuego. No se encontraba aún en el proceso de rebrote del *Pinnus patula*.

#### D. Extracción de datos Google Earth Engine

##### 1) NDVI

En la **TABLA XIII** se observa un ejemplo de los resultados obtenidos en la descarga de datos de NDVI con el producto de MODIS: MOD13Q1v061 de la plataforma de Google Earth Engine, donde en total se obtuvo 116640 datos de NDVI pertenecientes a la cuenca alta del río Casacay en los años del 2003 al 2022, dado que existen 486 puntos de sondeo cada 125 m.

TABLA XIII

DATOS DE LA VARIABLE DE NDVI OBTENIDOS DEL GOOGLE EARTH ENGINE PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY

System : index	Id	NDVI_Mensual	anio	mes	.geo
0_00000000000000000000	0	2173,5	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62818430804651 -3.4982602642720133]}
0_00000000000000000001	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62705840559742 -3.4982586104353053]}
0_00000000000000000002	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62593250368413 -3.498256955242823]}
0_00000000000000000003	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62480660230705 -3.4982552986945703]}
0_00000000000000000004	0	2173,5	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62931184809162 -3.497135055244167]}
0_00000000000000000005	0	2173,5	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62818594645086 -3.497133403296806]}
0_00000000000000000006	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62706004534543 -3.4971317499941064]}
0_00000000000000000007	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62593414477581 -3.497130095336069]}
0_00000000000000000008	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.6248082447424 -3.497128439322699]}
0_00000000000000000009	0	3050	2003	1	{"type":"Point","coordinates":[-79.62368681309974 -3.4971267885335364]}

## E. Descarga de imágenes satelitales

### 1) Anomalías terminas/incendios

En total se identificaron seis eventos de quema dentro de la cuenca alta del río Casacay, desde el 2005 hasta el 2022 donde, por ejemplo, en la **Fig. 22** muestra datos del producto de MODIS, MYD14A2v061 del satélite Aqua del 21 de septiembre de 2003, en donde se identifica la presencia e intensidad del incendio en la parte suroeste de la cuenca alta del río Casacay.

Los colores que se presentan en la leyenda indican las clases de pixeles que contiene la imagen, donde el valor de 7 a 8 representa baja confianza a confianza nominal de fuego y los valores de 8 a 9 representa confianza nominal a fuego de alta confianza.

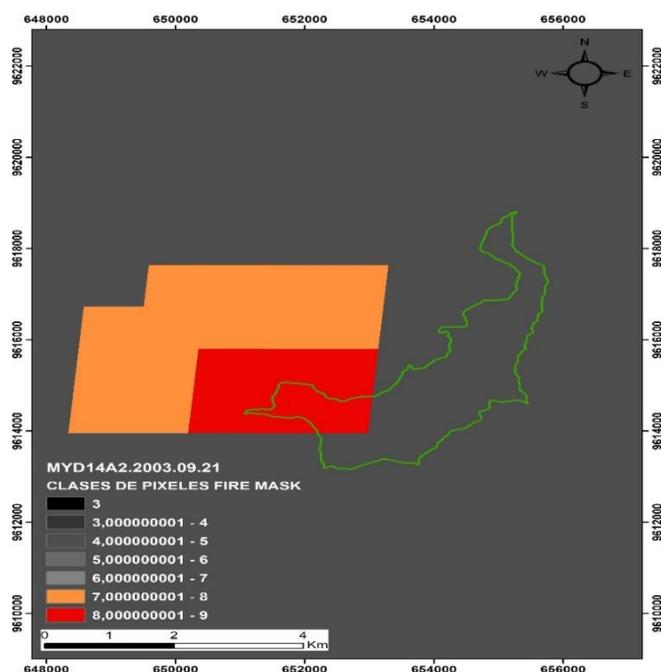


Fig. 22. Evento de quema de septiembre de 2003 cuenca alta de Casacay

En diciembre de 2005 (**Fig. 23**) el satélite Terra MOD14A2 y Aqua MYD14A2 registraron otro evento de quema donde el satélite Terra registró valores de 7 a 8 representando baja confianza a confianza nominal de fuego, no obstante, el satélite Aqua registraría más adelante valores de 8 a 9 dándonos a conocer que en esos píxeles de color rojo hubo fuego de alta confianza.

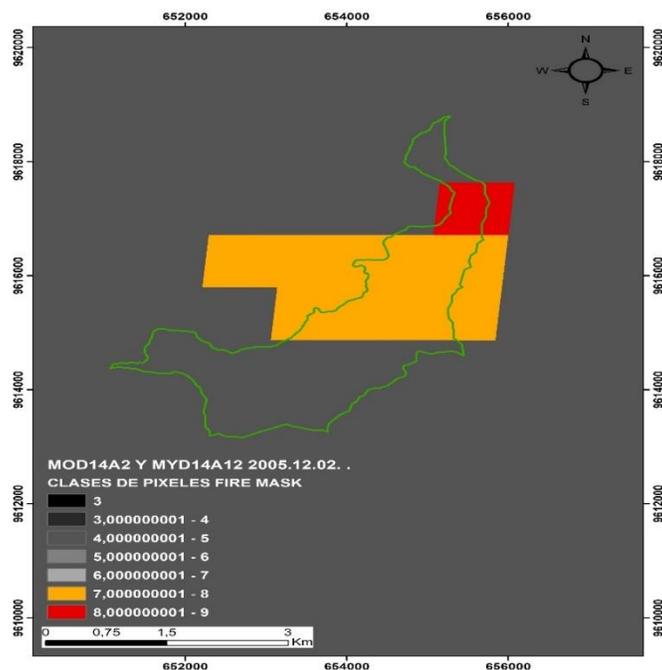


Fig. 23. Evento de quema de noviembre de 2005 cuenca alta del río Casacay

En Julio de 2012, el satélite Terra MOD14A2 registró el inicio del tercer evento de quema en la cuenca alta del río Casacay, sin embargo, dentro de la imagen se registró la presencia de un pixel de 7 a 8 representando baja confianza a confianza nominal de fuego, dándonos a entender que fue el inicio de lo que posteriormente como se observa en la **Fig. 24** sería el evento de quema registrado por el satélite Aqua MYD14A2v061, por ese motivo se optó por tomar como referencia del incendio en esta fecha la imagen del Aqua MODIS MYD14A2v061 registrada el 03 de Agosto de 2012.

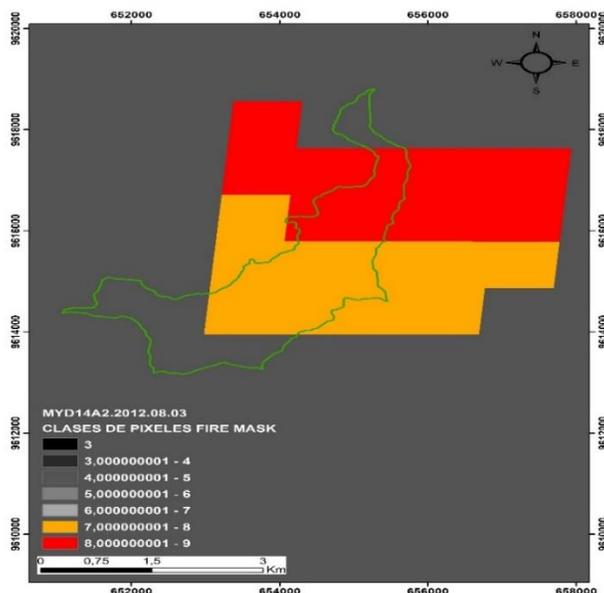


Fig. 24. Evento de quema de julio de 2012 cuenca alta del río Casacay

Al igual que el evento de julio de 2012, en septiembre del mismo año, a tan solo un mes del último viento el MODIS Terra MOD14A2v061 registro la presencia de otro incendio como se observa en la **Fig. 25** de lado izquierdo, dentro del área de estudio se observa la presencia en una pequeña zona valores de 7 a 8 que representa baja confianza a confianza nominal de fuego y valores de 8 a 9 representa confianza nominal a fuego de alta confianza en una mayor área de la cuenca.

Sin embargo más adelante el satélite MODIS Aqua MYD14A2v061 registraría algunos cambios en los píxeles de la imagen del mismo evento observado en la misma **Fig. 25** de lado derecho, donde a simple vista se puede ver el cambio en los píxeles donde en zonas donde no había una presencia de fuego de baja confianza, ahora si lo hay y como en una pequeña zona hacia el norte una parte del pixel donde había una presencia de fuego de alta confianza, cambio a fuego de baja confianza nominal, dándonos a entender que disminuyo la intensidad del incendio en esa zona.

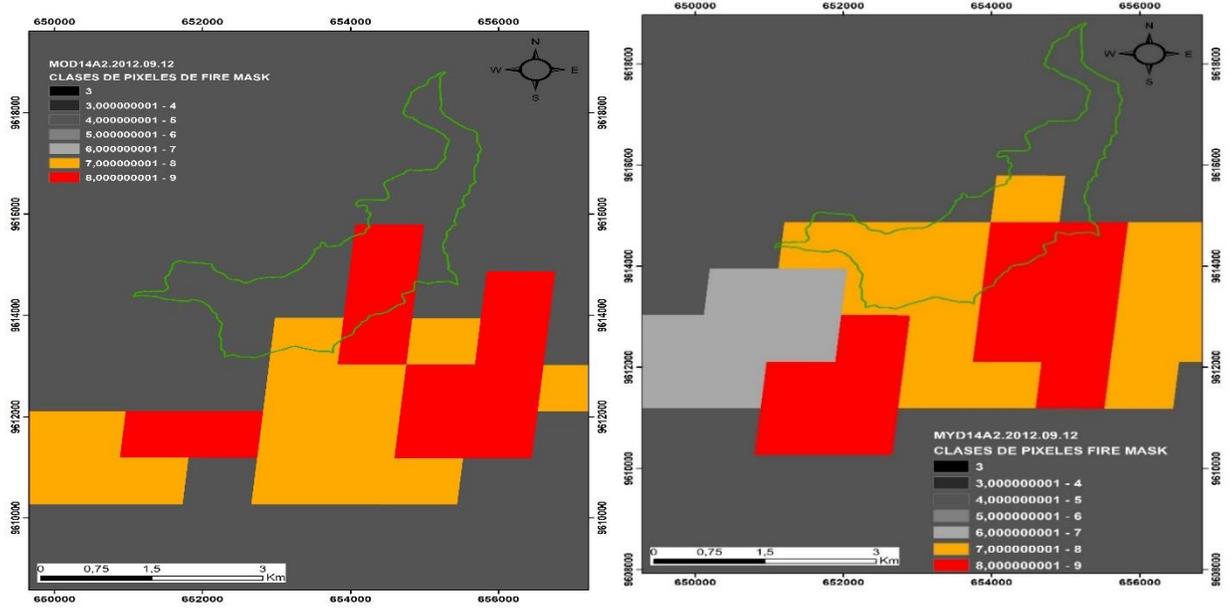


Fig. 25. Evento de quema de septiembre de 2012 cuenca alta del río Casacay

En noviembre de 2017 **Fig. 26**, el satélite Terra MOD14A2v061 registró el quinto evento de quema en la cuenca alta del río Casacay, se encontró valores de 7 a 8 representa baja confianza a confianza nominal de fuego y este es el único evento donde el satélite MODIS Aqua MYD14A2v061 no registró presencia de fuego dentro del área de estudio.

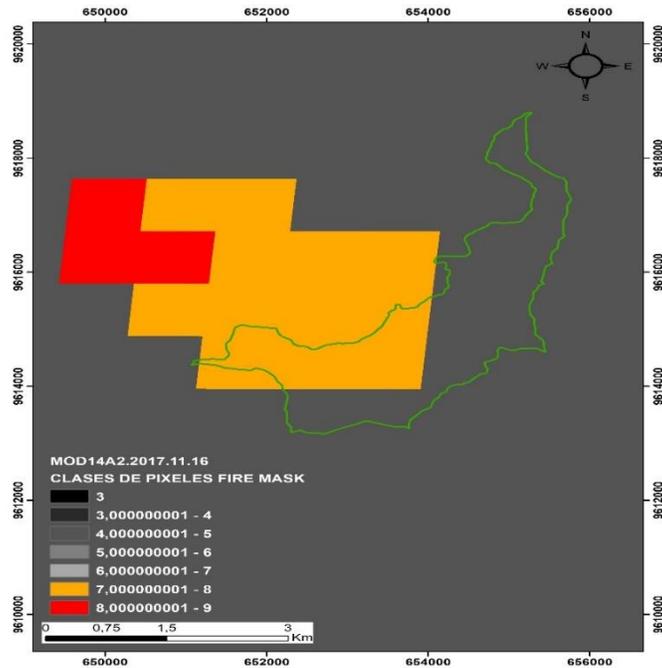


Fig. 26. Evento de quema de noviembre de 2017 en la cuenca alta del río Casacay

Por último, en noviembre de 2020, los satélites Terra MOD14A2v061 y Aqua MYD14A2v061 registraron los que serían el sexto evento de quema dentro de la cuenca alta del río Casacay, en la **Fig. 27** de lado izquierdo se observa como fue el inicio del evento y en la misma ilustración de lado derecho se puede observar los cambios en los pixeles dándonos a entender como fue cambiando la intensidad del fuego.

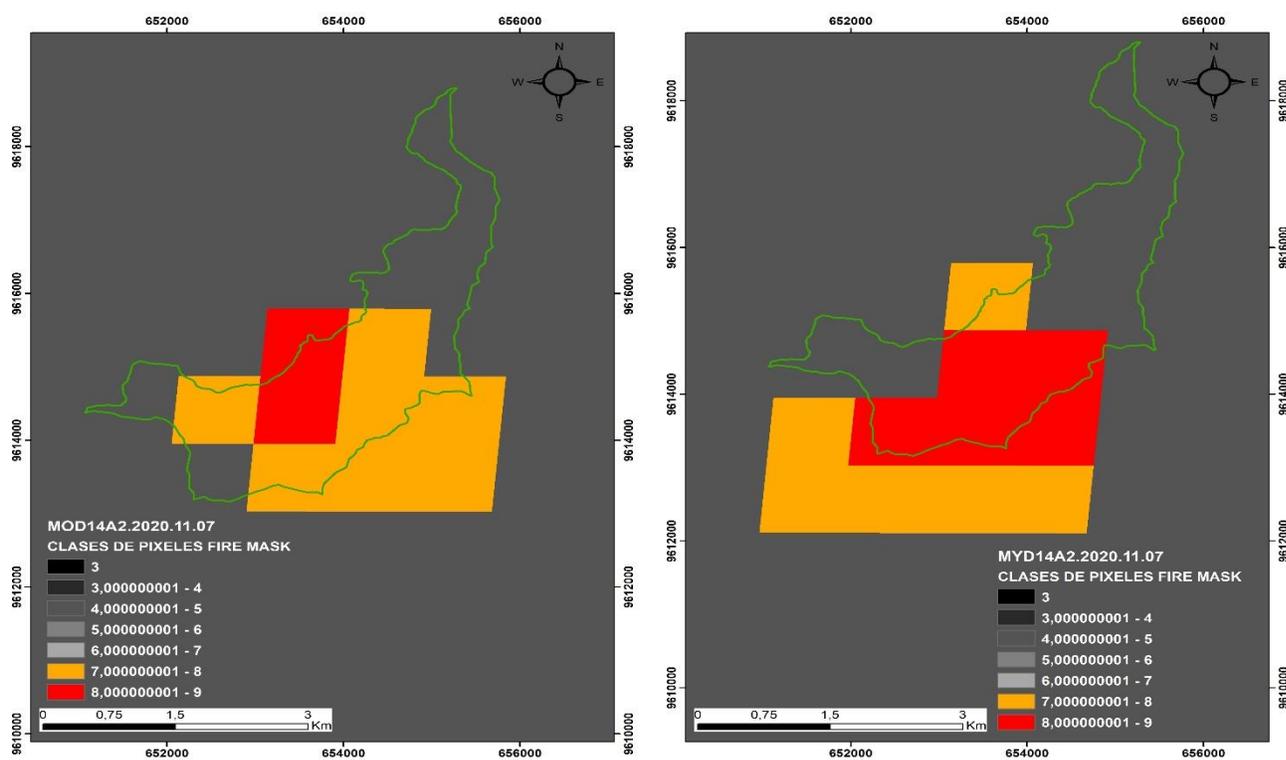


Fig. 27. Evento de quema de noviembre de 2020 en la cuenca alta del río Casacay

En todos los años donde se registró los seis incendios dentro de la cuenca alta del río Casacay, encontramos una estrecha relación entre los meses donde ocurrieron estos eventos, el mes de agosto a diciembre, ya que gracias a la topografía del lugar y a la presencia de vegetación seca en estos meses del año han permitido las condiciones necesarias para la ocurrencia de estos eventos.

*F. Procesamiento de datos*

En la **TABLA XIV** se observa el factor de escala para la corrección de datos en producto del índice de vegetación “NDVI”. El factor de corrección es proporcionado por la Guía del usuario del índice de vegetación de MODIS.

TABLA XIV  
PRODUCTO MODIS: MOD13Q1V061.

<b>Science Data Set</b>	<b>Units</b>	<b>Scale Factor</b>
250/500 m 16 days NDVI	NDVI	0.0001

Nota: factor de escala para el producto de MODIS: MOD13Q1V061 [63]

Una vez haber obtenido los datos del NDVI mensual se multiplico los valores obtenidos por el factor de escala de 0.0001 para el producto de 250/500m 16 days NDVI, **TABLA XV**.

TABLA XV  
CORRECCIÓN DE DATOS APLICANDO EL FACTOR DE ESCALA 250/500M 16 DAYS NDVI

<b>Ndvi_Mensual</b>	<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Factor de escala</b>	<b>NDVI_Corregido</b>
2173,50	2003	1	0,0001	0,22
3050,00	2003	1	0,0001	0,31

Por último, como se observa en la **TABLA XVI** para el procesamiento de los datos corregidos de NDVI, se calculó el promedio mensual para cada año obtenido, desde el 01/Ene/2003 al 31/Dic/2022.

TABLA XVI  
 PROMEDIOS MENSUALES DE NDVI - CUENCA ALTA DEL RÍO CASACAY (2003 - 2022)

Años/Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>2003</b>	0,35	0,40	0,59	0,52	0,60	0,70	0,66	0,61	0,53	0,51	0,51	0,42
<b>2004</b>	0,66	0,50	0,48	0,59	0,70	0,72	0,67	0,63	0,65	0,57	0,75	0,56
<b>2005</b>	0,58	0,48	0,55	0,64	0,71	0,68	0,66	0,60	0,62	0,60	0,55	0,54
<b>2006</b>	0,48	0,50	0,44	0,69	0,65	0,71	0,64	0,57	0,56	0,54	0,53	0,58
<b>2007</b>	0,48	0,51	0,50	0,54	0,63	0,74	0,70	0,70	0,61	0,61	0,48	0,47
<b>2008</b>	0,31	0,19	0,50	0,70	0,62	0,73	0,68	0,67	0,61	0,66	0,62	0,43
<b>2009</b>	0,37	0,41	0,65	0,72	0,74	0,74	0,72	0,68	0,60	0,59	0,60	0,50
<b>2010</b>	0,61	0,49	0,58	0,62	0,74	0,63	0,73	0,69	0,67	0,59	0,63	0,30
<b>2011</b>	0,49	0,42	0,50	0,49	0,75	0,76	0,73	0,69	0,63	0,70	0,54	0,45
<b>2012</b>	0,23	0,34	0,51	0,73	0,68	0,74	0,73	0,65	0,53	0,54	0,50	0,59
<b>2013</b>	0,31	0,32	0,50	0,72	0,52	0,69	0,66	0,66	0,56	0,29	0,60	0,52
<b>2014</b>	0,45	0,43	0,45	0,47	0,72	0,75	0,74	0,63	0,65	0,58	0,66	0,62
<b>2015</b>	0,49	0,51	0,38	0,59	0,59	0,68	0,69	0,68	0,60	0,64	0,48	0,63
<b>2016</b>	0,58	0,42	0,54	0,61	0,76	0,67	0,72	0,69	0,51	0,64	0,57	0,52
<b>2017</b>	0,40	0,39	0,55	0,55	0,68	0,76	0,70	0,68	0,62	0,59	0,64	0,48
<b>2018</b>	0,56	0,27	0,40	0,63	0,70	0,77	0,70	0,67	0,63	0,60	0,58	0,54
<b>2019</b>	0,59	0,42	0,52	0,54	0,64	0,70	0,73	0,66	0,60	0,61	0,43	0,49
<b>2020</b>	0,63	0,67	0,44	0,69	0,70	0,65	0,75	0,74	0,68	0,61	0,66	0,37
<b>2021</b>	0,53	0,43	0,52	0,54	0,76	0,75	0,72	0,62	0,65	0,38	0,46	0,43
<b>2022</b>	0,45	0,34	0,48	0,63	0,74	0,78	0,75	0,74	0,63	0,70	0,70	0,61

### G. Correlación de datos

#### 1) Rango relativo

##### a) Evento septiembre 2003

Antes del incendio, se observa en la **TABLA XVII** que el rango relativo obtenido del NDVI fue 0.62, que significa que la vegetación era medianamente constante, con ciertas fluctuaciones en su cobertura a lo largo del año. Sin embargo, un año después del incendio, este valor disminuyó a 0.51, que indica una vegetación más constante después del incendio, reduciendo la variabilidad estacional o interanual que existía previamente. Ver **Fig. 28**.

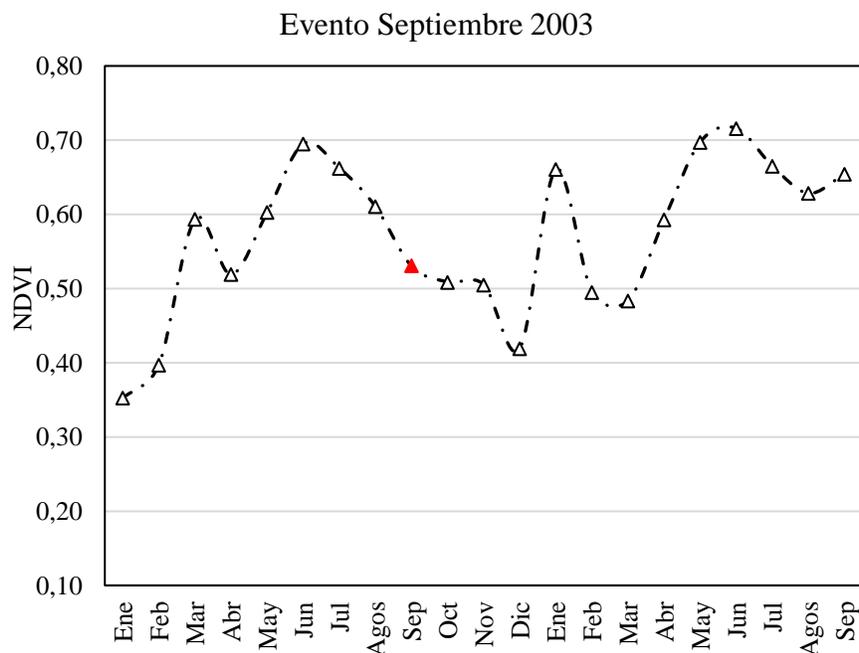


Fig. 28. Serie temporal del Incendio Forestal de septiembre de 2003

TABLA XVII

RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2003

Fecha	Menor	Mayor	NDVI-I	Rango relativo
ene 2003 - ago 2003	0.35	0.70	0.55	0.62
oct 2003 - sep 2004	0.42	0.72	0.59	0.51

b) Evento noviembre 2005

Un año antes del evento, el rango relativo fue de 0.43, indicando una constancia moderada antes del incendio, con cierta variabilidad en su cobertura a lo largo del año, como se observa en la **Fig. 29**. Un año después del incendio, este valor aumentó ligeramente a 0.47, lo que implica que el incendio no ha tenido un impacto significativo en la constancia de la vegetación. Ver **TABLA XVIII**.

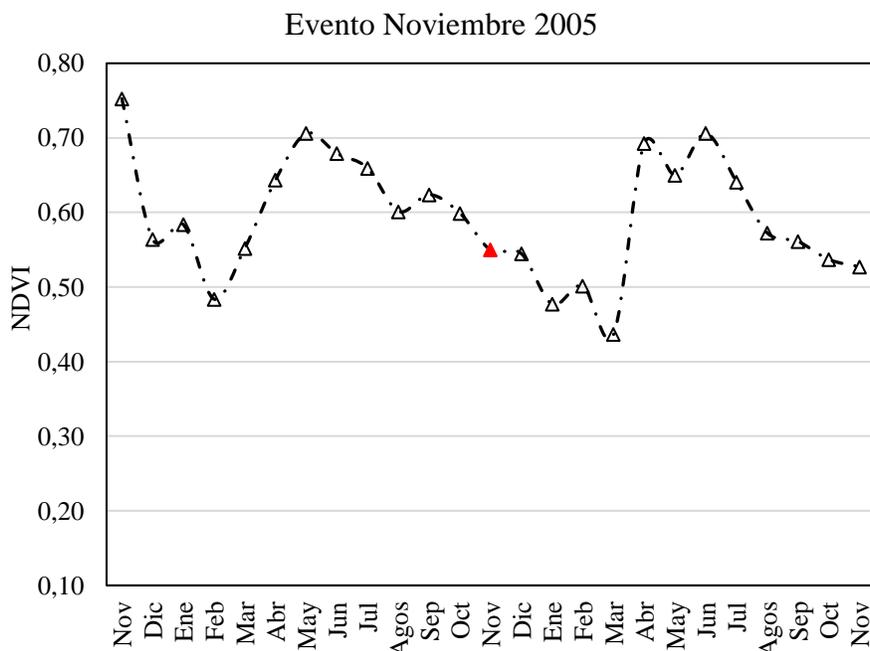


Fig. 29. Serie temporal del Incendio Forestal de noviembre de 2005

TABLA XVIII

RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2005.

Fecha	Menor	Mayor	NDVI-I	Rango relativo
nov 2004 - oct 2005	0.48	0.75	0.62	0.43
nov 2005 - dic 2006	0.44	0.71	0.57	0.47

c) Evento julio y septiembre de 2012

En el año de 2012 la cuenca alta del río Casacay sufrió dos incendios. El rango relativo pasó de 0.88 y 0.89 antes de los eventos de incendio a 0.76 y 0.75 después, respectivamente. Los valores antes del evento indican que la vegetación era altamente inconstante, el cual se ve reflejado en enero 2012 como el valor registrado de NDVI más bajo, seguido de altos valores de NDVI tan solo tres meses después de ese punto bajo registrado. Ver **TABLA XIX** y **TABLA XX**.

A pesar de la reducción, el rango relativo sigue siendo alto, lo que indica que la vegetación aún presenta cambios drásticos como se observa en la **Fig. 30**, aunque con menos variabilidad que en los puntos anteriores a los eventos de incendios.

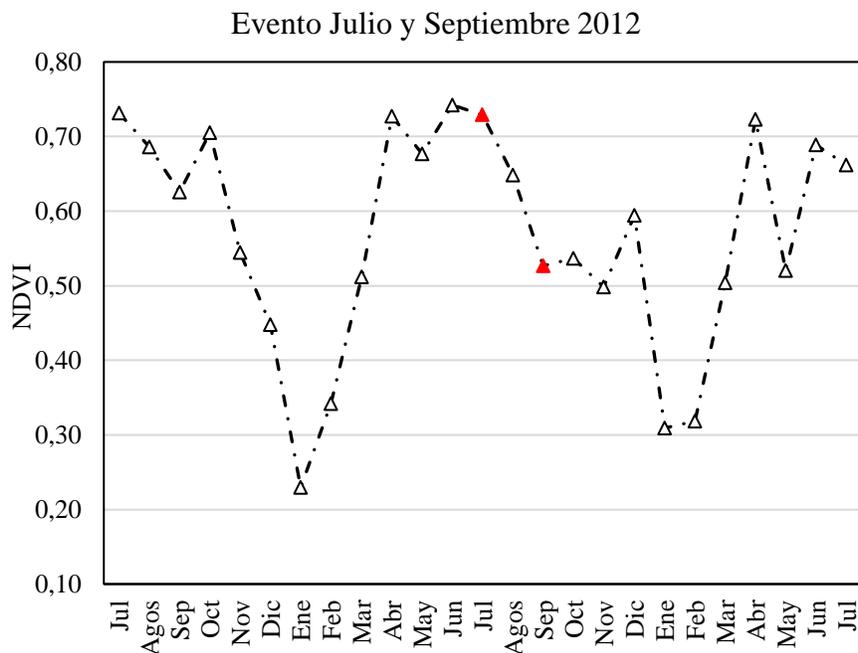


Fig. 30. Serie temporal del Incendio Forestal de julio y septiembre de 2012

TABLA XIX

RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO JULIO DE 2012

Fecha	Menor	Mayor	NDVI-I	Rango relativo
jul 2011 - jun 2012	0.23	0.74	0.58	0.88
ago 2012 - jul 2013	0.31	0.72	0.54	0.76

TABLA XX

RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO SEPTIEMBRE DE 2012

Fecha	Menor	Mayor	NDVI-I	Rango relativo
sep 2011 - ago 2012	0.23	0.74	0.58	0.89
sep 2012 - ago 2013	0.31	0.72	0.55	0.76

## d) Evento noviembre 2017

En la **TABLA XXI** se observó el aumento en el rango relativo del NDVI de 0.62 antes del incendio a 0.86 un año después indica una notable decadencia en la constancia de la vegetación en la cuenca alta como se observa en la **Fig. 31**. Este cambio significa que el incendio ha tenido un impacto considerable en la dinámica de la vegetación, resultando en una mayor inconstancia y más sensible a los cambios estacionales.

Además, se presenta la alteración de los patrones fenológicos de la vegetación, causando el aumento significativo del rango relativo después del evento de incendio.

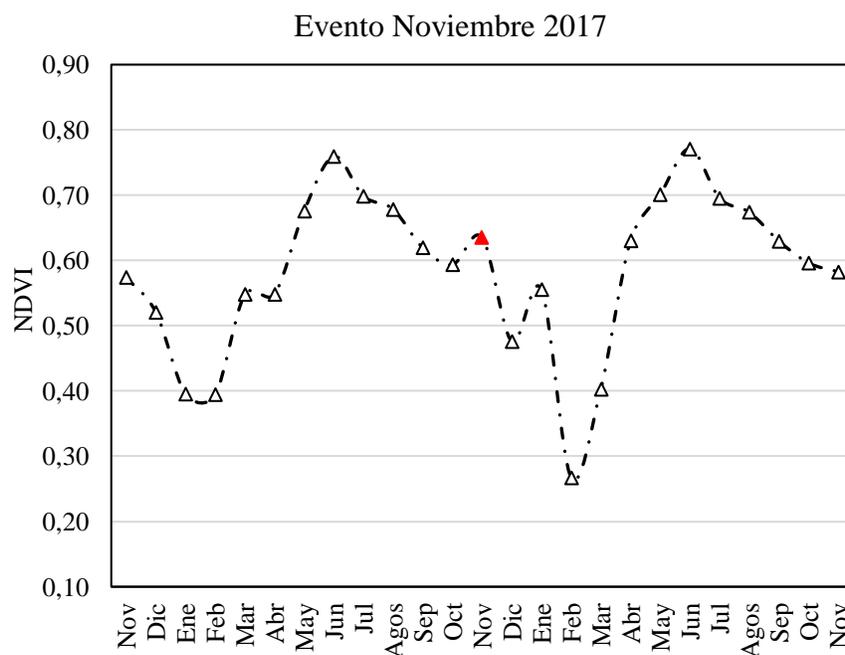


Fig. 31. Serie temporal del Incendio Forestal de noviembre de 2017

TABLA XXI

RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2017

Fecha	Menor	Mayor	NDVI-I	Rango relativo
nov 2016 - oct 2017	0.39	0.76	0.58	0.62
nov 2017 - oct 2018	0.27	0.77	0.59	0.86

## e) Noviembre 2020

Un rango relativo de 0.51 indica que la vegetación tenía una constancia moderada de los valores de NDVI antes del evento de quema, sin embargo, el rango relativo de 0.67 indica que el incendio ha causado una variabilidad considerable en la cobertura vegetal como se observa en la **Fig. 32**, con fluctuaciones más notables a lo largo del año.

Igual al anterior evento, el incendio alteró en el comportamiento de la vegetación y en el suelo, provocando cambios bruscos en su fenología. Ver **TABLA XXII**.

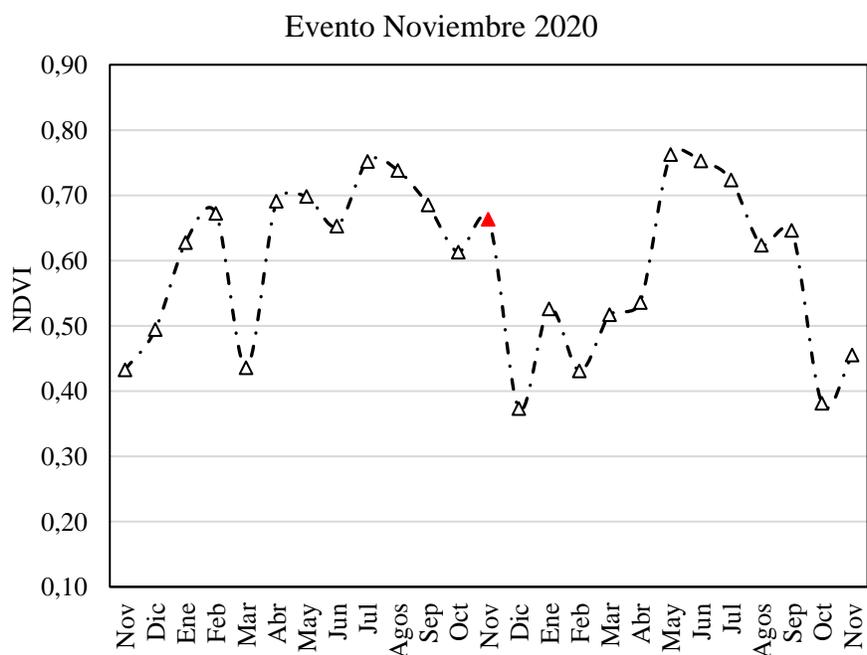


Fig. 32. Serie temporal del Incendio Forestal de noviembre 2020

TABLA XXII  
RANGO RELATIVO PRE-INCENDIO Y POST-INCENDIO, EVENTO DE 2020

Fecha	Menor	Mayor	NDVI-I	Rango relativo
nov 2019 - oct 2020	0.43	0.75	0.62	0.51
nov 2020 - oct 2021	0.37	0.76	0.58	0.67

#### H. Estimación de impactos

El análisis de los impactos ambientales muestra que existen tres eventos que han generado un impacto moderado, dos eventos un bajo impacto y un evento con un alto impacto. Un evento de quema a resaltar es el ocurrido es el de noviembre de 2017 (nov-17), que tiene la particularidad de que a pesar de que es el evento con menor probabilidad de pérdida de control resultó ser el de mayor severidad. Este incendio representa un alto rango relativo post-incendio, una de las razones puede ser la afectación a la productividad del suelo, alterando sus propiedades químicas, físicas y biológicas.

Los otros dos eventos con mayor severidad al ecosistema son los ocurridos en el mismo año de 2012 (jul-12; sep-12), esto se debe a que la recurrencia de incendios puede aumentar el efecto sobre el ecosistema, especialmente sobre el suelo. Ver **TABLA XXIII**.

TABLA XXIII  
RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE IMPACTOS DE INCENDIOS FORESTALES

Eventos	Frecuencia de ocurrencia					Probabilidad de pérdida de control					Severidad					Resultados F*P*S	Categoría de impacto
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
sep-03		x						x						x		12	Moderado
nov-05		x						x							x	8	Bajo
jul-12				x				x							x	24	Moderado
sep-12				x					x						x	36	Alto
nov-17		x						x							x	10	Bajo

---

nov-20	x	x	x	18	Moderado
--------	---	---	---	----	----------

---

## IX. DISCUSIÓN

### A. *Análisis de datos*

El rango relativo nos permitió identificar la variabilidad intra-anual del NDVI, ofreciendo una perspectiva sobre la estabilidad y la salud del ecosistema en la cuenca alta del río Casacay antes y después del evento de incendio. Además, al analizar el rango relativo antes y después del incendio, se evaluó cómo estos eventos afectan la constancia de la vegetación. Ayudó a la evaluación cuantitativa de los impactos de incendios forestales, ayudando a categorizar la severidad de los eventos y su efecto sobre la vegetación, funcionando como una herramienta alternativa para conocer la severidad del incendio forestal y posteriormente cuáles son los efectos que pueden causar dentro del ecosistema [77].

Según nuestro estudio, los incendios forestales tuvieron efectos variables sobre el rango relativo del NDVI. En algunos casos, los incendios provocaron un aumento en el rango relativo, indicando una mayor variabilidad en la vegetación debido a la eliminación de la cobertura vegetal en áreas quemadas y una regeneración desigual. En otros casos, los incendios llevaron a una disminución del rango relativo, en donde la vegetación se recuperó de manera más uniforme.

El rango relativo nos permitió identificar la variabilidad intra-anual del NDVI, ofreciendo una perspectiva sobre la estabilidad y la salud del ecosistema en la cuenca alta del río Casacay antes y después del evento de incendio. Además, al analizar el rango relativo antes y después del incendio, se evaluó cómo estos eventos afectan la constancia de la vegetación. Funcionó como una herramienta muy útil en la evaluación cuantitativa de los impactos de incendios forestales, ayudando a categorizar la severidad de los eventos y su efecto sobre la vegetación.

Esto podría deberse a factores estacionales, prácticas agrícolas, o variabilidad en la salud de la vegetación. Según menciona [78], los incendios forestales pueden tener impactos directos o indirectos dependiendo de la intensidad de su fuego. En caso de que los incendios sean de intensidades bajas, [78] explica que, al principio del proceso post-incendio, la fertilidad puede verse incrementada debido al aporte de materia orgánica semipirolizada, es decir todo material que haya sufrido degradación térmica por la ausencia de oxígeno. Además, también está la presencia de nutrientes en las cenizas que hayan sido liberadas de forma inorgánica.

Sin embargo, [79] en su estudio menciona que los incendios forestales de altas intensidades resultan en la disminución parcial o completa de la materia orgánica existente. Además, [80] menciona que estos incendios forestales pueden tener otros impactos indirectos como la alteración del pH, debido a la acumulación de cenizas que al reaccionar por hidrólisis con el agua del suelo aumentan el pH.

Por otra parte, [41] menciona que, aunque después de evento de incendio el pH tiende a aumentar, estos aumentos suelen ser temporales o breves, ya que este decrece debido a los efectos de la erosión eólica o por el arrastre y lavado de los cationes por la precipitación. Lo que tiene un impacto en las propiedades del suelo, ya que después del incendio el pH puede llegar a tener valores similares a su estado pre-incendio o incluso menores, llevando a una alteración del rango relativo de la cobertura vegetal en el área afectada [41].

Así se demuestra que el rango relativo del NDVI dependerá significativamente de la intensidad del fuego o perturbación. Ya que como demuestra [81], mientras mayor sea la intensidad del fuego del incendio, resultará en un mayor grado de perturbación. Estos factores tendrán una gran influencia en el tiempo de recuperación del NDVI en el área quemada ya que dependiendo de su estos se determinará la densidad inicial de plántulas de árboles después del incendio. La posterior recuperación dependerá de otros factores como el tipo de vegetación, el clima, topografía, pendiente, entre otros.

Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar no solo la presencia de incendios, sino también su severidad y probabilidad de pérdida de control, al evaluar los impactos en la vegetación. La integración de estos factores en los análisis permite una comprensión más completa de las dinámicas ecológicas post-incendio y la planificación de estrategias efectivas de restauración y manejo forestal.

### *B. Estimación de impactos*

Los resultados de la estimación de impactos del estudio revelaron una variedad en la severidad y frecuencia de los eventos, donde en particular se identificaron tres eventos con un impacto moderado, dos con un impacto bajo y un evento con un impacto alto.

La ocurrencia de dos eventos de incendios forestales en el año 2012, donde uno tuvo un impacto moderado para el primer evento y un impacto alto para el segundo, demuestra que a mayor sea la frecuencia se agravaran los impactos en el ecosistema. El evento ocurrido en septiembre de 2012 presenta una severidad significativa, Según [82] el término severidad del fuego se describe

cómo afecta la intensidad del fuego en el ecosistema, en este caso haciendo la relación entre las temperaturas máximas alcanzadas, la duración del evento y las propiedades iniciales del suelo [82].

Sin embargo, la recurrencia de estos incendios en un mismo año puede exacerbar los impactos que pueden ocasionar en el ecosistema, en especialmente en la productividad del suelo. [83] menciona que un aumento en la frecuencia en los incendios en condiciones de sequía o pequeña presencia de precipitaciones pueden generar grandes consecuencias para el ecosistema a largo plazo. Si bien las consecuencias directas se verán reflejadas en la vegetación, también es importante considerar a los efectos indirectos que a través de la erosión pueden generar en el ecosistema [84].

El suelo tras el evento de quema es susceptible a padecer erosión, ya que está expuesto al viento y agua, lo que ha generado problemas con la infiltración del agua y aumento de la escorrentía superficial por la erosión y la ceniza [85]. Esto quiere decir que luego de un incendio forestal la erosión del suelo y la ceniza actúan como agentes degradantes intensificando el problema, ya que la ceniza generada por la quema de la cobertura vegetal obstruye los poros del suelo causando una baja permeabilidad y haciendo que aumente la escorrentía superficial y el transporte de los sedimentos después de los incendios [86].

Según [87] las cenizas generadas por los incendios pueden proteger al suelo contra las precipitaciones y reducir la concentración de los sedimentos en la escorrentía, pero, [86], [88], [89], mencionan que las cenizas pueden ser una fuente de sedimentos que puede arrastrarse.

Los incendios en los ecosistemas son muy complejos y tiene una estrecha relación con la vegetación lo que genera una modificación tanto de su estatura, composición y los servicios ecosistémicos que nos brindan [85]. El fuego tiene la capacidad de alterar significativamente el estado fisicoquímico y ecológicos de los sistemas hídricos a largo plazo causando una perturbación en el servicio ecosistémico como el de aprovisionamiento de agua potable. Aunque la alteración del sistema hídrico se puede dar por muchos factores, el principal factor según [15] es la erosión del suelo la que causa un deterioro en la cantidad y la calidad del agua en los sistemas hídricos de la subcuenca del río Casacay.

Si bien todo ecosistema es susceptible a sufrir incendios forestales, ciertos tipos de vegetación han demostrado una cierta resiliencia antes estos eventos debido a sus propiedades físicas, entre esa especie es del género *Pinus* [90]. Los incendios forestales con una intensidad moderada además de generar la pérdida de la cobertura vegetal nativa, ayuda a la repoblación del

*Pinus patula*, ya que en general elimina la competencia en sus extractos inferiores teniendo un efecto negativo en el ecosistema [91].

En la **Fig. 33** se puede observar cómo hay una recuperación natural de la especie de *Pinus patual*, esto se debe a que según [91] esta especie debido a su rápido crecimiento y adaptabilidad pueden generar una resistencia a los incendios, donde además el calor les ayuda a liberar sus semillas de sus conos seróticos haciendo que luego de que pasa el incendio se recupere naturalmente las especies afectadas con nuevos individuos.



Fig. 33. Rebrote de *Pinus Patula* en la cuenca alta del río Casacay

Sin embargo, también existen tres eventos de incendios con un nivel de impacto moderado, ya que, aunque hayan sufrido mayores valores de severidad debido al fuego estos pueden recuperarse debido a los organismos presentes. Además [92] menciona que, la recuperación se puede dar gracias a áreas vecinas que no hayan sido quemadas por el fuego, o también por parches del área que haya sufrido el incendio, pero que esta haya sido con una baja intensidad dentro de la zona quemada [93]. Esto se da por la existencia de distintos grupos de microorganismos que tienen diferentes niveles de resistencia, por ejemplo, si es que se llega a un punto donde se ve una limitación del sustrato, la actividad microbiana baja pero la biomasa sigue en aumento hasta que la población se estabiliza gradualmente después de la recuperación de la vegetación [94].

De igual manera, se registraron dos eventos con un impacto al ecosistema bajo, los cuales fueron en el año 2005 y 2017. Especialmente en el evento del año 2005, se caracterizó por ser el de menor cambio en el valor de rango relativo. Como explica [95], esto puede estar relacionado al

nivel de intensidad o severidad del incendio, ya que los incendios de bajas intensidades ayudan a la movilización de nutrientes y también funcionan como un control de plagas. Además, [80] menciona que, al ser de baja intensidad, los incendios ayudan a mantener el carbono del suelo, ya que evitan su volatilización y pérdida en forma de gas carbónico. Esto concuerda con el hecho de que el evento del 2005 está registrado como el evento de menor severidad al ecosistema.

## X. CONCLUSIONES

Acerca de la revisión bibliográfica sobre eventos de incendios forestales durante el periodo 2003-2022 en la cuenca alta del río Casacay, se logró identificar un total de seis incendios forestales. Esta identificación se llevó a cabo mediante el uso de la plataforma FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA, que permite el monitoreo global de incendios en tiempo casi real a través de datos satelitales. La revisión permitió observar que la mayoría de los incendios ocurrieron en períodos de sequía, lo que sugiere una fuerte correlación entre las condiciones climáticas y la frecuencia de incendios. Además, otros estudios revisados han demostrado que los incendios forestales han tenido un impacto significativo en la biodiversidad, alterando la composición y estructura de los ecosistemas locales.

La recopilación de los datos de NDVI mediante la utilización de la Plataforma de Google Earth Engine nos proporcionó un conjunto de datos de 116640 que abarcan al periodo de 2003 a 2022. Estos datos permitieron realizar una evaluación precisa del estado de la vegetación implementando series temporales en la cuenca alta del río Casacay, esto facilitó la detección de los cambios en la variabilidad del NDVI a lo largo de la serie temporal, lo cual fue crucial para el análisis de la estimación de los impactos ambientales de los incendios forestales, implementando la metodología propuesta por Hunt & Johnson en 1996.

La utilización de la plataforma de Google Earth Engine ha demostrado su eficiencia como una herramienta para la recopilación de información de varias misiones satelitales como Landsat, Sentinel, MODIS, entre otras, que han permitido hacer estudios de carácter científicos e investigativos en el ámbito ambiental.

La utilización de la plataforma de Earth Explorer de la NASA permitió hacer la recopilación de las imágenes satelitales del producto de MODIS: Anomalías Terminas/Incendios que proporciono información valiosa sobre las fechas y la frecuencia de los incendios forestales, además que estos datos permitieron identificar las zonas de afectación de los incendios durante el periodo de estudio, dándonos como resultado un total de seis incendios forestales a lo largo del año 2003 a 2022.

El análisis de los cambios en la tendencia del NDVI ha revelado una correlación significativa entre la variabilidad de la vegetación y la ocurrencia de incendios forestales en la cuenca alta del río Casacay. Los datos analizados en el evento de septiembre de 2017 muestran la mayor diferencia variabilidad temporal en el NDVI antes y después del evento de incendio, confirmando el impacto negativo de estos eventos en la vegetación local. De esta manera, sostenemos que el fuego altera la composición del suelo ya que quema toda la capa de materia orgánica que protege a la superficie, provocando la obstrucción de poros que conlleva a una menor infiltración de agua, aumentando la capacidad de escorrentía superficial. Posterior al incendio, la presencia de precipitaciones causa una entrega desmesurada de sedimentos a la red de drenaje que pueden generar cambios en la morfología de los canales. Estos factores provocan una mayor fluctuación del NDVI debido a la pérdida de cobertura vegetal y la invasión de especies oportunistas resilientes al incendio como el *Pinus patula*.

Además, se ha observado que la presencia de *Pinus patula* en los ecosistemas tiene un efecto negativo, ya que esta especie tiende a colonizar las áreas quemadas debido a su alta resiliencia y capacidad de rebrote tras los incendios. La pérdida de cobertura vegetal de especies nativas favorece la expansión del *Pinus patula*, lo cual altera aún más la composición y estructura del ecosistema. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar estrategias de monitoreo y gestión forestal más efectivas, enfocadas no solo en la prevención de incendios, sino también en la restauración y protección de la vegetación nativa para limitar la proliferación de especies invasoras como el *Pinus patula*.

## XI. RECOMENDACIONES

Se recomienda mantener una base de datos sobre los incendios forestales ocurridos en la cuenca alta del río Casacay, en la que se incluya información sobre la ubicación, extensión, severidad, y fechas de los incendios, así como las condiciones climáticas asociadas y las medidas de respuesta implementadas. De esta manera, no solo se facilitará el seguimiento de tendencias a lo largo del tiempo, sino también proveerá datos esenciales para desarrollar modelos predictivos y estrategias de prevención que minimicen el riesgo y la severidad de futuros incendios.

Dada la alta resiliencia del bosque de *Pinus patula* y la capacidad para colonizar las áreas quemadas donde había vegetación nativa, es importante desarrollar y/o implementar programas de restauración enfocados a la recuperación de las especies nativas en la Cuenca alta del río Casacay. La restauración de la vegetación nativa no solo ayudara en la recuperación de la biodiversidad perdida, sino también ayudara a conservación de los servicios ecosistémicos y aumentara la resiliencia del ecosistema frente a futuros incendios forestales.

## REFERENCIAS

- [1] F. Reyes-Bueno y C. Balcazar-Gallegos, «Factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en Ecuador», *FIGEMPA Investig. Desarro.*, vol. 11, n.º 1, pp. 50-60, jul. 2021, doi: 10.29166/revfig.v11i1.2634.
- [2] A. A. Agbeshie, S. Abugre, T. Atta-Darkwa, y R. Awuah, «A review of the effects of forest fire on soil properties», *J. For. Res.*, vol. 33, n.º 5, pp. 1419-1441, oct. 2022, doi: 10.1007/s11676-022-01475-4.
- [3] Z. Zhu, X. Deng, F. Zhao, S. Li, y L. Wang, «How Environmental Factors Affect Forest Fire Occurrence in Yunnan Forest Region», *Forests*, vol. 13, n.º 9, Art. n.º 9, sep. 2022, doi: 10.3390/f13091392.
- [4] W. Ma, Z. Feng, Z. Cheng, S. Chen, y F. Wang, «Identifying Forest Fire Driving Factors and Related Impacts in China Using Random Forest Algorithm», *Forests*, vol. 11, n.º 5, Art. n.º 5, may 2020, doi: 10.3390/f11050507.
- [5] İ. Daşdemir, F. Aydın, y M. Ertuğrul, «Factors Affecting the Behavior of Large Forest Fires in Turkey», *Environ. Manage.*, vol. 67, n.º 1, pp. 162-175, ene. 2021, doi: 10.1007/s00267-020-01389-z.
- [6] R. de J. B. Calderón y R. E. E. Flores, «Análisis de la problemática de los incendios forestales y sus implicaciones en la pérdida de cobertura forestal en Cintalapa, Chiapas», *Rev. Geogr. Agríc.*, n.º 65, Art. n.º 65, dic. 2020, doi: 10.5154/r.ga.2020.65.04.
- [7] T. Van Renterghem, «Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise», *Urban For. Urban Green.*, vol. 40, pp. 133-144, abr. 2019, doi: 10.1016/j.ufug.2018.03.007.
- [8] I. González Gutiérrez, M. Farfán Gutiérrez, L. M. Morales Manilla, D. R. Pérez Salicrup, J. J. Garza Saldaña, y A. Medina Puente, «Índices y modelos para la predicción de la ocurrencia de incendios forestales: una revisión para México», *Rev. Geográfica América Cent.*, vol. 2, n.º 71, pp. 193-219, jul. 2023, doi: 10.15359/rgac.71-2.7.
- [9] D. Hunt y C. Johnson, *Sistemas de Gestion Medioambiental (Spanish Edition)*. 1996. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberlibro.com/Sistemas-Gestion-Medioambiental-Spanish-Edition-Hunt/30338435260/bd>

- [10] C. Garzón Santomaro, F. Prieto, J. Brito M., y J. Jaén, *Propuesta para el establecimiento del Subsistema de Áreas Naturales de Conservación y Diseño del Corredor Ecológico de la provincia El Oro*. 2019.
- [11] M. Ynouye-Francés, M. P. Ramos-Rodríguez, L. W. Martínez-Becerra, J. M. Cabrera-Reina, R. González-Rodríguez, y A. Duany-Dangel, «Causalidad de los incendios forestales en Pinar del Río, Cuba (1975-2018)», *Colomb. For.*, vol. 24, n.º 2, Art. n.º 2, jul. 2021, doi: 10.14483/2256201X.16881.
- [12] L. I. Medina Cajamarca, «INCENDIOS FORESTALES EN CHILLA 2020 CON ENFASIS A LAS CAUSAS, IMPACTOS Y RESILIENCIA by Luis Ivan Medina Cajamarca - Issuu». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://issuu.com/luis-ivan-medina/docs/at\\_informe\\_incendio\\_chilla\\_2020\\_ok](https://issuu.com/luis-ivan-medina/docs/at_informe_incendio_chilla_2020_ok)
- [13] D. A. Cadena, J. G. Flores-Garnica, A. G. Flores-Rodríguez, y M. E. Lomelí-Zavala, «Efecto de incendios en la vegetación de sotobosque y propiedades químicas de suelo de bosques templados», *Agro Product.*, vol. 13, n.º 4, Art. n.º 4, may 2020, doi: 10.32854/agrop.vi.1684.
- [14] H. Knicker, «How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review», *Biogeochemistry*, vol. 85, n.º 1, pp. 91-118, ago. 2007, doi: 10.1007/s10533-007-9104-4.
- [15] L. A. V. Collaguazo y J. E. E. Correa, «Strategic Planning As A Tool For The Comprehensive Management Of The Casacay Sub-Basin», 2023.
- [16] J. A. Orellana Salas y T. D. C. Lalvay Portilla, «Uso e importancia de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico. Caso Cantón Chilla, El Oro, Ecuador», *Rev. Interam. Ambiente Tur.*, vol. 14, n.º 1, pp. 65-79, jun. 2018, doi: 10.4067/S0718-235X2018000100065.
- [17] S. E. Reyes Palomino y D. M. Cano Ccoa, «Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad», *Rev. Investig. Altoandinas - J. High Andean Res.*, vol. 24, n.º 1, pp. 53-64, feb. 2022, doi: 10.18271/ria.2022.328.
- [18] J. M. Paruelo, J. P. Guerschman, y S. Verón, «Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo», vol. 14, n.º 87, jun. 2005, [En línea]. Disponible en: <https://www.agro.uba.ar/users/steinbac/Anexo5-Paruelo%20y%20cajas.pdf>
- [19] P. Quichimbo, G. Tenorio, P. Borja, I. Cárdenas, P. Crespo, y R. Célleri, «EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO

DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO: PÁRAMO DE QUIMSACocha AL SUR DEL ECUADOR», dic. 2012.

[20] B. P. Heerspink, A. D. Kendall, M. T. Coe, y D. W. Hyndman, «Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover», *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 32, p. 100755, dic. 2020, doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100755.

[21] M. Perevochtchikova, «Gestión de cuencas hidrográficas: experiencias y desafíos en México y Rusia», 2008.

[22] A. Dourojeanni R., 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.

[23] E. Aguilar Aguilar, K. Reyes Erreyes, O. Ordoñez Contreras, y M. Calle Iñiguez, «Uso y valoración de los recursos naturales y su incidencia en el desarrollo turístico: Caso Casacay, cantón Pasaje, El Oro-Ecuador», *Rev. Interam. Ambiente Tur.*, vol. 14, n.º 1, pp. 80-88, jun. 2018, doi: 10.4067/S0718-235X2018000100080.

[24] J. B. Zhiminaicela Cabrera, K. A. Lima Morales, J. N. Quevedo Guerrero, R. M. García Batista, y B. A. Rogel Jarrín, «Incendios forestales un factor influyente en la degradación de la biodiversidad del cantón Chilla, Ecuador», *Rev. Científica Amazon.*, vol. 4, n.º 7, pp. 5-12, may 2021, doi: 10.34069/RA/2021.7.01.

[25] J. Lecina-Díaz, J. Martínez Vilalta, A. Álvarez, J. Vayreda, y J. Retana, «Evaluación de los servicios ecosistémicos en riesgo debido a incendios forestales», jun. 2022.

[26] J. C. Monárrez-González, G. Pérez-Verdín, C. López-González, M. A. Márquez-Linares, y M. D. S. González Elizondo, «Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México», *Madera Bosques*, vol. 24, n.º 2, ago. 2018, doi: 10.21829/myb.2018.2421569.

[27] Z. Wen, S. Wu, J. Chen, y M. Lü, «NDVI indicated long-term interannual changes in vegetation activities and their responses to climatic and anthropogenic factors in the Three Gorges Reservoir Region, China», *Sci. Total Environ.*, vol. 574, pp. 947-959, ene. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.049.

- [28] E. Pedroza-Parga, M. A. Velásquez-Valle, A. Pedroza-Sandoval, I. Sánchez-Cohen, y L. G. Yáñez-Chávez, «The impact of vegetation cover on soil erosion and soil deposition due to runoff», *Ing. Agríc. Biosist.*, vol. 144, n.º 1, pp. 17-31, 2022, doi: 10.5154/r.inagbi.2021.12.135.
- [29] D. Bahamondes, P. Moraga, y E. Belmonte, «Servicios ecosistémicos de regulación que aporta el guácano (*Morella pavonis*) en Chapisca, valle de Lluta, región de Arica y Parinacota, Chile», *Idesia Arica*, vol. 39, n.º 1, pp. 119-125, 2021, doi: 10.4067/S0718-34292021000100119.
- [30] A. Jacquin, D. Sheeren, y J.-P. Lacombe, «Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series», *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, vol. 12, pp. S3-S10, feb. 2010, doi: 10.1016/j.jag.2009.11.004.
- [31] P. Vazquez, L. Zulaica, y B. Benavidez, «AGRICULTURIZACION E IMPACTOS AMBIENTALES EN EL PARTIDO DE NECOCHEA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA - AGRICULTURIZATION AND ENVIRONMENTAL IMPACTS IN NECOCHEA COUNTY, BUENOS AIRES, ARGENTINA», *Raega - O Espaço Geográfico Em Análise*, vol. 39, p. 202, abr. 2017, doi: 10.5380/raega.v39i0.44789.
- [32] MAE, *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*. 2013. Accedido: 25 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/263151462/Sistema-de-clasificacion-de-ecosistemas-de-Ecuador-continental-pdf>
- [33] J. A. Martínez Duarte, «Mecanismo de pagos por servicios ecosistémicos hidrológicos en la Cuenca hidrográfica del arroyo Piray Miní», *Visión Futuro*, n.º 26, No 2-2022, pp. 107-126, jul. 2022, doi: 10.36995/j.visiondefuturo.2022.26.02.004.es.
- [34] D. Avendaño-Leadem, B. Cedeño-Montoya, y M. S. Arroyo-Zeledón, «Integrando el concepto de servicios ecosistémicos en el ordenamiento territorial», *Rev. Geográfica América Cent.*, vol. 2, n.º 65, pp. 63-90, jun. 2020, doi: 10.15359/rgac.65-2.3.
- [35] T. Leyva-Pablo *et al.*, «Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario», *Madera Bosques*, vol. 27, n.º 4, oct. 2021, doi: 10.21829/myb.2021.2742421.
- [36] J. D. J. Huerta-Olague *et al.*, «Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo», *Idesia Arica*, n.º ahead, pp. 0-0, 2018, doi: 10.4067/S0718-34292018005000701.

- [37] Y. P. Mojica Macías, M. L. Ortiz Moreno, y A. M. Gnecco Lizcano, «Estrategia de gestión ambiental basada en los servicios ecosistémicos del caño siete vueltas (Villavicencio, Colombia).», *Luna Azul*, n.º 49, pp. 38-63, jul. 2019, doi: 10.17151/luaz.2019.49.3.
- [38] L. Hernández Félix, D. Molina Rosales, y C. Agraz Hernández, «Servicios ecosistémicos y estrategias de conservación en el manglar de Isla Arena.», *Agric. Soc. Desarro.*, vol. 14, n.º 3, p. 427, oct. 2017, doi: 10.22231/asyd.v14i3.644.
- [39] 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. Cienc. Ambient.*, vol. 55, n.º 2, pp. 157-179, jul. 2021, doi: 10.15359/rca.55-2.8.
- [40] E. H. R. Durand y C. G. Terry, «El impacto de las actividades físicas en el medio ambiente», *VARONA*, n.º 71, sep. 2020.
- [41] J. A. Rosales-Rodríguez, E. A. Esquivel-Segura, M. A. Acevedo-Tapia, M. González-Ortega, y E. Cartes-Rodríguez, «Situación pre y post-incendio, de un ecosistema del tipo forestal Roble-Hualo, Región del Maule, Chile», *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 16, n.º 38, pp. 55-68, dic. 2018, doi: 10.18845/rfmk.v16i38.3997.
- [42] K. Ocampo-Zuleta y J. Beltrán-Vargas, «Modelación Dinámica de incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá, Colombia», *Madera Bosques*, vol. 24, n.º 3, nov. 2018, doi: 10.21829/myb.2018.2431662.
- [43] P. F. Temporetti, «Efecto a largo plazo de los incendios forestales en la calidad del agua de dos arroyos en la sub-región Andino-Patagónica, Argentina», *Ecol. Austral*, 2006.
- [44] L. Arellano y C. Castillo-Guevara, «Efecto de los incendios forestales no controlados en el ensamble de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) en un bosque templado del centro de México», *Rev. Mex. Biodivers.*, vol. 85, n.º 3, pp. 854-865, sep. 2014, doi: 10.7550/rmb.41756.
- [45] J. G. Pausas y J. E. Keeley, «Wildfires as an ecosystem service», *Front. Ecol. Environ.*, vol. 17, n.º 5, pp. 289-295, 2019, doi: 10.1002/fee.2044.
- [46] A. Z. Bertolotti, T. Phan, y J. Campos do Prado, «Wildfire Smoke, Air Quality, and Renewable Energy—Examining the Impacts of the 2020 Wildfire Season in Washington State», *Sustainability*, vol. 14, n.º 15, Art. n.º 15, ene. 2022, doi: 10.3390/su14159037.

- [47] M. E. Lucas-Borja, M. Parhizkar, y D. A. Zema, «Short-Term Changes in Erosion Dynamics and Quality of Soils Affected by a Wildfire and Mulched with Straw in a Mediterranean Forest», *Soil Syst.*, vol. 5, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2021, doi: 10.3390/soilsystems5030040.
- [48] G. Papaioannou, A. Alamanos, y F. Maris, «Evaluating Post-Fire Erosion and Flood Protection Techniques: A Narrative Review of Applications», *GeoHazards*, vol. 4, n.º 4, pp. 380-405, oct. 2023, doi: 10.3390/geohazards4040022.
- [49] P. Pereira, I. Bogunovic, W. Zhao, y D. Barcelo, «Short-term effect of wildfires and prescribed fires on ecosystem services», *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, vol. 22, p. 100266, ago. 2021, doi: 10.1016/j.coesh.2021.100266.
- [50] M. E. Lucas-Borja *et al.*, «Short-term effects of prescribed burning in Mediterranean pine plantations on surface runoff, soil erosion and water quality of runoff», *Sci. Total Environ.*, vol. 674, pp. 615-622, jul. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.114.
- [51] J. Faúndez Pinilla, M. Castillo Soto, y R. M. Navarro Cerrillo, «Impactos de los incendios forestales de magnitud en áreas silvestres protegidas de Chile Central», *Bosque Valdivia*, vol. 44, n.º 1, pp. 83-95, abr. 2023, doi: 10.4067/s0717-92002023000100083.
- [52] R. M. S. Simões, P. F. Ribeiro, y J. L. Santos, «Estimating the Trade-Offs between Wildfires and Carbon Stocks across Landscape Types to Inform Nature-Based Solutions in Mediterranean Regions», *Engineering*, preprint, ago. 2023. doi: 10.20944/preprints202308.1776.v1.
- [53] J. G. Mollocana Lara, C. I. Álvarez Mendoza, y L. J. Jaramillo Coronel, «Evaluación de información relacionada con combustibles en el Distrito Metropolitano de Quito para el modelado y simulación de incendios forestales, caso de estudio: Incendio del cerro Atacazo», *La Granja*, vol. 34, n.º 2, pp. 45-62, ago. 2021, doi: 10.17163/lgr.n34.2021.03.
- [54] J. C. Mora-Barrantes, O. M. Molina-León, y J. P. Sibaja-Brenes, «Aplicación de un método para evaluar el impacto ambiental de proyectos de construcción de edificaciones universitarias», *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 29, n.º 3, p. 132, nov. 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2893.
- [55] M. I. Viloría Villegas, L. Cadavid, y G. Awad, «Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia», *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 28, n.º 2, pp. 121-156, jun. 2018, doi: 10.18359/rcin.2941.

- [56] B. Orlando Olivares y M. A. López-Beltrán, «Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada aplicado al territorio indígena agrícola de Kashaama, Venezuela», *UNED Res. J.*, vol. 11, n.º 2, pp. 112-121, jun. 2019, doi: 10.22458/urj.v11i2.2299.
- [57] «¿Qué es ArcGIS? | Plataforma de Mapeo y Analítica». Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sigsa.info/es-mx/arcgis/about-arcgis/overview>
- [58] «¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center». Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- [59] «EarthExplorer Help Index | U.S. Geological Survey». Accedido: 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/earthexplorer-help-index>
- [60] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, y R. Moore, «Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone», *Remote Sens. Environ.*, vol. 202, pp. 18-27, dic. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [61] D. Wang *et al.*, «Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series», *Remote Sens. Environ.*, vol. 119, pp. 55-61, abr. 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.12.001.
- [62] R. Lindsey y D. Herring, «MODIS, Moderate resolution Imaging Spectroradiometer». [En línea]. Disponible en: [https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis\\_brochure.pdf](https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis_brochure.pdf)
- [63] K. Didan, A. B. Munoz, y A. Huete, «MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series)». junio de 2015. [En línea]. Disponible en: [https://lpdaac.usgs.gov/documents/103/MOD13\\_User\\_Guide\\_V6.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/103/MOD13_User_Guide_V6.pdf)
- [64] «MODIS Web». Accedido: 5 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- [65] L. Giglio, W. Schroeder, J. V. Hall, y C. Justicia, «MODIS Collection 6 and Collection 6.1 Active Fire Product User's Guide», may 2021.
- [66] H. Carbajal-Morán, «Determination with satellite images of the normalized difference vegetation index of the Pampas-Tayacaja valley», vol. 5, n.º 1, pp. 228-245, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i1.1893.
- [67] L. Delgado y J. Meave, «La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota», *Scribd*. Accedido: 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/724657402/vegetacion-vista-espacio>

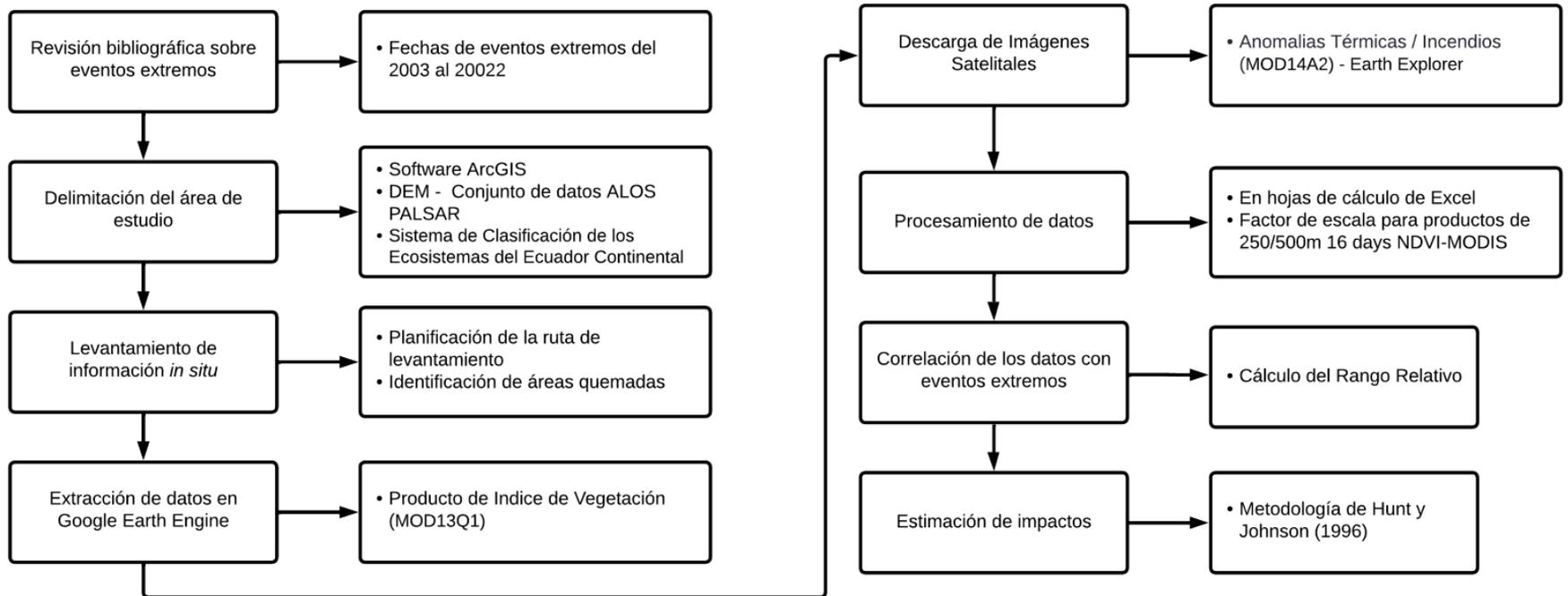
- [68] J. A. Gamon *et al.*, «Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types», *Ecol. Appl.*, vol. 5, n.º 1, pp. 28-41, feb. 1995, doi: 10.2307/1942049.
- [69] P. Vázquez, E. Adema, y B. Fernández, «Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa», *Ecol. Austral*, vol. 23, n.º 2, pp. 077-086, ago. 2013, doi: 10.25260/EA.13.23.2.0.1163.
- [70] J. Paruelo y D. Alcaraz-Segura, «El seguimiento del nivel de provisión de los servicios ecosistémicos», ene. 2011, [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/233387031>
- [71] J. M. Paruelo, «La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos», *Ecosistemas*, vol. 17, n.º 3, pp. 4-22, 2008.
- [72] G. Baldi, M. D. Noretto, R. Aragón, F. Aversa, J. M. Paruelo, y E. G. Jobbágy, «Long-term Satellite NDVI Data Sets: Evaluating Their Ability to Detect Ecosystem Functional Changes in South America», *Sensors*, vol. 8, n.º 9, Art. n.º 9, sep. 2008, doi: 10.3390/s8095397.
- [73] J. P. Guerschman, J. M. Paruelo, y I. C. Burke, «LAND USE IMPACTS ON THE NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX IN TEMPERATE ARGENTINA», *Ecol. Appl.*, vol. 13, n.º 3, pp. 616-628, jun. 2003, doi: 10.1890/1051-0761(2003)013[0616:LUIOTN]2.0.CO;2.
- [74] L. C. Alatorre, S. Beguería, y S. M. Vicente-Serrano, «Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central», *Pirineos*, vol. 165, n.º 0, pp. 7-27, dic. 2010, doi: 10.3989/Pirineos.2010.165001.
- [75] W. Yu *et al.*, «Gap Filling for Historical Landsat NDVI Time Series by Integrating Climate Data», *Remote Sens.*, vol. 13, n.º 3, Art. n.º 3, ene. 2021, doi: 10.3390/rs13030484.
- [76] R. Liu, R. Shang, Y. Liu, y X. Lu, «Global evaluation of gap-filling approaches for seasonal NDVI with considering vegetation growth trajectory, protection of key point, noise resistance and curve stability», *Remote Sens. Environ.*, vol. 189, pp. 164-179, feb. 2017, doi: 10.1016/j.rse.2016.11.023.
- [77] A. G. F. Rodríguez, J. G. Flores-Garnica, D. R. González-Eguiarte, A. Gallegos-Rodríguez, P. Zarazúa-Villaseñor, y S. Mena-Munguía, «Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales», *Investig. Geográficas*, n.º 106, Art. n.º 106, nov. 2021, doi: 10.14350/ig.60396.

- [78] T. A. Justiniano y G. N. Sánchez, «Impacto de los incendios forestales en el estado natural de suelos afectados en la Chiquitanía (Santa Cruz, Bolivia) y propuesta de índices para su evaluación.», *ACTA NOVA*, vol. 11, n.º 1, 2023.
- [79] I. Fernández, *Influencia de los incendios forestales sobre la materia orgánica edáfica*. CSIC - Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia (IIAG), 1997. Accedido: 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/103090>
- [80] J. Rosero y I. Osorio, «Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte», *Cuad. Act.*, vol. 5, pp. 59-67, 2013, Accedido: 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/130>
- [81] E. Shvetsov, «Temporal Dynamics of Vegetation Indices for Fires of Various Severities in Southern Siberia», *Environ. Sci. Proc.*, vol. 22, n.º 1, Art. n.º 1, 2022, doi: 10.3390/IECF2022-13048.
- [82] J. Mataix-Solera, A. Cerdà, V. Arcenegui, A. Jordán, y L. M. Zavala, «Fire effects on soil aggregation: A review», *Earth-Sci. Rev.*, vol. 109, n.º 1-2, pp. 44-60, nov. 2011, doi: 10.1016/j.earscirev.2011.08.002.
- [83] N. Tessler, L. Wittenberg, y N. Greenbaum, «Vegetation cover and species richness after recurrent forest fires in the Eastern Mediterranean ecosystem of Mount Carmel, Israel», *Sci. Total Environ.*, vol. 572, pp. 1395-1402, dic. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.113.
- [84] D. Bretreger, G. R. Hancock, J. Lowry, I. P. Senanayake, y I.-Y. Yeo, «The Impacts of Burn Severity and Frequency on Erosion in Western Arnhem Land, Australia», *Sensors*, vol. 24, n.º 7, p. 2282, abr. 2024, doi: 10.3390/s24072282.
- [85] P. Ulibary, «Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna», 24 de abril de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=39186>
- [86] A. Bookter, «Erosional processes after wildfires: The impact of vegetative ash and the morphology of debris flows», may 2006, [En línea]. Disponible en: <https://scholarworks.umt.edu/etd/8289>
- [87] P. Pereira, M. B. Bodí, X. Úbeda, A. Cerdà, y J. Mataix-Solera, «Las cenizas en el ecosistema suelo», 2010.

- [88] S. H. Cannon, E. R. Bigio, y E. Mine, «A process for fire-related debris flow initiation, Cerro Grande fire, New Mexico», *Hydrol. Process.*, vol. 15, n.º 15, pp. 3011-3023, oct. 2001, doi: 10.1002/hyp.388.
- [89] K. Burns y E. J. Gabet, «The effective viscosity of slurries laden with vegetative ash», *CATENA*, vol. 135, pp. 350-357, dic. 2015, doi: 10.1016/j.catena.2014.06.008.
- [90] J. I. Yerena-Yamallel *et al.*, «Efecto de la severidad de incendio en brotes de *Pinus* en Santiago, Nuevo León», *Rev. Mex. Cienc. For.*, vol. 14, n.º 79, pp. 159-179, oct. 2023, doi: 10.29298/rmcf.v14i79.1370.
- [91] J. González, M. de los S. Posadas, A. Rodríguez, y L. Rodríguez, «EFECTO DEL DAÑO POR FUEGO Y DESCORTEZADORES SOBRE LA MORTALIDAD DE *Pinus patula* Schl. et Cham EN HIDALGO, MÉXICO», 2014.
- [92] I. N. Bezkorovainaya, E. N. Krasnoshchekova, y G. A. Ivanova, «Transformation of soil invertebrate complex after surface fires of different intensity», *Biol. Bull.*, vol. 34, n.º 5, pp. 517-522, oct. 2007, doi: 10.1134/S1062359007050159.
- [93] K. B. Gongalsky y T. Persson, «Recovery of soil macrofauna after wildfires in boreal forests», *Soil Biol. Biochem.*, vol. 57, pp. 182-191, feb. 2013, doi: 10.1016/j.soilbio.2012.07.005.
- [94] G. Bárcenas-Moreno, F. García-Orenes, J. Mataix-Solera, J. Mataix-Beneyto, y E. Bååth, «Soil microbial recolonisation after a fire in a Mediterranean forest», *Biol. Fertil. Soils*, vol. 47, n.º 3, pp. 261-272, abr. 2011, doi: 10.1007/s00374-010-0532-2.
- [95] J. L. López, «Degradación del suelo posterior al fuego en condiciones mediterráneas. Identificación de factores de riesgo:», *Ecosistemas*, vol. 15, n.º 3, Art. n.º 3, jun. 2006, Accedido: 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/503>

## ANEXOS

## Anexo A. Diagrama de flujo implementado en la metodología



Anexo B. Scrip para la descarga de los datos de NDVI mensuales en la fecha de 2003 a 2022.

```

NDVI-Mensual
Get Link Save Run Reset Apps
1 // Importar el Shape de puntos
2 var puntos = ee.FeatureCollection('projects/ee-eculuis2/assets/Puntos');
3 print('puntos', puntos);
4 Map.addLayer(puntos, null, 'puntos');
5 Map.centerObject(puntos, 5);
6
7 // Importar el Producto de MODIS y seleccionar el periodo de estudio
8 var MOD13Q1 = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD13Q1')
9   .select('NDVI')
10  .filterDate('2003-01-01', '2022-12-31');
11
12 // Funcion para reducir la resolucio temporal a compuesto mensual
13 var anios = ee.List.sequence(2003,2022,1);
14 print('lista de años', anios);
15 var meses = ee.List.sequence(1,12,1);
16 print('lista de meses', meses);
17
18 var CompMens = ee.ImageCollection(
19   anios.map(function(y) {
20     return meses.map(function(m){
21       var start = ee.Date.fromYMD(y, m, 1)
22       var stop= start.advance(1, 'month')
23
24       return MOD13Q1
25         .filterDate(start, stop)
26         .mean()
27         .rename('NDVI_Mensual')
28         .set({'system:time_start': start.millis(), 'fecha': ee.Date(start.millis())});
29     });
30   }).flatten()
31 );
32 print('Total de imagenes en el periodo seleccionado', MOD13Q1.size(), 'Numero de imagenes mensuales', CompMens.size())
33
34
35 // Funcion para agregar las fechas de exportación
36 var addDate = function(image) {
37   var year = ee.Image.constant(ee.Date(image.get('fecha')).get('year')).rename('anio')
38   var month = ee.Image.constant(ee.Date(image.get('fecha')).get('month')).rename('mes')
39   return image.addBands (year). addBands(month)
40 }
41 // Agregar banda de mensual
42 var CompMensDate = CompMens.map(addDate)
43
44 // Funcion para extraer puntos en bucle
45 var datos = CompMensDate.map(function(i){
46   return i.reduceRegions(puntos, 'first', 463.3127165275)
47 })
48
49 var extract = ee.FeatureCollection(datos.flatten());
50
51 // Exportar resultados en formato CSV
52 Export.table.toDrive({
53   collection: extract,
54   folder: 'resultadosNDVI',
55   description: 'NDVI_mensual',
56   fileFormat: 'CSV'
57 });
58

```

*Anexo C. Datos de NDVI en crudo descargados de la plataforma de Google Earth Engine, total 11640 datos.*

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
system:index	id	NDVI_Mensual	anio	mes	geo							
0_000000000	0	2173,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4982602642720133,0]}				0	0,21735	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4982586104353053,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.498256955242823,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4982552986945703,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	2173,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497133403296806,0]}					0,21735	2003	1
0_000000000	0	2173,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497133403296806,0]}					0,21735	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4971317499941064,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497130095336069,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497128439322699,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	3050	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4971267885335364,0]}					0,305	2003	1
0_000000000	0	5281,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497125129814885,0]}					0,52815	2003	1
0_000000000	0	5281,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4971234697409113,0]}					0,52815	2003	1
0_000000000	0	7159,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4971201455270036,0]}					0,71595	2003	1
0_000000000	0	7159,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4971184813870764,0]}					0,71595	2003	1
0_000000000	0	7159,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497116822503624,0]}					0,71595	2003	1
0_000000000	0	7159,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.497115155658456,0]}					0,71595	2003	1
0_000000000	0	4900,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.496003704219273,0]}					0,49005	2003	1
0_000000000	0	4900,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4960020528076075,0]}					0,49005	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.496000400041039,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495998745919576,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495997090443217,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4959954401893722,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	4311	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495993782008613,0]}					0,4311	2003	1
0_000000000	0	4311	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495992122472967,0]}					0,4311	2003	1
0_000000000	0	4311	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4959904615824406,0]}					0,4311	2003	1
0_000000000	0	5143	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4959887993370367,0]}					0,5143	2003	1
0_000000000	0	5143	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495987135736757,0]}					0,5143	2003	1
0_000000000	0	5143	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495985477391249,0]}					0,5143	2003	1
0_000000000	0	5143	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.495983811086605,0]}					0,5143	2003	1
0_000000000	0	4900,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4948723531662997,0]}					0,49005	2003	1
0_000000000	0	4900,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4948707022903265,0]}					0,49005	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.494869050059892,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.494867396474999,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4948657415356514,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	3652,5	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.494864091817124,0]}					0,36525	2003	1
0_000000000	0	4311	2003	1	"{"type":"Point","coordinates":[-3.4948624341742525,0]}					0,4311	2003	1

*Anexo D. Levantamiento de información In situ, fotografía del sitio 1.*



*Anexo E. Levantamiento de información In situ, fotografía del sitio 2*



*Anexo F. Levantamiento de información In situ, fotografía del sitio 3*



*Anexo G. Levantamiento de información In situ, fotografía del sitio 4*



*Anexo H. Levantamiento de información In situ, fotografía del sitio 5*



*Anexo I. Levantamiento de información In situ, fotografía del sitio 6*

