UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"Determinación de la susceptibilidad a incendios forestales en función de factores biofísicos y climáticos en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Forestal

Línea de investigación: Desarrollo agropecuario y forestal sostenible

AUTORA:

NAIDELYN LIZBETH PÉREZ HERRERA

DIRECTOR:

ING. OSCAR ARMANDO ROSALES ENRÍQUEZ, MSc.

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pérez Herrera Naidelyn Lizbeth

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Determinación de la susceptibilidad a incendios forestales en función de factores biofísicos y climáticos en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas"
AUTORA:	Pérez Herrera Naidelyn Lizbeth
FECHA: DD/MM/AAAA	28/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	[redacted] **PREGRADO** **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Forestal
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc. Ing. Oscar Hernando Eraso Terán, PhD.

2. CONSTANCIAS

La autora manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es la titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de julio de 2026

LA AUTORA:

Firmado electrónicamente por:
NAIDELYN LIZBETH PEREZ HERRERA

NAIDELYN LIZBETH PÉREZ HERRERA

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 28 de julio de 2026

Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
OSCAR ARMANDO
ROSALES ENRIQUEZ

(f) ……

Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

C.C.: 0400933529

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "Determinación de la susceptibilidad a incendios forestales en función de factores biofísicos y climáticos en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas" elaborado por Pérez Herrera Naidelyn Lizbeth, previo a la obtención del título de Ingeniera Forestal aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
OSCAR ARMANDO ROSALES ENRIQUEZ

(f): …….

Ing. Oscar Armando Rosales Enríquez, MSc.

C.C.:0400933529

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
OSCAR HERNANDO ERASO TERAN

(f): ……..

Ing. Oscar Hernando Eraso Terán, PhD.

C.C.:1003565718

DEDICATORIA

Es un honor para mí dedicar y expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de este viaje en mi vida académica para obtener mi título de Ingeniera Forestal.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto, llena de fortaleza en medio del dolor.

A mis abuelitos Rosita, Trajano y Lidia que están en el cielo, que, aunque ya no están conmigo, los siento presentes en cada logro y en cada pensamiento. Gracias por su amor eterno, por ser mi inspiración y por cuidar de mi desde donde estén. Este triunfo se lo dedico con todo mi corazón.

A mis padres Néstor y Amparo que gracias a sus consejos me he convertido en una mujer fuerte, luchadora con metas claras en la vida. Por inculcarme grandes valores que me han acompañado en todos los aspectos de mi vida, por su gran apoyo y sacrificio a ustedes dedico con amor este logro.

A Michael Chamorro, no encuentro las palabras perfectas para expresar que has sido mi soporte desde el inicio de mi carrera, brindándome tu apoyo y tu motivación para seguir adelante. Gracias por tu paciencia y comprensión, por creer en mí, por no soltar mi mano cuando los días se tornaban difíciles y por ser parte de este proceso que hoy se termina. Este logro es nuestro.

A mis hermanas y hermanos porque sé que sin su apoyo constante no hubiera sido posible llegar a este momento, por su alegría en los días difíciles, por sus pequeños gestos en toda mi carrera, sus palabras de aliento y por recordarme que nunca he estado sola.

A mis sobrinos, por iluminar mis días, por ser un motivo para sonreír, porque con su ternura me motivan y me han inspirado a seguir adelante.

A mis amigos, quienes estuvieron conmigo en los momentos más difíciles y celebraron cada pequeño logro. Gracias por su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y por recordarme que siempre podía lograr cada cosa que me proponga.

Naidelyn Lizbeth Pérez Herrera

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte, por brindarme la oportunidad de formarme profesional y personalmente en sus aulas. Gracias por los conocimientos, por los valores obtenidos y por permitirme llegar a este punto importante en mi vida de obtener mi título.

Al ingeniero Oscar Rosales, quien fue mi director de tesis, le doy las gracias por su conocimiento, por ser mi guía en este proyecto de investigación La experiencia y su compromiso en el Proyecto fueron fundamentales para culminar.

Al ingeniero Oscar Eraso, quien fue mi asesor le doy las gracias por ser mi guía, por su paciencia y las observaciones planteadas que fueron importantes para mejorar y poder finalizar el trabajo.

A mis padres, Néstor y Amparo, quienes han sido el mayor ejemplo de trabajo, dedicación y perseverancia. Gracias por el amor, la confianza y el apoyo que me han brindado durante toda mi formación académica. Cada uno de sus esfuerzos y sacrificios han sido fundamental para alcanzar esta meta, por lo que este logro también les pertenece.

A Michael, por estar siempre a mi lado con paciencia, amor y apoyo incondicional. Gracias por impulsarme a seguir adelante, confiar en mis capacidades y acompañarme en cada momento, especialmente cuando las dificultades parecían mayores

A mis hermanos, por acompañarme en este camino, brindarme ánimo en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada avance alcanzado.

A mis amigos, por su amistad sincera, su comprensión y el apoyo que me ofrecieron a lo largo de esta etapa. Gracias por compartir conmigo los desafíos, las experiencias y las satisfacciones que hicieron de este proceso un camino más llevadero.

Naidelyn Lizbeth Pérez Herrera

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio se realizó en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, localizada en la provincia de Imbabura al norte del Ecuador. El objetivo principal fue identificar las áreas con mayor susceptibilidad a incendios forestales para facilitar información que aporte a la conservación y gestión de esta área protegida. La metodología que se aplicó consistió en el análisis de seis variables relacionadas con la ocurrencia de incendios: 1) cobertura vegetal, 2) pendiente, 3) altitud, 4) orientación del terreno, 5) velocidad del viento y 6) uso del suelo. Las variables analizadas fueron reclasificadas y ponderadas mediante análisis multicriterio, con lo cual se elaboró mapas temáticos de susceptibilidad a incendios forestales. Además, se emplearon los índices NDVI y NBR para evaluar los cambios en la cobertura vegetal y detectar zonas afectadas por incendios forestales empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e imágenes satelitales Landsat de los años 2001, 2007, 2021 y 2024. Los resultados obtenidos indican que el páramo constituye la cobertura predominante del área de estudio, seguido por el bosque nativo y la vegetación arbustiva. El análisis multitemporal evidenció cambios en la cobertura vegetal y una disminución de las cicatrices de incendios en el periodo 2001-2007 con 10.36 %. Sin embargo, las categorías de susceptibilidad alta y muy alta continúan ocupando gran parte del territorio, principalmente en zonas con pendientes pronunciadas y vegetación de páramo y arbustiva, donde las condiciones topográficas y climáticas favorecen la propagación del fuego.

Palabras clave: incendios forestales, susceptibilidad, Parque Nacional Cotacachi Cayapas, SIG, Landsat, NDVI, NBR.

ABSTRACT

The study was conducted in the upper reaches of Cotacachi Cayapas National Park, located in the province of Imbabura in northern Ecuador. The main objective was to identify the areas most susceptible to forest fires in order to provide information that contributes to the conservation and management of this protected area. The methodology used consisted of analyzing six variables related to fire occurrence: 1) vegetation cover, 2) slope, 3) altitude, 4) aspect of the terrain, 5) wind speed, and 6) land use. The analyzed variables were reclassified and weighted using multi-criteria analysis, resulting in the creation of thematic maps of forest fire susceptibility. In addition, the NDVI and NBR indices were used to assess changes in vegetation cover and detect areas affected by forest fires, employing Geographic Information System (GIS) tools and Landsat satellite imagery from 2001, 2007, 2021, and 2024. The results indicate that páramo (high-altitude grassland) is the predominant land cover in the study area, followed by native forest and shrubland. Multitemporal analysis revealed changes in vegetation cover and a 10.36% decrease in fire scars during the 2001–2007 period. However, high and very high susceptibility categories continue to occupy a large part of the territory, primarily in areas with steep slopes and páramo and shrubland vegetation, where topographic and climatic conditions favor fire spread.

Keywords: forest fires, susceptibility, Cotacachi Cayapas National Park, GIS, Landsat, NDVI, NBR.

LISTA DE SIGLAS

COA: Código Orgánico Ambiental

MAE: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

IGM: Instituto Geográfico Militar

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

SNI: Sistema Nacional de Información.

PNCC: Parque Nacional Cotacachi Cayapas.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index (Índice de vegetación de diferencia normalizada).

NBR: Normalized Burn Ratio (Índice de quema normalizado).

NIR: Near Infrared (Infrarrojo cercano del Espectro electromagnético).

RED: Red (Rojo del Espectro Visible).

SWIR: Short Wavelength InfraRed (Infrarrojo medio).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN **16**
Problema de investigación 16
Formulación del problema de investigación 17
Justificación 17
Objetivos 18
Objetivo General 18
Objetivos Específicos 18
Preguntas de Investigación 19
CAPÍTULO I **20**
MARCO TEÓRICO 20
1.1. Incendios de cobertura vegetal 20
1.2. Causas de los incendios de cobertura vegetal 20
1.3. Causas inmediatas 21
1.4. Causas estructurales 21
1.5. Tipos de incendios de cobertura vegetal 22
1.6. Incendios en los ecosistemas 22
1.7. Fases de inicio del fuego 23
1.8. Elementos determinantes del componente fuego 24
1.9. Impactos que ocasionan los incendios de cobertura vegetal 24
1.10. Sistemas de información geográfica aplicado al estudio de incendios 25
1.11. Susceptibilidad a incendios 26
1.12. Proceso de análisis Jerárquico (AHP) 26
1.13. Validación estadística 27
1.14. Gestión de riesgo de incendios 27
CAPÍTULO II **29**
2. MATERIALES Y MÉTODOS 29

2.1. Tipo de investigación 29
2.2. Ubicación del lugar: 29
2.3. Cartografía del sitio de investigación: 29
2.4. Caracterización edafoclimática del lugar 31
2.5. Materiales, equipos y software 31
2.6. Métodos, técnicas e instrumentos 32
2.7. Determinación de las características biofísicas y climáticas que influyen en la susceptibilidad a incendios forestales 32
2.8. Análisis multitemporal de las áreas susceptibles a incendios forestales. 36
2.9. Modelación de la distribución espacial y el grado de susceptibilidad a incendios forestales de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (PNCC). 36
2.10. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) 37
2.11. Cálculo del índice de susceptibilidad a incendios forestales 38
2.12. Procedimiento y análisis de datos 38
2.13. Modelación de la distribución espacial y el grado de susceptibilidad a incendios forestales de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (PNCC) 40
2.14. Evaluación de la variación y recuperación de la cobertura vegetal en áreas susceptibles que han sido afectadas por incendios forestales 45
CAPÍTULO III 47
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 47
3.1. Clasificación de las variables topográficas, antrópicas y climáticas relacionadas con la susceptibilidad a incendios forestales 47
3.2. Asignación de ponderaciones a las variables topográficas, antrópicas y climáticas que influyen en la susceptibilidad a incendios forestales. 49
3.3. Factores topográficos 58
3.4. Factores climáticos 61
3.5. Susceptibilidad temporal de incendios forestales 66
3.6. Evaluación de los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales 74
3.7. Control y validación de la clasificación supervisada 84
CAPÍTULO IV 87

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 87
Bibliografía 89
Anexos 95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de la Parte alta del PNCC 30
Tabla 2. Materiales, equipos y software a emplear en la investigación 31
Tabla 3. Escala de clasificación de la susceptibilidad a incendios forestales 32
Tabla 4. Susceptibilidad a incendios forestales según la cobertura vegetal 33
Tabla 5. Clasificación del uso del suelo según su susceptibilidad a incendios forestales 33
Tabla 6. Categorías de la susceptibilidad en la altitud del terreno 34
Tabla 7. Susceptibilidad orientación del terreno 34
Tabla 8. Categorización de la susceptibilidad de la pendiente del terreno 35
Tabla 9. Clasificación de la velocidad del viento de acuerdo con su influencia en la susceptibilidad a incendios forestales. 35
Tabla 10. Registro de imágenes Landsat descargadas para el estudio 39
Tabla 11. Pesos asignados a las variables 41
Tabla 12. Matriz de Confusión 45
Tabla 13. Variables que influyen en la susceptibilidad de incendios 46
Tabla 14. Cobertura vegetal anual 2001-2007 53
Tabla 15. Categorías de incendio anual 2001-2009 54
Tabla 16. Cobertura vegetal anual 2021-2024 55
Tabla 17. Categorías de incendio anual 2021-2024 55
Tabla 18. Susceptibilidad 2001 66
Tabla 19. Susceptibilidad 2007 68
Tabla 20. Susceptibilidad 2021 70
Tabla 21. Susceptibilidad 2024 72
Tabla 22. Valores del NDVI máximo y mínimo por año 77
Tabla 23. Valores del NDVI máximo y mínimo por año 78
Tabla 24. Matriz de confusión 84
Tabla 25. Valoración del coeficiente Kappa 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas 30
Figura 2. Proceso para la corrección de imágenes Landsat 40
Figura 3. Procesos para la clasificación supervisada 40
Figura 4. Proceso para el cálculo del NDVI 42
Figura 5. Proceso para el cálculo del NBR 44
Figura 6. Cobertura Vegetal del año 2001 49
Figura 7. Cobertura Vegetal del año 2007 50
Figura 8. Cobertura Vegetal del año 2021 51
Figura 9. Cobertura Vegetal año 2024 52
Figura 10. Pendiente de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas 57
Figura 11. Altitud de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas 58
Figura 12. Orientación del Parque Nacional Cotacachi Cayapas 59
Figura 13. Velocidad del Viento en el Parque Nacional Cotacachi Cayapas 60
Figura 14. Uso de Suelo año 2001 62
Figura 15. Uso de Suelo año 2007. 63
Figura 16. Uso Suelo año 2021 64
Figura 17. Uso de Suelo 2024 65
Figura 18. Susceptibilidad a incendios forestales año 2001 66
Figura 19. Susceptibilidad a incendios forestales año 2007 68
Figura 20. Susceptibilidad a incendios forestales año 2021 70
Figura 21. Susceptibilidad a incendios año 2024 72
Figura 22. NDVI 2001. 73
Figura 23. NDVI 2007. 74
Figura 24. NDVI 2021 75
Figura 25. NDVI 2024 76
Figura 26. NBR 2001 79
Figura 27. NBR 2007 80

Figura 28. NBR 2021..... 81
Figura 29. NBR 2024..... 82

INTRODUCCIÓN

El estudio analizó la susceptibilidad a incendios forestales en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas y su zona de amortiguamiento, ubicada en Ecuador, provincia de Imbabura, identificando los factores biofísicos y climáticos que influyen en la quema. Se evaluó la influencia de variables como la cobertura vegetal, la pendiente, la altitud, y la orientación del terreno, la velocidad del viento y el uso del suelo en la ocurrencia y propagación a incendios forestales. El análisis comparativo de los resultados obtenido en los años 2001, 2007, 2021 y 2024 permitió evaluar la evolución de esta variable a lo largo del tiempo. A partir de esto fue posible reconocer sectores donde la cobertura vegetal evidenció un proceso de regeneración posterior a los incendios forestales, así como otras zonas en las que existen las alteraciones. De acuerdo con la Secretaría de Gestión de Riesgos (2023), este tipo de evaluaciones proporciona insumos técnicos que respaldan la planificación del territorio y facilitan la formulación de acciones dirigidas a disminuir la vulnerabilidad y fortalecer la gestión de riesgo.

Problema de investigación

Por estas razones la cobertura vegetal del parque Nacional Cotacachi Cayapas en general presenta diferentes niveles de susceptibilidad a incendios, lo que determina el grado de afectación cuando ocurren dichas quemas de cobertura vegetal; está problemática se acentúa por causas de cambio climático y periodos de sequía en la Cordillera de los Andes, (Arias et al., 2024). Existe la necesidad de cartografiar las zonas susceptibles para la identificación de la susceptibilidad, debido a que se podría tomar medidas preventivas y de respuesta temprana que minimicen los impactos negativos de los incendios forestales. Existió la necesidad de cartografiar las zonas susceptibles para identificar la susceptibilidad, debido a que se podría

tomar medidas preventivas y de respuesta temprana que minimicen los impactos negativos de los incendios forestales.

Formulación del problema de investigación

¿Cuál es la susceptibilidad a incendios forestales en la parte alta del parque Nacional Cotacachi Cayapas?

Justificación

La investigación sobre la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas es importante para la conservación y protección de los ecosistemas alto andinos conformados por pajonal y vegetación arbustiva, los mismos que se desempeñan funciones ecológicas para el equilibrio ambiental. La parte alta corresponde a la superficie cubierta por el ecosistema páramo, en el rango altitudinal de 2600 – 4900 m.s.n.m (Arias et al., 2024).

De acuerdo con los riesgos ambientales, la información sobre la susceptibilidad de incendios de cobertura vegetal en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas permitirá conocer a profundidad la gravedad del problema que causan las quemas de cobertura vegetal natural. Según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos de Ecuador (2024), desde el 01 de enero de 2024 hasta la presente fecha, se han registrado 5.210 incendios forestales en 22 provincias, afectando a 179 cantones y 716 parroquias, ocasionando la pérdida de 74722.67 hectáreas de cobertura vegetal. Las provincias con mayores pérdidas en cobertura vegetal son: Loja, Azuay, Pichincha, Chimborazo, El Oro, Cotopaxi, Carchi, Imbabura y Guayas.

El presente estudio aportó con información detallada que explica la susceptibilidad de quema de cobertura vegetal en los ecosistemas de la parte alta del área protegida. Por lo cual, la información podrá ser usada por los tomadores de decisiones para mitigar y prevenir los efectos negativos de las quemas de su vegetación. La información que se genere aportara con bases que permitan actualizar el plan de manejo del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, y de igual manera concientizar a la población sobre el cuidado y protección de los ecosistemas naturales que contienen especies nativas de flora y fauna de gran importancia para la población local, nacional e internacional.

La información que se genere en el presente estudio permitirá aportar a la actualización de Plan de Manejo del PNCC, ya que se dispondrá de datos espaciales sobre la distribución de la susceptibilidad a incendios de cobertura vegetal en la parte alta del área protegida.

Objetivos

Objetivo General

- Modelar espacialmente la susceptibilidad ante incendios forestales en la franja altoandina del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, integrando covariables ambientales y climáticas para la predicción del riesgo ecológico.

Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar las covariables ambientales y climáticas de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas.
- Cuantificar el cambio de coberturas del suelo y cicatrices de incendios históricas entre (2001-2007-2021 y 2024) mediante imágenes satelitales de Landsat.
- Realizar la clasificación de la susceptibilidad a incendios forestales en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas.

Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son las condiciones biofísicas y ambientales de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas?
- ¿Cuál es el modelo aceptable para la distribución espacial y el grado de susceptibilidad a incendios forestales de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas?

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Incendios de cobertura vegetal

De acuerdo con Parra et al. (2025) los incendios de cobertura vegetal se denominan interrupciones ecológicas que tienen efectos discretos o difusos, leves o muy graves que llegan a ser muy destructivos, los cuales se llevan a cabo de un origen natural o antrópico, su dinámica está relacionada con las concurrencias de diferentes condiciones que se originan en un mismo sitio. El incendio influye en la estructura, composición y función de los ecosistemas ocasionando que la composición de especies se modifique y favorezca la ocurrencia de incendios posteriores. Al incendiarse la cobertura vegetal de un ecosistema se asume repercusiones, que en ocasiones son benéficas; no obstante, la incontrolable generación de incendios contribuye a agravar los efectos de este (Cisneros et al., 2024).

Los principales factores que afectan al comportamiento de los incendios son la topografía, las condiciones climáticas y los elementos combustibles estos factores combinados de forma adecuada conforman los tres elementos principales como el oxígeno, calor y combustible para generar inflamación (Capador et al., 2021). El incendio implica de diferente manera en cada tipo de ecosistema, lo que llega a provocar afectaciones en la cobertura vegetal, a esto se debe la necesidad de un monitoreo constante de las condiciones para la combustión del fuego y cambios post incendios con diferentes mecanismos de teledetección (Ríos, 2023). La teledetección satelital permite conseguir información de forma local, regional o global, esto da la procedencia de realizar un seguimiento y detección de incendios los datos mapeados contribuyen a comprender como los factores interactúan en la naturaleza y comportamiento del fuego en un área (Toaza et al., 2021).

1.2. Causas de los incendios de cobertura vegetal

De acuerdo con Farid et al., (2024) el origen de un incendio dentro de un área depende mucho de los factores de incidencia presentes, los cuales llevan a un origen y propagación rápida del incendio. Los factores son la disponibilidad de los combustibles, las condiciones meteorológicas del lugar y la existencia de fuentes de inflamación, las cuales están presentes en la superficie.

Hay causas conocidas como estructurales, que están vinculadas a circunstancias permanentes, ecológicas y sociales, así como causas inmediatas que provienen de fuentes antrópicas o de elementos naturales (Perea & García, 2024).

En los análisis de Ramírez et al. (2022) los incendios en la cobertura vegetal son provocados por una variedad de factores, entre los que se incluyen el cambio climático, la variabilidad climática, la deforestación y el uso de la tierra. Además, se examina cómo las políticas relacionadas con el uso del suelo y la gestión forestal influyen en la frecuencia e intensidad de la quema, es de gran importancia destacar que el ser humano es responsable de que los incendios sean ocasionados en diferentes tipos de regiones.

1.3. Causas inmediatas

El fuego se inicia de forma inmediata por agentes naturales o antrópicos por comportamiento humano. Las causas inmediatas se clasifican en tres tipos que son:

1.3.1. Origen natural. Incendios que se generan sin intervención del ser humano, principalmente por caída de rayos, que es por la presencia de combustible en el área que se origina y propaga rápidamente un incendio, esto es más común durante la época de sequía (Ríos, 2023).

1.3.2. Negligencias. Se refiere a incendios producidos por descuidos del uso de fuego. Las quemas de residuos agrícolas, quemas de pastos, que para las personas en su trabajo les resulta conveniente llegan a descontrolarse expandiéndose a las áreas naturales (Quijije et al., 2025).

1.3.3. Intencional. Son aquellas que se han provocado deliberadamente por el ser humano. Generando el fuego con intencionalidad producto de conflictos entre comunidades, creencias ancestrales y piromanía provocando que el fuego consuma grandes extensiones (Gil, 2022).

1.4. Causas estructurales

Se relaciona con factores que influyen en el comportamiento y propagación del fuego, estas causas dependen de factores intrínsecos dentro de un área vegetativa y del entorno socioeconómico. Se considera como causa estructural la acumulación de cargas de combustibles y el uso tradicional del fuego en la agricultura, además del poco conocimiento de las personas sobre la fragilidad de los ecosistemas, aparte del poco espíritu de conservación por parte de las poblaciones rurales (Ferreira et al., 2024).

1.5. Tipos de incendios de cobertura vegetal

Existen diferentes tipos de incendios de cobertura vegetal. La forma más común de clasificar es de acuerdo con la forma de propagación que son:

1.5.1. Incendios de superficie

En este tipo de incendios el combustible que se encuentra sobre el suelo es el factor principal para la propagación, generalmente se trata de hojas secas, ramas desprendidas de los árboles y troncos (Sadrabadi & Innocente, 2023). El incendio de este tipo suele propagarse con rapidez. Para determinar la probabilidad de ignición en este tipo de incendios se evalúa la composición de la vegetación, sus combustibles, vegetación que se encuentra sobre la superficie del suelo, y la relación con los parámetros físicos y meteorológicos del ambiente (Armenteras et al., 2021).

1.5.2. Incendios de copas

El fuego se propaga rápidamente por ascendencia vertical y quema la vegetación hacia arriba al usar las ramas como combustible, hasta llegar al dosel de los árboles. Para evaluar el comportamiento de este tipo de incendios en zonas boscosas se toma en cuenta el tipo de vegetación, altura, carga combustible de las 11 copas, y la relación de volumen del combustible con la densidad de este (Liu, 2023).

1.5.3. Incendios de suelo o subterráneo

Según Ferreira (2024) menciona este caso el fuego se dispersa por debajo de la superficie al quemar raíces y materia orgánica seca, este tipo de incendio avanza muy lento, sin embargo, es difícil de detectar ya que es el producto de un incendio previo, y puede alcanzar una profundidad de hasta dos metros.

1.6. Incendios en los ecosistemas

El fuego es considerado una fuerza evolutiva que con el tiempo ha ayudado a moldear la estructura, composición y distribución de los diferentes ecosistemas de cobertura vegetal (Samamé, 2023) menciona que es importante considerar a la ecología del fuego dentro de la ciencia, la cual se encarga del estudio del fuego en distintos componentes de los ecosistemas

y las interrelaciones que se manifiestan entre los seres vivos y el ambiente. El fuego a lo largo del tiempo ha presentado influencia en la sucesión ecológica, es importante comprender la función que el fuego cumplen en los diferentes ecosistemas (Cisneros et al., 2024). La clasificación de los ecosistemas se basa de acuerdo con la respuesta de la vegetación al fuego.

1.6.1. Ecosistemas dependientes. Los ecosistemas requieren del fuego para conservar las especies, sus hábitats y paisajes esto debido a que este tipo de ecosistemas se han desarrollado con el fuego. Donde el fuego es esencial y las especies que se encuentran dentro del ecosistema han desarrollado adaptaciones para mayor resistencia (Armenteras et al., 2021).

1.6.2. Ecosistemas independientes. Estos ecosistemas son demasiado fríos, húmedos o secos para quemarse, por esto la influencia del fuego es muy pequeña o nula. Al ser áreas muy húmedas y no contar con 12 las características para la ignición y propagación del fuego, es muy poco probable que estos ecosistemas se ven afectados por incendios (Plaza et al., 2022).

1.6.3. Ecosistemas sensibles. Las especies vegetativas dentro del ecosistema carecen de adaptación al fuego, y las condiciones en las que se encuentran impide la rápida propagación, sin embargo, esta condición cambia por la invasión de pastos, cambio de uso de suelo, arbustos pirófilos y cambio climático. Sowmya et al., (2025) menciona que estas actividades causan la fragmentación del ecosistema, lo que altera el combustible que contribuye a que las igniciones aumenten, y debido a esto el ecosistema cambie a una vegetación más propensa al fuego.

1.6.4. Ecosistemas influidos. Estos ecosistemas están emparentados jerárquicamente entre los ecosistemas sensibles y dependientes se encuentran en el punto de transición entre estos ecosistemas donde aún la respuesta de las especies vegetativas no es concreta y el mantenimiento de la diversidad dentro de este aún no se conoce (Gajendiran et al., 2024).

1.7. Fases de inicio del fuego

Para el inicio y propagación de un incendio se cumple tres fases que principalmente se distinguen por los niveles térmicos, estas fases son:

1.7.1. Fase de precalentamiento. Al comenzar el incendio el aire comienza a calentarse y a elevar la temperatura del combustible lo que ayuda a reducir la humedad. En esta fase se inicia la pérdida de humedad y comienza la destilación de la resina del combustible conforme aumenta la temperatura. (Wu et al., 2022)

1.7.2. Fase de combustión de gases. Esta fase establece un efecto dominó, donde, la madera genera gases que contienen propiedades inflamables, que al oxidarse con el aire dan inicio al fuego, indaga el desprendimiento de energía continua con la reacción del fuego al emanar calor y expandirse a la superficie y cuerpos cercanos (Bargali et al., 2024).

1.7.3. Fase de combustión del carbón. La madera que debido a las altas temperaturas desprende calor, forma pequeños fragmentos denominados carbón, los cuales requieren una menor cantidad de oxígeno para continuar con la combustión al quemarse el carbón combinado con el oxígeno quedan las cenizas formadas por sustancias minerales que no arden (Villacís et al., 2022).

1.8. Elementos determinantes del componente fuego

El fuego es el resultado de un proceso químico que tiene origen en la presencia de tres elementos que son: combustible, calor y oxígeno, denominado por algunos autores como triángulo de fuego o de combustión, estos factores están presentes en el ambiente, es decir, su nivel de influencia dependerá de la cantidad en la que estos se encuentren. La humedad del suelo mantiene inactivo el combustible, pero una vez se inicia la ignición el viento aumenta la velocidad de las llamas, traslada el aire caliente que seca los combustibles y acelera la propagación del incendio (Ruiz et al., 2022).

1.9. Impactos que ocasionan los incendios de cobertura vegetal

Al existir una alteración en el funcionamiento natural del ecosistema, en este caso al pasar por un incendio, se producen cambios que alteran la naturalidad del medio físico alterando las variables químicas y físicas y los ciclos naturales a los que se someten. Estos cambios pueden traer consecuencias positivas como negativas. Según Faúndez (2023) el fuego puede ser usado de forma positiva al realizarse de forma prescrita y control; no obstante, los incendios incontrolados llegan a causar daños dependiendo de la respuesta del ecosistema y la adaptación de las especies. En ecosistemas sensibles los incendios causan modificaciones en la composición y ciclo de las especies donde la vegetación se vuelve más propensa, y los incendios se vuelven más recurrentes.

En la indagación Gómez et al. (2021) menciona que el principal tema que lo aborda es como el cambio climático va alterando en los diferentes tipos de incendios forestales en sus diferentes zonas por ello se demuestra que las olas de calor más frecuentes y las sequías prolongadas están correlacionadas en la quema principalmente de pajonal en diferentes sitios que son más propensos los incendios en regiones.

1.10. Sistemas de información geográfica aplicado al estudio de incendios

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son piezas claves en la detección de cambios espacio temporales, ya que proporcionan registros gráficos georreferenciados de puntos de la tierra referentes a un tamaño y dimensión relativa (Cisneros et al., 2024). La herramienta brinda facilidad en la entrada de datos, velocidad de procesamiento y dinamismo permitiendo ser usadas en amplias 17 disciplinas investigativas entre ellos el estudio de incendios afirman la importancia de la integración del SIG en el mapeo de los incendios lo cual permite realizar estudios preventivos, de seguimiento y simulación del comportamiento del fuego (Toaza et al., 2021).

Castillo y Baldassini (2023) en su investigación toman al SIG como un medio de superposición y combinación de imágenes satelitales para analizarlos y determinar zonas de riesgo a incendios, concluyendo que este método puede ser aplicado para la gestión de incendios en los lugares de alto riesgo y tomar medidas adecuadas para evitar daños a largo plazo; de igual manera, emplea las capacidades de la teledetección y el SIG para zonificar áreas que presentan mayor riesgo a incendios, asociando los factores topográficos y meteorológicos que influyen en la ocurrencia de incendios, y finalmente compara el mapa de las zonas detectadas como mayor riesgo a incendios con los puntos de los lugares reales afectados con el fuego coincidiendo en su mayoría con las áreas con alto riesgo a incendio demostrando la confiabilidad de las herramientas aplicadas. Por su parte, Toaza et al., (2021) empleo la herramienta de SIG en el monitoreo de la regeneración de la vegetación luego de un incendio, realizando una comparación cronológica de la cartografía para determinar la tasa de recuperación de la vegetación luego del siniestro.

Skakun et. al. (2024) menciona que la susceptibilidad de incendio es considerada un proceso espacial y temporal, es por esto por lo que al estudiarlo se lo analiza de la misma manera usando una herramienta que trabaje adecuadamente con información espacial, es a causa de esto que el SIG es usado en varios estudios previos sobre la susceptibilidad a incendios, identificar áreas

susceptibles a incendios mediante el mapeo con SIG ayuda en la prevención de incendios y el desarrollo de estrategias de mitigación para combatir los incendios.

1.11. Susceptibilidad a incendios

La predisposición de un área a sufrir recurrentemente incendios es denominada susceptible. Para determinar la susceptibilidad a incendios de 18 cobertura vegetal de un área, se inicia con el análisis de los factores que influyen en la ignición y propagación de incendios (Rojas et al., 2022).

En un estudio realizado por Arias (2024) se identifican que los factores influyentes en los incendios en su área de estudio y cada factor es clasificado de acuerdo con la susceptibilidad debido a que cada variable afecta en los incendios de manera diferente, para posteriormente procesar la información y obtener un mapa general de la susceptibilidad a incendios dentro del área.

La susceptibilidad a incendios se la obtiene con la suma de los factores que influyen en la ignición, estos factores son caracterizados y clasificados acorde a su importancia, esto permite posteriormente zonificar las áreas más susceptibles a la ocurrencia incendios de cobertura vegetal con el mapa de susceptibilidad se identifica la vulnerabilidad y predisposición del área a la ocurrencia y dispersión del incendio, de igual manera el mapeo permite cuantificar la probabilidad de ocurrencia para generar medidas de mitigación más acertadas (Tecuapetla et al., 2021). De acuerdo con el estudio de varios autores la susceptibilidad de incendios se la clasifica de forma equitativa en cinco niveles cada nivel vario acorde a su traducción o definición.

1.12. Proceso de análisis Jerárquico (AHP)

De acuerdo con López et. al. (2021) el proceso de análisis jerárquico desarrollado por Thomas Saaty está diseñado para resolver problemas que tengan multicriterio, por ello es de vital importancia conocer la finalidad de resolver el problema, para deducir el grado de cada criterio a analizar. Mediante el AHP se puede obtener resultados medibles para la matriz de evaluación, ponderando los criterios, donde se puede puntuar acorde a su importancia o relevancia frente a la problemática Farfán et. a esto es posible mediante la correcta gestión de la información y métodos de adquirir conocimiento que permitan obtener los resultados deseados a la hora de resolver la problemática en su investigación menciona que la evaluación multicriterio y el

análisis jerárquico son empleados constantemente en los SIG donde es necesario realizar un proceso de verificación manual del procedimiento de AHP, donde se inicia con una tabla de comparación pareada de cada criterio y posteriormente se estandariza los valores, obteniendo el promedio de los procesos para obtener una ponderación para cada criterio (Herrera & Castillo, 2025).

1.13. Validación estadística

Según Sánchez et. al. (2024) las pruebas estadísticas están diseñadas para analizar cualquier tipo de información, utilizando esta facilidad para la aplicación en la validación de datos por medio de comparación de resultados o modelos. En el estudio se realiza una comparación estadística entre los datos de incendios reales con el resultado de datos obtenidos de un simulador que analiza el comportamiento del fuego, en este caso se realizó un análisis multivariado de conjunto de dato lo que permitió demostrar la alta confiabilidad del modelo por medio del análisis estadístico. Por su parte Arias et al. (2024) toma las pruebas de Chi-cuadrado y curva Roc para asociar dos variables independientes y validar el modelo las áreas susceptibles a incendios en el cantón Ibarra

1.14. Gestión de riesgo de incendios

En Ecuador el SNGRE es el eje central para la atención de emergencias que juntamente con los Bomberos, el ECU-911, las fuerzas de control, los Gobiernos Autónomos Descentralizados, Ministerio del Ambiento y otras entidades que pertenecen a la cartera de estado, se encuentran atentas en los estudios de prevención y respuesta temprana (SNGRE, 2020).

El implemento de leyes es importante para controlar igniciones y que los incendios se esparzan sin control causando impactos negativos en el ambiente, estas leyes deben estar enfocadas en sanciones, educación, programas de control las mismas que deben estar enfocadas para trabar en conjunto con el gobierno y las comunidades (Becerra et al., 2025).

Los programas de prevención y mitigación se enfocan de acuerdo con el comportamiento del fuego y la recurrencia de estos, a la hora de combatir un incendio los programas para defensa se establecen entorno a evitar que el incendio se propague, esto por medio de líneas de defensa o de control, también con métodos correctos de combate aplicado por las líneas de emergencia. De igual manera Villacís (2022) menciona que la educación hacia las comunidades es una parte fundamental para dar a conocer el funcionamiento del fuego, las técnicas correctas de quemas

controladas y de este modo prevenir los incendios descontrolados de cobertura vegetal. Por su parte el SNGRE (2020) se encuentra en la labor de desarrollar brigadas acreditadas en el refuerzo de los incendios forestales, dirigidos al cuerpo de bomberos del país, con el propósito de formar equipos especializados en el control y combate de incendios con la finalidad de salvaguardar la seguridad de los ciudadanos y los recursos naturales.

Los sistemas de alerta temprana involucran control, vigilancia constante y prevención en los incendios, este tipo de sistemas requieren un establecimiento de métodos de evacuación y rutas de ingreso para las líneas de emergencia, la intervención de la comunidad tanto para alertar del hecho como para combatirlo contribuirá a contrarrestar de manera más rápida. Por esto el proponer la instalación de un sistema de alerta comunitaria es beneficioso para tener un control, vigilancia y respuesta inmediata en el caso de suscitarse un incendio, lo que permite disminuir el daño y la intensidad del fuego.

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tipo de investigación

El presente estudio abordó enfoques cualitativos y cuantitativos para certificar el análisis de la susceptibilidad de incendios forestales en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. En el enfoque cualitativo, se analizó las zonas con mayor susceptibilidad, en el enfoque cuantitativo se analizó variables dependientes e independientes como: velocidad del viento, cobertura vegetal, uso del suelo, pendientes del terreno, orientación del terreno y temperatura, para el cálculo de la suma ponderada de incendios de cobertura vegetal.

Se determinó los objetivos de la investigación y se la clasificó como aplicada, se indagó conocimientos técnicos y científicos para conocer el problema de incendios de cobertura en la parte alta. En relación con el alcance, es de tipo explicativo, además se investigó cuál de las zonas de la parte alta del área protegida son más propensas a incendios.

El diseño de la investigación es no experimental, por lo que el presente estudio no permite la manipulación directa de recolección de datos en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. Por consiguiente, el enfoque temporal es transversal o sincrónico, enfocado hace 10 años para observar el avance de quema. El área de estudio se realizó en campo, en un entorno de reserva natural donde existe fauna, flora y especies forestales nativas.

2.2. Ubicación del lugar:

- Provincia: Imbabura
- Cantón: Cotacachi
- Parroquias: Quiroga, Imantag, Plaza Gutiérrez, Apuela, 6 de Julio de Cuellaje
- Cantón: Urcuquí
- Parroquias: San Blas, Pablo Arenas, La Merced de Buenos Aires, Cahuasqui

2.3. Cartografía del sitio de investigación:

Las coordenadas del área de estudio se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.

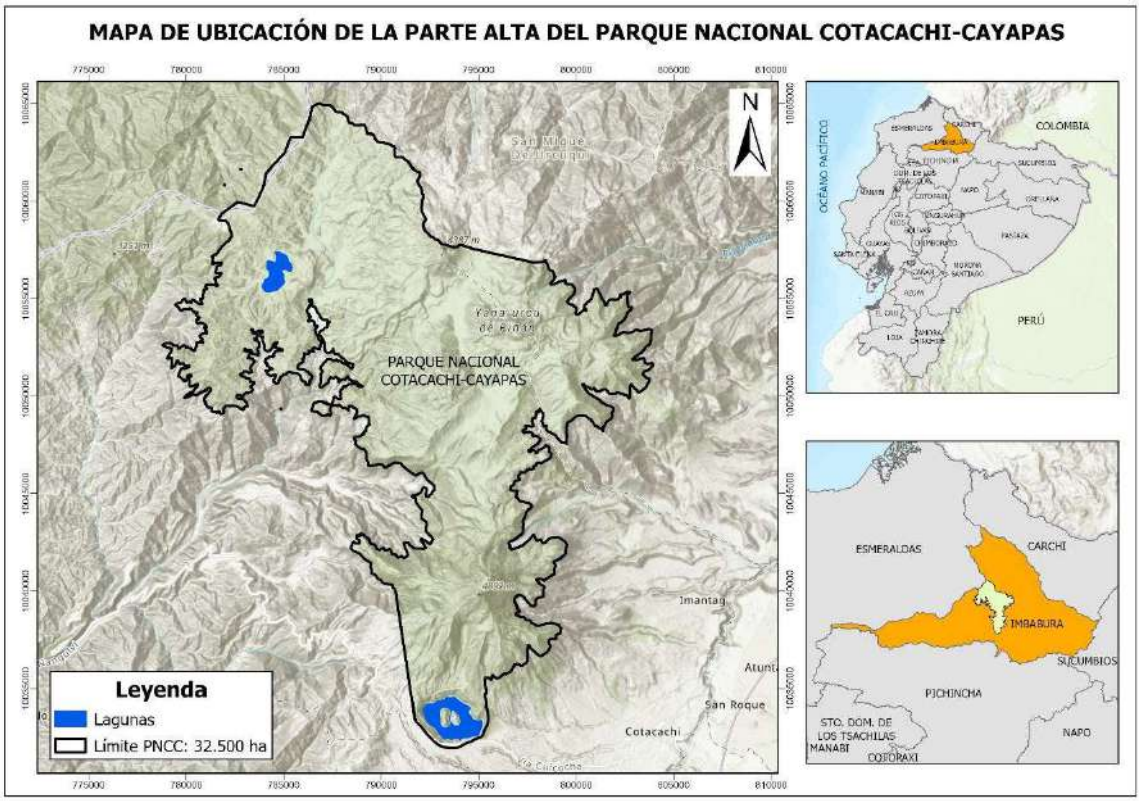
Coordenadas de la Parte alta del PNCC

PUNTO	COORDENADA X	COORDENADA Y
Norte	786626	10065112
Sur	793350	10032015
Este	803654	10053323
Oeste	778941	10052799

Nota: Esta tabla indica las coordenadas de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi - Cayapas.

Figura 1.

Ubicación de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas



Fuente: SNI, (2017).

Límites:

Los límites para la investigación se determinaron de acuerdo con la Orientación Territorial:

- Norte: Cantón Urcuqui, parroquia La Merced de Buenos Aires.
- Oeste: Cantón Cotacachi en la parroquia 6 de Julio de Cuellaje, Apuela, Plaza Gutiérrez.
- **Sur:** Cantón Cotacachi en la parroquia Quiroga.
- **Este:** Cantón Urcuquí en la parroquia de Imantag, San Blas, Pablo Arenas y Cahuasquí.

2.4. Caracterización edafoclimática del lugar

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información Geográfica (2017) (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2007) el sitio tiene las siguientes características:

- Suelo: Inceptisol
- Clima: Ecuatorial de Alta Montaña
- Precipitación media anual: 1000 – 2500 mm
- Temperatura media anual: 4 y 12 °C
- Altitud: 2600 – 4900 m.s.n.m

2.5. Materiales, equipos y software

Tabla 2.

Materiales, equipos y software a emplear en la investigación

Materiales de campo	Materiales de laboratorio	Equipos	Software
Cartas topográficas	Archivos Shapefile	Computadora	Office 365
	Datos de estaciones meteorológicas	GPS	ArcGIS Pro
Mapas temáticos	Imágenes Landsat	Drone	Rstudio
	Modelos digitales de elevación	Vehículo	

2.6. Métodos, técnicas e instrumentos

2.6.1 Área de Estudio

El área de estudio constituye la superficie de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas que representa 32500 ha, que se extiende desde los sectores de laguna de Cuicocha hasta los páramos de Piñán.

2.6.2. Características del área de estudio

El área de estudio corresponde a la superficie de pajonal y vegetación arbustiva de la parte alta del PNCC, en un rango altitudinal de 2600 – 4900 m.s.n.m. La parte alta del Parque Nacional Cotacachi - Cayapas pertenece a la superficie que se encuentra en la provincia de Imbabura en el cantón Cotacachi y una parte en el cantón Urcuqui, las parroquias que pertenecen al área de estudio se describen en el apartado de la ubicación política. Dentro de esta zona alta se encuentra la Laguna de Cuicocha y especies de flora y fauna nativas, además existe cobertura de pajonal perteneciente al ecosistema páramo.

2.7. Determinación de las características biofísicas y climáticas que influyen en la susceptibilidad a incendios forestales

Para la determinación de las áreas con susceptibilidad a incendios forestales se consideraron variables biofísicas y climáticas, entre las que se incluyen:

- Cobertura Vegetal
- Pendiente
- Uso de Suelo
- Velocidad de Viento
- Altitud de Terreno
- Orientación del Terreno

Posteriormente, cada una de estas variables fueron clasificadas en cinco categorías de susceptibilidad, con el propósito de evaluar su influencia en la ocurrencia de incendios forestales. La distribución de estas categorías se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.

Escala de clasificación de la susceptibilidad a incendios forestales

Clase	Susceptibilidad	Color
0	No aplica	Gris
1	Baja	Verde
2	Muy Baja	Verde Azulado
3	Moderada	Amarillo
4	Alta	Tomate
5	Muy Alta	Rojo

Variables Topográficas

En la T abla 4 presenta las clases de susceptibilidad establecidas para la variable de la cobertura vegetal.

Tabla 4 .

Susceptibilidad a incendios forestales según la cobertura vegetal

CLASES	CATEGORÍA	SUSCEPTIBILIDAD	COLOR
0	Afloramiento de roca y Lagunas	No Aplica	GRIS
1	Incendio Forestal	Muy Baja	Verde
2	Cicatriz de Incendios	Baja	Verde Azul
3	Bosque Nativo	Moderada	Amarillo
4	Vegetación Arbustiva	Alta	Naranja
5	Páramo	Muy alta	Roja

Las categorías de susceptibilidad de acuerdo con el uso del suelo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Clasificación del uso del suelo según su susceptibilidad a incendios forestales

CLASES	CATEGORÍAS	SUSCEPTIBILIDAD	COLOR
0	Afloramiento de Roca y Lagunas	No aplica	GRIS
2	Área Intervenida	Baja	Verde Azul
3	Bosque Nativo	Moderada	Amarillo
4	Vegetación Arbustiva	Alta	Naranja
5	Páramo	Muy Alta	Roja

La susceptibilidad asociada a la altitud del terreno se describe en la Tabla 6.

Tabla 6.

Categorías de la susceptibilidad en la altitud del terreno

CLASES	CATEGORIA (msnm)	SUSCEPTIBILIDAD	COLOR
1	2750 – 3000	Muy baja	Verde
2	3000 – 3250	Baja	Verde Azul
3	3250 – 3500	Moderada	Amarillo
4	3500 – 3750	Alta	Naranja
5	>3750	Muy Alta	Roja

En la Tabla 7 se presenta la clasificación de la susceptibilidad de acuerdo con la orientación del terreno.

Tabla 7.

Susceptibilidad orientación del terreno

CLASES	CATEGORIA	SUSCEPTIBILIDAD	COLOR
1	Plano	Muy Baja	Verde
2	Este	Baja	Verde Azul
3	Sur	Moderada	Amarillo
4	Oeste	Alta	Naranja
5	Norte	Muy Alta	Roja

Las categorías utilizadas para clasificar la susceptibilidad de la pendiente del terreno se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Categorización de la susceptibilidad de la pendiente del terreno

CLASE	RANGO (%)	CATEGORIA	SUSCEPTIBILIDAD	COLOR
1	0-12	Ligeramente ondulado- Muy montañoso	Muy Baja	Verde
2	12 -25	Montañoso	Baja	Verde Azul
3	25-50	Muy montañoso	Moderada	Amarillo
4	50-70	Escarpado	Alta	Naranja
5	>70	Muy Escarpado	Muy alta	Roja

En la Tabla 9 se describen las categorías de susceptibilidad relacionadas con la velocidad del viento.

Tabla 9.

Clasificación de la velocidad del viento de acuerdo con su influencia en la susceptibilidad a incendios forestales.

CLASE	CATEGORIA (m/s)	SUSCEPTIBILIDAD	COLOR
1	0-3	Muy Baja	Verde
2	3-5	Baja	Verde Azul
3	5-8	Moderada	Amarillo
4	8-10	Alta	Naranja
5	>10	Muy Alta	Roja

2.8. Análisis multitemporal de las áreas susceptibles a incendios forestales.

El comportamiento de las áreas susceptibles fue evaluado mediante un análisis multitemporal basado en imágenes satelitales. Para este propósito, se calcularon:

- Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI)
- Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)
- Variación multitemporal de las áreas susceptibles (2001, 2007, 2021 y 2024)

A continuación, las variables consideradas en el estudio fueron integradas para determinar la susceptibilidad a incendios forestales mediante la ecuación que se presenta a continuación.

2.9. Modelación de la distribución espacial y el grado de susceptibilidad a incendios forestales de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (PNCC).

En la modelación de la distribución espacial y el grado de susceptibilidad de incendios forestales se empleó la ecuación de suma ponderada, donde se asignaron pesos o ponderaciones a las seis variables.

Susceptibilidad = (Cob.veg (30%) + Pend (15%) + U. Suelo (10%) + V. Vien (15%) + Al. Terr (15%) + Or. Terr (15%))

Para lo cual:
Cob. Veg = ráster reclasificado de la cobertura vegetal integrado por las categorías de vegetaciñon arbustiva, vegetación herbácea y bosque, al cual se asignó una ponderación del 30%.

Pend = ráster reclasificado de la pendiente del terreno, conformado por las clases de relieve (plano, ondulado, ligeramente ondulado, montañoso, muy montañoso y escarpado), con una ponderación del (15%).

U.Sue = ráster reclasificado de Uso de suelo que comprende las categorías de (Pastos y Cultivos), con una ponderación del (10%).

V.vient = ráster reclasificado de Velocidad del Viento (Velocidad medida en m/s) (15%). Al. Terr = ráster reclasificado de Temperatura (Rangos de Temperatura en Grados Centígrados) (15%).

Or. Terr = ráster reclasificado de Orientación del Terreno (Orientaciones del Terreno de acuerdo con los puntos cardinales: N, S, E, O, NE, SE, NO, SO) (15%).

La modelación de la susceptibilidad a incendios forestales contiene la variable altitud del terreno, la misma que está muy correlacionada con la variable temperatura de acuerdo al gradiente adiabático húmedo. En la modelación de la susceptibilidad no se consideró la precipitación, ya que la ocurrencia de los incendios forestales ocurre con alta frecuencia en la época seca. DIAZ, (2009).

Los pesos ponderados para las variables fueron obtenidos de acuerdo con el análisis multicriterio, según (Oñate-Valdivieso, Álvaez, Esparza, & Oñate-Paladines, s.f.)

2.10. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Para estimar el estado de la cobertura vegetal se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), calculando mediante la ecuación propuesta por Olivares & López, (2019) y Ovando et al. (2021):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

- NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada.
- NIR: Banda del Infrarrojo cercano
- RED: Banda correspondiente al espectro rojo

2.11. Cálculo del índice de susceptibilidad a incendios forestales

La identificación de las áreas afectadas por incendios forestales se realizó mediante el Índice Normalizada de Áreas Quemadas (NBR), empleando la ecuación descrita por United Nations, (2021) y Valdez, Bravo, y Manzo, (2021):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

- NBR: Índice de incendios de áreas quemadas.
- NIR: Banda el infrarrojo cercano.
- SWIR: Banda del infrarrojo de onda corta (infrarrojo medio).

Los resultados obtenidos fueron utilizados para elaborar el análisis multitemporal de la cobertura vegetal, cuyos registros se organizaron mediante la matriz presentada a continuación.

2.12. Procedimiento y análisis de datos

2.12.1. Delimitación de las áreas susceptibles a incendios forestales en el Parque Nacional Cotacachi Cayapas

La delimitación se realizó mediante el análisis multicriterio en el software ArcGIS Pro en el Laboratorio de Geomática de la Universidad Técnica del Norte.

2.12.2. Caracterización del tipo de suelo

Se obtuvo archivos Shapefile desde el Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM), a escala 1:50000 (http://www.geograficomilitar.gob.ec/)

Los archivos descargados se procesaron en la interfaz de ArcGIS Pro, posteriormente fueron empleados para obtener información del tipo de suelo que existe en la parte alta del PNCC.

2.12.3. Pendientes, orientación y altitud del terreno

Las variables altitud, pendiente y orientación del terreno fueron generadas a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 30 m de resolución espacial, descargado del Geoportal OpenTopography (https://opentopography.org/). Con esta información se obtuvieron los rangos altitudinales y las características topográficas necesarias para el análisis de la susceptibilidad a incendios forestales.

2.12.4. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal se obtuvo mediante la clasificación de imágenes Landsat de los últimos 10 años, las clases de cobertura que se usaron correspondieron a 1) bosque nativo, 2) páramo, 3) vegetación arbustiva y 4) vegetación herbácea. Las imágenes se obtuvieron desde la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS (por sus siglas en inglés) (https://earthexplorer.usgs.gov/).

2.12.5. Velocidad del viento

Los datos de velocidad y dirección del viento se obtuvieron de las estaciones meteorológicas del INAMHI (https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/), mediante el acceso a la biblioteca del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Las estaciones seleccionadas para la obtención de información fueron: Ibarra, Atuntaqui, Otavalo, Hacienda Las Marías e Inguincho.

2.12.6. Uso del suelo

El uso del suelo se obtuvo mediante la clasificación de imágenes Landsat de los últimos 10 años, las clases de uso del suelo que se usaron correspondieron a: 1) cultivos, 2) pastos, 3) vías,4) cuerpos de agua y 5) comunas de la parte alta del PNCC. Para validar la clasificación supervisada de imágenes se usó la matriz de confusión y el cálculo de índice Kappa.

2.13. Modelación de la distribución espacial y el grado de susceptibilidad a incendios forestales de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (PNCC)

En la modelación de la distribución espacial y el grado de susceptibilidad de incendios forestales se empleó la ecuación de suma ponderada, donde se asignaron pesos o ponderaciones a las seis variables.

Paso 1: Recolección de información

Imágenes Satelitales: Se seleccionó y se descargó imágenes satelitales correspondientes a los años de estudio, considerando la disponibilidad y calidad de los datos, las cuales fueron utilizadas para el procesamiento y análisis multitemporal de las variables evaluadas.

Tabla 10.

Registro de imágenes Landsat descargadas para el estudio

IMAGEN	AÑO	NOMBRE
Landsat 7	2001	LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_010060_20010916
Landsat 7	2007	LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_010060_20070731
Landsat 7	2021	LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_010060_20210705
Landsat 9	2024	LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_010060_20240830

Datos Geoespaciales: Se generó datos de cobertura vegetal, pendiente, uso de suelo, velocidad del viento, altitud del terreno y orientación del terreno, a partir de los datos obtenidos en los geoportales del Instituto Geográfico Militar (IGM). Estos insumos fueron utilizados como variables de entrada para el análisis de susceptibilidad a incendios forestales.

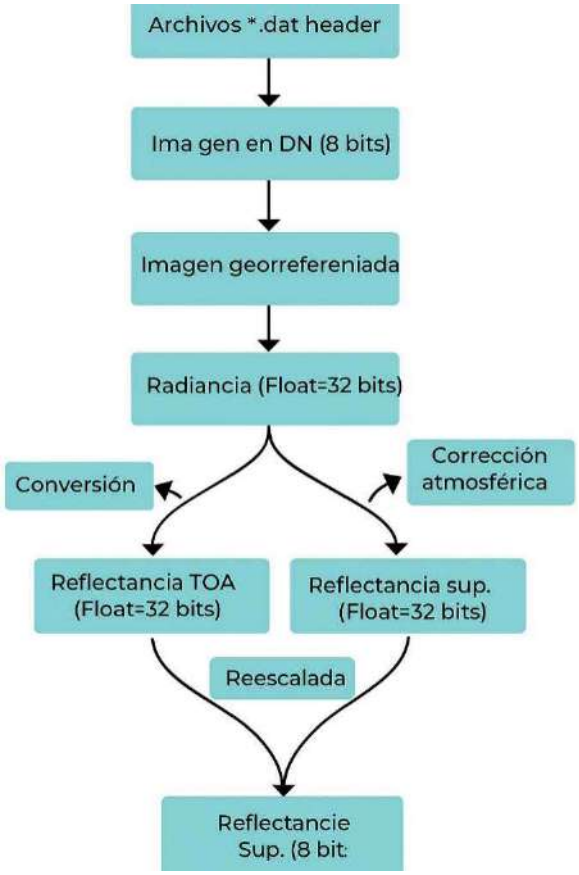
Registro Histórico de Incendios: La información relacionada con la ocurrencia histórica de incendios forestales fue recopilada a partir de los registros proporcionados por la secretaria de Gestión de Riesgos (https://www.grdtionderiesgos.gob.ec/), y también con registros obtenidos por el presidente del Parque Nacional Cotacachi Cayapas. Estos datos permitieron identificar antecedentes de eventos ocurridos dentro del área de estudio.

Paso 2: Tratamiento preliminar de imágenes y datos geoespaciales.

Las imágenes satelitales Landsat fueron sometidas a procesos de corrección radiométrica y geométrica con la finalidad de reducir posibles alteraciones presentes en los datos y mejorar su calidad para el análisis espacial. En la Figura 2 se representa el flujo metodológico aplicado durante el procesamiento y ajuste de las imágenes satelitales utilizadas en la investigación.

Figura 2

Proceso para la corrección de imágenes Landsat

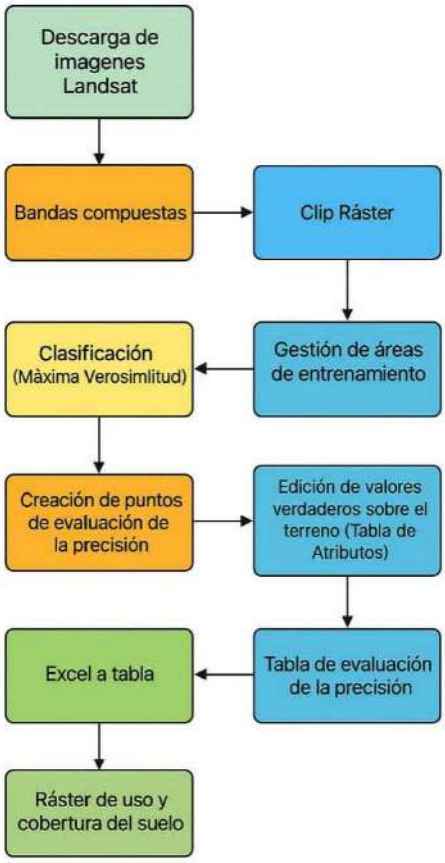


Fuente: La autora

Paso 3: Identificación de Áreas Susceptibles

Clasificación supervisada: Una vez corregidas, las imágenes fueron sometidas a un proceso de clasificación utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud, con el fin de reconocer y estimar las zonas susceptibles. Este procedimiento se desarrolló mediante herramientas de clasificaciones disponibles en ArcGIS Pro. En la Figura 3 se muestra la secuencia aplicada para la clasificación supervisada de las imágenes Landsat.

Figura 3.
Procesos para la clasificación supervisada



Fuente: La autora

Análisis Jerárquico de Procesos (AHP): Para estimar la susceptibilidad se empleó el método multicriterio propuesto por Thomas L. Saaty, el cual permite establecer un orden de importancia entre distintos factores mediante la asignación de prioridades en la toma de decisiones. Este enfoque facilita determinar la influencia relativa de cada variable. En la Tabla 11 se presentan los valores de ponderación otorgados según el nivel de incidencia de cada factor en la ocurrencia de incendios forestales.

Tabla 11.

Pesos asignados a las variables

Variables	Peso
Cobertura Vegetal	0.30
Pendiente	0.15
Uso de Suelo	0.10
Velocidad de Viento	0.15
Altitud del Terreno	0.15
Orientación del Terreno	0.15

Adaptado de Angulo (2019)

Paso 4: Análisis de Índices de Vegetación e Incendios

Cálculo de NDVI: Evaluación del estado de la vegetación: A partir del procesamiento del ráster correspondiente al NDVI se realizó la interpretación de los valores obtenidos. Los valores inferiores a cero fueron asociados con superficies que presentan ausencia de cobertura vegetal, tales como cuerpos de agua, áreas urbanizadas, afloramientos rocosos, nubes y sombras generadas por estas. Por otro lado, los valores positivos indicaron la presencia de vegetación, incluyendo zonas agrícolas, pastizales, bosques naturales y áreas de matorral.

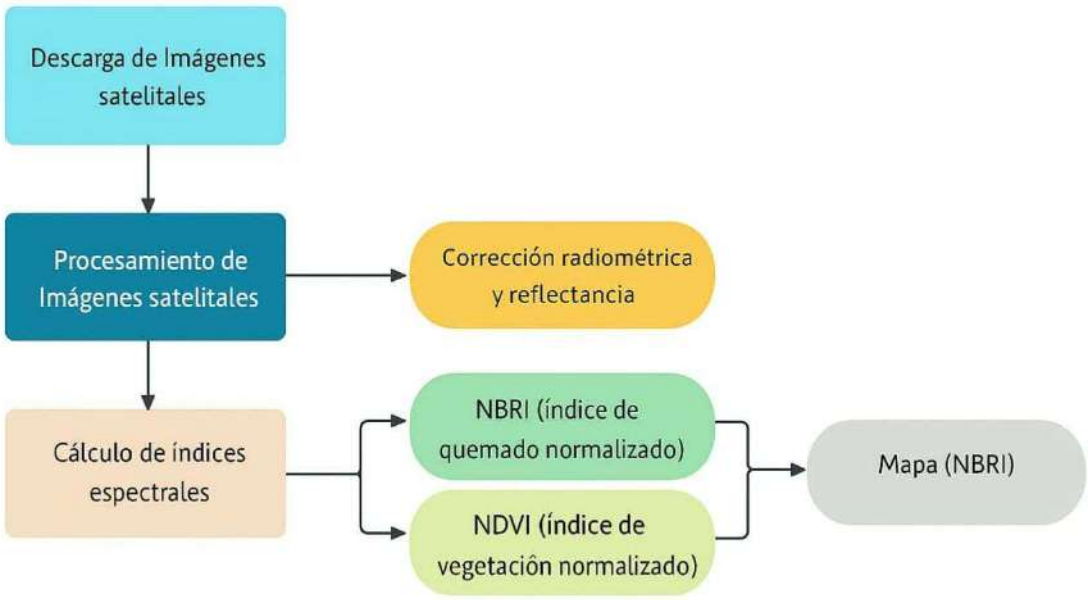
El cálculo del NDVI se efectuó mediante la herramienta Calculadora Ráster, permitiendo posteriormente clasificar la cobertura en cinco categorías: nubes y agua (NA), suelo desnudo (SV), vegetación ligera (VL), vegetación moderada (VM) y vegetación densa (VD). A partir de esta clasificación se estimó la superficie ocupada por cada categoría en hectáreas.

Además, se realizó un análisis comparativo utilizando la escala de valores comprendida entre -1 y 1, con el propósito de evaluar las condiciones de la cobertura vegetal. Los valores entre -1 y 0 fueron relacionados con áreas afectadas por incendios forestales; aquellos entre 0 y 0.33

correspondieron a vegetación deteriorada; los valores de 0.33 a 0.66 representaron una condición moderada; mientras que los rangos entre 0.66 y 1 indican una vegetación en buen estado. En la Figura 4 se presenta el procedimiento aplicado para generación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Figura 4

Proceso para el cálculo del NDVI



Fuente: La autora

Cálculo de NBR:

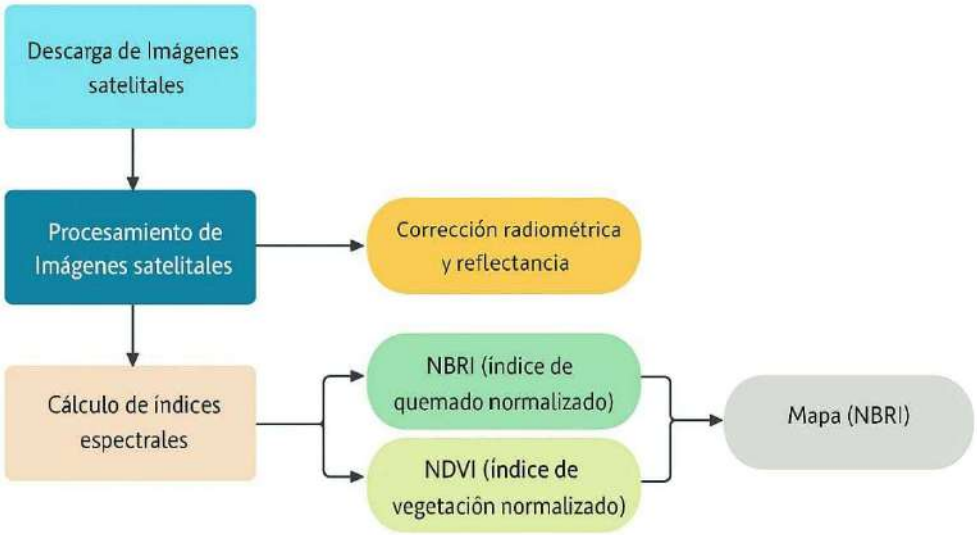
Identificación y cuantificación de áreas quemadas: para cuantificar las áreas quemadas se empleó el Índice de Incendios (NBR), en el software ArGIS Pro se obtuvo mediante la herramienta "Raster Calculator", con las bandas NIR (Near infrared) que representa el valor de la banda en el espectro infrarrojo cercano y SWIR (Middle infrared) que representa el valor de la banda en el espectro infrarrojo medio.

Para identificar las áreas quemadas se obtuvo en función de los valores obtenidos, donde los valores más altos de NBR indican áreas quemadas, mientras que los valores bajos o negativos indican vegetación sana. Además, se utilizó la herramienta "Reclassify" para definir rangos de

valores y asignarles clases como “vegetación quemada” y “vegetación no quemada”. Con ello se realizó un análisis de comparación mostrando una escala de incendios los cuales son: 5) Extremo, 4) Muy alto,3) Alto, 2) Moderado y 1) Bajo. En la Figura 5 se indica el procedimiento para el cálculo de Índice Normalizado de Áreas Quemadas.

Figura 5

Proceso para el cálculo del NBR



Fuente: La autora.

2.14. Evaluación de la variación y recuperación de la cobertura vegetal en áreas susceptibles que han sido afectadas por incendios forestales

Paso 1: Distribución espacial del área de estudio.

Análisis Espacial y Temporal: Se realizó el estudio de las imágenes satelitales correspondientes a los años 2001, 2007, 2021 y 2024 con el propósito de identificar las variaciones ocurridas en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo. Así mismo, se examinó la distribución espacial y temporal de los incendios forestales mediante el empleo de técnicas de teledetección, lo que permitió reconocer las zonas afectadas y los cambios asociados a estos eventos.

Paso 2: Análisis de la regeneración de la cobertura vegetal

Evaluación de la regeneración de la vegetación: Se evaluaron los cambios observados en la vegetación arbustiva de las zonas vulnerables para reconocer su proceso de recuperación. Además, se identificaron áreas con distintos niveles de regeneración, evidenciando que la recuperación de la cobertura vegetal no ocurre de manera uniforme en todo el territorio.

Paso 3: Verificación de los resultados

Trabajo de Campo: Se efectuaron recorridos de campo con el propósito de comprobar la confiablidad de los resultados obtenidos durante el análisis y procesamiento de las imágenes Landsat. Para ello, se emplearon dispositivos GPS que permitieron verificar la ubicación de los puntos de control y evaluar la precisión de los mapas elaborados mediante la matriz de confusión, cuyos resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12.

Matriz de Confusión

		PREDICCIÓN	
		POSITIVOS	**NEGATIVOS**
Observación	POSITIVOS	VERDADEROS POSITIVOS (VP)	FALSOS NEGATIVOS (FN)
	NEGATIVOS	FALSOS POSITIVOS (FP)	VERDADEROS NEGATIVOS (VN)

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Clasificación de las variables topográficas, antrópicas y climáticas relacionadas con la susceptibilidad a incendios forestales

Las variables consideradas para el análisis de la susceptibilidad a incendios forestales incluyeron factores topográficos, climáticos y antrópicos, entre ellos la pendiente, la altitud, la orientación del terreno, la velocidad del viento, el uso del suelo y la cobertura vegetal. Estas variables fueron seleccionadas por su influencia en la ocurrencia y propagación de incendios forestales en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas.

Posteriormente, cada una fue organizada y jerarquizada de acuerdo con un peso porcentual dentro del modelo de susceptibilidad, tal como se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13.

Variables que influyen en la susceptibilidad de incendios

Variables	Peso
Cobertura Vegetal	30%
Pendiente	15%
Uso de Suelo	10%
Velocidad de Viento	15%
Altitud del Terreno	15%
Orientación del Terreno	15%
Total	100%

Los incendios que avanzan sin control sobre la cobertura vegetal representan una de las principales amenazas ambientales, ya que su comportamiento está ligado a la cantidad y disposición del material combustible existente en el territorio. La organización del paisaje, como la presencia de bosques, matorrales o páramos, genera una continuidad que puede facilitar la expansión del fuego cuando las condiciones climáticas lo permiten. En este sentido, la conexión del combustible en el paisaje favorece el traslado del fuego entre diferentes tipos de vegetación (Armenteras et al., 2021).

Las condiciones del relieve también influyen en el desarrollo de los incendios. La pendiente, por ejemplo, puede aumentar tanto la probabilidad de inicio como la rapidez con la que el fuego se propaga. Esto ocurre porque las laderas inclinadas permiten que el aire caliente ascienda, secando y precalentando la vegetación ubicada en zonas superiores. De igual forma, en terrenos con mayor inclinación suelen presentarse ambientes más secos y acumulación de material vegetal que favorecen la combustión (Casado & Vargas, 2025)

La altitud constituye otro factor que incide en la ocurrencia de incendios. En zonas más elevadas las temperaturas tienden a ser menores y la vegetación puede presentar menor facilidad para arder; sin embargo, la acción del viento puede intensificar el comportamiento del fuego. La interacción entre temperatura, disponibilidad de oxígeno y tipo de cobertura vegetal en distintos pisos altitudinales influye directamente en los regímenes de incendio (Arias et al., 2024).

Asimismo, la orientación del terreno influye en el nivel de humedad de la vegetación. Las laderas que reciben mayor radiación solar experimentan un secado más rápido, lo que incrementa la posibilidad de ignición. La exposición solar modifica el contenido de humedad de los combustibles finos, aumentando la susceptibilidad al fuego en sectores más expuestos (Arias et al., 2024).

El viento también cumple un rol fundamental, ya que reduce la humedad de la vegetación y facilita el transporte de partículas encendidas hacia nuevas áreas. La velocidad del viento influye directamente tanto en la intensidad como en la velocidad de propagación del fuego (Gonzáles & Ortiz, 2022).

Finalmente, el uso del suelo refleja la influencia de las actividades humanas en la generación de incendios. Cambios como la expansión agrícola, el abandono de tierras o el crecimiento urbano alteran la estructura del combustible disponible. Los regímenes de fuego están estrechamente relacionados con la intervención humana, que puede aumentar o disminuir la frecuencia e intensidad de los incendios según el manejo del territorio (Farfán et al., 2025).

3.2. Asignación de ponderaciones a las variables topográficas, antrópicas y climáticas que influyen en la susceptibilidad a incendios forestales.

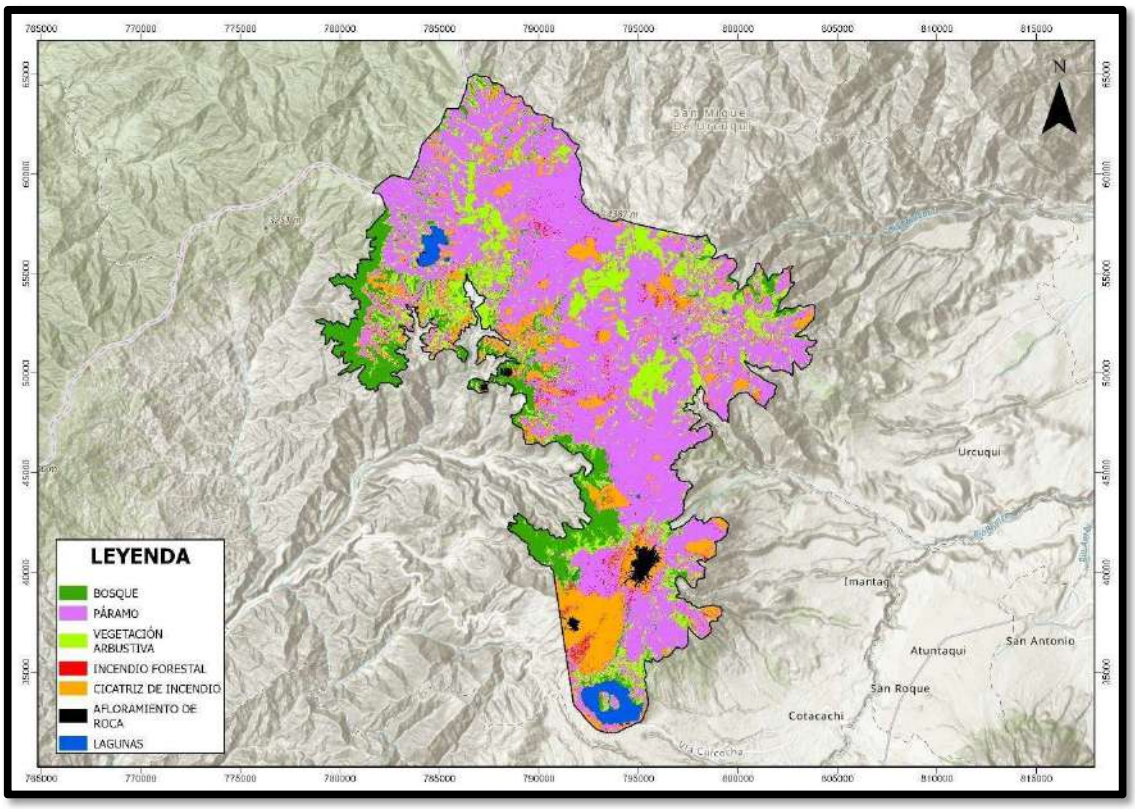
El análisis se llevó a cabo con imágenes satelitales correspondientes a los años 2001, 2009, 2021 y 2024. La selección de estos períodos se debió a la disponibilidad de imágenes con calidad adecuada para su procesamiento, ya que la elevada cobertura de nubes en otros años impidió obtener información confiable. En consecuencia, la evaluación se realizó utilizando únicamente los datos disponibles para los años que reunieron las condiciones necesarias para el análisis.

Cobertura vegetal

Las categorías de cobertura vegetal con mayor superficie en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas en el año 2001 fueron: Páramo (55.31%) y Bosque Nativo (11.19%), las mismas que cubren el 66.5% de la superficie total, como se indica en la Figura 6.

Figura 6

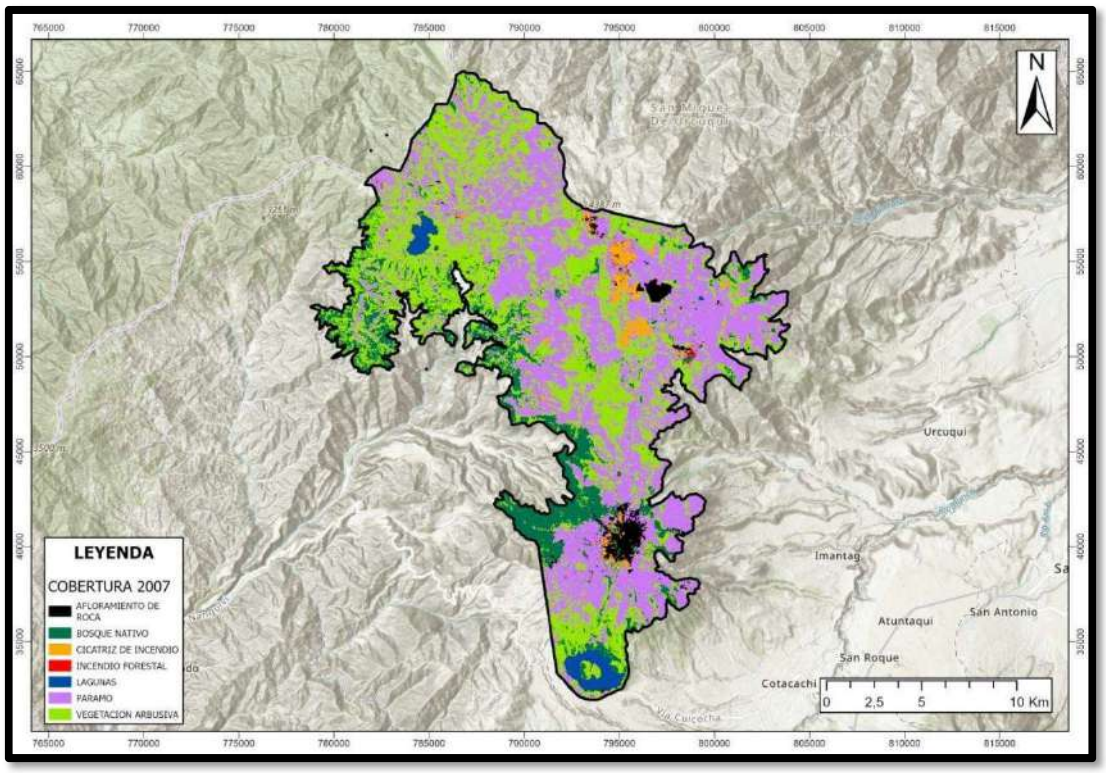
Cobertura Vegetal del año 2001



Las categorías de cobertura vegetal con mayor superficie en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas en el año 2007 fueron: Páramo (59.61%) y Vegetación Arbustiva (15.30%), las mismas que cubren el 74.91% de la superficie total, como se indica en la Figura 7.

Figura 7

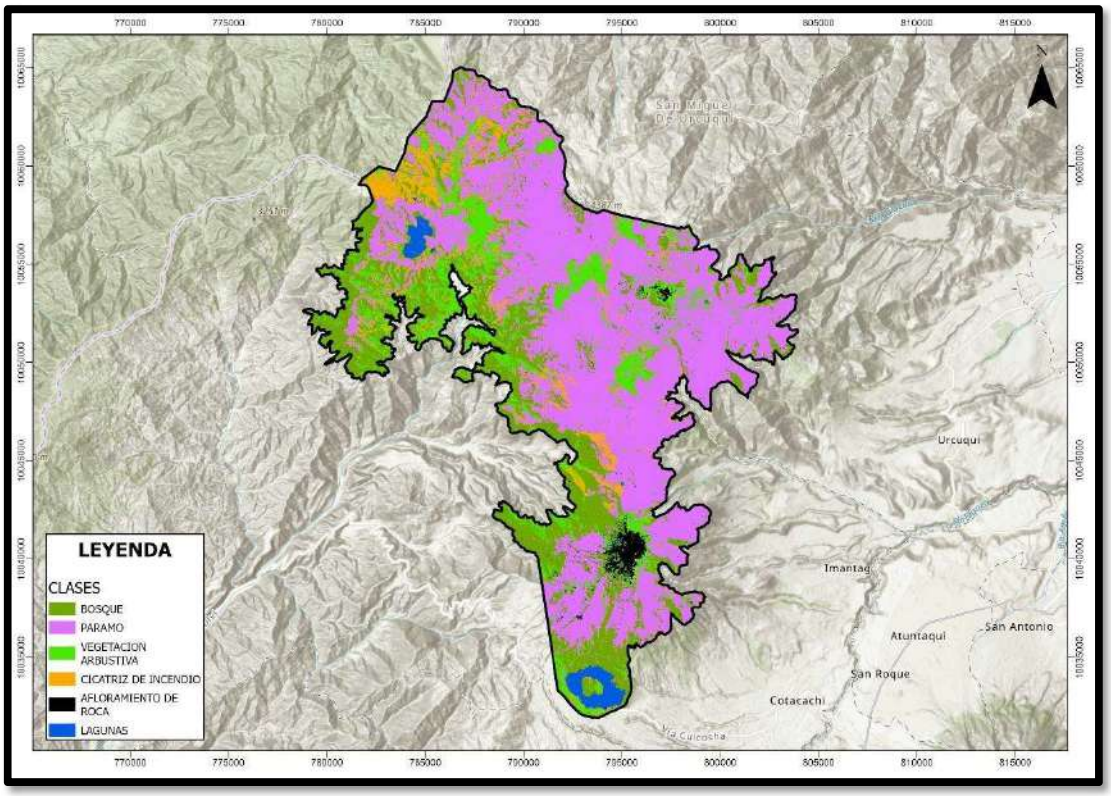
Cobertura Vegetal del año 2007



Las categorías de cobertura vegetal con mayor superficie en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas en el año 2021 fueron: Páramo (54.71%) y Vegetación Arbustiva (14.06%), las mismas que cubren el 68.77% de la superficie total, como se indica en la Figura 8.

Figura 8

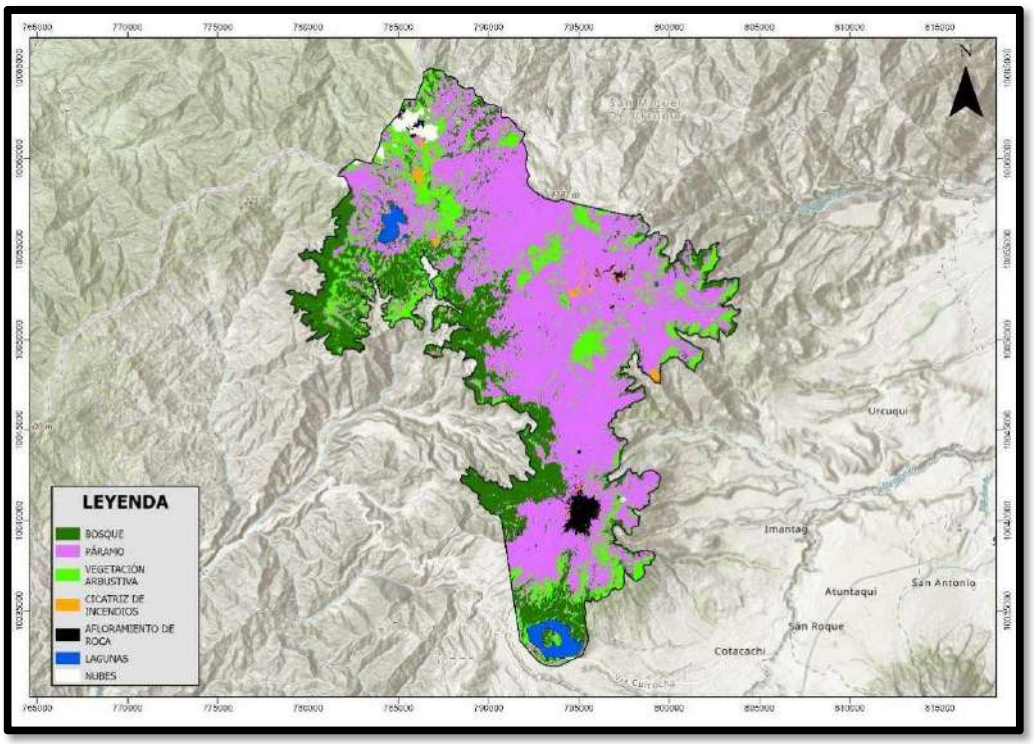
Cobertura Vegetal del año 2021



Las categorías de cobertura vegetal con mayor superficie en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas en el año 2024 fueron: Páramo (56.40%) y Bosque Nativo (21.21%), las mismas que cubren el 77.61% de la superficie total, como se indica en la Figura 9.

Figura 9

Categorización de la Cobertura Vegetal año 2024



Durante los años 2001, 2007, 2021 y 2024, la cobertura vegetal de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas presentó variaciones importantes, como se observa en las Tablas 14, 15, 16 y 17. Cabe señalar que las categorías correspondientes a nubes y afloramientos rocosos no fueron consideradas susceptibles a incendios forestales, por lo que no constituyen un factor de riesgo dentro del presente análisis. Los cambios registrados reflejan una modificación progresiva del paisaje, asociada tanto a la dinámica de los ecosistemas naturales como a la creciente influencia de las actividades humanas sobre el territorio.

Tabla 14.

Cobertura vegetal anual 2001-2007

VALUE	CATEGORÍAS	ÁREA (HAS) 2001	ÁREA (HAS) 2007	PORCENTAJE 2001	PORCENTAJE 2007	ÁREA (HAS) 2007-2001	PORCENTAJE 2007-2001
1	BOSQUE	3636.09	3869.88	11.19	11.91	233.79	0.72
2	PÁRAMO	17976.8	22175.47	55.31	12.38	4198.67	-42.93
3	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	5942.7	12634.4	18.28	1.94	6691.7	-16.34
4	AFLORAMIENTO DE ROCA	270.9	633.67	0.83	1.95	362.77	1.12
5	LAGUNAS	582.21	600.17	1.79	1.85	17.96	0.06
	TOTAL	32502.89	39913.59	100	100	11504.89	-57.37

Tabla 15.

Categorías de incendios anuales 2001-2009

VALUE	CATEGORÍAS DE INCENDIO	ÁREA (HAS) 2001	ÁREA (HAS) 2007	PORCENTAJE 2001	PORCENTAJE 2007	ÁREA (HAS) 2007-2001	PORCENTAJE 2007-2001
1	INCENDIO FORESTAL	510.3	28.71	1.57	0.01	-481.59	-1.56
2	CICATRIZ DE INCENDIO	3583.89	218.84	11.03	0.67	-3365.05	-10.36
	TOTAL	4094.19	247.55	12.6	0.68	-3846.64	-11.92

Tabla 16.

Cobertura vegetal anual 2021-2024

VALUE	CATEGORÍAS	ÁREA (HAS) 2021	ÁREA (HAS) 2024	PORCENTAJE 2021	PORCENTAJE 2024	ÁREA (HAS) 2021-2024	PORCENTAJE 2021-2024
1	BOSQUE	4087.35	6894.45	12.66	21.21	2807.1	8.55
2	PÁRAMO	17659.3	18330.6	54.71	56.4	671.3	1.69
3	VEGETACIÓN ARBUSTIVA	4540.23	5769.9	14.06	17.75	1229.67	3.69
4	AFLORAMIENTO DE ROCA	1229.67	470.16	3.81	1.45	-759.51	-2.36
5	LAGUNAS	557.37	532.26	1.73	1.64	-25.11	-0.09
6	NUBES		289.71		0.9		
	TOTAL	28073.92	32287.08	86.97	99.35	3923.45	11.48

Tabla 17.

Categorías de incendios anuales 2021-2024

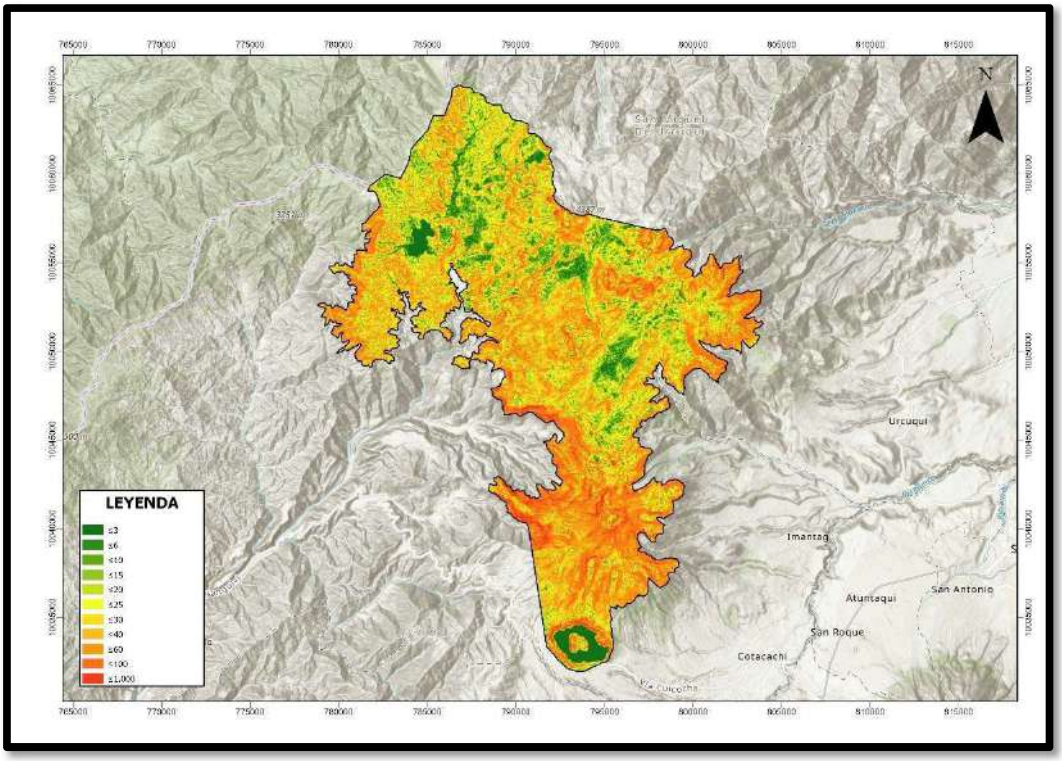
VALUE	CATEGORÍAS	ÁREA (HAS) 2021	ÁREA (HAS) 2024	PORCENTAJE 2021	PORCENTAJE 2024	ÁREA (HAS) 2021-2024	PORCENTAJE 2021-2024
1	CICATRIZ DE INCENDIO	4206.78	212.58	13.03	0.65	-3994.2	-12.38
	TOTAL	4206.78	212.58	13.03	0.65	-3994.2	-12.38

3.3. Factores topográficos

La distribución de pendientes en el Parque Nacional Cotacachi Cayapas, según (IGAC, 2013) (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2007) se clasificada en seis rangos de inclinación, donde se localizan en la parte alta del Parque Nacional, como se visualiza en la Figura 10.

Figura 10

Pendiente de la parte alta del Parque Nacional Cotacachi- Cayapas



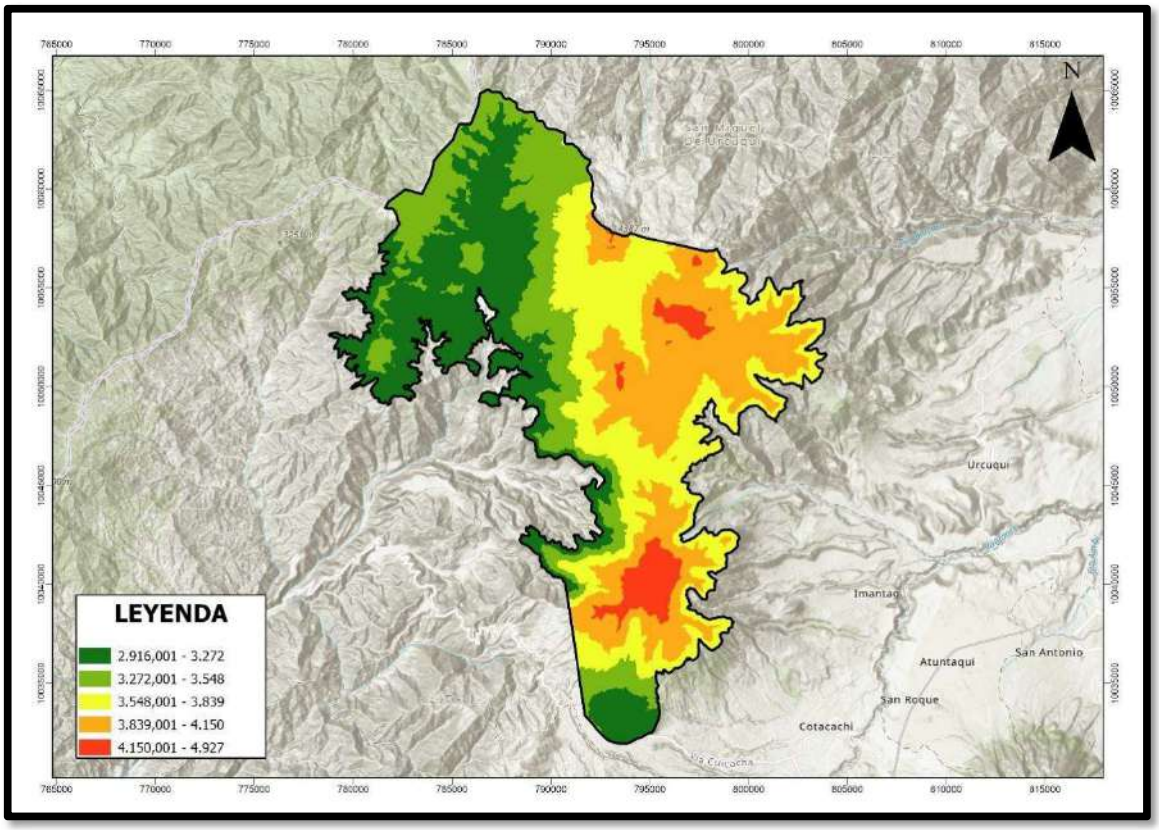
Las áreas representadas en color verde, ubicadas principalmente en la zona norte y en ciertos sectores dispersos al interior del territorio, corresponden a espacios con menor nivel de riesgo, asociados a coberturas vegetales con mayor humedad, pendientes suaves o condiciones que favorecen el equilibrio ecológico. En contraste, gran parte del área de estudio se presenta en tonalidades amarillas y anaranjadas, lo que refleja una susceptibilidad intermedia. Por otro lado, las zonas identificadas en rojo, localizadas sobre todo hacia el sur y en sectores montañosos periféricos, evidencian los escenarios de mayor fragilidad frente a incendios.

Altitud del Terreno

En la zona alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas se registró un rango altitudinal que va desde los 2916 hasta los 4927 msnm, lo cual evidencia una marcada heterogeneidad propia de los paisajes andinos de montaña, como se muestra en la Figura 11. De acuerdo con lo señalado por (Arias et al., 2024), el incremento de la altitud tiende a relacionarse con una menor probabilidad de incendios, debido a la presencia de condiciones climáticas más frías y húmedas que disminuyen la capacidad de combustión de la vegetación. No obstante, este comportamiento no depende únicamente de la altura, ya que puede verse modificado por otros elementos del relieve, como la inclinación del terreno.

Figura 11

Altitud de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas

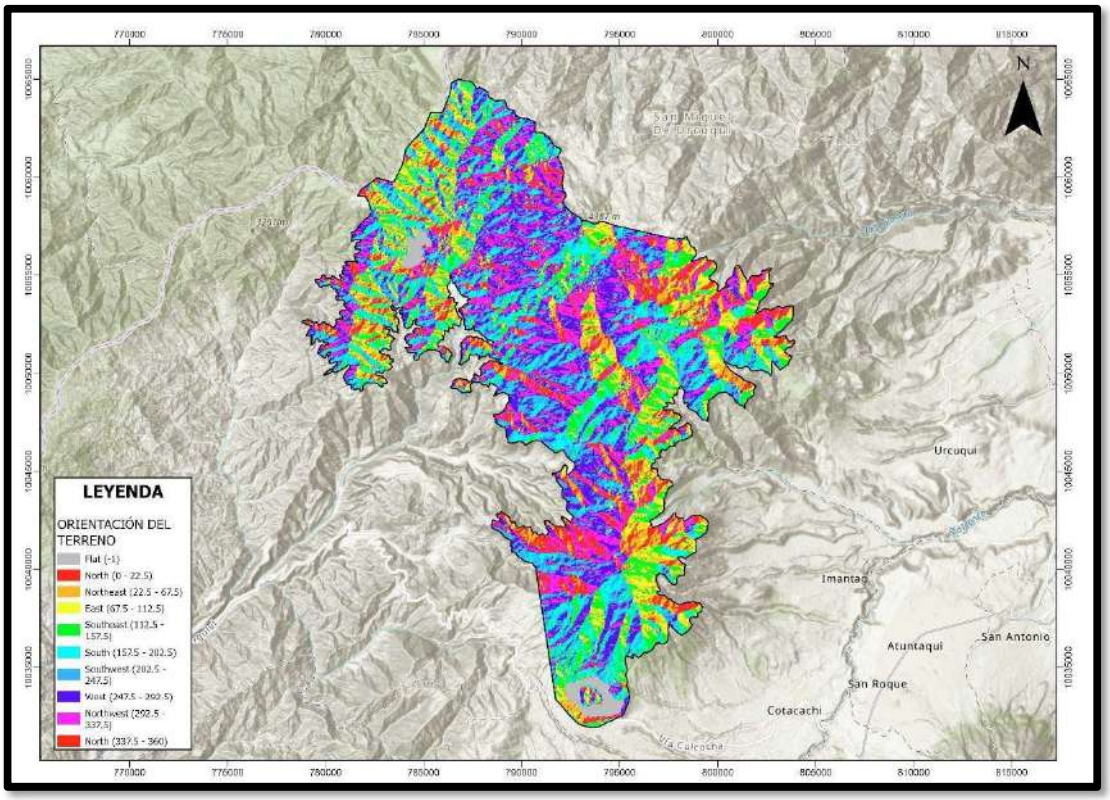


Orientación del terreno

En la zona alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas se observa una diversidad en la orientación de las laderas, tal como se aprecia en la Figura 26. Predominan las exposiciones hacia el norte (337.5°–360°), seguidas por las orientaciones noreste (22.5°) y noroeste (292.5°–337.5°), las cuales, debido a su nivel de radiación solar, pueden incidir en el desarrollo de la vegetación y en las condiciones micro climáticas del área. En menor proporción se presentan las orientaciones este (67.5°–112.5°) y oeste (247.5°–292.5°), mientras que las laderas con exposición sur (157.5°–202.5°) y sureste (112.5°–157.5°) son aún menos frecuentes. Estas diferencias en la orientación del terreno, según lo indicado por Arias et al., *(2024)*, influyen directamente en la dinámica de propagación del fuego.

Figura 12

Orientación del Parque Nacional Cotacachi Cayapas



3.4. Factores climáticos

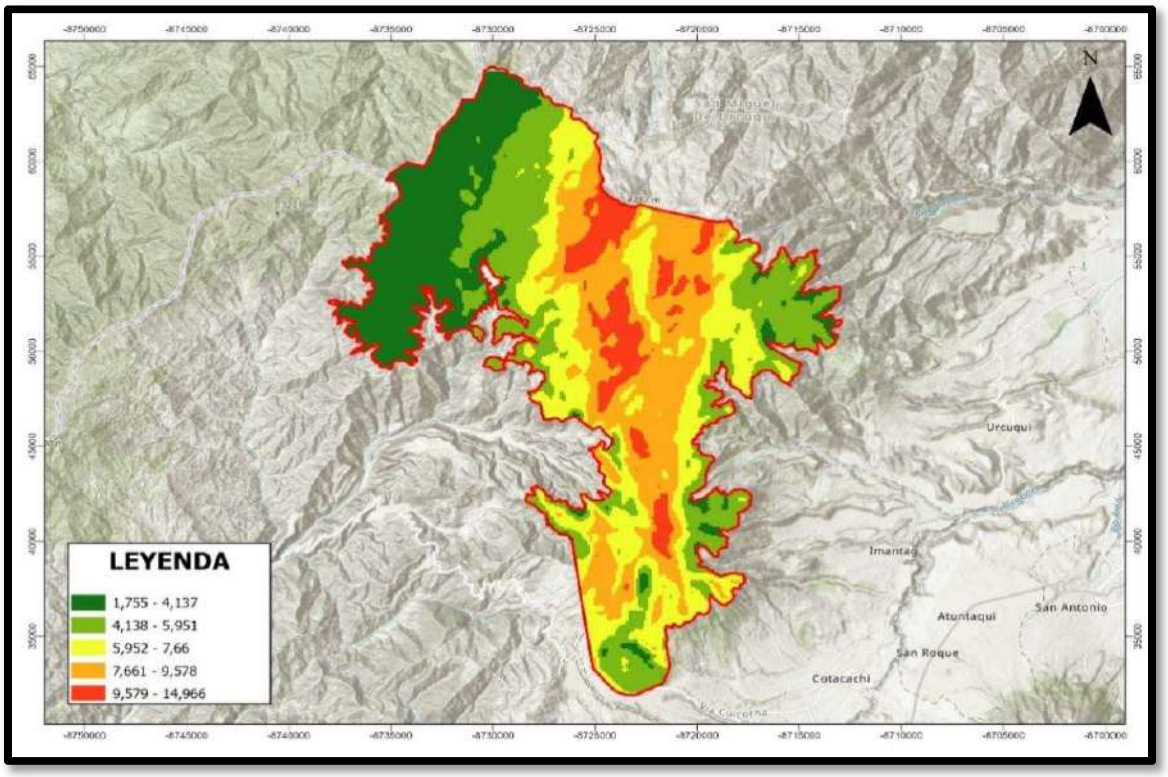
Velocidad del viento

Para este análisis se utilizó información climática obtenida de las estaciones meteorológicas ubicadas en los alrededores del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, con el fin de estimar el comportamiento del viento en el área de estudio, se consideraron los registros de las estaciones de Otavalo, Cahuasquí-FAO, Tomalón-Tabacundo, Inguincho, Olmedo-Pichincha, Quito y Papallacta, seleccionadas por su cercanía y por reflejar adecuadamente las condiciones atmosféricas propias de la región andina y subandina.

Los resultados indican que la velocidad del viento en el área protegida se encuentra entre 2.11 y 6.06 m/s, lo que corresponde a escenarios de intensidad moderada a relativamente fuerte. La velocidad del viento influye directamente en el comportamiento de incendios forestales. De acuerdo con Trujillo (2021), cuando el viento aumenta, el fuego tiende a propagarse con mayor rapidez, debido a que aporta oxígeno a la combustión, inclina las llamas hacia la vegetación cercana y favorece el secado del material combustible, lo que facilita la generación de nuevos incendios. Además, durante el día el viento suele ascender por las laderas debido al calentamiento solar, mientras que en horas nocturnas desciende con menor intensidad. En este contexto, la propagación del fuego tiende a intensificarse cuando el viento coincide con la dirección de avance del incendio, especialmente en pendientes ascendentes, lo que potencia su desplazamiento (Flores, 2021).

Figura 13

Velocidad del viento en el Parque Nacional Cotacachi Cayapas



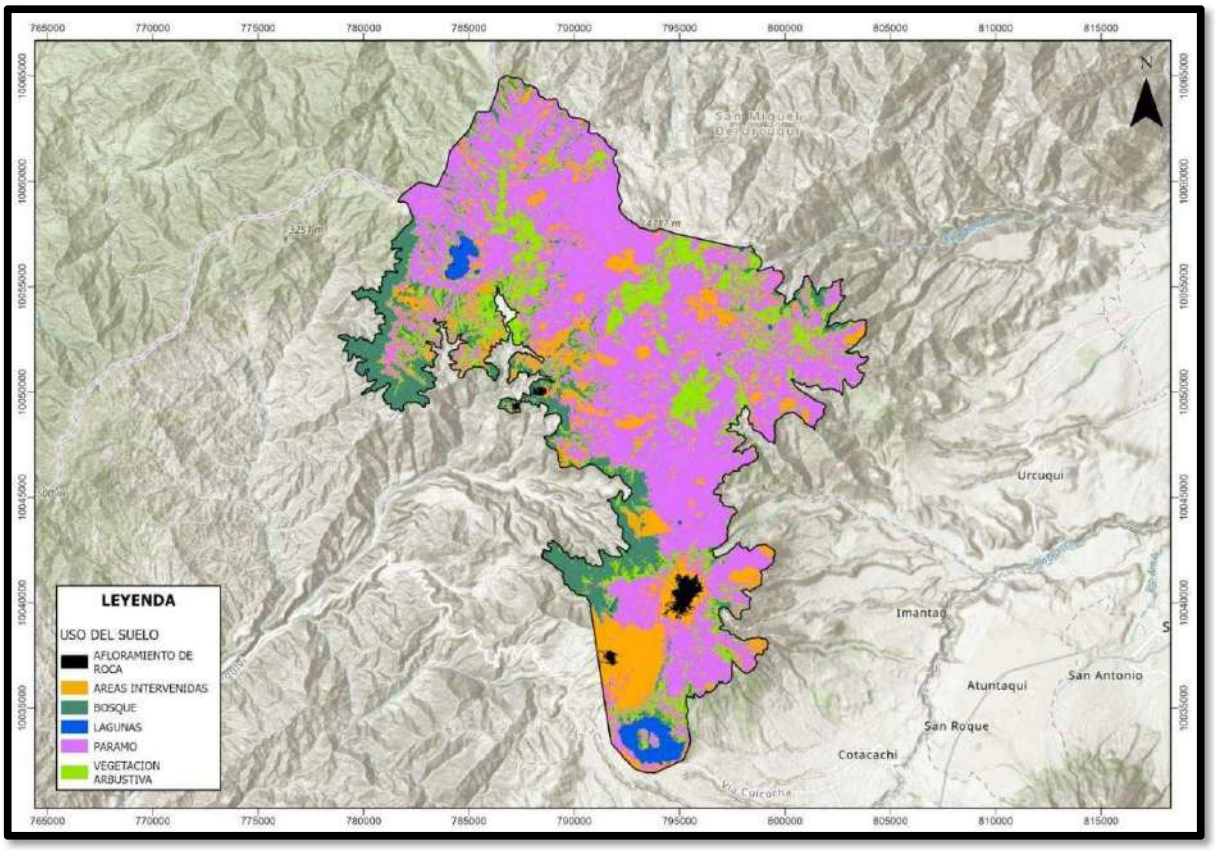
El comportamiento del viento en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas está influenciado por la compleja topografía del área, donde las montañas, valles y laderas favorecen la aceleración de las corrientes de aire. Así mismo, las variaciones de temperatura entre el día y la noche generan diferencias de presión que contribuyen a la formación de corrientes de viento, incrementando su velocidad en determinados sectores.

Uso del suelo

En la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, para el año 2001, se identificaron diferentes categorías de uso y cobertura del suelo. Entre ellas, el páramo, el bosque y la vegetación arbustiva fueron las de mayor extensión, representando en conjunto el 51.24 % de la superficie total del área de estudio, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14

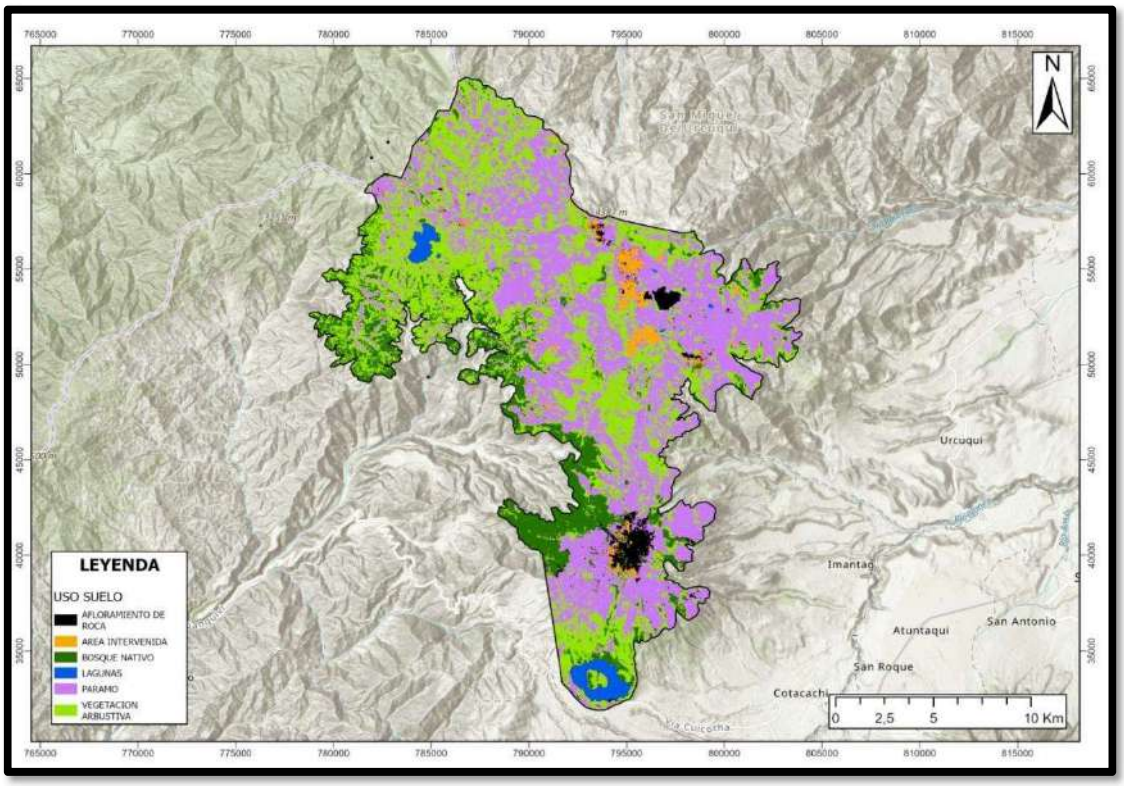
Uso de suelo año 2001



En el parque Nacional Cotacachi Cayapas se identificaron diversos usos del suelo en el año 2007 como: Páramo, Bosque Nativo y Vegetación Arbustiva siendo estas categorías con mayor superficie representa el 51.25 % del área total, como se observa en la Figura 15.

Figura 15

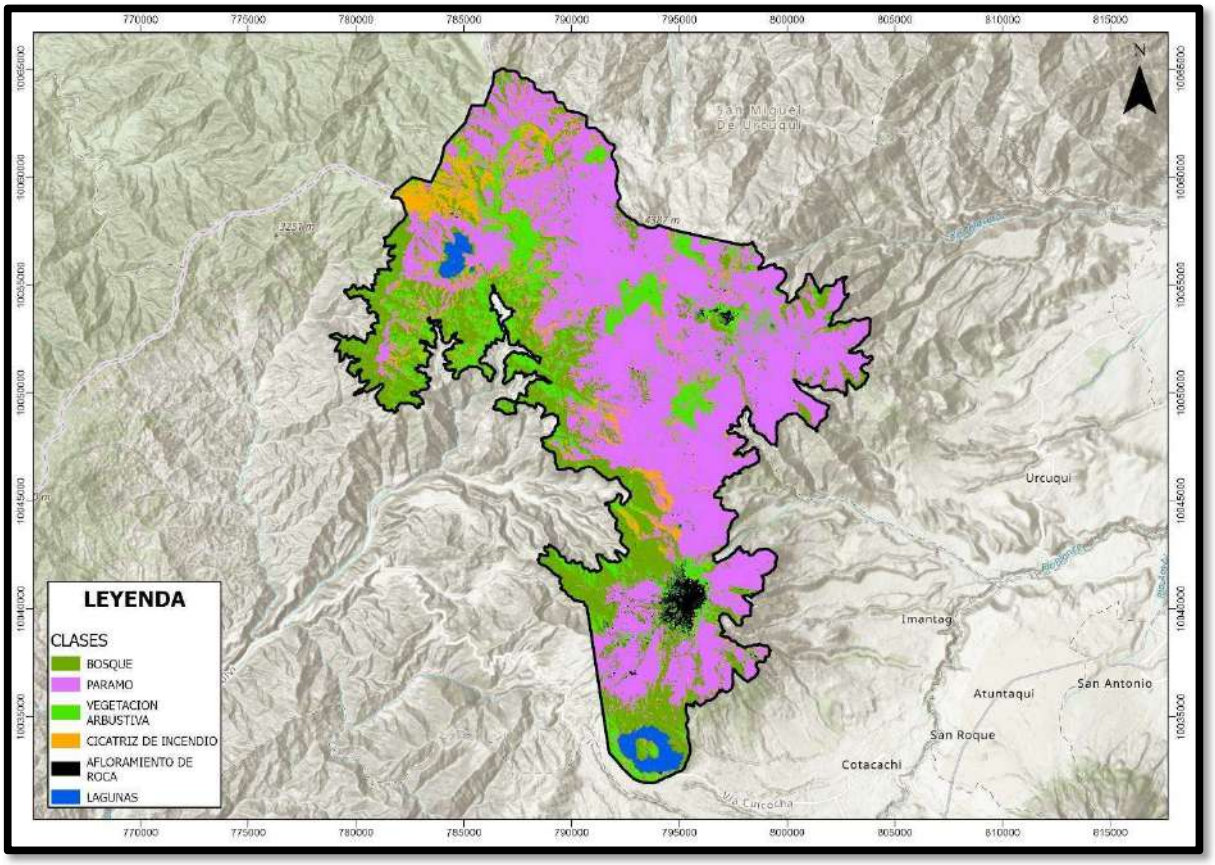
Uso de Suelo año 2007



En la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas, para el año 2021, se identificaron diversas categorías de uso y cobertura del suelo. Entre ellas, el páramo, el bosque nativo y la vegetación arbustiva fueron las de mayor extensión, representando en conjunto el 51.25% de la superficie total del área de estudio, como se observa en la Figura 16.

Figura 16

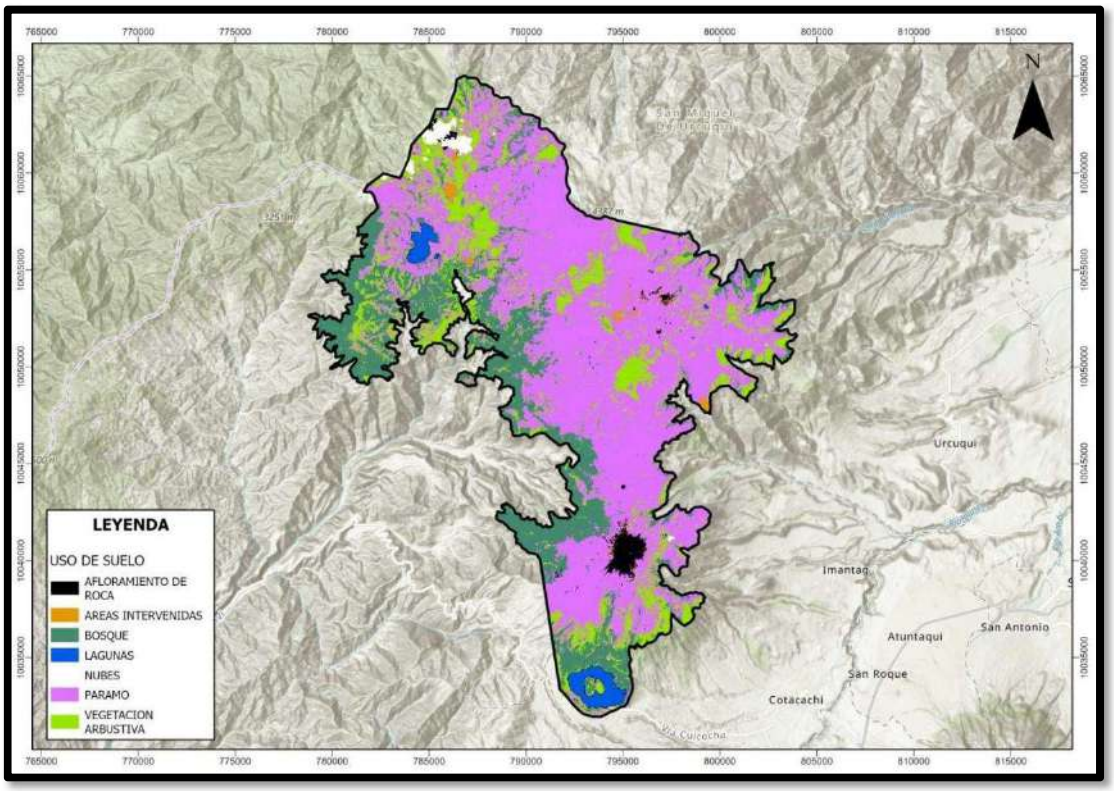
Uso Suelo año 2021



En la parte alta del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas, para el año 2024, se identificaron diversas categorías de uso y cobertura del suelo. El páramo, el bosque nativo y la vegetación arbustiva correspondieron a las categorías de mayor extensión, ocupando en conjunto el 54.53 % de la superficie total del área de estudio, como se presenta en la Figura 17.

Figura 17

Uso de Suelo 2024



3.5. Susceptibilidad temporal de incendios forestales

3.5.1. Susceptibilidad 2001

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios forestales se presenta en la Figura 18. La categoría de susceptibilidad muy baja se concentra en áreas de reducida extensión ubicadas al oeste del Parque Nacional, con una superficie aproximada de 1.44 ha. Estas zonas se localizan principalmente alrededor de los 3090 m.s.n.m., donde predomina la cobertura de bosque nativo. La categoría baja posee 205.74 ha y se encuentra en el páramo de Piñán y al suroeste de la laguna. La categoría moderada, que cubre 5073.03 ha, se distribuye en zonas de relieve montañoso y muy montañoso, donde predominan el bosque nativo y el páramo, a altitudes ubicadas entre 3150 a 3800 m.s.n.m. Por su parte, la categoría alta ocupa 17278.7 ha y predomina en terrenos muy montañosos y escarpados, especialmente en altitudes de 3330 a 3450 m.s.n.m., caracterizados por páramo y vegetación arbustiva. La categoría muy alta tiene

una superficie de 8416.89 ha y se localiza en sitios con relieve montañosa y escarpada, en altitudes de 3830 a 3980 m.s.n.m. La categoría no aplica corresponde a áreas de afloramientos rocosos y cuerpos de agua (732.84 ha).

Figura 18

Susceptibilidad a incendios forestales año 2001

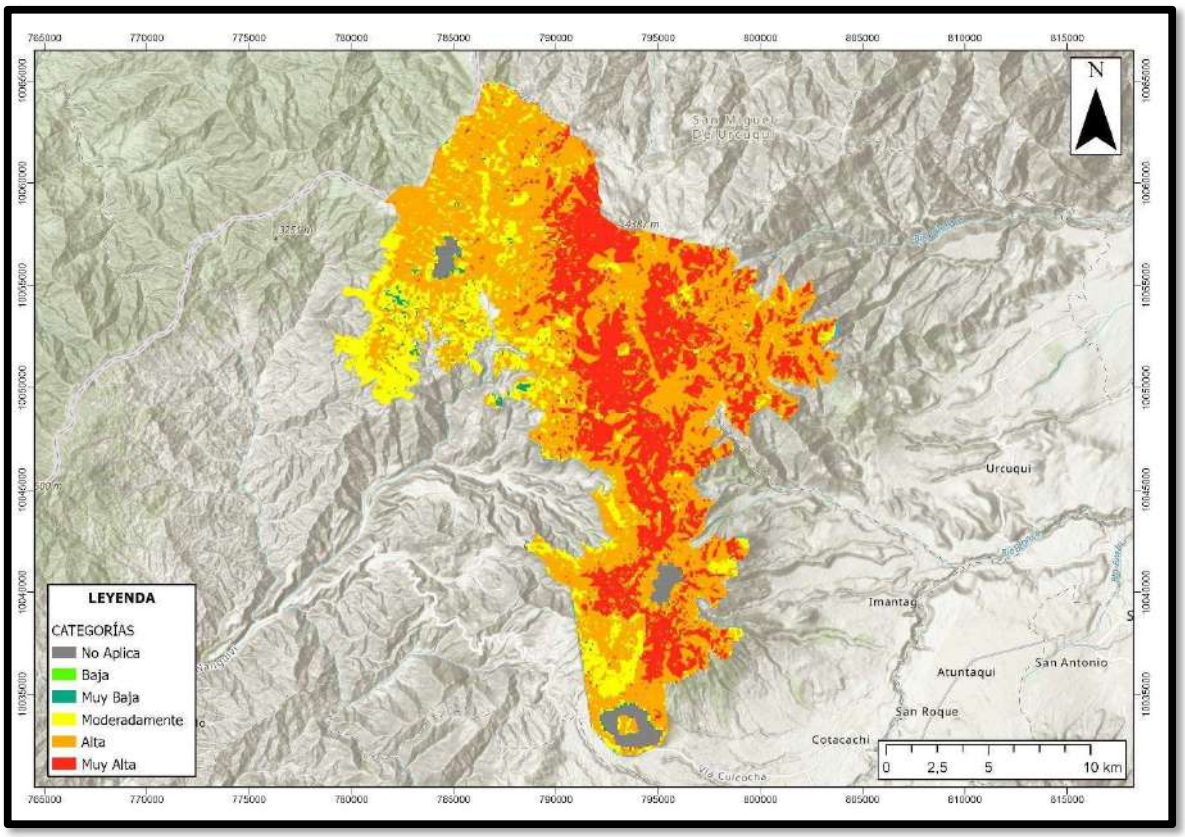


Tabla 18.

Susceptibilidad 2001

2001		
SUSCEPTIBILIDAD	**ÁREA (HAS)**	**PORCENTAJE %**
No Aplica	732.87	2.31
Muy Baja	1.44	0.03
Baja	205.74	0.64
Moderadamente	5073.03	15.99
Alta	17278.7	54.49
Muy Alta	8416.89	26.54
TOTAL	31708.67	100.00

3.5.2. Susceptibilidad 2007

En 2007, la susceptibilidad a incendios en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas presentó una distribución influenciada por el relieve y las características ambientales del sitio el cual muestra en la Figura 19. Las áreas de susceptibilidad muy baja, que poseen 14.67 ha, se encuentran principalmente en terrenos planos o ligeramente ondulados con altitudes más bajas de 3080 a 3200 m.s.n.m., en sitios aledaños a los cuerpos de agua (laguna de Piñán y laguna de Cuicocha). En la Tabla 19 las zonas de susceptibilidad baja tienen una superficie de 162.36 ha, están asociadas a pendientes planos y ondulados, donde se localizan los cuerpos de agua y el afloramiento de roca. La susceptibilidad moderada, con 5256.99 ha, se distribuye en terrenos montañosos y muy montañosos, relacionados con el bosque nativo en altitudes de 3060 a 3270 m.s.n.m. La categoría alta, que cubre 19526.90 ha, se localiza en pendientes más pronunciadas, como zonas muy montañosas y escarpadas, donde predominan el páramo y la vegetación arbustiva en altitudes de 4075 a 3500 m.s.n.m. La categoría muy alta se localiza en las partes más altas del PNCC, en pendientes montañosas, muy montañosas y escarpadas con una superficie de 5718.95 ha, la altitud varía desde 3810 hasta 4050 m.s.n.m. Por último, la categoría "no aplica" con 1049.21 ha, corresponde a afloramientos rocosos y cuerpos de agua.

Figura 19

Susceptibilidad a incendios forestales año 2007

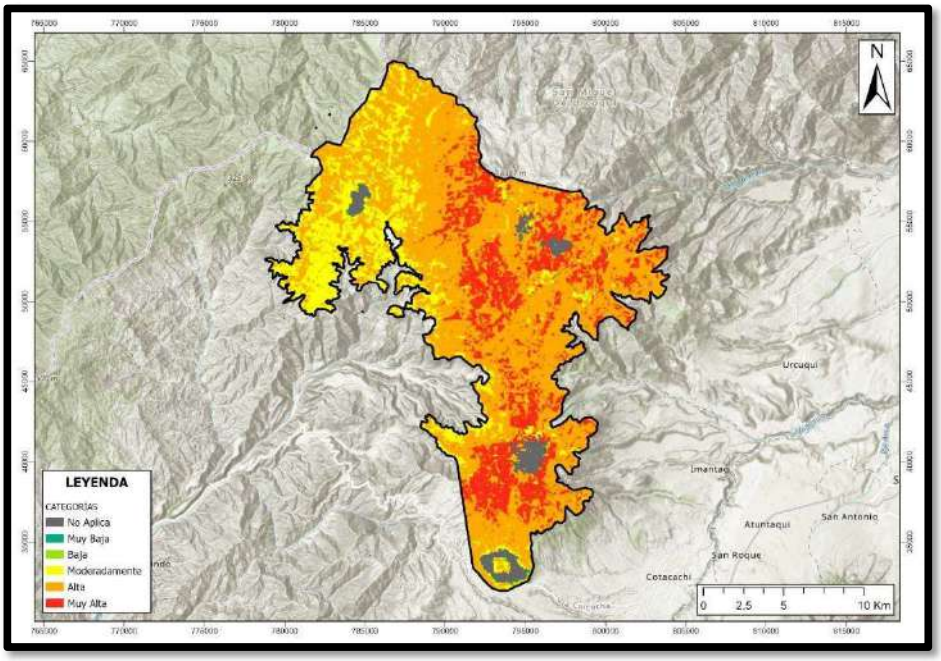


Tabla 19.

Susceptibilidad 2007

2007		
SUSCEPTIBILIDAD	**ÁREA (HAS)**	**PORCENTAJE %**
No Aplica	1049.22	3.31
Muy Baja	14.67	0.05
Baja	162.36	0.51
Moderadamente	5256.99	16.57
Alta	19526.9	61.54
Muy Alta	5718.96	18.02
TOTAL	31729.10	100

3.5.3. Susceptibilidad año 2021

En la Figura 20 se observa la distribución espacial de la susceptibilidad a incendios forestales en el área de estudio, donde se observa que la categoría muy baja es de 0.63 ha, se encuentra en pequeñas superficies localizadas en los límites del Parque Nacional, con predominancia de vegetación de páramo en un rango altitudinal de 3650 m.s.n.m. La categoría baja con 942.84, se localiza en terrenos montañosos, con presencia de bosques y vegetación arbustiva al norte y sur de la Laguna de Piñán. La categoría clasificada como moderadamente tiene 9478.26 ha, se distribuye en las zonas muy montañosas de las partes norte y sur de la Laguna de Piñán y en la parte norte de la Laguna de Cuicocha, con pendientes onduladas, montañosas, y muy montañosas. La categoría alta con 18818.7 ha, se encuentra en las laderas escarpadas y muy escarpadas, donde las pendientes pronunciadas y la exposición al viento hacen que estas zonas sean altamente vulnerables a incendios, especialmente en áreas de páramo. La categoría muy alta tiene 1574.28 ha se encuentra en las partes centro norte y centro sur del PNCC. Por último, la categoría no aplica con 915.48 ha, corresponde a áreas con afloramientos rocosos y cuerpos de agua (Tabla 20).

Figura 20

Susceptibilidad a incendios forestales año 2021

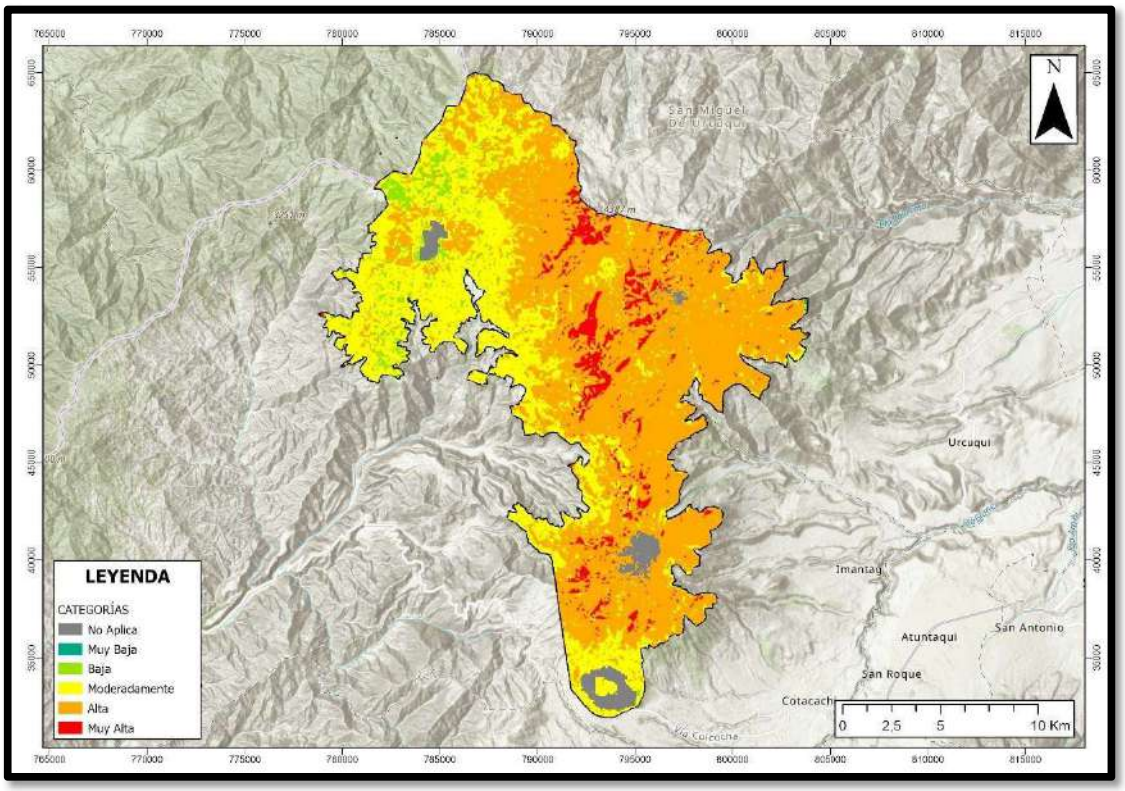


Tabla 20.

Susceptibilidad 2021

	2021	
SUSCEPTIBILIDAD	**ÁREA (HAS)**	**PORCENTAJE %**
No Aplica	915.48	2.88
Muy Baja	0.63	0.02
Baja	942.84	2.97
Moderadamente	9478.26	29.87
Alta	18818.70	59.30
Muy Alta	1574.28	4.96
TOTAL	31730.19	100.00

3.5.4. Susceptibilidad año 2024

La distribución espacial de la susceptibilidad a incendios se muestra en la Figura 21, donde se observa que la categoría muy baja es de 26.41 ha, se encuentra en las áreas planas y ligeramente onduladas, con pendientes suaves, principalmente ocupadas por cultivos y vegetación dispersa, lo que dificulta la propagación del fuego. La categoría baja con 3669.42 ha, se distribuye en terrenos montañosos, donde predomina el bosque y otras coberturas vegetales que ofrecen una resistencia moderada al avance del fuego debido a la inclinación moderada del terreno. La categoría moderada con 3660.54 ha, se encuentra en las zonas muy montañosas, con pendientes más empinadas, lo que facilita la propagación del fuego, aunque la vegetación densa en algunas áreas puede ralentizar su avance. La categoría alta que cubre 2914.83 ha, se localiza en las laderas escarpadas y muy escarpadas, donde las fuertes pendientes y la exposición al viento aumentan significativamente la vulnerabilidad a incendios, especialmente en zonas de páramo o pajonal y la categoría no aplica con 106.01 ha, se refiere a áreas con afloramientos rocosos o terrenos donde no es posible la susceptibilidad a incendios (Tabla 21).

Figura 21

Susceptibilidad a incendios forestales año 2024

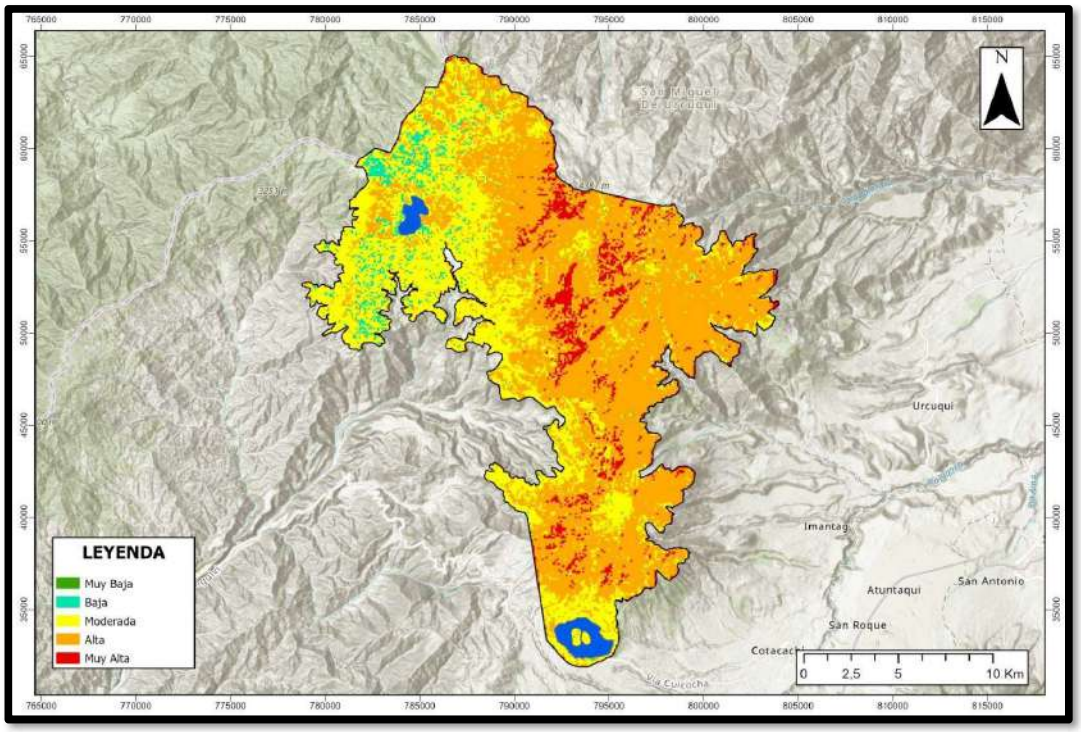


Tabla 21.

Susceptibilidad 2024

2024		
SUSCEPTIBILIDAD	**ÁREA (Has)**	**Porcentaje (%)**
No Aplica	345.09	1.09
Baja	442.08	1.39
Moderada	6301.19	19.85
Alta	16434.11	51.78
Muy Alta	8217.80	25.89
Total	31740.27	100

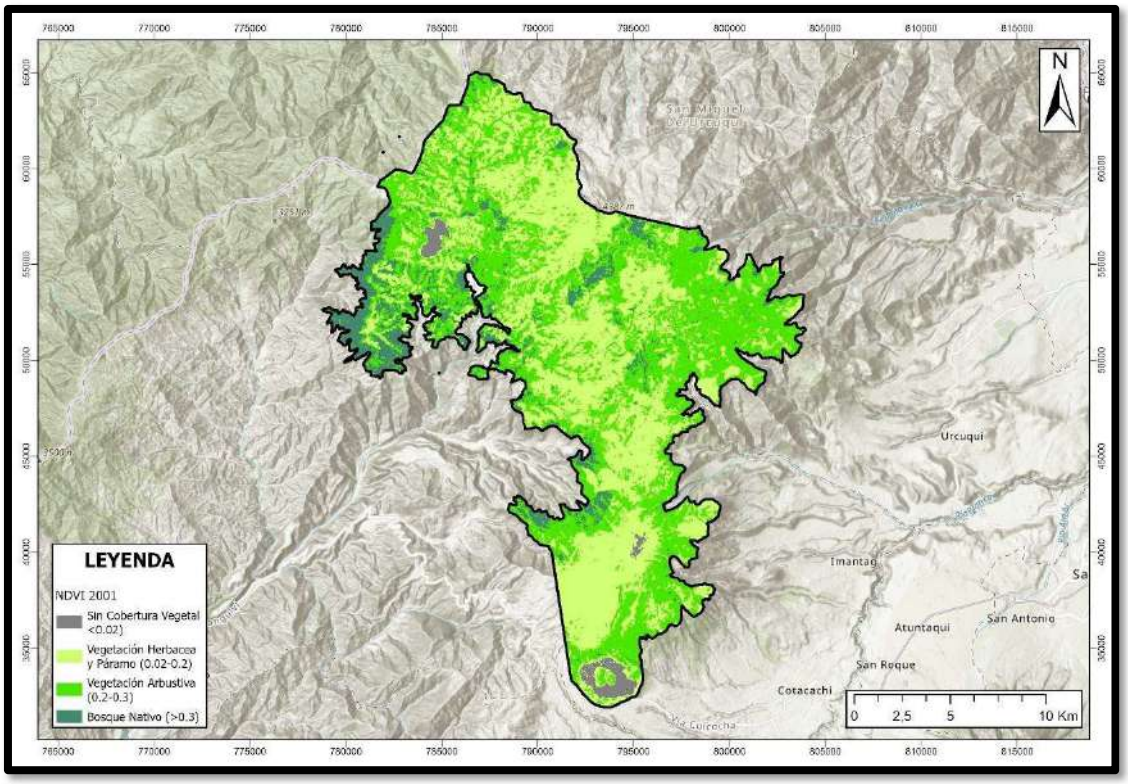
3.6. Evaluación de los patrones de cambio y recuperación de la vegetación en las áreas afectadas por incendios forestales

3.6.1. Índice de vegetación (NDVI)

La distribución espacial y temporal del NDVI se indica en las Figuras 22 a 25. Los valores positivos más altos del NDVI se localizan en los pixeles de color verde en la imagen, que representa el vigor o verdor de la vegetación, destacándose el bosque nativo y el páramo donde la cobertura del suelo está constituida por árboles, arbustos y vegetación herbácea. Los valores intermedios del NDVI corresponden a la vegetación arbustiva, mientras que los valores negativos más bajos representan suelos sin cobertura vegetal.

Figura 22

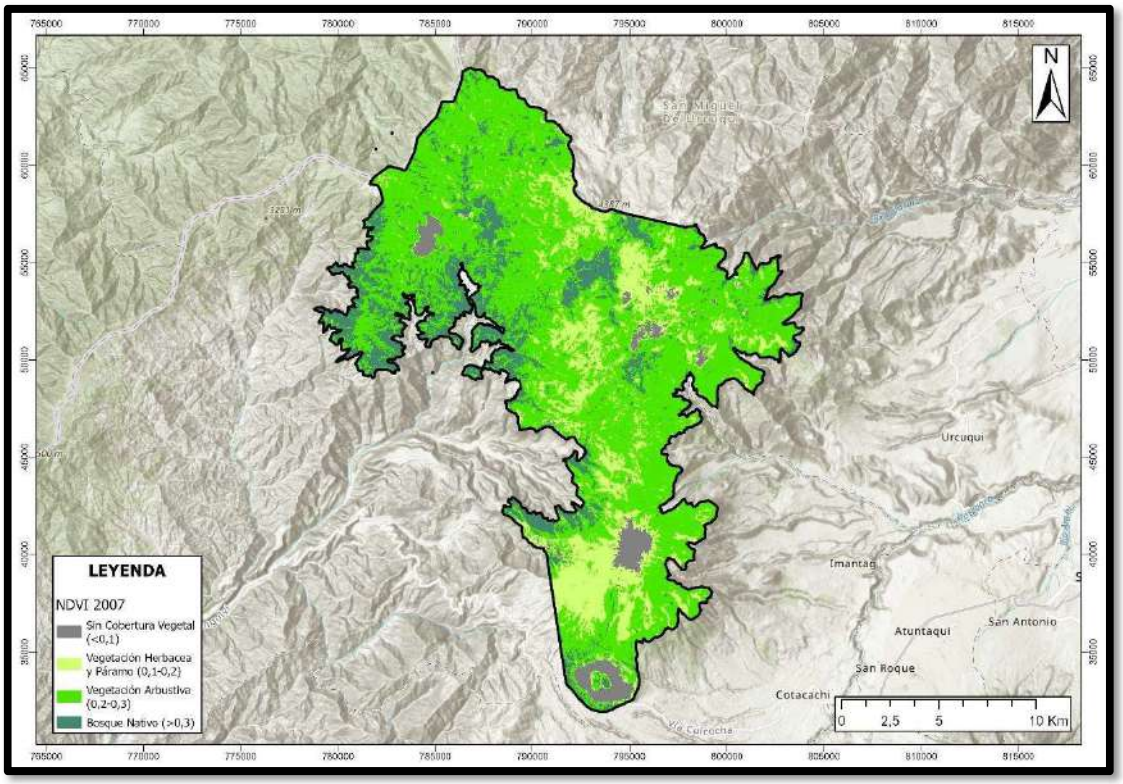
NDVI 2001.



En el Parque Nacional Cotacachi Cayapas durante el año 2001, los valores bajos y negativos del índice de vegetación se distribuyen a lo largo de toda el área de estudio. El índice presenta un rango de valores que varía entre 0.02 (valor mínimo) y 0.3 (valor máximo)

Figura 23

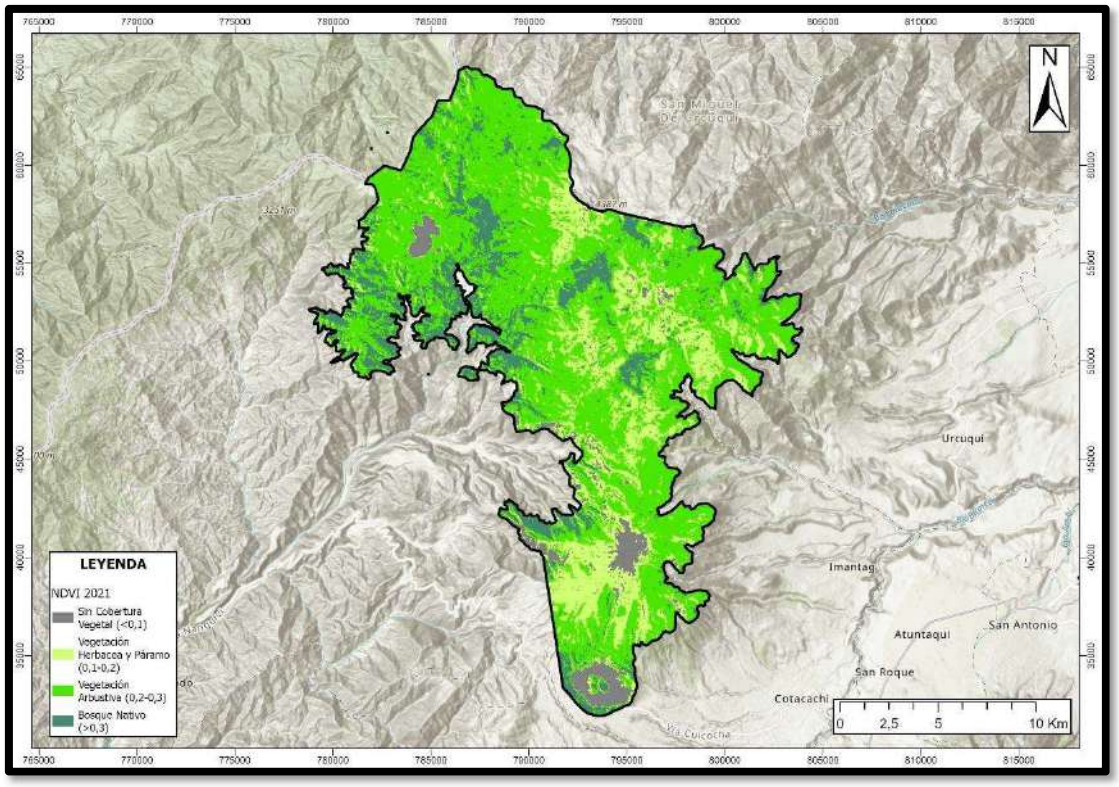
NDVI 2007.



En este año 2007, los valores bajos y negativos del índice de vegetación se distribuyen a lo largo de toda el área de estudio. El índice presenta un rango de valores que varía entre 0.1 y 0.3

Figura 24

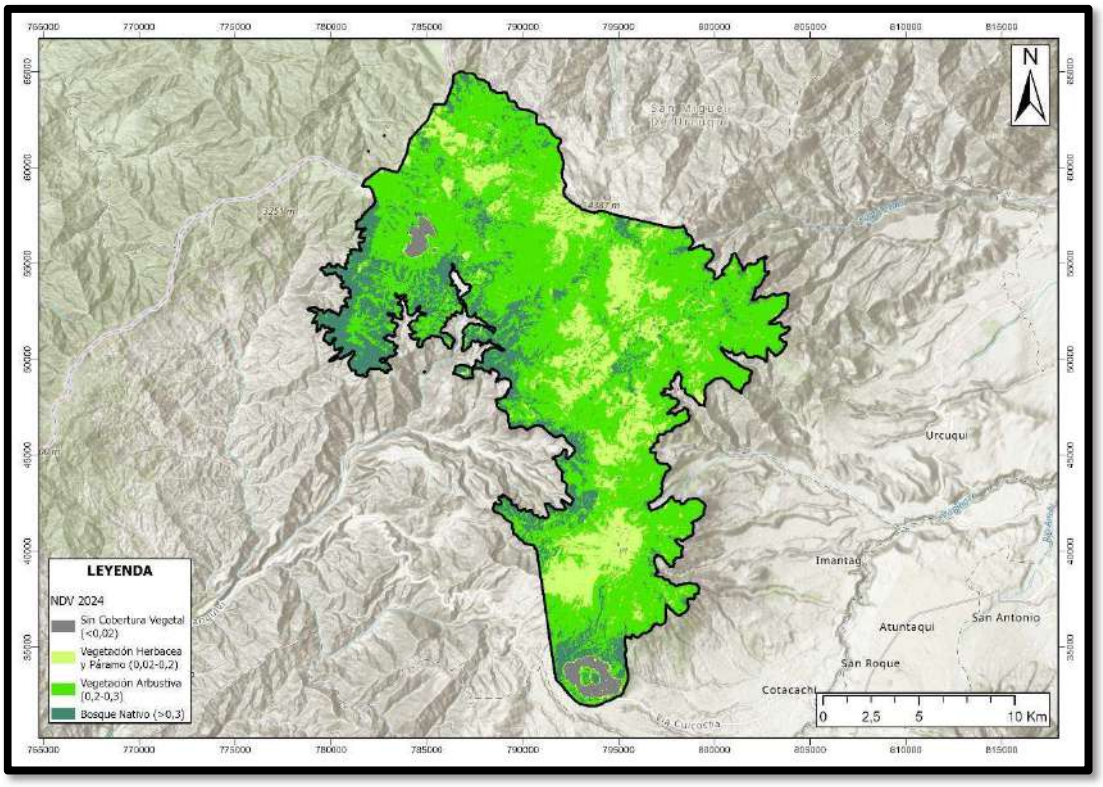
NDVI 2021



En el PNCC en el año 2021, los valores bajos y negativos del NDVI se distribuyen en toda el área de estudio, mientras que el índice de vegetación presenta un rango de valores entre 0.1 y 0.3. Estos valores reflejan la presencia de superficies con escasa cobertura vegetal y otras con mayor densidad de vegetación.

Figura 25

NDVI 2024



La distribución del índice de vegetación muestra que los valores bajos y negativos están presentes en varias zonas del área de estudio. El rango de valores obtenidos varía entre 0.02 y 0.3.

3.6.2. Evaluación de los cambios del NDVI

Los valores máximos de NDVI indican una estabilidad en la cobertura de áreas densamente vegetadas, como el bosque nativo y el páramo, con ligeros incrementos en algunos años como en el caso del 2021 con valor de 0.528. Los valores de índice superiores a 0 reflejan distintos niveles de desarrollo de la vegetación; a medida que la vegetación es más vigorosa, el valor se aproxima a 1, es decir cuando el índice supera el rango de 0.02 a 0.1 se considera que la vegetación se encuentra en un estado de productividad fotosintética (Vela et al., 2024). Sin embargo, los valores mínimos de NDVI destacan patrones de deterioro en ciertas áreas, con registros negativos más bajos en años como 2024 (con valor de -0.035). Los valores del índice inferiores a 0.1 están asociados a áreas con afloramiento de roca y lagunas. Los índices con valores entre 0.2 y 0.3 representan suelos con baja productividad, caracterizados por la presencia de vegetación arbustiva en la Tabla 22 se indican los valores del NDVI desde el año 2001, 2007, 2021 y 2024.

Tabla 22.

Valores del NDVI máximo y mínimo por año

AÑO	NDVI Máximo	NDVI Mínimo
2001	0.486	-0.515
2007	0.516	-0.065
2021	0.528	-0.015
2024	0.526	-0.035

Los resultados del análisis multitemporal de NDVI en el Parque Nacional Cotacachi Cayapas evidencian una estabilidad relativa en las áreas de vegetación densa, como bosque nativo y páramo, lo que refleja la resiliencia de estos ecosistemas. Sin embargo, la presencia de valores negativos en ciertos periodos puede representar áreas afectadas por disturbios, como incendios forestales. Los resultados obtenidos en el presente estudio se alinean con estudios previos que evalúan el estado de conservación de ecosistemas similares, como el bosque de ceja andina

suroccidental del Parque Nacional Sangay (Vela et al., 2024). En ambos casos, los valores máximos de NDVI reflejan una cobertura vegetal densa y vigorosa, característica de ecosistemas bien conservados. En el Parque Nacional Cotacachi-Cayapas, el NDVI máximo alcanzó un valor de 0.558 en 2021, lo que sugiere la persistencia de áreas con vegetación vigoroso y saludable. De manera similar, en el bosque de ceja andina, los valores máximos registrados en 2007 (0.516) y 2024 (0.526) destacan la densidad vegetal constante en el tiempo.

La variabilidad observada en los valores de NDVI puede explicarse en los dos estudios por factores meteorológicos y condiciones de suelo. En el Parque Nacional Sangay, la diferencia mínima entre los valores de 2001 y 2014 fue de 0.018 y 0.017 en valores mínimos y máximos respectivamente, lo que refleja la influencia de la precipitación, temperatura, radiación solar y otros factores meteorológicos. En el área de estudio, los valores mínimos más bajos, como los registrados en 2019 (-0.024), muestran áreas afectadas por disturbios, como incendios forestales, que alteran la cobertura vegetal y exponiendo al suelo. El análisis de Maldonado (2021) sobre la variación y respuesta de la vegetación a factores climáticos en la Reserva de la Biosfera Sierra La Laguna (RBSLL) en comparación con el Parque Nacional Cotacachi-Cayapas indica patrones comunes y diferencias que reflejan las características propias de cada región. En la RBSLL, los valores de NDVI durante la temporada de crecimiento (septiembre-noviembre) de 2001 a 2015 muestran un aumento constante en la productividad vegetal, con valores más altos en 2015 (0.65) y una correlación positiva significativa entre NDVI y factores climáticos, como la precipitación y la temperatura. Este patrón destaca cómo las condiciones climáticas influyen directamente en el vigor y la cobertura vegetal. Además, en el Parque Nacional Cotacachi-Cayapas, los valores máximos de NDVI reflejan estabilidad en áreas densamente vegetadas, como el bosque nativo y el páramo, con ligeros incrementos en ciertos años, como 2020 (0.552). Sin embargo, los valores mínimos negativos.

3.6.3. Índice de incendio (NBR)

Entre los años analizados como se muestra en la Tabla 23, se observó que el NBR máximo, que representa las áreas con mayor cobertura vegetal saludable, resaltó en 2020 con un valor de 0.512, mientras que disminuyó en 2022 a 0.392. Por otro lado, el NBR mínimo, que refleja las áreas más afectadas por disturbios como incendios forestales, disminuyó en 2020 alcanzando su valor más bajo (-0.262), pero resaltó en 2022 con un incremento a - 0.086.

Tabla 23.

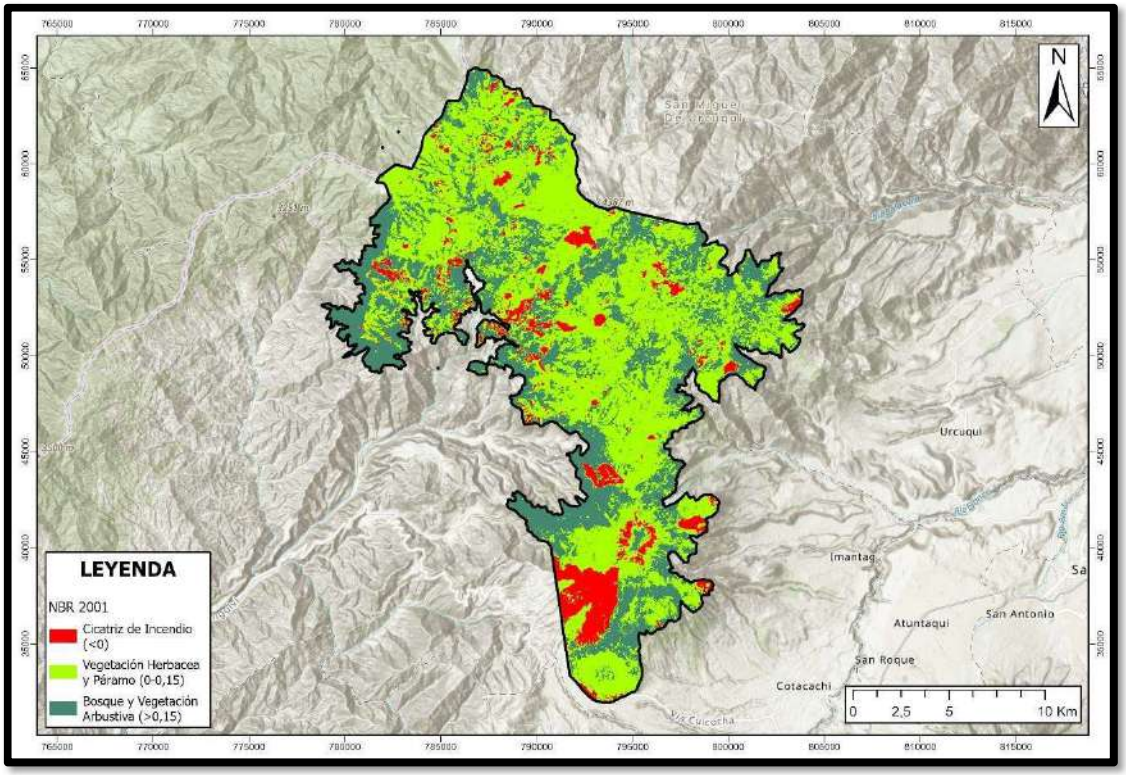
Valores del NDVI máximo y mínimo por año

AÑO	NBR Máximo	NBR Mínimo
2001	0.58	-0.34
2007	0.42	-0.70
2021	0.47	-0.22
2024	0.39	-0.25

Se detectó ocurrencia de incendios en los años 2001,2007, 2021 y 2024 como se muestra en las Figuras 25, 26, 27 y 28.

Figura 25

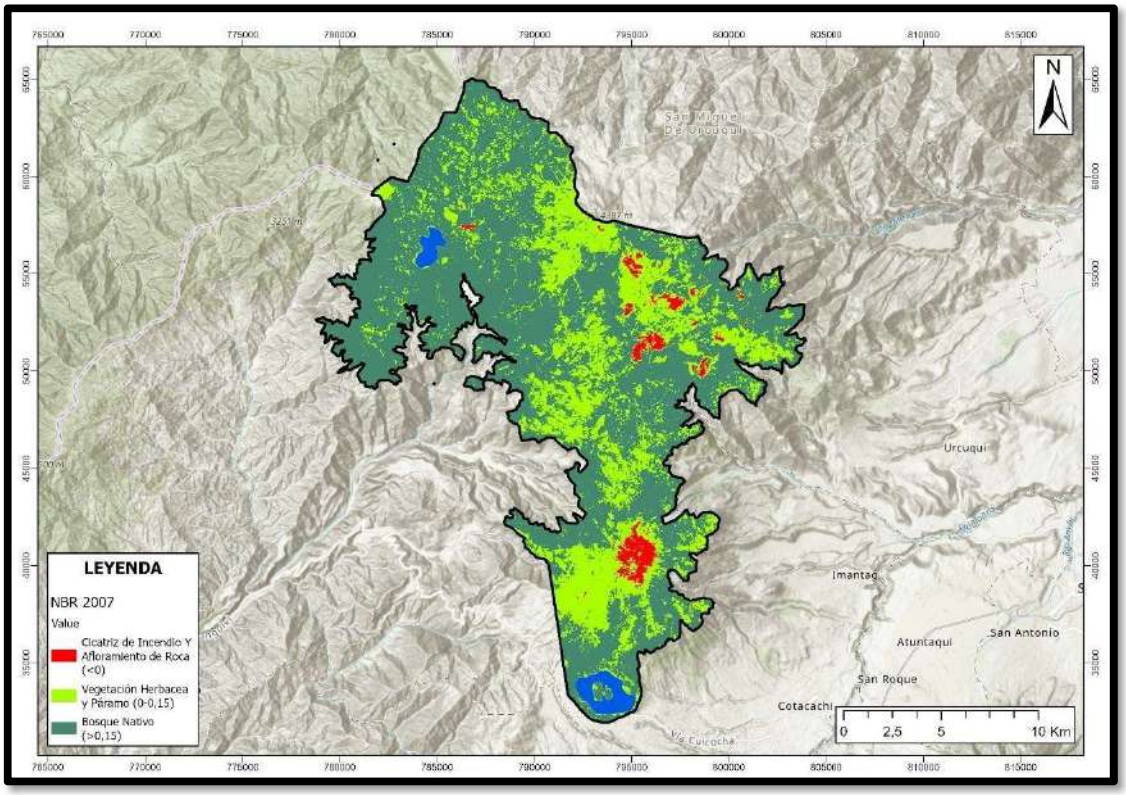
NBR 2001



El análisis multitemporal permitió identificar las áreas afectadas por incendios forestales en el año 2001. Los incendios registrados se localizaron principalmente en las vertientes sur y noreste del Parque Nacional, donde predominaban ecosistemas de páramo y vegetación arbustiva, evidenciando la susceptibilidad de estas zonas frente a eventos de incendios forestales.

Figura 26

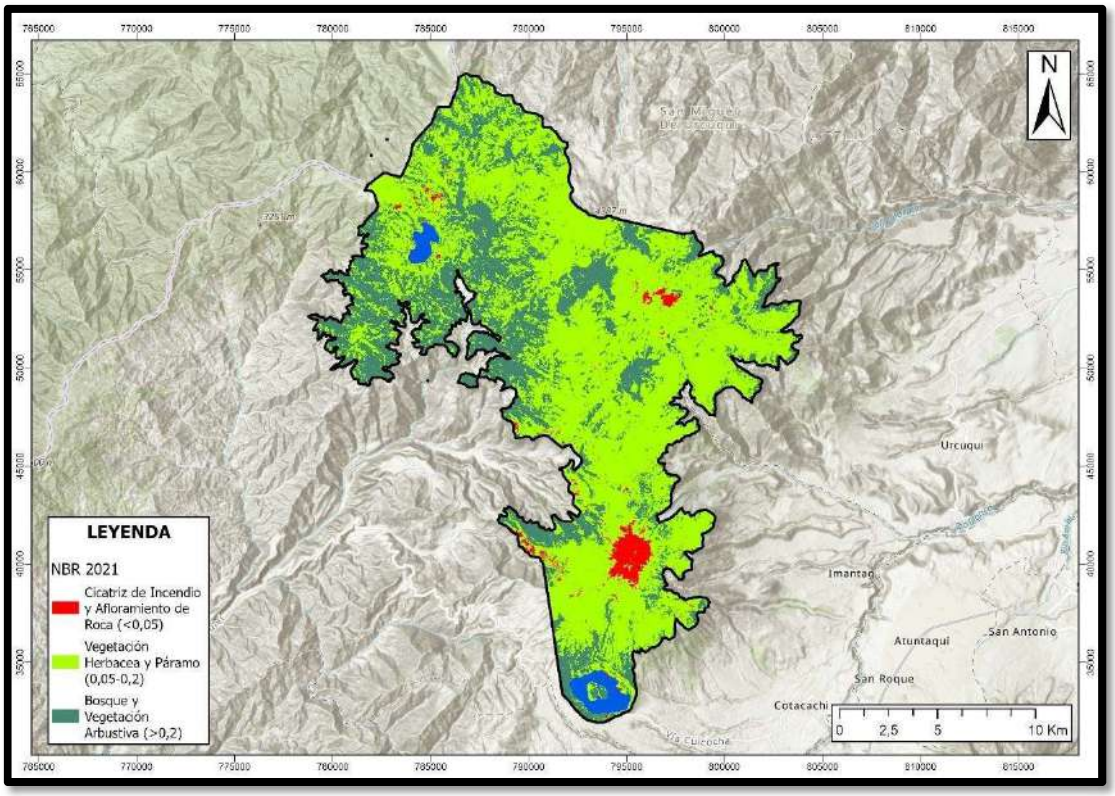
NBR 2007



El análisis multitemporal permitió identificar las áreas afectadas por incendios forestales en el año 2007. Los incendios registrados se localizaron principalmente en las vertientes sur y noreste del Parque Nacional, donde predominaban ecosistemas de páramo, evidenciando la susceptibilidad de estas zonas frente a eventos de incendios forestales.

Figura 27

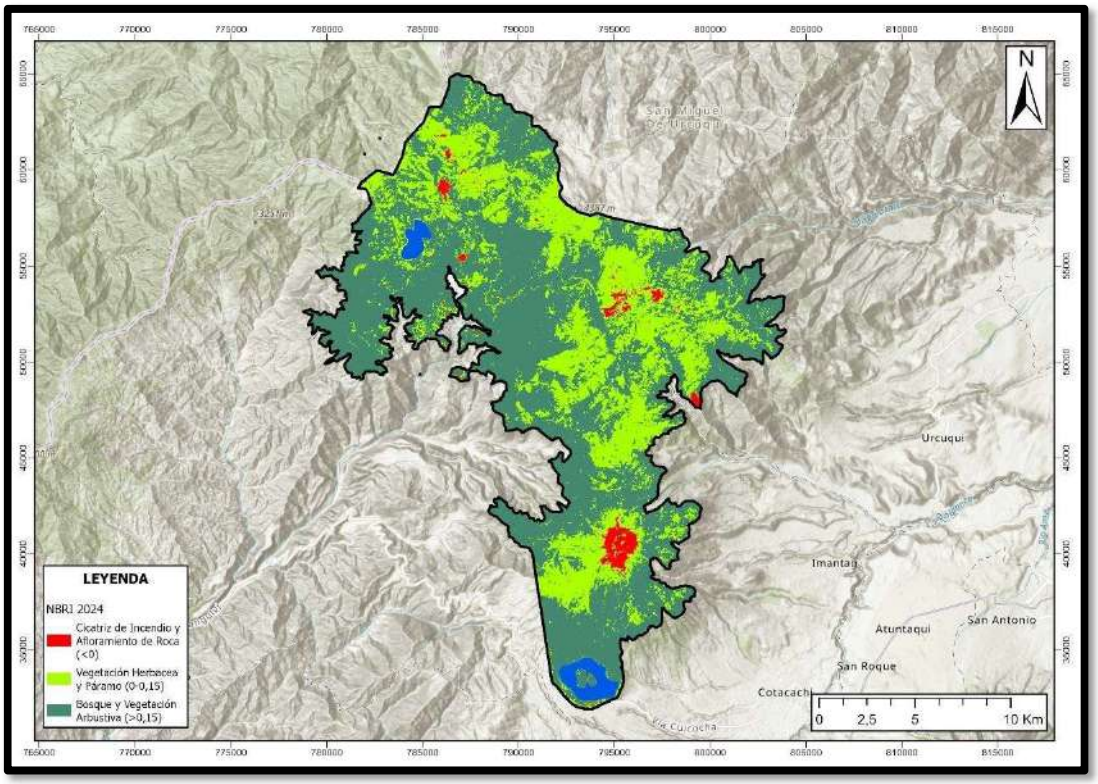
NBR 2021



El análisis multitemporal permitió identificar las áreas afectadas por incendios forestales en el año 2021. Los incendios registrados se localizaron principalmente en las vertientes sur y noreste del Parque Nacional, donde predominaban ecosistemas de páramo y vegetación arbustiva, evidenciando la susceptibilidad de estas zonas frente a eventos de incendios forestales.

Figura 28

NBR 2024



El análisis multitemporal permitió identificar las áreas afectadas por incendios forestales en el año 2024. Los incendios registrados se localizaron principalmente en las vertientes sur y noreste del Parque Nacional, donde predominaban ecosistemas de páramo y vegetación arbustiva, evidenciando la susceptibilidad de estas zonas frente a eventos de incendios forestales.

3.7. Control y validación de la clasificación supervisada

En la Tabla 24 se indica la matriz de confusión, con datos de cobertura vegetal del suelo del año 2024 y las respectivas clases comparando valores del predictor Producer's accuracy (Recall) y el usuario User's accuracy (Precisión).

Tabla 24.
Matriz de confusión

	BOSQUE	PÁRAMO	VEGETACIÓN ARBUTIVA	CICATRIZ DE INCENDIO	AFLORAMIENTO DE ROCA	LAGUNAS	NUBES	CLASIFICACIÓN GENERAL	PRECISIÓN DEL USUARIO
BOSQUE	17	3	2	0	0	0	0	22	77.27%
PÁRAMO	2	61	3	0	1	0	0	67	91.05%
VEGETACIÓN ARBUSTIVA	0	0	5	0	0	0	0	5	100%
CICATRIZ DE INCENDIO	0	0	0	1	0	0	0	1	100%
AFLORAMIENTO DE ROCA	0	0	0	0	1	0	0	1	100%
LAGUNAS	0	0	0	0	0	3	0	3	100%
NUBES	0	0	0	0	0	0	1	1	100%
LA VERDAD EN GENERAL	19	64	10	1	2	3	1	100	
PRECISIÓN DEL PRODUCTOR	89.47%	95.31%	50%	100%	50%	100%	100%		

Precisión general (OA)	89%
Índice Kappa	0.79%

En el índice Kappa obtenido fue de 0.79 con una precisión general del 89%, el valor del índice de acuerdo con la Tabla 22 tiene una fuerza de concordancia considerable, por lo que la clasificación supervisada de imágenes está correctamente realizada.

Tabla 25.

Valoración del coeficiente Kappa

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre
0.01 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Koch (1977

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se identificaron y caracterizaron las principales covariables ambientales y climáticas que influyen en la susceptibilidad a incendios forestales en la parte alta del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas. La cobertura vegetal fue la variable de mayor influencia dentro del modelo, seguida por la pendiente, la altitud, la orientación del terreno, la velocidad del viento y el uso del suelo, evidenciando que la interacción entre estos factores determina las condiciones de mayor vulnerabilidad frente a la ocurrencia y propagación de incendios forestales.

El análisis multitemporal de las imágenes Landsat de los años 2001, 2007, 2021 y 2024 permitió identificar cambios en la cobertura vegetal y en las cicatrices de incendios forestales. Los resultados muestran que el páramo continúa siendo la cobertura predominante, mientras que el bosque nativo presentó un incremento en su superficie durante los últimos años. Asimismo, las cicatrices de incendios disminuyeron entre los períodos analizados, lo que evidencia procesos de recuperación de la vegetación, aunque persisten sectores con condiciones favorables para la ocurrencia de nuevos incendios.

La clasificación de la susceptibilidad permitió determinar que las categorías alta y muy alta predominan en gran parte de la zona de estudio, principalmente en áreas de páramo y vegetación arbustiva localizadas sobre pendientes pronunciadas y expuestas a condiciones climáticas que favorecen la propagación del fuego. La validación del modelo obtuvo una precisión global del 89 % y un índice Kappa de 0.79, lo que confirma la confiabilidad de la metodología aplicada para representar espacialmente la susceptibilidad a incendios forestales.

4.2. Recomendaciones

Incorporar variables complementarias, como temperatura, precipitación, humedad relativa del aire y proximidad a vías de acceso o asentamientos humanos, con el fin de fortalecer futuros modelos de susceptibilidad y mejorar la representación espacial del riesgo de incendios forestales.

Actualizar periódicamente los mapas de cobertura vegetal y de susceptibilidad mediante imágenes satelitales de mayor resolución espacial y temporal, lo que permitirá realizar un monitoreo continuo de los cambios en el territorio y detectar oportunamente nuevas áreas vulnerables.

Utilizar los mapas de susceptibilidad obtenidos como herramienta de apoyo para la planificación y gestión del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas, priorizando las zonas clasificadas con susceptibilidad alta y muy alta para la implementación de acciones de prevención, vigilancia y control de incendios forestales.

Fortalecer los programas de educación ambiental y participación comunitaria dirigidos a las poblaciones ubicadas en el área de influencia del parque, promoviendo prácticas de manejo responsable del fuego y acciones preventivas que contribuyan a disminuir el riesgo de incendios forestales y a conservar los ecosistemas altoandinos.

Bibliografía

Arias, P., Chuma, L., Coronado, P., & Jácome, G. (2024). Susceptibility to vegetation cover fires an evaluation using multi-criteria and radio frequency methods (Cotacachi Cantón, Ecuador). *CIG, 50*(1). doi:https://doi.org/10.18172/cig.5867

Armenteras, D., González, T., Vargas, J., Meza, M., & & Oliveras, I. (2021). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia, 42*(1). doi:https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353

Bargali, H., Pandey, A., Bhatt, D., & Sundriyal, R. (2024). Forest fire management, funding dynamics, and research in the burning frontier: A comprehensive review. *Trees, Forests and People, 16*(1). doi:https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100526

Becerra, L., Esquivel, L., & Castro, M. (2025). Gestión del riesgo de desastres y formación de competencias en prevención: revisión sistemática de políticas públicas en países andinos. *Zenodo, 2*(1). doi:https://doi.org/10.5281/zenodo.17247469

Capador, Y., González, G., & Suarez, P. (2021). Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia). *Avances Investigación en Ingeniería, 18*(1). doi:https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6931

Casado, F., & Vargas, D. (2025). Incendios forestales y variables geográficas en la zona de amortiguamiento del Parque Internacional La Amistad, Costa Rica. *SciELO, 17*(1). doi:http://dx.doi.org/10.22458/urj.v17i1.5499

Castillo, E., Chalco, R., & Gonzáles, S. (2025). Sistema de Detección y Alerta de Incendios Forestales Basado en Procesamiento de Imágenes e IA. *Revista Tecnológica ESPOL, 37*(E1), 88-111. doi:https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1352

Castillo, H., & Baldassini, P. (2023). Teledetección aplicada al análisis de los impactos ecosistémicos generados por los incendios del año 2020 en la provincia de Córdoba, Argentina, e identificación de áreas prioritarias de restauración. *Investigaciones Geográficas, 1*(80). doi:https://doi.org/10.14198/INGEO.23754

Causas y origen de los incendios forestales en el Ecuador. (2023). *INNDEV*.

Cisneros, C., Calahorrano, J., & Manzano, M. (2024). Análisis espacial y temporal de incendios forestales en el Ecuador utilizando datos de sensores remotos. *Colombia Forestal, 27*(1). doi:https://doi.org/10.14483/2256201x.20111

DIAZ, C. P. (2009). Obtenido de IMPACTO A LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE, PRODUCTO DE LAS OPERACIONES HIDROCARBURÍFERAS DE PETROAMAZONAS EN EL BLOQUE 15:

https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1630/1/CD-2273.pdf

Farfán, M., Orozco, C., Alcántara, C., & Nicasio, S. (2025). Análisis de la probabilidad antropogénica de incendios forestales en el Área de Conservación Tempisque, Costa Rica: un enfoque basado en pesos de evidencia y métricas de paisaje. *SciELO,*

1(75). doi:http://dx.doi.org/10.15359/rgac.75-2.04

Farid, A., Alam, M., Akin, I., & Akinleye, T. (2024). A Review of the Occurrence and Causes for Wildfires and Their Impacts on the Geoenvironment. *Fire, 7*(8). doi:https://doi.org/10.3390/fire7080295

Faúndez, J., Castillo, M., & Navarro, R. (2023). Impactos de los incendios forestales de magnitud en áreas silvestres protegidas de Chile Central. *SciELO, 44*(1). doi:http://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002023000100083

Ferreira, C., Costa, L., & Valente, M. (2024). Forest fire causes and prevention strategies in Portugal: Insights from stakeholder focus groups. *Forest Policy and Economics,*

169. doi:https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103330

Flores, J. (2021). Antecedentes y perspectivas de la investigación en incendios forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales, 12*(1). doi:https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iEspecial-1.981.

Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Narayanan, M. (2024). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. *Environmental Research, 240*(2). doi:https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117537

Gil, J. (2022). INCENDIOS FORESTALES: causas e impactos. *El Antoniano, 6*(1), 68-

113. doi:https://doi.org/10.51343/anto.v135i1.866

Gómez, A., Correa, A., & Castruita, L. (2021). CAMBIO CLIMÁTICO Y DINÁMICA DE

LOS ECOSISTEMAS FORESTALES. *Revista Fitotecnia Mexicana, 44*(4). doi:https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.673

Gonzáles, A., & Ortiz, C. (2022). Superficie forestal afectada por incendios en México: apuntes iniciales hacia un modelo de manejo preventivo. *SciELO, 56*(1). doi:http://dx.doi.org/10.15359/rca.56/1.1

Hayman, J. (1984). *Investigación y educación.* Buenos Aires: Paidos.

Herrera, G., & Castillo, E. (2025). Proceso de Análisis Jerárquico: La Ciencia detrás de las Decisiones Estratégicas. *Editorial Grupo AEA, 1*(1). doi:https://doi.org/10.55813/egaea.l.132

Liu, N. (2023). Wildland surface fire spread: Mechanism transformation and behavior transition. *Fire Safety Journal, 141*(1). doi:https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103974

López, S., Chung, P., & Ramírez, M. (2021). Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método multicriterio para la localización óptima de estaciones intermodales.

Economía Sociedad Y Territorio, 21(66). doi:https://doi.org/10.22136/est20211583

Maldonado, D. (2021). *Variación y respuesta de la vegetación a factores climáticos en la refión del Cabo con énfasis en la reserva de la Biosfera Sierra la Laguna, Baja California Sur.* Obtenido de CIB: https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/2552/1/maldonado_d

%20TESIS.pdf

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2007). *Plan de Manejo de la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas*. Obtenido de Ministerio del Ambiente del Ecuador: https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Andres-Garzon-Delvaux/publication/334131968_Contribution_to_the_financial_aspects_and_scena rii/links/5d19de23a6fdcc2462b4e204/Contribution-to-the-financial-aspects-and-scenarii.pdf? cf_chl_f_tk=krLmKy2aiMo_w7IQ6

Oñate-Valdivieso, F., Álvaez, M. [., Esparza, C. [., & Oñate-Paladines, A. [. (s.f.).

Evaluación multicriterio aplicada al análisis de movimientos en masa en carreteras de montaña.

Ovando, G., de la Casa, A., Díaz, G., Díaz, P., Bressanini, L., & Miranda, C. (2021). Desempeño de diferentes índices de vegetación de Sentinel-2 para estimar el rendimiento de soja en agricultura de precisión. *AgriScientia, 38*(2). doi:https://doi.org/10.31047/1668.298x.v38.n2

Parra, Á., Uribe, H., & Parra, E. (2025). Incendios de cobertura vegetal, biodiversidad y gobernanza. *Revista Controversia, 1*(224), 1-15. doi:https://doi.org/10.54118/controver.vi224.1360

Perea, M., & García, W. (2024). Propuesta para la prevención, mitigación y control de incendios forestales. *Revista Social Fronteriza, 4*(1). doi:https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(1)183

Plaza, G., Tumbaco, D., Santillán, E., & Vallejo, V. (2022). REFORESTACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR INCENDIOS FORESTALES EN EL CANTÓN RIOBAMBA, ECUADOR. *INNDEV, 1*(1). doi:https://doi.org/10.69583/inndev.v1n1.2022.29

Posso, M. (2011). *Proyectos, tesis y marco lógico.* Quito: Noción.

Quijije, V., Ramos, M., Villavicencio, D., & Manrique, T. (2025). Diagnóstico del uso del fuego en actividades agrícolas en el sitio Estancia Vieja, cantón Portoviejo, Manabí, Ecuador. *Ciencia y Tecnología, 18*(1). doi:https://doi.org/10.18779/cyt.v18i1.828

Ramirez, D., Lértora, G., Vargas, R., & Aponte, H. (2022). Effect of fires on vegetation cover, carbon storage and plant biomass in a coastal wetland: The case of Los Pantanos de Villa (Lima-Peru), a wetland on the arid Pacific coast. *Revista De Biología Tropical, 70*(1). doi:https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v70i1.46084

Ríos, J. (2023). Causas y origen de los incendios forestales en el Ecuador. *INNDEV, 2*(4). doi:https://doi.org/10.69583/inndev.v2n4.2023.79

Rojas, L., Romo, J., Radríguez, D., & Villanueva, A. (2022). Susceptibilidad a incendios en el Campo Forestal Experimental Las Cruces, Texcoco, México: una priorización basada en el enfoque multicriterio. *Sociedad Y Ambiente, 1*(25). doi:https://doi.org/10.31840/sya.vi25.2484

Romero, J., & Monteros, D. (2025). Revisión sistemática de las estrategias para la reducción del riesgo de desastres en los municipios de la Zona 2 en Ecuador. *Conciencia Digital, 8*(4), 75-97. doi:https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v8i4.3567

Ruiz, R., Raj, D., Venegas, A., & Jerez, D. (2022). Dinámica temporal de combustibles forestales y efecto del incendio en Cerro Nambiyugua, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 9*(2). doi:https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3253

Sadrabadi, M., & Innocente, M. (2023). Vegetation Cover Type Classification Using Cartographic Data for Prediction of Wildfire Behaviour. *Fire, 6*(2). doi:https://doi.org/10.3390/fire6020076

Samamé, J. (2023). Los incendios forestales y su repercusión en el ecosistema peruano. *LATAM Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades, 4*(2). doi:https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.610

Sánchez, Y., Raqui, C., Huaroc, E., & Huaroc, N. (2024). Importancia de Conocer la Normalidad de los Datos Utilizados en los Trabajos de Investigación por Tesistas. *Revista Docentes 2.0, 17*(2). doi:https://doi.org/10.37843/rted.v17i2.554

Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2024). *Incendios Forestales 2024*. Obtenido de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos: https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendios-forestales-2024/

Shivaprasad, K., Sowmya, M., Danakumara, T., & Manoj, M. (2025).

Forest fire and its impact on forest biodiversity, 1(1), 37-53. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-443-31406-

3.00004-7

Skakun, R., Castilla, G., & Jain, P. (2024). Mapping wildfires in Canada with Landsat MSS to extend the National Burned Area Composite (NBAC) time series back to 1972.

Int J Wildland Fire, 33(12). doi:https://doi.org/10.1071/WF24138

SNGRE. (2020). *El Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos activado para atender las afectaciones ante incendios forestales*. Obtenido de El Servicio Nacional de Gestión de Riesgo: https://www.gestionderiesgos.gob.ec/el-sistema-nacional-descentralizado-de-gestion-de-riesgos-activado-para-atender-las-afectaciones-ante-incendios-forestales/

Tecuapetla, I., Villamil, G., & Cruz, I. (2021). Estimación estadística de áreas quemadas en La Primavera (México) de 2003 a 2016 utilizando series de tiempo de imágenes Landsat-7. *Investigaciones Geográficas, 1*(106). doi:https://doi.org/10.14350/rig.60418

Toaza, E., Velasteguí, J., Espinoza, V., & Chamorro, H. (2021). Application of Geographic Information Technologies to estimate areas affected by forest fires.

Conciencia Digital, 4(2.2). doi:https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i2.2.1739

Trujillo, E., Lopez, R., & Proaño, J. (2021). Simulation of wildfire spread using firebreaks in Ilaló Volcano, Quito-Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, 13*(2). doi:https://dx.doi.org/10.18272/aci.v13i2.2328

Valdez, K., Bravo, L., & Manzo, L. (2021). Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice Normalized Burn Ratio (NBR). *SciELO, 29*(1). doi:https://doi.org/10.15174/au.2019.2418

Vela, A., Navarro, M., Mendoza, M., Sánchez, J., & Esparza, L. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales,*

15(81). doi:https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425.

Villacís, C., Lizano, K., Toapanta, J., & Chango, M. (2022). LOS INCENDIOS FORESTALES Y SU PREVENCIÓN EN EL ECUADOR. *INNDEV, 1*(1). doi:

https://doi.org/10.69583/inndev.v1n1.2022.32

Wu, Z., Wang, B., Li, M., & Tian, Y. (2022). Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence. *Ecological Indicators, 136*(1). doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108653.

Anexos

Mapas Finales de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi- Cayapas, con sus variables y el análisis multitemporal.

Figura 1. Cobertura Vegetal del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2001)

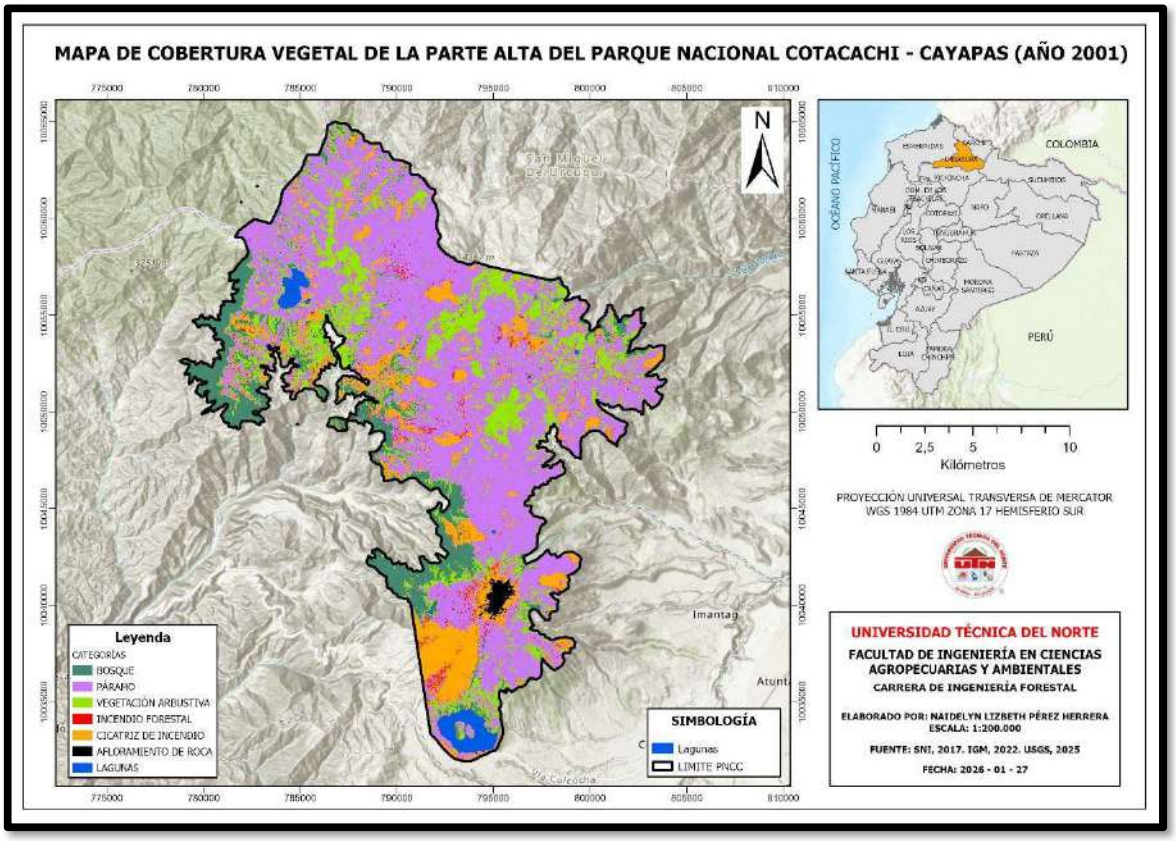


Figura 2. Cobertura Vegetal del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2007)

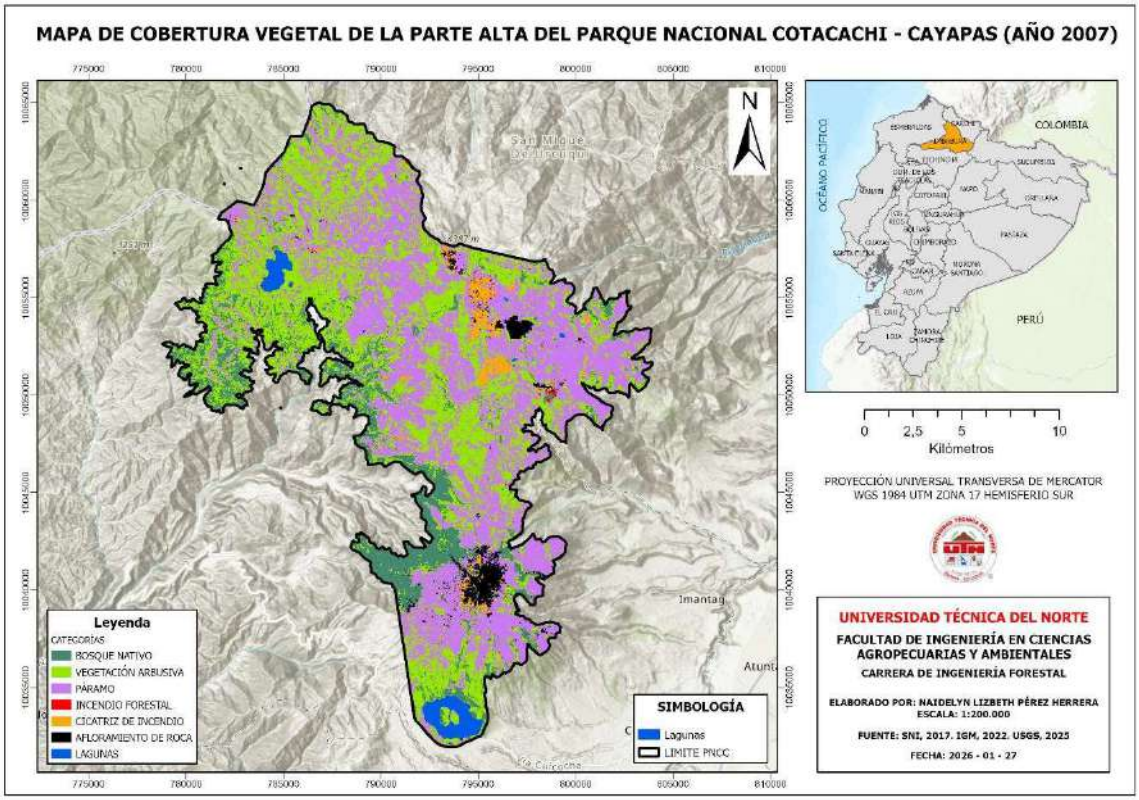


Figura 3. Cobertura Vegetal del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2021)

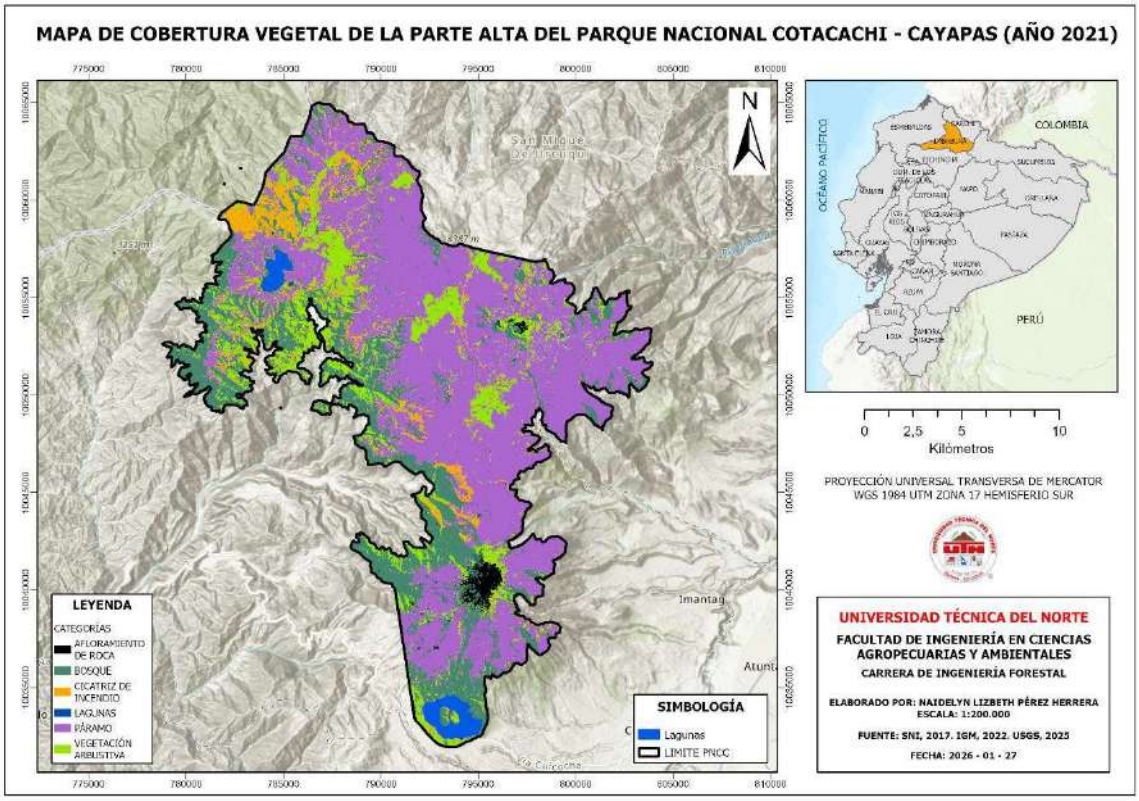


Figura 4. Cobertura Vegetal del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2024)

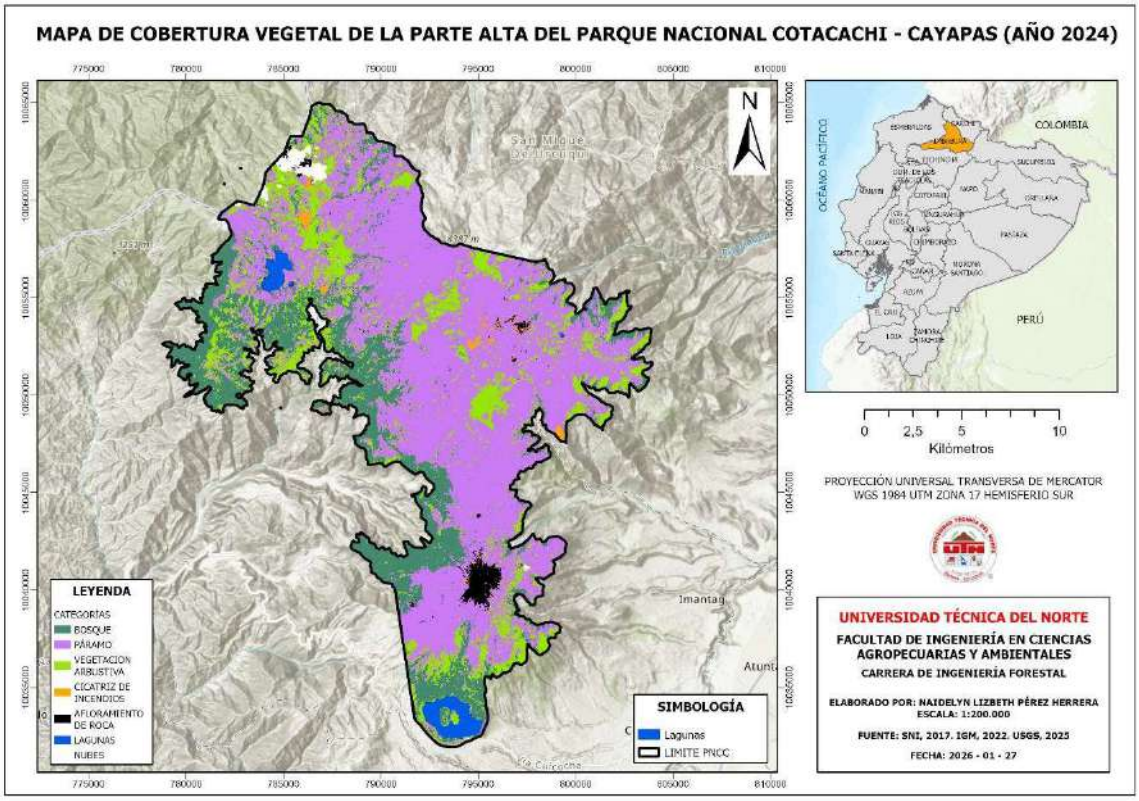


Figura 5. Altitud del Terreno de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas

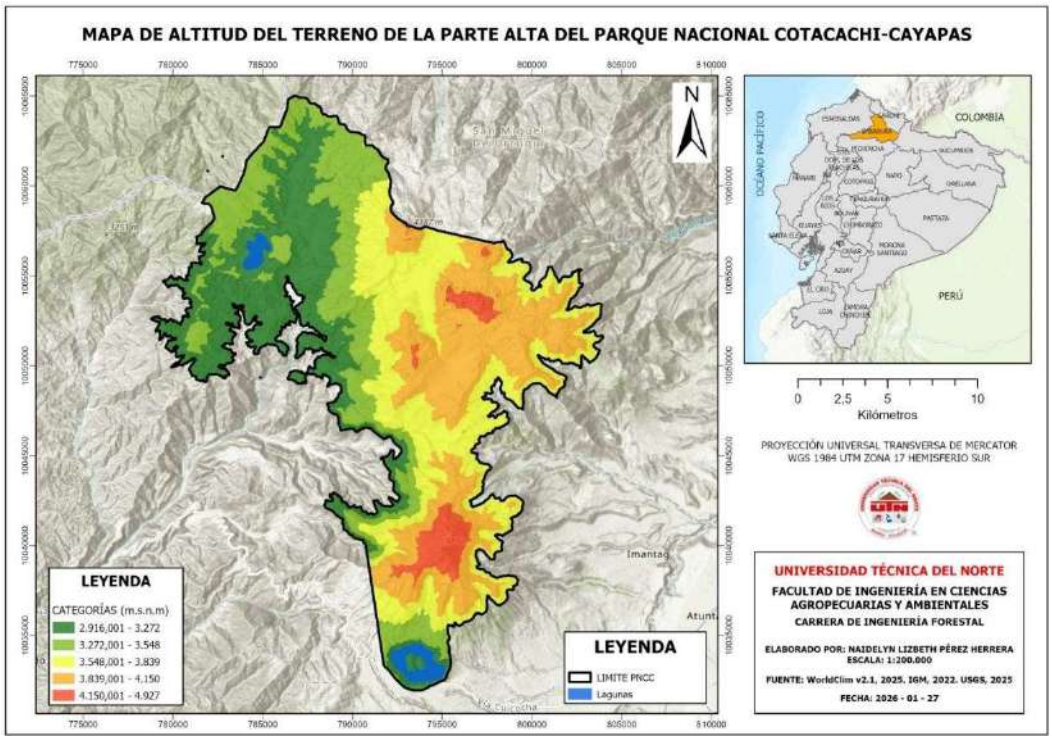


Figura 6. Pendientes del Terreno de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas

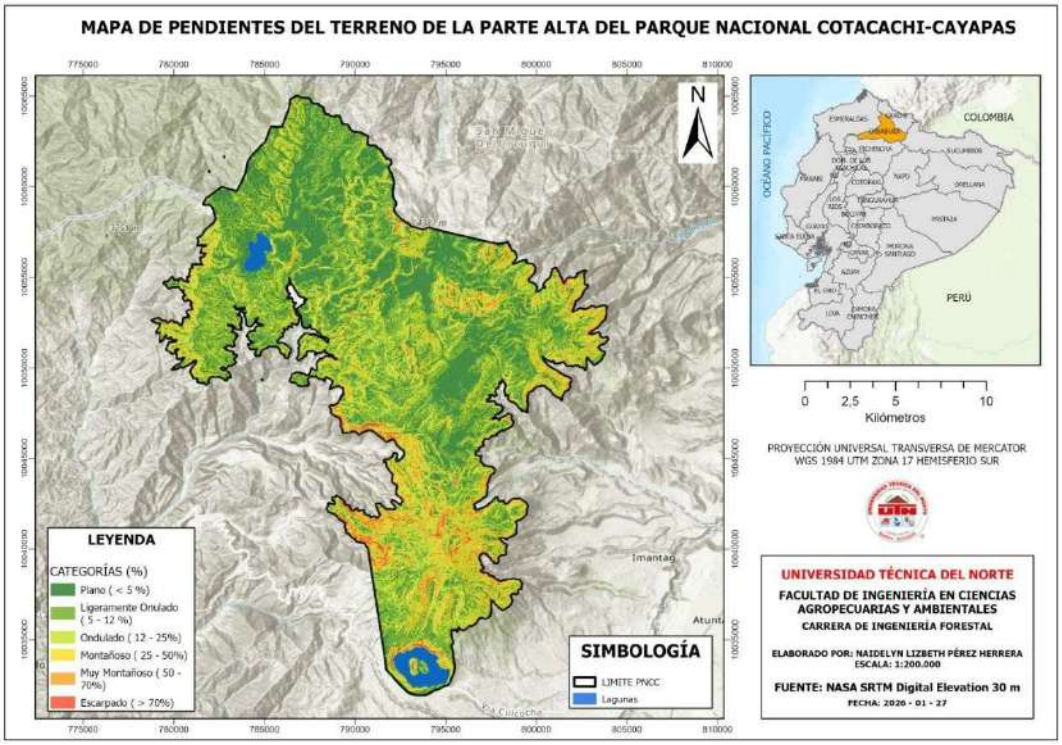


Figura 7. Velocidad del Viento de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas

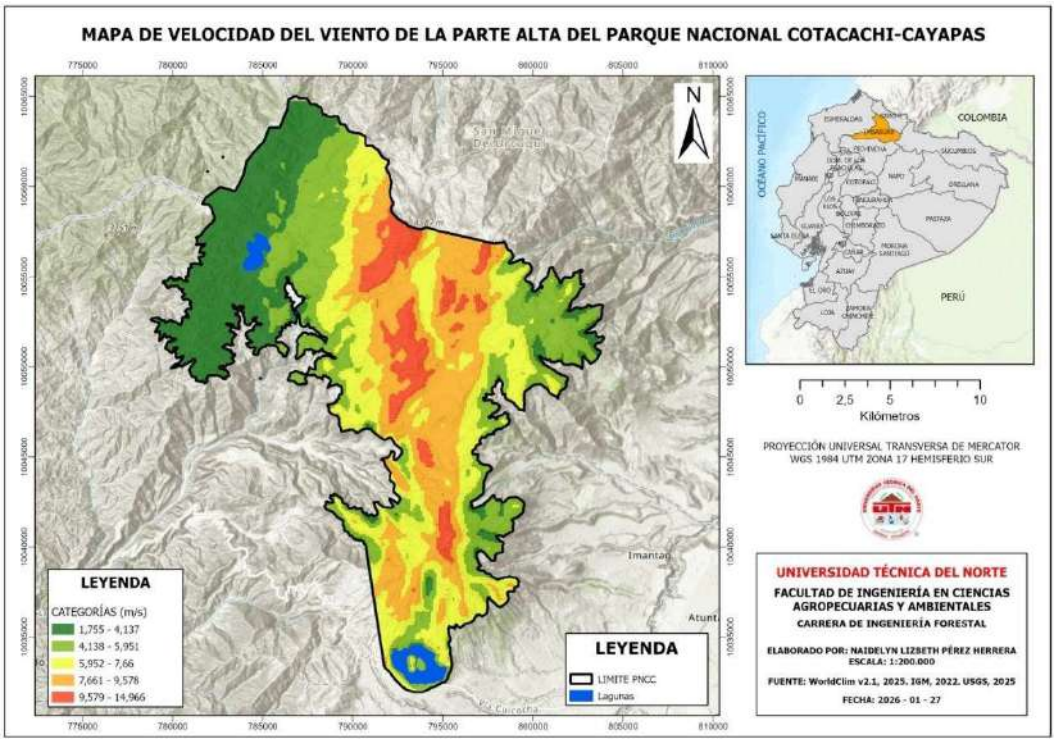


Figura 8. Orientación del Terreno de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas

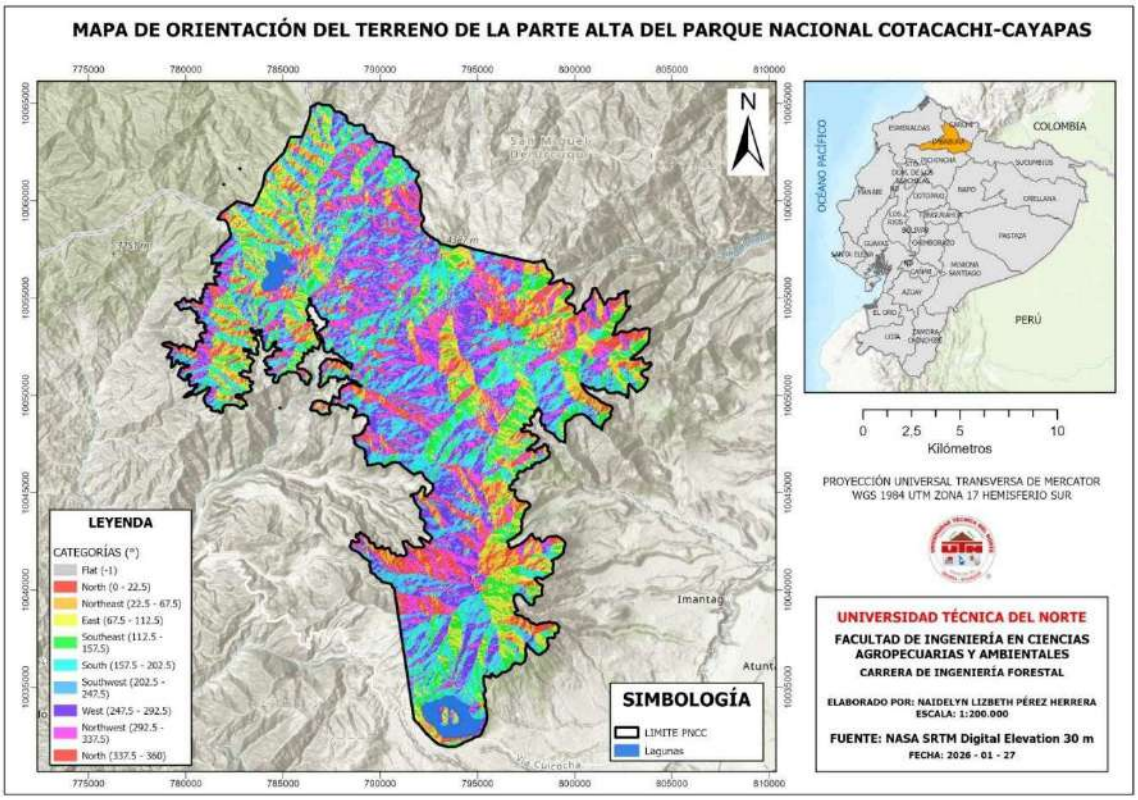


Figura 9. Uso del Suelo de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2001)

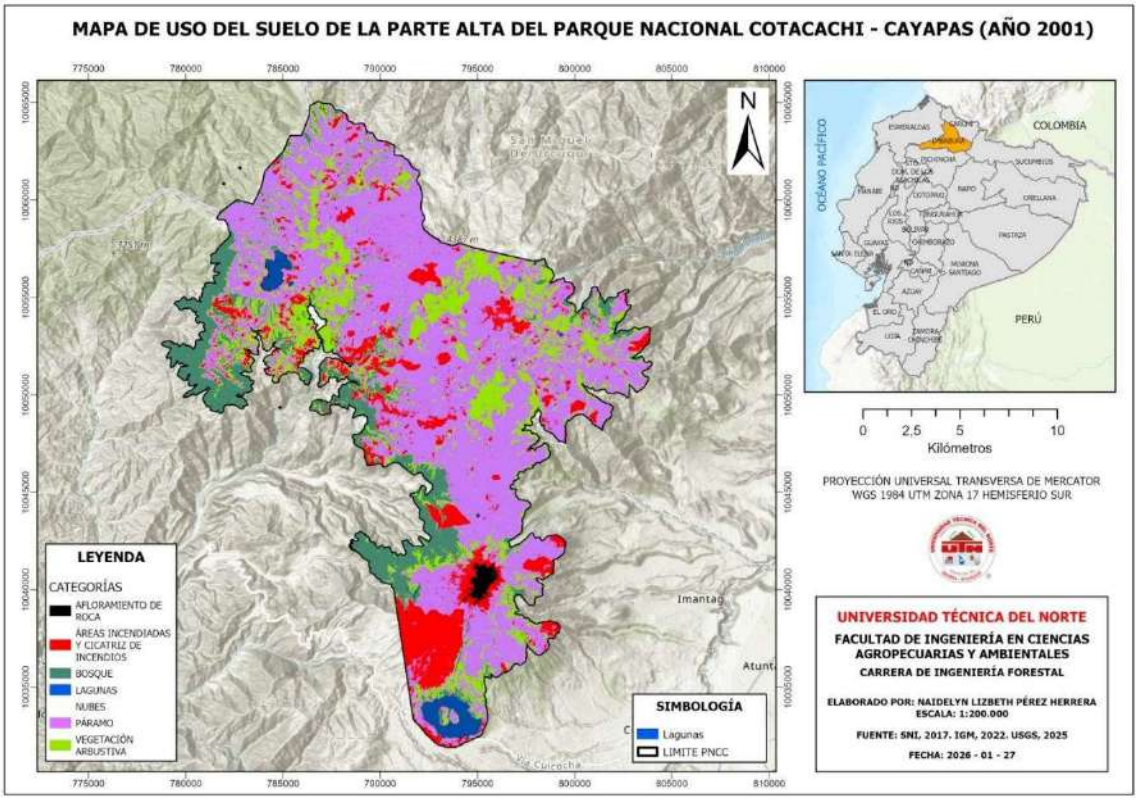


Figura 10. Uso del Suelo de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2007)

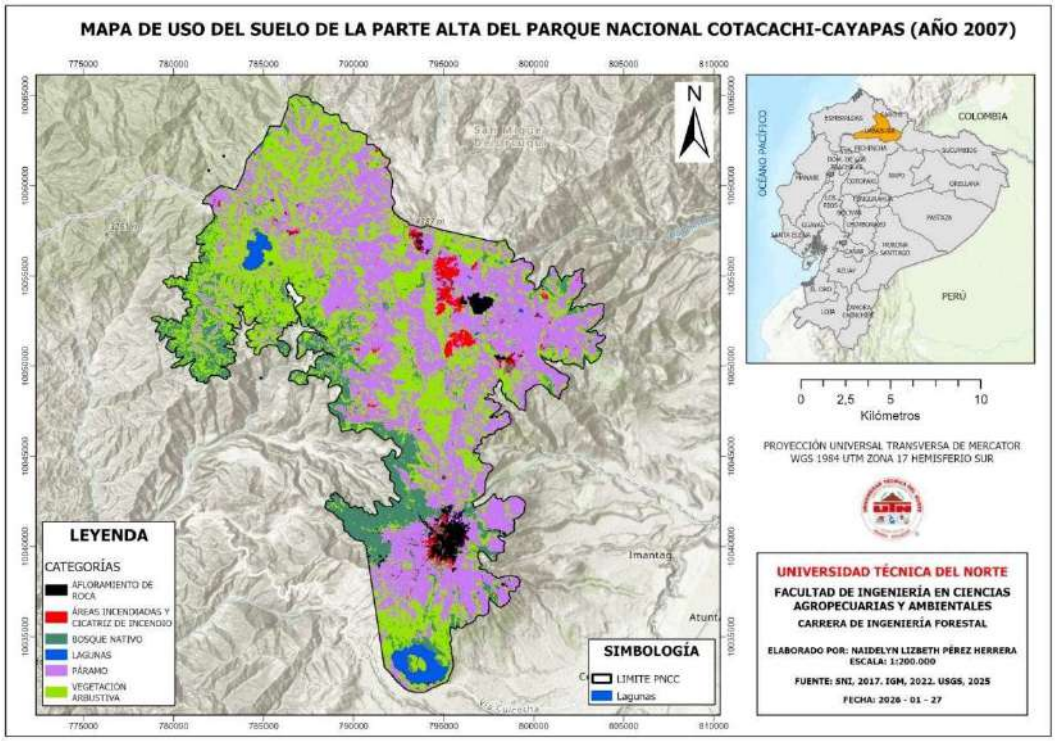


Figura 11. Uso del Suelo de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2021)

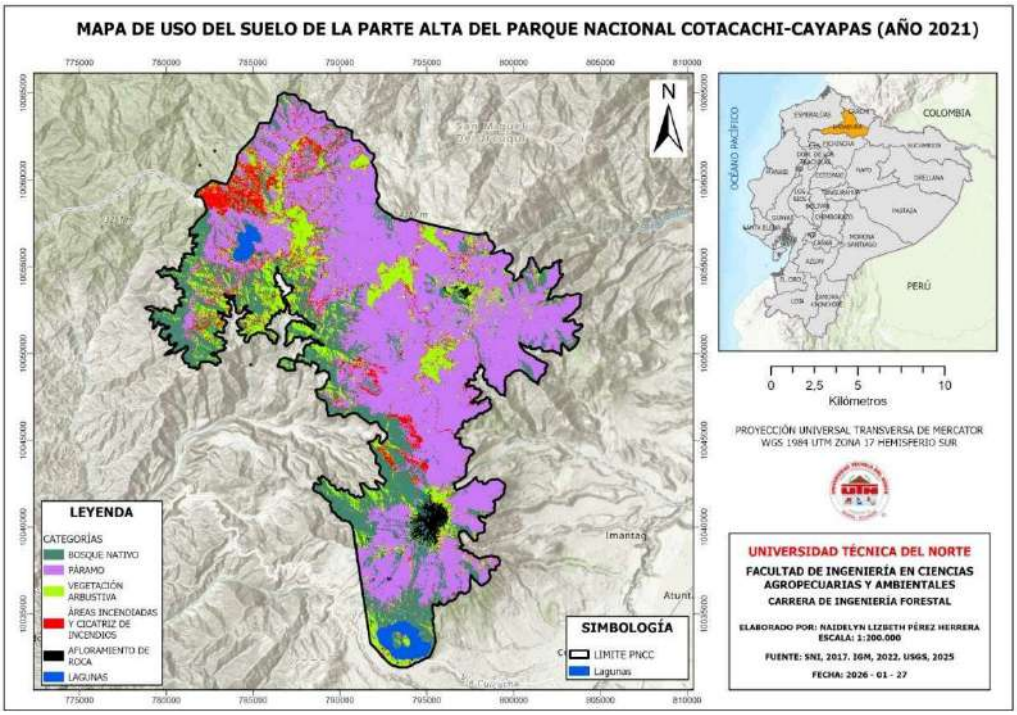


Figura 12. Uso del Suelo de la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2024)

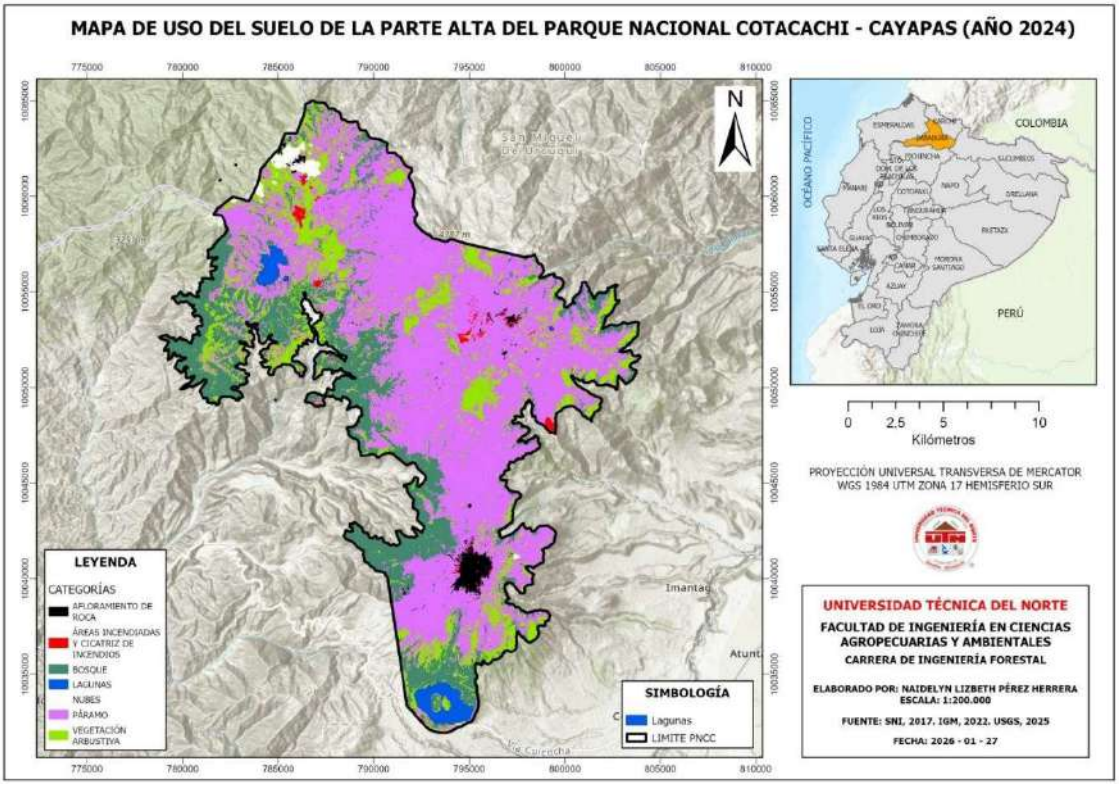


Figura 13. Susceptibilidad a Incendios Forestales en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2001)

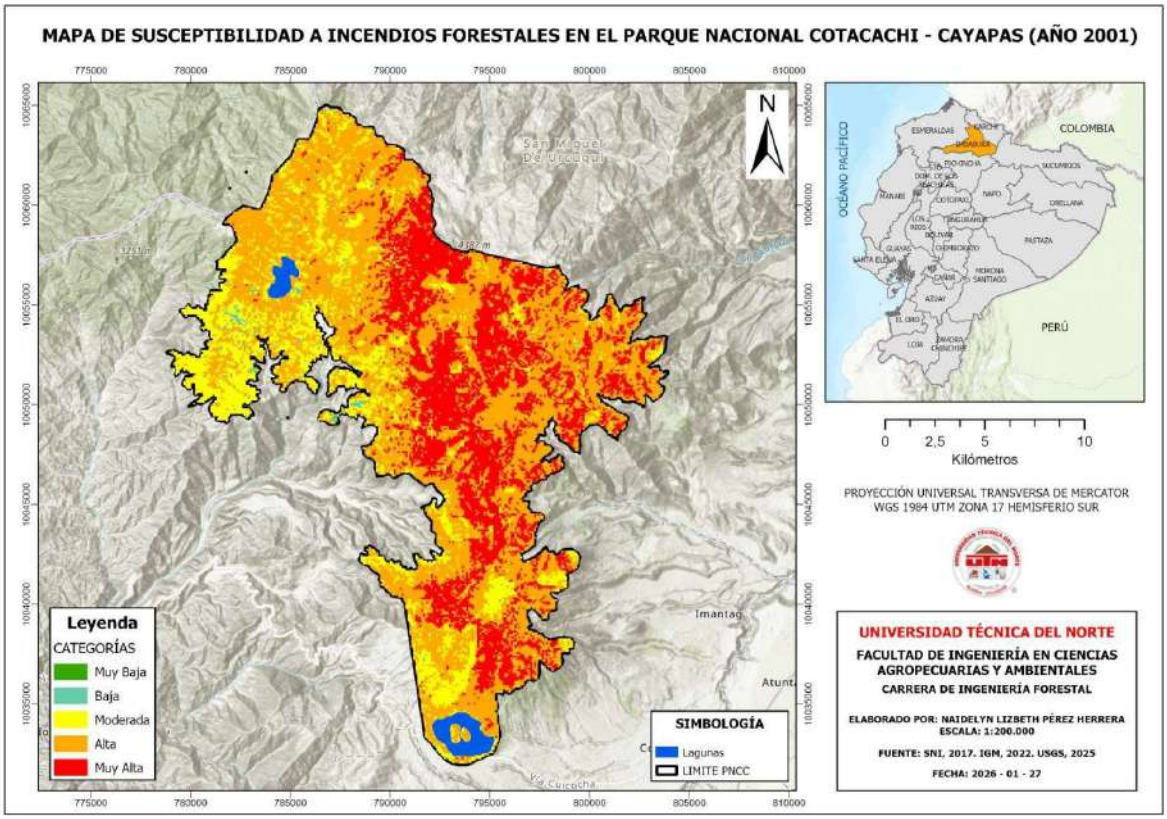


Figura 14. Susceptibilidad a Incendios Forestales en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2007)

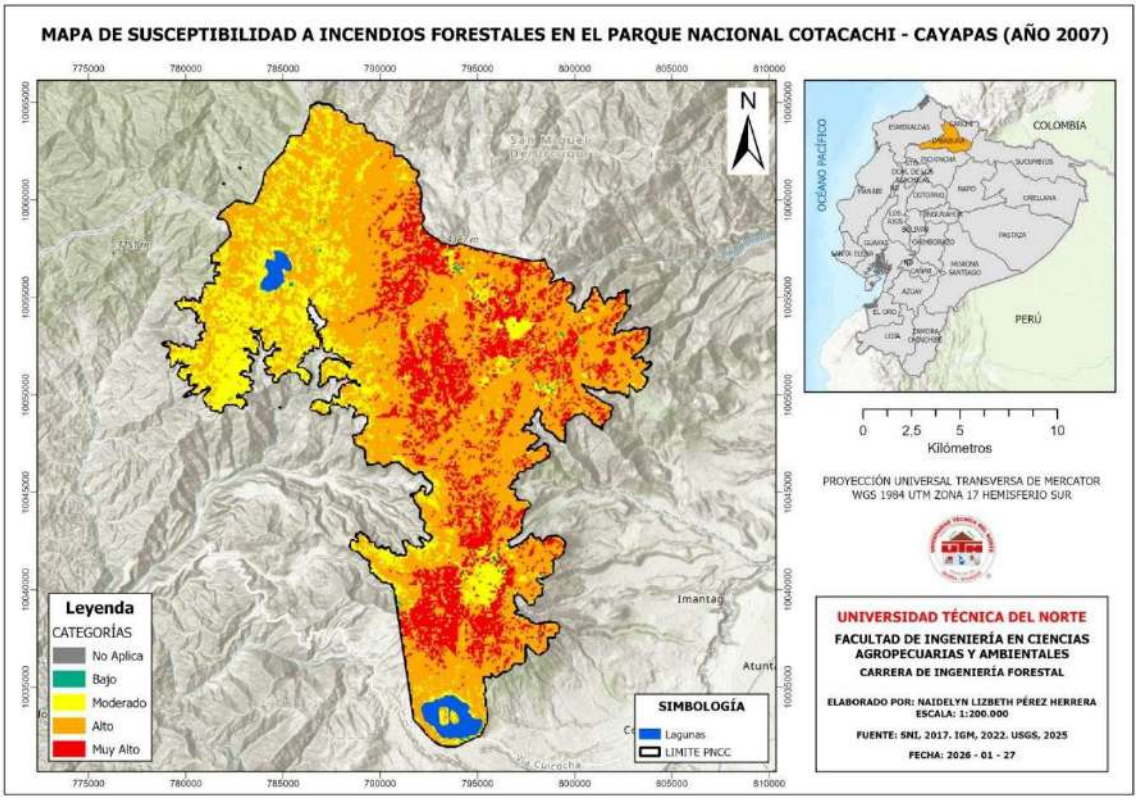


Figura 15. Susceptibilidad a Incendios Forestales en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2021)

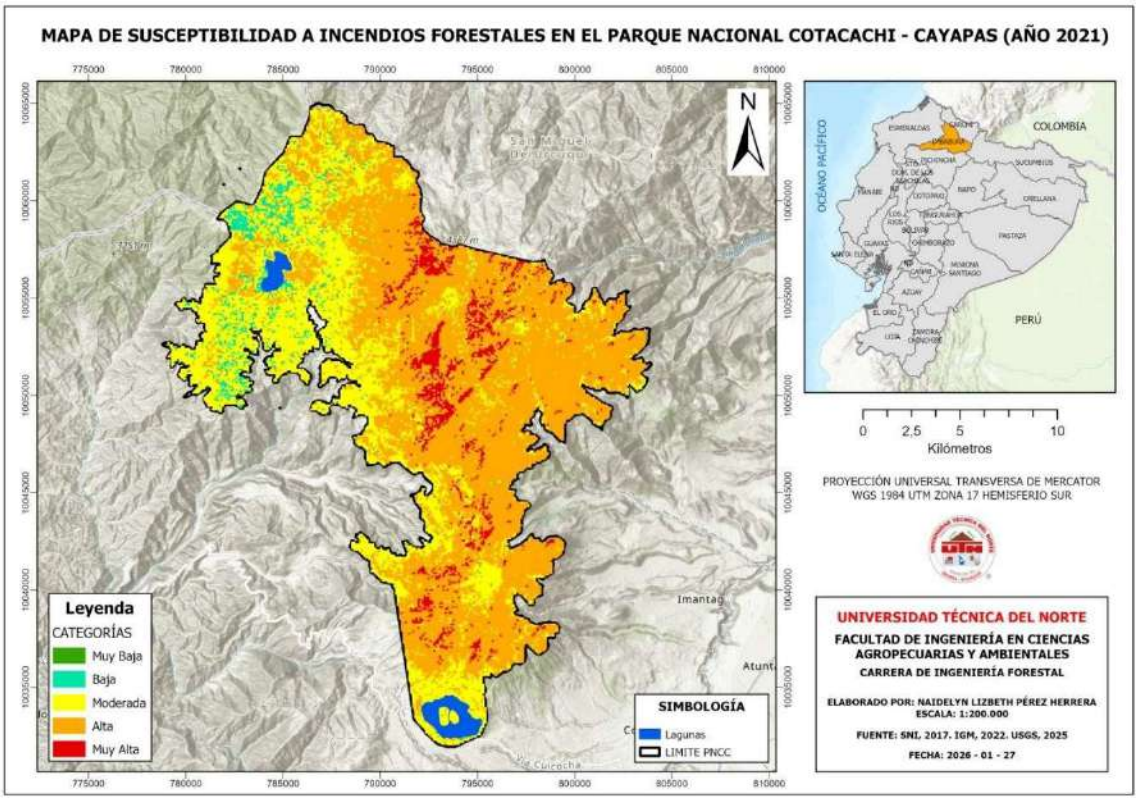


Figura 16. Susceptibilidad a Incendios Forestales en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2024)

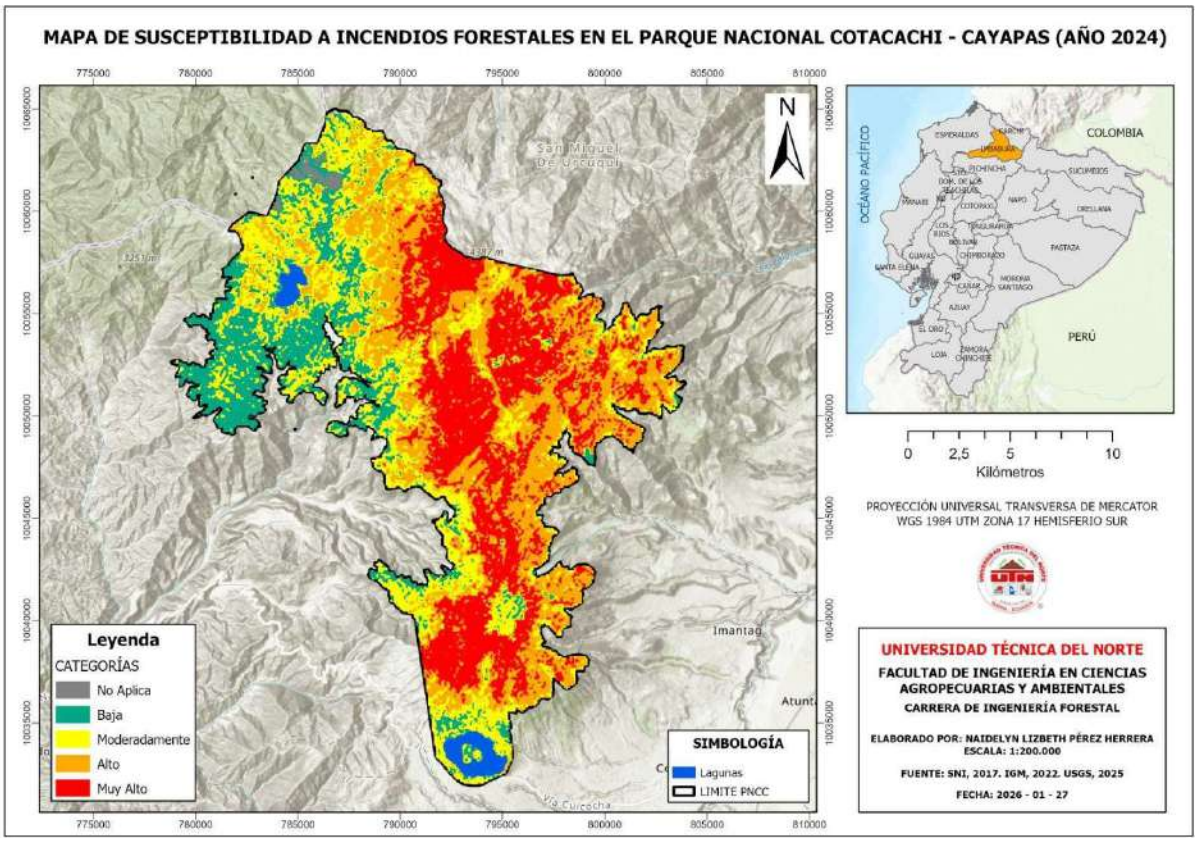


Figura 17. NDVI en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2001)

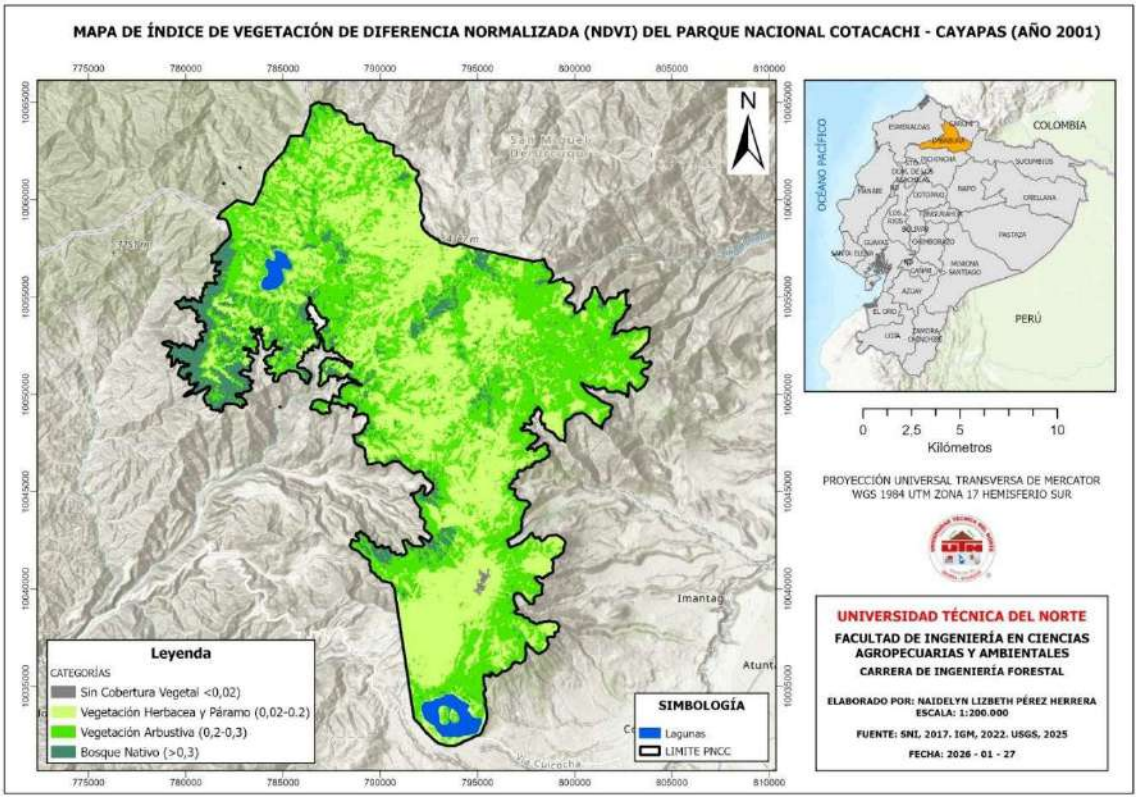


Figura 18. NDVI en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2007)

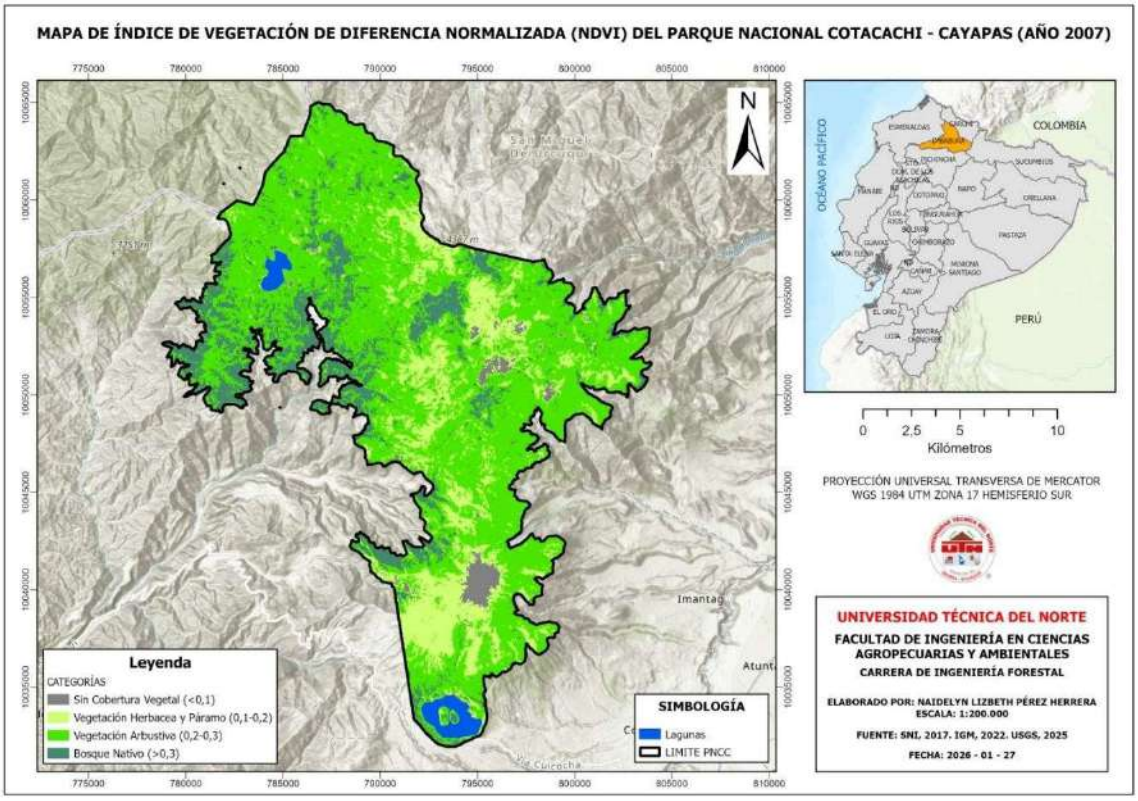


Figura 19. NDVI en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2021)

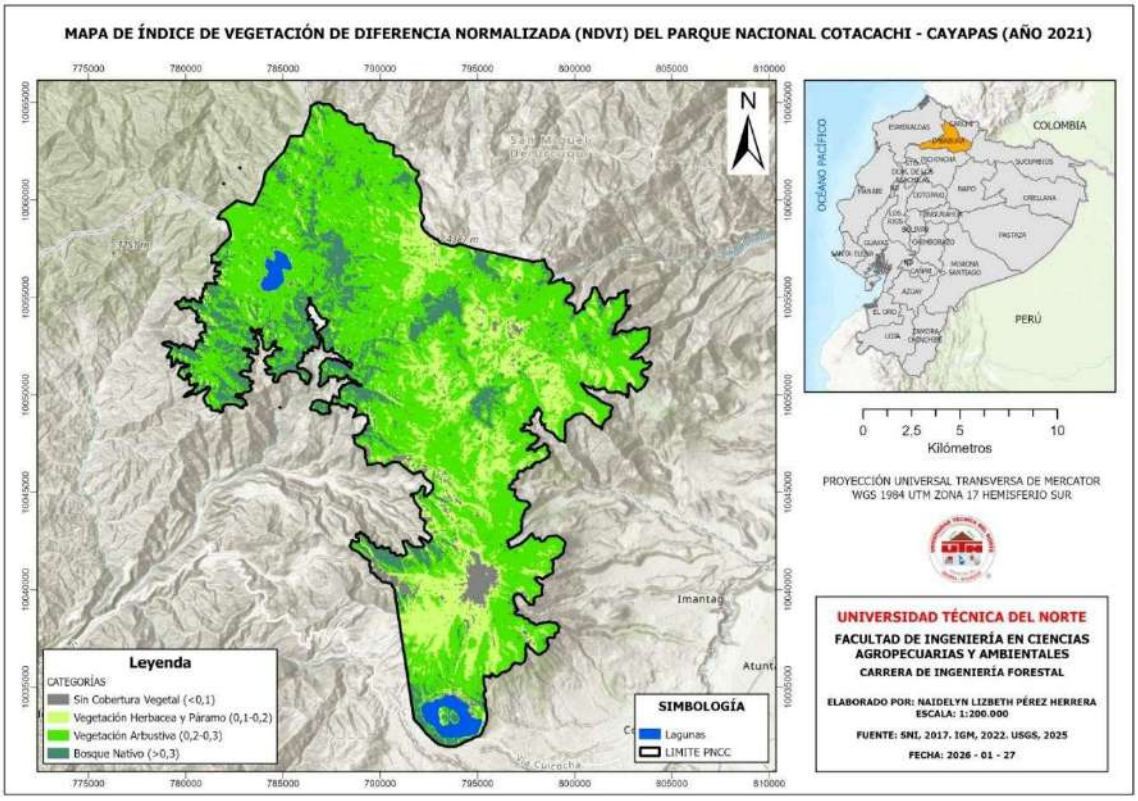


Figura 20. NDVI en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2024)

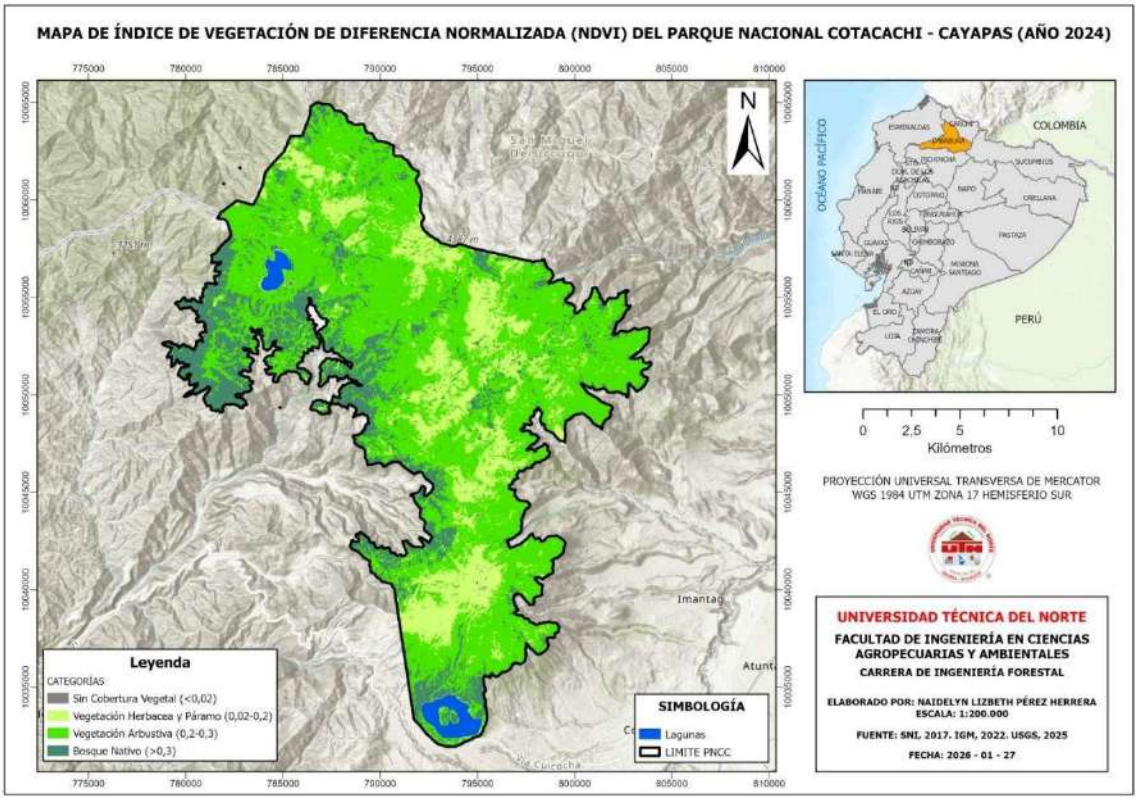


Figura 21. NBR en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2001)

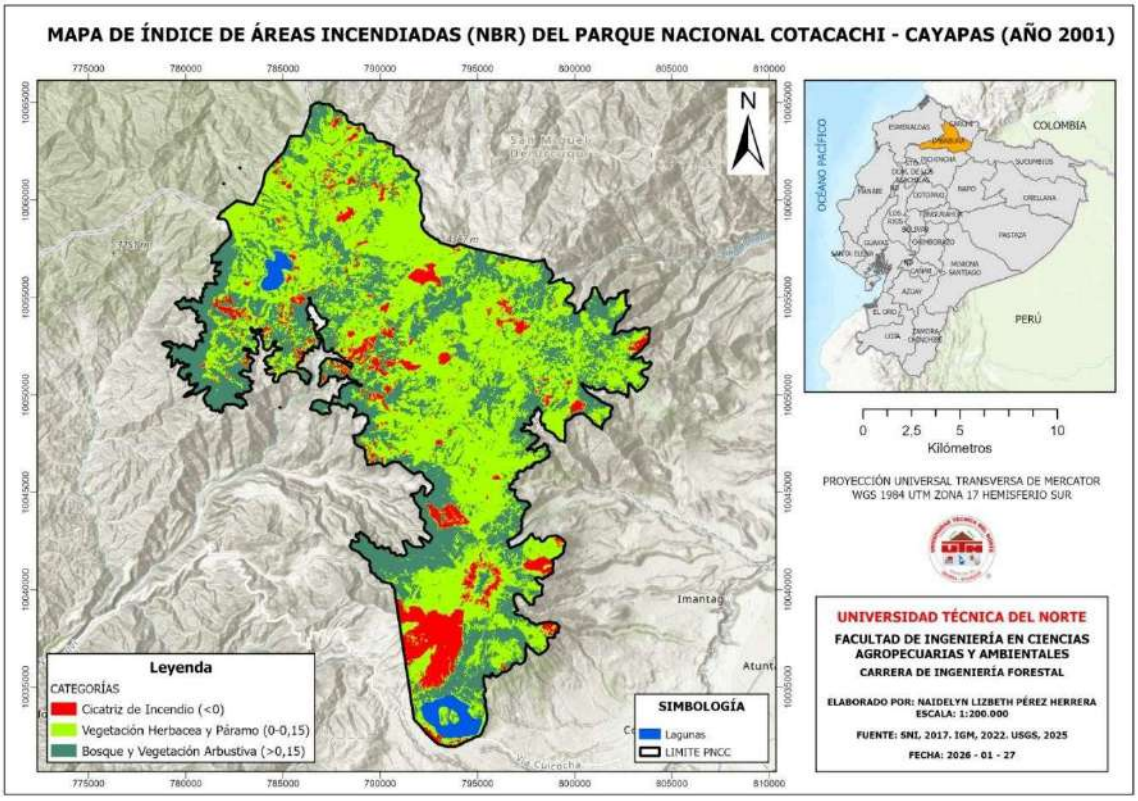


Figura 22. NBR en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2007)

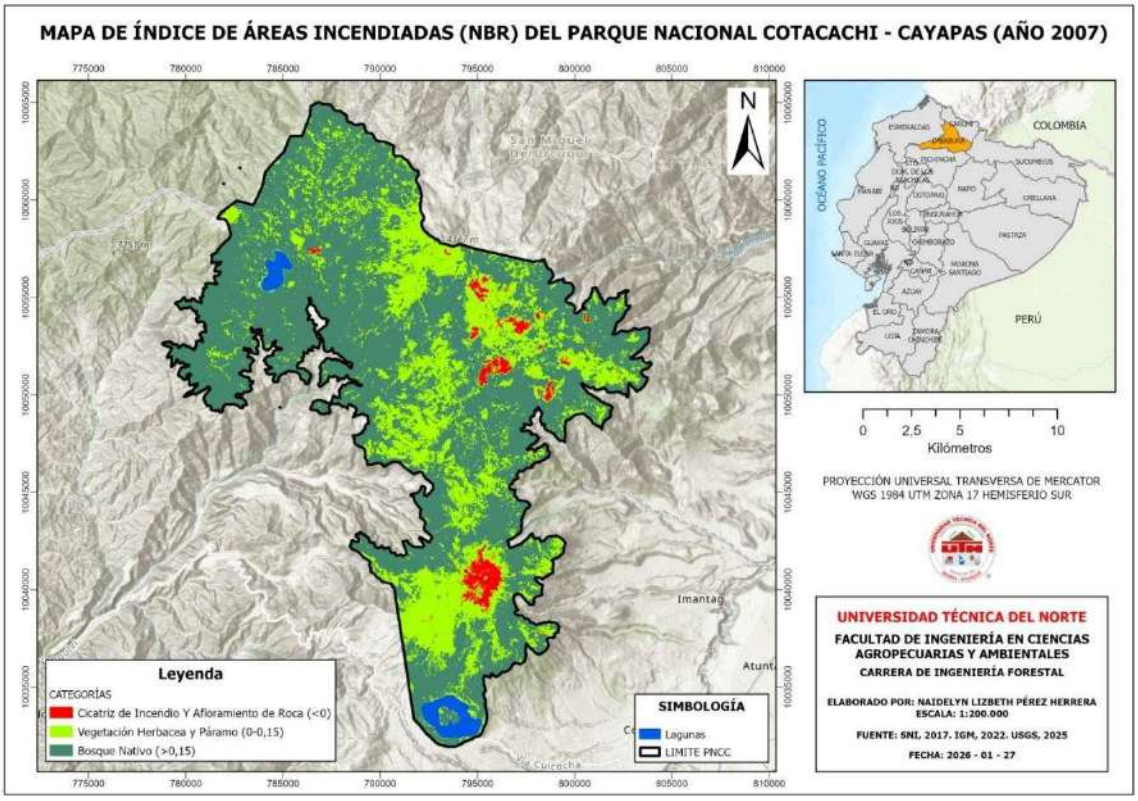


Figura 23. NBR en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2021)

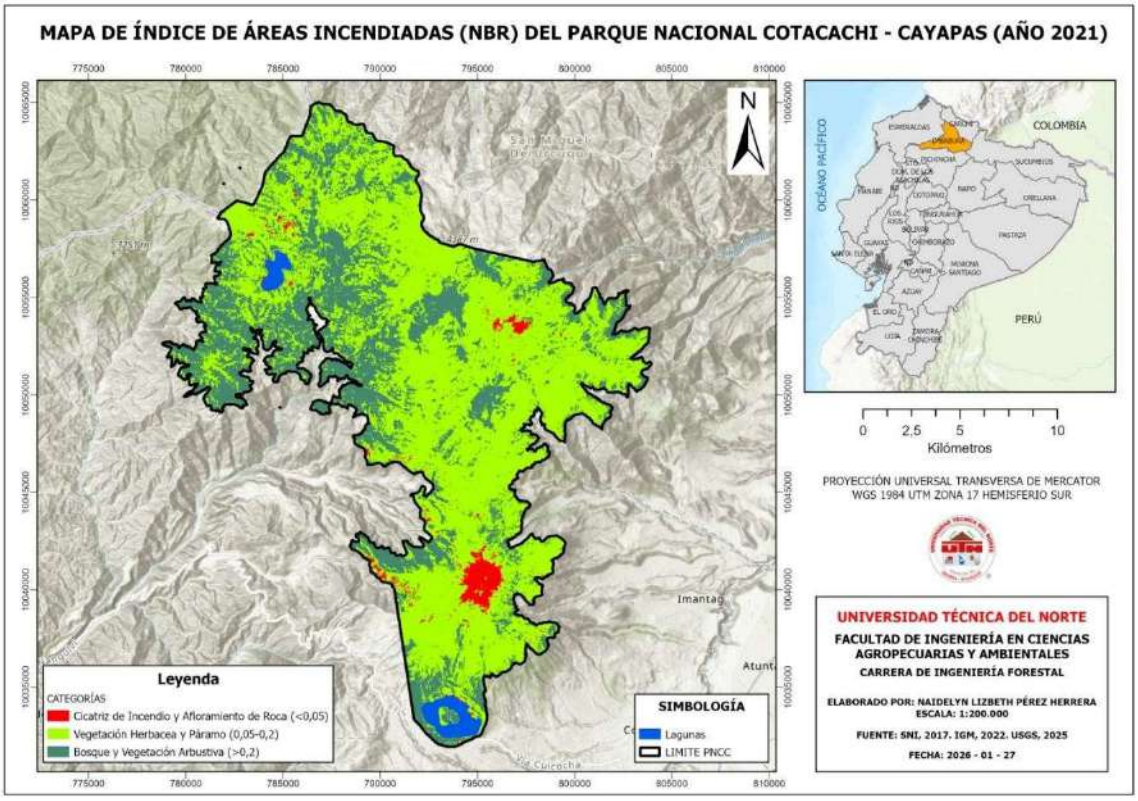


Figura 24. NBR en la Parte Alta del Parque Nacional Cotacachi Cayapas (Año 2024)

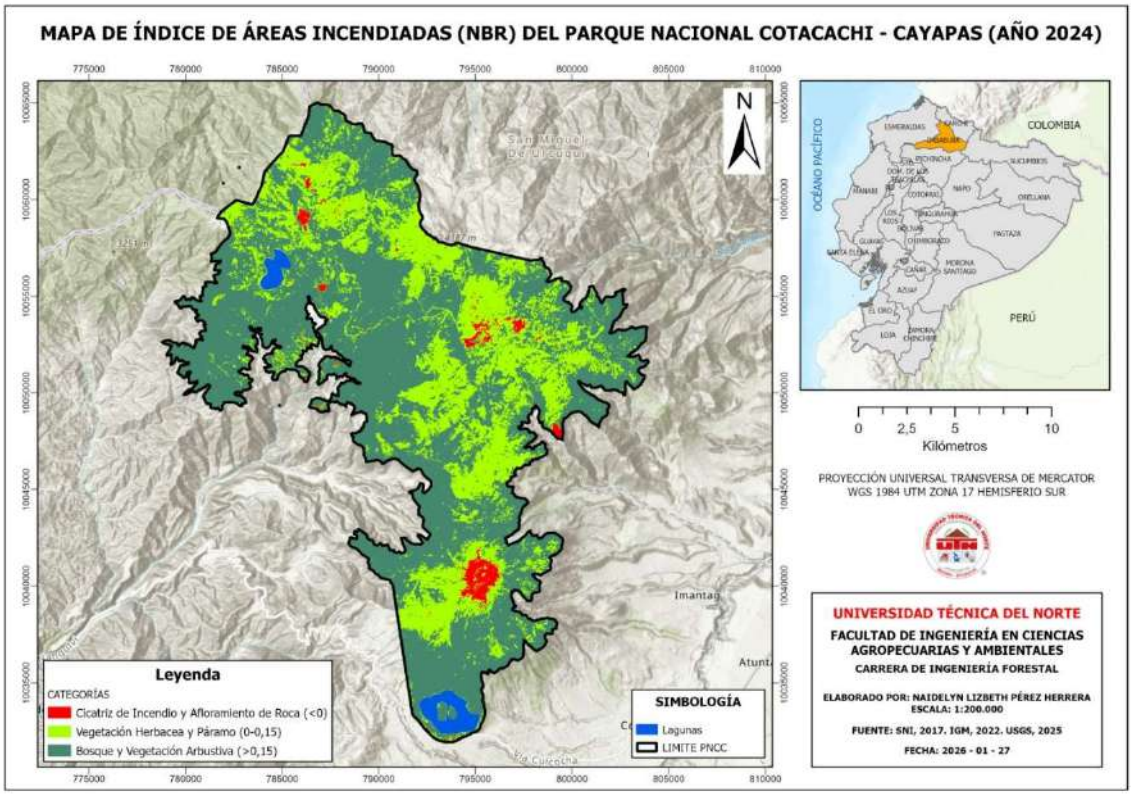
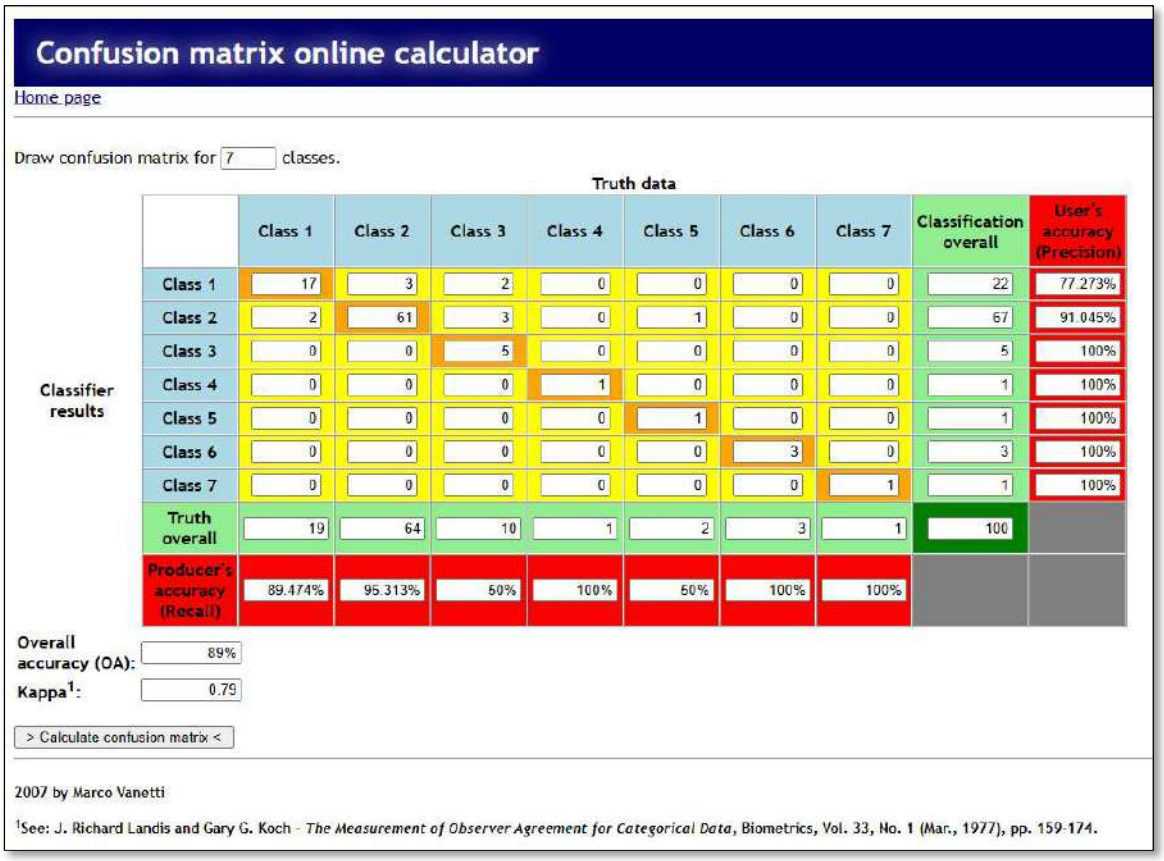


Figura 25. Matriz de Confusión del Índice Kappa



Confusion matrix online calculator

Home page

Draw confusion matrix for 7 classes.

		Truth data								
		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Classification overall	User's accuracy (Precision)
Classifier results	Class 1	17	3	2	0	0	0	0	22	77.273%
	Class 2	2	61	3	0	1	0	0	67	91.045%
	Class 3	0	0	5	0	0	0	0	5	100%
	Class 4	0	0	0	1	0	0	0	1	100%
	Class 5	0	0	0	0	1	0	0	1	100%
	Class 6	0	0	0	0	0	3	0	3	100%
	Class 7	0	0	0	0	0	0	1	1	100%
	Truth overall	19	64	10	1	2	3	1	100	
	Producer's accuracy (Recall)	89.474%	95.313%	50%	100%	50%	100%	100%		

Overall accuracy (OA): 89%

Kappa[1]: 0.79

> Calculate confusion matrix <

2007 by Marco Vanetti

[1]See: J. Richard Landis and Gary G. Koch - *The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data*, Biometrics, Vol. 33, No. 1 (Mar., 1977), pp. 159-174.

Registro Fotográfico de la Salida al Campo

Figura 26. Entrada al PNCC

Figura 27. Área de estudio en el mapa informativo del PNCC

Figura 28. Cobertura vegetal

Figura 29. Bosque Nativo

Figura 30. Ladera con Vegetación arbustiva arbustiva

Figura 31. Páramo y Vegetación

Figura 32. Laguna de Cuicocha

Figura 33. Vegetación herbácea y arbustiva