



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES COMO PREDICTORES DE
HUMEDAD DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CUTUCHI

PROPUESTA DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE
INGENIERO HIDRÁULICO

AUTOR(ES):

Usuño Recalde Edison Alfredo

TUTOR:

Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago MSc.

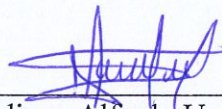
LATACUNGA, Marzo, 2026

Latacunga, 10 de Marzo del 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Edison Alfredo Usuño Recalde declaro ser autor del proyecto de titulación “Evaluación de índices espectrales como predictores de humedad del suelo en la cuenca del río Cutuchi.”, siendo el Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago MSc. tutor del presente trabajo de titulación; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de titulación, son de mi exclusiva responsabilidad.



Edison Alfredo Usuño Recalde

CC._0504119298

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **EDISON ALFREDO USUÑO RECALDE**, identificado con cédula de ciudadanía No.0504119298 de estado civil casado, a quien en lo sucesivo se denominará EL CEDENTE; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. – **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Hidráulica, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**EVALUACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES COMO PREDICTORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CUTUCHI**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2020 – Marzo 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Aprobación en Consejo Directivo: 11 de Marzo del 2026

Tutor: Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago, MSc

Tema: “**EVALUACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES COMO PREDICTORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CUTUCHI**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.

g) La publicación del trabajo de grado.

h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.

i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.

j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que LA CESIONARIA no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

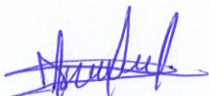
CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 11 días del mes de marzo del 2026.



Edison Alfredo Usuño Recalde
EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

Latacunga 11 de marzo del 2026

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES COMO PREDICTORES DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA CUENCA RÍO CUTUCHI”, de Edison Alfredo Usuña Recalde, de la carrera de Ingeniería Hidráulica, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.



Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago, MSc

C.C.: 1313770891

TUTOR


Latacunga, 11 de marzo del 2026

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Usúño Recalde Edison Alfredo con el título del Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE ÍNDICES ESPECTRALES COMO PREDICTORES DE HUMEDAD EL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CUTUCHI”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.


Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Para constancia firman:


Ing. Andy Miguel Giler Ormaza, MSc.


C.C.: 1312820325

LECTOR 1 (PRESIDENTE)


Ing. Xiomara Alejandra Zambrano
Navarrete MSc.

C.C.: 1313058453

LECTOR 2 (MIEMBRO)


Ing. Jimmy Xavier Toaza Iza MSc.

C.C.: 1717621062

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada dificultad y permitirme alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente. De igual manera, agradezco a todos los ingenieros y docentes que, con su conocimiento, dedicación y guía, contribuyeron significativamente a mi formación académica y personal a lo largo de toda mi carrera.

A mis queridos padres, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor, esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional en cada momento. Este logro también es de ustedes, porque siempre creyeron en mí y me motivaron a seguir adelante.

A mi hermana Marizta, por su apoyo, compañía y palabras de ánimo en cada etapa de este camino.

A mi hermana que hoy ya no se encuentra físicamente conmigo, pero que vive eternamente en mi corazón. Su recuerdo y su amor han sido una inspiración constante para seguir adelante y alcanzar este sueño, dedicando este logro también a su memoria.

A mi tío Reinaldo y a mi tía Lorena, por su apoyo, confianza y motivación durante este proceso, por estar presentes y acompañarme en este camino académico.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía en cada paso de mi vida, por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar cada obstáculo y permitirme alcanzar esta meta tan importante.

A mis queridos padres, Alfredo Usuño y Norma Recalde, quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio han sido el ejemplo más grande de lucha, trabajo y perseverancia. Gracias por sus consejos, por creer siempre en mí y por estar a mi lado en cada momento. Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, porque es el reflejo de todo el amor, apoyo y valores que me han inculcado a lo largo de mi vida.

A mi hermana Marizta, por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por motivarme siempre a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

A mí querida hermana Flor, quien ahora habita en el cielo. Aunque la vida nos separó físicamente, su amor permanece vivo en mi corazón. Sé que desde lo alto me cuida, me protege y guía mis pasos. Su recuerdo es una inspiración constante que me impulsa a seguir luchando y a no rendirme jamás.

A mí querido tío Reinaldo y a mi tía Lorena, por su cariño, sus sabios consejos y por estar siempre pendientes de mí, brindándome su apoyo y confianza en cada etapa de mi vida.

Y a mis amigos, por su compañía, su motivación y por compartir conmigo momentos que hicieron más llevadero este camino.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “Evaluación de índices espectrales como predictores de humedad del suelo en la cuenca del Río Cutuchi”

Autor: Usuña Recalde Edison Alfredo

Resumen

La presente investigación evalúa la capacidad de los índices espectrales como predictores de la humedad del suelo en la cuenca del Río Cutuchi, abordando la necesidad de herramientas de monitoreo hidrológico del alta precisión y bajo costo, la metodología integra el uso de herramientas digitales como Google Earth Engine y programación en lenguaje Python para un período de estudio del 2014 hasta el 2024 con el satélite Landsat, llevando a cabo delimitación de cuenca – corrección topográfica – cálculo de los índices – análisis de mezcla espectral y el modelo de tendencias. Los resultados revelaron una correlación significativa entre la fracción del suelo expuesto y la pérdida de humedad superficial, con el modelo se validó una tendencia de desecación sistemática en sectores estratégicos de la cuenca, consolidando al NDMI y NDFI como predictores eficaces para la gestión de los recursos hídricos, concluyendo que la integración avanzada permite anticipar escenarios de estrés hídricos y dejando una base técnica robusta para la toma de decisiones en la ingeniería hidráulica regional de la provincia de Cotopaxi.

Palabras claves: Humedad del suelo, teledetección, GEE, índices espectrales, degradación edáfica

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TITLE: “Evaluation of spectral indices as predictors of soil moisture in the Cutuchi River basin”

Author: Usuña Recalde Edison Alfredo

Abstract

This research evaluates the capacity of spectral indices as predictors of soil moisture in the Cutuchi River basin, addressing the need for accurate and low-cost hydrological monitoring tools. The methodology integrates the use of digital tools such as Google Earth Engine and Python programming for a study period from 2014 to 2024 with the Landsat satellite, carrying out basin delimitation, topographic correction, index calculation, spectral mixture analysis, and trend modelling. The results revealed a significant correlation between the fraction of exposed soil and the loss of surface moisture. The model validated a systematic drying trend in strategic sectors of the basin, consolidating the NDMI and NDFI as effective predictors for water resource management. It concluded that advanced integration allows for the anticipation of water stress scenarios and provides a robust technical basis for decision-making in regional hydraulic engineering in the province of Cotopaxi.

KEYWORDS: Soil moisture, remote sensing, GHG, spectral indices, soil degradation

Latacunga, 11 de marzo del 2026

CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el tema: “Evaluación de índices espectrales como predictores de humedad del suelo en la cuenca del río Cutuchi”, de Usuño Recalde Edison Alfredo, de la carrera de Hidráulica, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencias del 2 %; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.

*% detectado como IA

La detección de IA incluye la posibilidad de que haya falsos positivos. Aunque cierto texto en esta entrega se generó probablemente con IA, los puntajes inferiores al umbral del 20 % no aparecen porque tienen una mayor probabilidad de falsos positivos.

Precaución: Se necesita revisión.

Es esencial comprender los límites de la detección de IA antes de tomar decisiones acerca del trabajo del estudiante. Te alentamos a obtener más información acerca de las funciones de detección de IA de Turnitin antes de usar la herramienta.

Aviso legal

Nuestra evaluación de escritura con IA está diseñada para ayudar a los académicos a identificar texto que podrían haberse preparado mediante una herramienta de IA generativa. Es posible que nuestra evaluación de escritura con IA no siempre sea precisa (existe la posibilidad de que identifique erróneamente redacciones probablemente generadas por humanos como generadas por IA, y redacciones probablemente generadas por IA como generadas por humanos), por lo que no debe usarse como único fundamento para aplicar sanciones a un estudiante. Para determinar si es un caso de deshonestidad académica, se necesita de un escrutinio mayor y el juicio humano, junto con la aplicación de las políticas académicas específicas de la organización.




2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)



Ing. Rudys Rafael Cusme Intriago Msc.

C.C. 1313770891

TUTOR

ÍNDICE

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1.	TEMA DEL PROYECTO	1
1.2.	MODALIDAD DE TITULACIÓN	1
1.3.	TRABAJO DE TITULACIÓN VINCULADO AL PROYECTO	1
1.4.	EQUIPO DE TRABAJO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	1
1.5.	ÁREA DE CONOCIMIENTO	1
1.6.	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	1
1.7.	SUB-LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE LA CARRERA.....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	3
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
2.3.	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	3
2.3.1.	Objeto de Investigación	3
2.3.2.	Campo de Acción	3
2.4.	BENEFICIARIOS	4
2.4.1.	Directo	4
2.4.2.	Indirecto.....	4
2.5.	JUSTIFICACIÓN	4
2.6.	OBJETIVOS.....	4
2.6.1.	General.....	4
2.6.2.	Específicos.....	4

2.7.	SISTEMAS DE TAREAS	5
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1.	ANTECEDENTES	6
3.2.	USO Y COBERTURA DEL SUELO	7
3.3.	ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO	8
3.4.	DEGRADACIÓN FORESTAL.....	8
3.5.	CAMBIOS CLIMÁTICOS	9
3.6.	CONOCIMIENTO REMOTO	9
3.7.	ANÁLISIS DE MEZCLAS ESPECTRALES	9
3.8.	MÉTODO SMAP	10
3.9.	ÍNDICES ESPECTRALES PARA LE MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO	10
3.10.	CONVENIO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO	11
3.11.	SOFTWARES	11
3.12.	HIPÓTESIS	12
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	12
4.1.	ESQUEMA METODOLÓGICO.....	12
4.2.	ÁREA DE ESTUDIO	12
4.3.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL	13
4.4.	PREPROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL	13
4.5.	PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL	14
4.6.	ÍNDICES DE VEGETACIÓN	15
4.7.	ANÁLISIS DE MEZCLAS ESPECTRALES	16
4.8.	ANÁLISIS DE TENDENCIA DE VEGETACIÓN.....	17
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	18
5.1.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	18

5.2.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	20
5.3.	ANÁLISIS DE TENDENCIA.....	29
5.4.	DISCUSIÓN.....	31
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
6.1.	CONCLUSIONES.....	32
6.2.	RECOMENDACIONES	33
7.	REFERENCIAS	33
8.	ANEXOS.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema metodológico	12
Figura 2.	Delimitación de la cuenca	13
Figura 3.	NDVI 2024.....	21
Figura 4.	NDMI 2024	23
Figura 5.	SMA 2024.....	26
Figura 6.	NDFI 2024	28
Figura 7.	Modelo lineal	30
Figura 8.	Tendencias y áreas de humedad en la cuenca	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Áreas Conocimientos Unesco.....	1
Tabla 2	Sistema de Tareas del Plan de Titulación.....	5
Tabla 3	Detalles del satélite Landsat 8	19
Tabla 4	Detalles técnicos del proceso.....	22
Tabla 5	Configuración del modelo	25
Tabla 6	Parámetros para el NDFI.....	27
Tabla 7	Resultados del coeficiente R ²	30

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación del NDVI.....	15
Ecuación 2 Ecuación del NDMI.....	15
Ecuación 3 Ecuación del NDFI	16
Ecuación 4 Ecuación del coeficiente	16
Ecuación 5 Ecuación del modelo lineal.....	16
Ecuación 6 Ecuación del modelo de regresión lineal	17
Ecuación 7 Ecuación de la pendiente	18
Ecuación 8 Ecuación del coeficiente	18

INDICE DE ANEXOS

Anexo A.1. NDFI 2014

Anexo A.2. NDMI 2014

Anexo A.3. NDVI 2014

Anexo A.4. SMA 2014

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1.TEMA DEL PROYECTO

Evaluación de índices espectrales como predictores de humedad del suelo en la cuenca del Río Cutuchi.

1.2.MODALIDAD DE TITULACIÓN

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Exámen de indicadores de RDA		

1.3.TRABAJO DE TITULACIÓN VINCULADO AL PROYECTO

Agua Quest: potenciando la investigación en recursos hídricos aplicados a la solución de problemas reales del medio.

1.4.EQUIPO DE TRABAJO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Usuño Recalde Edison Alfredo, Ing. Cusme Intriago Rudys Rafael Mg,

1.5.ÁREA DE CONOCIMIENTO

Tabla 1 Áreas Conocimientos Unesco.

05 ciencias físicas, ciencias naturales, matemáticas y estadísticas	052 medio ambiente	0521 ciencias ambientales
		0532 ciencias de la tierra

1.6.LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Meteorología, hidrología, mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.

1.7.SUB-LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE LA CARRERA

Gestión y manejo sostenible y/o sustentable del recurso hídrico.

2. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es parte de los componentes en el funcionamiento de los ecosistemas, esta dinámica hidrológica y producción agrícola, debido a su directa influencia en procesos como la infiltración, evapotranspiración, disponibilidad de agua para la vegetación y recarga de acuíferos. Estos procesos son especialmente complejos en cuencas alto andinas como lo es la cuenca del Río Cutuchi, donde la topografía abrupta, la variabilidad climática y la heterogeneidad especial al uso del suelo generan cambios en los patrones de humedad, la medición directa de esta particular características presenta limitaciones asociadas a la necesidad de instrumentación [1], [2], costos de mantenimiento y cobertura insuficiente de métodos alternativo en tecnologías satelitales y espectrales. En las últimas décadas, la teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para el monitorear de las variables terrestres con diferentes escalas espaciales y temporales, la disponibilidad de estos índices espectrales ha proporcionado nuevas técnicas de análisis ambiental con instrumentación hidrometeorológica es limitada, evidenciando que estos índices espectrales derivados de sensores ópticos como el NDVI, NDMI, NDFI [3], [4], relacionado con bandas del espectro visible y sirven como predictores indirectos del contenido de humedad gracias a su sensibilidad a cambios en la vegetación, contenido de agua y propiedades del suelo.

De la misma forma los sensores como Sentinel-1 demuestran un alto potencial en el monitoreo de la humedad para penetrar la vegetación y variaciones en la rugosidad y el contenido hídrico del suelo, incluso en condiciones de nubosidad y características comunes en regiones alto andinas [5]. El uso combinado de imágenes y radas con técnicas de fusión de datos permite mejorar significativamente la precisión de la humedad del suelo, estos modelos son aprendizajes automáticos o redes neuronales integrando la información espectral, geométrica y edáfica [6], [7]. Estos avances con alta precisión en ambientes tropicales con topografía compleja, evidenciando el potencial de metodologías en paisajes similares en la sierra ecuatoriana [7], de la misma forma se tiene la metodología de SMA generando productos de humedad superficial utilizando la validación, calibración y modelación hidrológica contribuyendo al entendimiento del ciclo de humedad del suelo en distintas regiones [8], [9], [10]. Estas metodológicas aun presentan desafíos como la interferencia de la vegetación, saturación de los índices ópticos, variaciones en el tipo de suelo y la necesidad de calibración, siendo necesario desarrollar estudios específicos para cada cuenca [11], integrando los datos satelitales como mediciones hidrológicas para garantizar resultados confiables [12], [13]. En este sentido la cuenca del Río Cutuchi representa un espacio estratégico para evaluar el

comportamiento de los índices espectrales como predictores de humedad del suelo, siendo un área de información hidrológica convencional es limitada, donde el uso de la teledetección funciona como una herramienta científica para la gestión ambiental en las cuencas alto andinas del Ecuador.

2.1.SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La humedad del suelo constituye una variable esencial en la comprensión del comportamiento hidrológico de una cuenca, en los procesos como infiltración, escurrimiento, evapotranspiración y crecimiento de la vegetación. Este monitoreo para la cuenca del Río Cutuchi la cual se ve limitada por la escasa presencia de estaciones hidrometeorológica, la inadecuada continuidad de los registros e insuficiencia de datos en campo a escala global genera incertidumbre en la caracterización de las dinámicas hídricas locales [14]. Esta falta de información se vuelve especialmente crítica en cuencas alto andinas, donde el paisaje es heterogenia producto de las variaciones abruptas en altitud, cobertura vegetal y uso del suelo, produciendo cambios significativos en los patrones de humedad que no pueden captarse con los métodos convencionales [15].

En la cuenca del Río Cutuchi, el cambio en los patrones climáticos reportados por las entidades respectivas ha intensificado la variabilidad de la humedad del suelo, afectando las actividades agrícolas, disponibilidad de agua en la cuenca [16]. La combinación de un clima altamente variable, un mosaico heterogéneo de uso de suelo y un déficit de datos hidrológicos determina la necesidad de emplear herramientas avanzadas para la cuenca.

2.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En qué medidas los productos satelitales (índices como el NDVI, NDMI o NDFI) pueden representar la variabilidad espacial y temporal en la humedad del suelo para la cuenca del Río Cutuchi.

2.3.OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.3.1. Objeto de Investigación

Evaluar los índices espectrales en la predicción de la humedad del suelo en la cuenca del Río Cutuchi.

2.3.2. Campo de Acción

2508.13 humedad del suelo.

2.4.BENEFICIARIOS

2.4.1. Directo

- Comunidad científica, estudiantes y docentes de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4.2. Indirecto

- Moradores de la cuenca del Río Cutuchi.

2.5.JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se basa en la necesidad de mejorar la estimación y monitoreo de la humedad del suelo en la cuenca del Río Cutuchi, donde la región tiende a tener una variabilidad climática, presión sobre los recursos hídricos y los cambios en el uso del suelo hacen indispensables disponer de herramientas avanzadas para la gestión productiva de la cuenca, esta investigación contribuye al desarrollo de metodologías en análisis multitemporal, fusión de sensores y validaciones de datos hidrológicos locales, siendo estas recomendables en zonas montañosas donde la topografía afecta la reflectancia y la señal del radas, en busca de superar todas estas limitaciones digitales. Permitiendo de esta manera mejorar la estimación de la humedad del suelo, la planificación agrícola, prever condiciones de sequía o saturación, apoyando la toma de decisión de instituciones públicas y reducir los riesgos hidrológicos asociados al cambio climático y fenómenos que se puedan documentar para la gestión de los recursos naturales y comunidades asentadas en la cuenca del Río Cutuchi. Siendo esto parte de responder a la necesidad de disponer de modelos replicables para otras cuencas andinas del Ecuador, representando problemáticas similares, ampliando su impacto académico y territorial en la gestión sostenible del recurso hídrico y su concordancia con herramientas en el análisis hidrológico.

2.6.OBJETIVOS

2.6.1. General

Evaluar los índices espectrales (NDVI, NDMI, NDFI) mediante un modelo lineal para la humedad del suelo en la cuenca del Río Cutuchi.

2.6.2. Específicos

- Recopilar los datos satelitales e hidrológicos mediante herramientas digitales para la obtención de los índices espectrales.

- Procesar la información satelital e hidrológica mediante metodologías SIG para el análisis de los índices espectrales.
- Analizar la humedad del suelo mediante un modelo lineal – satelital para la cuenca del Río Cutuchi.

2.7.SISTEMAS DE TAREAS

Tabla 2 Sistema de Tareas del Plan de Titulación.

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Recopilar los datos satelitales e hidrológicos mediante herramientas digitales para la obtención de los índices espectrales	Recopilación de datos históricos diarios.	Obtención de datos de precipitación.	Bases de datos hidrológicos y satelitales. Instrumentos – Anuarios hidrológicos del INAMHI. USGS
	Recopilación de datos satelitales.	Obtención de datos de imágenes satelitales.	
Procesar la información satelital e hidrológica mediante metodologías SIG para el análisis de los índices espectrales	Procesamiento de las imágenes satelitales.	Imágenes satelitales procesadas.	Técnica – Visualización Instrumentos – QGis
Analizar la humedad del suelo mediante	Modelado hidrológico de la humedad del suelo	Modelado de predicción	Técnicas – Matemática

un modelo lineal – satelital para la cuenca del Río Cutuchi.			Instrumentos – Python
--	--	--	-----------------------

Elaborado por: Edison Usuño

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

La humedad del suelo ha sido ampliamente reconocida como una variable clave en el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas y en la productividad agrícola, debido a su influencia directa en procesos como la infiltración, la evapotranspiración, la disponibilidad de agua para la vegetación y la recarga de acuíferos. Diversos estudios han señalado que, en cuencas de montaña y regiones alto andinas, la dinámica de la humedad del suelo se vuelve particularmente compleja debido a la topografía abrupta, la alta variabilidad climática y la heterogeneidad espacial del uso y cobertura del suelo, lo que genera patrones espaciales y temporales altamente variables.

Tradicionalmente, la medición de la humedad del suelo se ha realizado mediante métodos directos en campo, los cuales presentan limitaciones asociadas a la necesidad de instrumentación especializada, altos costos de instalación y mantenimiento, así como una cobertura espacial insuficiente para representar adecuadamente grandes áreas o cuencas complejas. Frente a estas limitaciones, en las últimas décadas la teledetección ha emergido como una herramienta fundamental para el monitoreo de variables terrestres a múltiples escalas espaciales y temporales, permitiendo estimar indirectamente el contenido de humedad del suelo en regiones donde la información hidrometeorológica convencional es escasa. En este contexto, diversos trabajos han demostrado el potencial de los índices espectrales derivados de sensores ópticos, como el NDVI, NDMI y NDFI, para actuar como predictores indirectos del contenido de humedad del suelo, debido a su sensibilidad a cambios en la cobertura vegetal, el contenido de agua y las propiedades físicas del suelo. Estos índices, calculados a partir de bandas del espectro visible e infrarrojo cercano, han sido ampliamente utilizados para analizar la relación entre la vegetación y la disponibilidad hídrica en diferentes ecosistemas, mostrando resultados satisfactorios en estudios ambientales y agrícolas [17].

Asimismo, investigaciones recientes han destacado la utilidad de sensores de radar de apertura sintética, como Sentinel-1, en la estimación de la humedad del suelo, debido a su capacidad para penetrar la cobertura vegetal y captar variaciones en la rugosidad superficial y el contenido hídrico, incluso bajo condiciones de nubosidad frecuente, características comunes en regiones alto andinas. El uso combinado de datos ópticos y de radar, mediante técnicas de fusión de información, ha permitido mejorar significativamente la precisión de los modelos de estimación de humedad del suelo. De manera complementaria, se han desarrollado metodologías basadas en algoritmos de aprendizaje automático, como Random Forest y redes neuronales artificiales, que integran variables espectrales, geométricas y edáficas para estimar la humedad del suelo con mayor exactitud. Estudios recientes han evidenciado el alto desempeño de índices avanzados, como el RSMI, así como de productos satelitales globales como SMAP, los cuales han sido validados en ambientes tropicales y de topografía compleja, aportando información relevante para la modelación hidrológica y el entendimiento del ciclo de humedad del suelo [17].

No obstante, estos enfoques aún presentan desafíos asociados a la interferencia de la vegetación, la saturación de los índices ópticos, la variabilidad del tipo de suelo y la necesidad de procesos de calibración y validación local. Por ello, diversos autores coinciden en la importancia de desarrollar estudios específicos a escala de cuenca, integrando información satelital con mediciones hidrológicas de campo, a fin de garantizar resultados confiables y representativos.

En este marco, la cuenca del río Cutuchi se presenta como un área estratégica para evaluar el comportamiento de los índices espectrales como predictores de la humedad del suelo, debido a la limitada disponibilidad de información hidrológica convencional y a sus características propias de las cuencas alto andinas. Estos antecedentes sustentan la necesidad de aplicar metodologías basadas en teledetección como una herramienta científica para fortalecer la gestión ambiental y el análisis hidrológico en cuencas de montaña del Ecuador.

3.2.USO Y COBERTURA DEL SUELO

En el territorio de Latacunga, la transformación en el uso y cobertura del suelo ha avanzado en las últimas décadas, impulsándose por factores como es el aumento de la población, desarrollo comercial, expansión de la agricultura hacia terrenos con pendientes pronunciadas, este resultado es la fragmentación de la cobertura, reducción de la capacidad del suelo en la regulación del agua y su incremento en la erosión y pérdida de humedad, siendo un impacto

directo en las propiedades físicas del suelo, alterando la respuesta espectral que se observa a través de los sensores remotos y la afectación en la interpretación de los índices [18]. Al analizar los territorios, se nota que las zonas agrícolas y de pastizales dependen en gran medida de la humedad del suelo, especialmente debido a las condiciones climáticas del suelo interandino, siendo caracterizadas por variaciones estacionales y periodos de sequías, por otro lado las áreas urbanizadas particularmente los barrios han aumentado en la impermeabilización del suelo, reduciendo a la infiltración y alterando los patrones hidrológicos a nivel de la cuenca, generando variaciones en la firma espectral e influir en la gestión del recurso hídrico [19].

3.3. ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO

Una serie de tiempo que se forma a partir de la recolección secuencial y continua de valores espectrales multi fechas obtenidas de sensores satelitales, permitiendo evaluar la evolución, la variación y la estabilización de los recursos hídricos superficiales bajo diferentes escenarios climáticos y de uso del suelo, con la aplicación de los índices multitemporales como el NDVI, NDMI y NDFI., siendo relevantes debido a la sensibilidad a la absorción de agua en las bandas NIR y SWIR, reflejando los cambios volumétricos de agua en el suelo. En el procesamiento a lo largo del tiempo nos ayuda a identificar a los componentes como las tendencias hidrológicas a lo largo del plazo, la estacionalidad hidro climática provocadas por eventos extremos, la variabilidad del ENSO y las alteraciones causadas por la cobertura vegetal, expansión agrícola y la degradación del suelo, este enfoque analítico incluyendo herramientas estadísticas como la autocorrección temporal, descomposición STL, pruebas no paramétricas de tendencia y estimadores robusto, determinando la persistencia, significancia y capacidad predictiva de los índices espectrales como sustitutos funcionales de las mediciones directas de la humedad [20].

3.4. DEGRADACIÓN FORESTAL

La degradación forestal en la cuenca del Río Cutuchi es un proceso continuo que implica la pérdida de la cobertura y la funcionalidad ecológica de las formaciones vegetales de la zona de estudio [21], esto se manifiesta a través de la reducción de la biomasa, la fragmentación del paisaje, disminución de la cobertura y alteración en los servicios eco sistémicos en la regulación del agua y conservación del suelo [22]. Desde el punto de vista biofísica, la degradación forestal afecta a la capacidad del suelo para retener humedad, aumentando a la escorrentía superficial, reduciendo la infiltración y acelerando la erosión laminar, especialmente en las áreas con pendientes pronunciadas. Estos cambios provocados por las variaciones en la reflectancia espectral de la superficie terrestre, debido a la exposición de suelos desnudos y disminución de

la vegetación, impactando directamente en la interpretación de los índices espectrales que se requirieren para estimar el contenido del agua [23].

3.5.CAMBIOS CLIMÁTICOS

La influencia de las dinámicas atmosféricas muestra alteraciones relacionadas en el cambio climático, estas se manifiestan en la variabilidad espacio temporal de las lluvias, los cambios en los patrones de temperatura y aumento de la frecuencia de eventos extremos, impacta directamente en los procesos eco hidrológicos de los suelos, afectando su capacidad de retener agua, la evapotranspiración real y la forma en que se redistribuye el recurso hídrico en la superficie como en el subsuelo [24], en los escenarios como Latacunga el cambio climático provoca variaciones del suelo debido a sus fluctuaciones en el balance energético de la superficie, influyendo en los coeficientes de absorción, reflectancia y emisión captados en los índices espectrales como el NDVI, NDMI O NDFI, convirtiéndolos sensibles a las transformaciones climáticas.

3.6.CONOCIMIENTO REMOTO

La percepción remota consiste en un conjunto de métodos para registrar y analizar la energía emitida o reflejada por la superficie terrestre sin necesidad de estar en contacto directo, el avance en el desarrollo de la tecnología satelital, siendo que sus primeras aplicaciones fueron a inicios del siglo XX, evolucionando en la exploración espacial [25]. Los sistemas modernos de percepción remota tienen una estructura de tres componentes, los cuales son fuente de iluminación, un sensor y el objeto de estudio, este proceso tiene una interacción entre la radiación y los elementos del área, más conocido como radiancia electromagnética, dicha radiación se caracteriza por su longitud y frecuencia de onda dentro del espectro [26]. Las bandas más utilizadas incluyen el espectro visible (0.4 – 0.7 m), correspondiente al color rojo – verde – azul, el infrarrojo cercano (0.7 – 1.3 m) para estudios de biomasa, el infrarrojo medio (1.3 – 1.8 m) para estudios de humedad del suelo, el infrarrojo térmico (8 – 14 m) en estudios de temperatura en la superficie, todos capaces de atravesar la atmósfera [27], este avance tecnológico ha incrementado la resolución espacial y espectral de las escenas, permitiendo disponer de mayor cantidad de bandas y mejorar la calidad de los análisis.

3.7.ANÁLISIS DE MEZCLAS ESPECTRALES

El análisis de mezclas tiene un enfoque de descomposición radiométrica buscando cuantificar la contribución de los diferentes componentes físico – estructurales dentro de los píxeles, permitiendo modelar la reflectancia observada en una combinación de firmas espectrales

conocidas como espectros representando materiales superficiales en una imagen satelital [28]. En el punto de vista espectral, nos permite identificar y separar las fracciones relacionadas con la humedad del suelo, siendo el agua en el suelo tiende a reducir la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y provoca diferentes absorciones en el infrarrojo de onda corta (SWIR), afectando la respuesta espectral de los materiales en la superficie, esto destaca que está en descomposición permite estimar las abundancias en los subpíxeles de componentes hídricos, vegetales y minerales, mostrando la capacidad para representar los gradientes de humedad, evitando sesgos que pueden surgir de la variabilidad fenológica, orográfico o la mezcla espectral causada por una cobertura parcial [29].

3.8.MÉTODO SMAP

El método SMAP es un sistema orbital para estimar la humedad del suelo desarrollado en la misión satelital soil moisture active passive de la NASA, como finalidad de medir el contenido de agua en la capa superficial del suelo utilizando las técnicas de teledetección, este proceso se apoya en la radiometría pasiva en la banda L (1.41 GHz), permitiendo captar la emisión natural del suelo y relacionarla con su nivel de humedad, alcanzando la penetración hasta cinco centímetros. En su diseño es la inclusión de un sensor pasivo y un radar activo, tras la descomposición de su componente activo, distribuyendo únicamente la radiometría pasiva y algoritmo de fusión espacial, permitiendo obtener resoluciones que están entre 9 a 36 Km, con tiempo de retornos cada 48 horas o 72 horas [30].

Las magnitudes que pueden inferir en la humedad superficial del suelo y la condición térmica del mismo, variables clave para entender la dinámica hidro geofísica de la superficie y los flujos de almacenamiento de agua, ofreciendo ventajas instrumentales como su insensibilidad a la nubosidad, la capacidad de operar, alta sensibilidad dieléctrica al contenido de agua en el suelo y una cobertura espacial a nivel global [30].

3.9.ÍNDICES ESPECTRALES PARA LE MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

La relación entre la humedad del suelo y las distintas métricas derivadas de las imágenes satelitales, en los puntos de índices de vegetación e índices de brillo del suelo como las herramientas indirectas para estimar las variaciones en el contenido hídrico superficial, el principio de la humedad modifica las propiedades reflectivas del terreno, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la vegetación es escasa y las superficiales responden con mayor sensibilidad a los cambios en este principio. Los índices NDVI, NDMI y NDFI con los

componentes de brillo demuestran la relación de forma más estable con la humedad cuando existe cobertura vegetal moderada, y estos son más útiles en suelos desnudos o con vegetación limitada. Los modelos de regresión semi empíricos para vincular la reflectancia con la humedad volumétrica, mostrando la combinación de indicadores espectrales en mejora de la capacidad predictiva respecto al uso de un solo índice [31].

3.10. CONVENIO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La estimación espectral de la humedad del suelo se basa en la modelación de las propiedades radiométricas y óptico – dieléctricas del medio ambiente, donde la variación en el contenido del agua afecta de manera notable en la permitividad dieléctrica, el coeficiente de absorción, la capacitancia volumétrica, con el comportamiento de retro dispersión y atenuación fotónica, en este contexto, los índices espectrales funcionales como las variables proxy parametrizadas, capaces de aproximar el estado hídrico superficial a través de la interpretación matemática de la banda NIR y SWIR, con la respuesta espectral disminuye a medida que aumenta la humedad disponible en la matriz suelo-vegetación, donde se destaca la precisión de las estimaciones mejora en la combinación de los índices espectrales con la radiometría de microondas pasivas, con su capacidad para caracterizar la dinámica del agua y su capilar, reconociendo los sistemas territoriales de la escala local y topografía compleja, sensores ópticos y ofrecer una resolución espacial submétrica y multiescalar, permitiendo discriminar gradientes hídricos relacionados con el uso del suelo, patrones agrícolas, fragmentación forestal y variaciones altimétricas [32].

3.11. SOFTWARES

QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto, permitiendo visualizar, editar, analizar y gestionar datos geoespaciales de manera eficiente, este software se ha consolidado como una herramienta completa y accesibles debido a su estructura modular e integración de librerías especializadas en análisis espacial, trabajando con datos vectoriales y ráster para los procesos de geo procesamiento, cartografías proyectadas y algoritmos avanzados, y además incorpora herramientas nativas como GRASS GIS, SAGA GIS y Orfeo Toolbox para estudios ambientales, hidrológicos y territoriales [33].

Dentro del análisis ráster se destaca la capacidad del software para procesar imágenes satelitales, transformar las ondas espectrales y calcular los índices derivados, con las clasificaciones supervisadas y no supervisadas, en el monitoreo de variables biofísicas como la humedad del suelo, estado de la vegetación o la dinámica de la cobertura terrestre, facilitando

la creación de modelos automatizados mediante el model builder, permitiendo realizar los procedimientos complejos y estandarizar los flujos de trabajo [33].

3.12. HIPÓTESIS

Los índices espectrales capturan adecuadamente la variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo basado en la teledetección en la cuenca del Río Cutuchi.

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1.ESQUEMA METODOLÓGICO

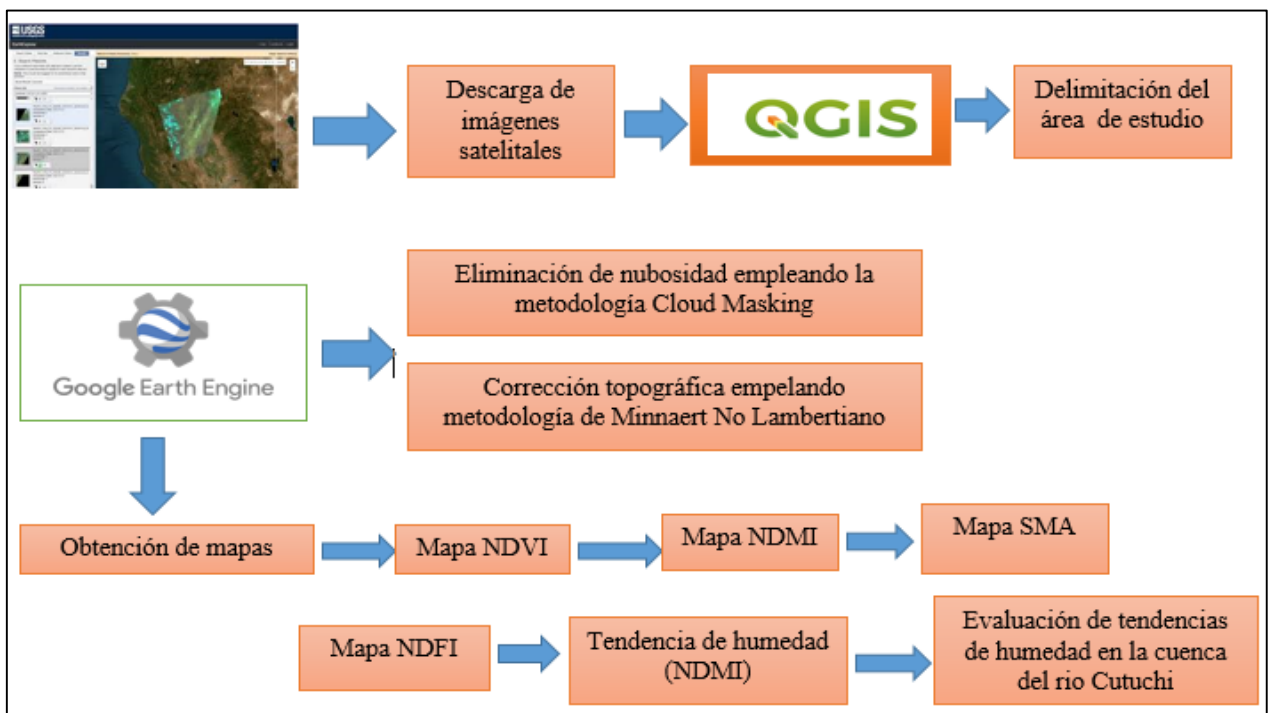


Figura 1. Esquema metodológico

4.2.ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la cuenca del Río Cutuchi, considerada una de las unidades hidrológicas de mayor relevancia en la Sierra Central del Ecuador. Ubicada en la provincia de Cotopaxi, su extensión territorial abarca principalmente los cantones de Latacunga, Salcedo, Pujilí y Saquisilí. La red hídrica se sustenta por el deshielo del volcán Cotopaxi y los ecosistemas de páramo circundantes. Presenta un régimen bimodal con picos de precipitación durante los periodos de marzo-mayo y octubre-noviembre, alternados con fases de estiaje. Según registros del INAMHI, la pluviosidad está condicionada por la altitud, mientras que las temperaturas fluctúan entre los 9 y 15 °C, manteniendo niveles constantes de humedad relativa en la zona.

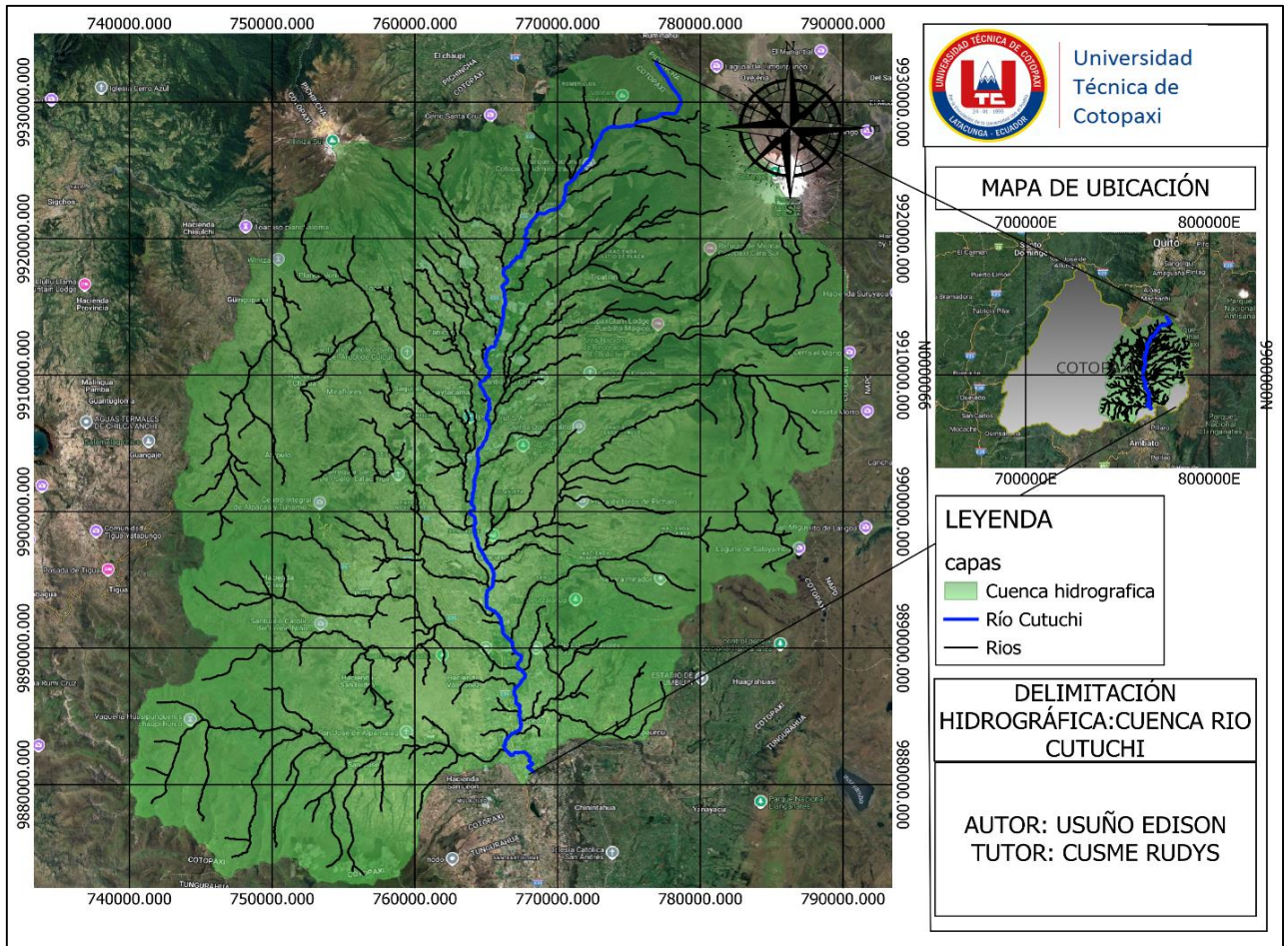


Figura 2. Delimitación de la cuenca

4.3. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL

En esta sección se digitaliza y organiza la información proveniente de distintos sensores remotos, proceso que inicia con la delimitación del área de estudio, permitiendo seleccionar las imágenes satelitales más adecuados y con suficiente detalle para el análisis requerido, definida el área de estudio, se procede a elegir el sensor o conjunto de sensores donde se obtendrá la información, en la actualidad existen diversas plataformas que facilitan la descarga de imágenes satelitales múltiples, entre ellas Earth Explorer, GloVis y Copernicus, proporcionando insumos de diferentes resoluciones y características según la necesidad de la investigación [34].

4.4. PREPROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL

El preprocesamiento de las imágenes satelitales inicia en la eliminación de la nubosidad mediante un procedimiento de enmascaramiento y generando mosaicos que integran varias escenas, empleando la metodología de Cloud Masking combinando parámetros de nubosidad y sombras en la identificación y exclusión de los pixeles contaminado [35], estos mosaicos son contruidos por diferentes escenas para cubrir adecuadamente las áreas afectadas de la imagen

principal, utilizando el complemento de Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) [33]. Continuando con las correcciones atmosféricas y topográficas, siendo esto fundamental en el procesamiento de imágenes satelitales, la corrección atmosférica tiene el propósito de minimizar la influencia de la dispersión de la atmosfera, ajustar la reflectancia y considerar la radiación solar incidente, mediante la metodología de Chávez DOS1, herramienta que utiliza los metadatos de cada imagen para la alcanzar la calibración correspondiente a la imagen [36], en la corrección topográfica se presenta el procesamiento radiométrico, este procedimiento parte desde la obtención del modelo digital de elevación del área de estudio, para poder aplicar la metodología de Minnaert en el apartado de No Lambertiano, donde se emplean valores del parámetro K entre los 0.25 a 0.50, ajustando la pendiente y orientación del terreno sobre la reflectancia que tiene las escenas satelitales [37]. Alcanzando de esta manera un procesamiento adecuando de las imágenes satelitales para lograr los mejores resultados en los siguientes procesos.

4.5.PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL

En esta fase consiste en aplicar algoritmos de clasificación, que requieren de intervención del usuario para definir los parámetros y establecer áreas de entrenamiento, permitiendo obtener categorías temáticas con un mayor nivel de precisión[38], el complemento del SCP ofrece variedad de enfoques para clasificar las escenas, entre ellos tiene distancia mínima, máxima probabilidad, mapeo del ángulo espectral, Random forest, entre otros., estos métodos persiguen una metodología precisa en el análisis de cada pixel del área de estudio, por ejemplo en el caso de distancia mínima asigna a cada pixel la clase cuyo valor medio es más cercano, en máxima probabilidad incorpora la varianza y covarianza para determinar la clase más probable de cada pixel [39], y así cada método expresado contiene un nivel de metodología que se aplica mediante el SCP. Esto es complementado con un suavizador de ruidos, esto surge por la existencia de pixeles aislados o patrones no deseado de la clasificación supervisada, esto se resuelve mediante los filtros disponibles en SAGA GIS, permitiendo la evaluación de la estructura y la consistencia de los datos clasificados alcanzando una homogeneidad de las clases [40]. Finalizando con la determinación de los porcentajes de las imágenes satelitales mediante el SCP en el apartado de accuracy, permitiendo visualizar la distribución porcentual de las clases [33].

4.6.ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Los índices de vegetación relacionan las matemáticas entre las diferentes bandas espectrales, con lo que evalúan la presencia, vigor y humedad de la cubierta vegetal, estos indicadores se elaboran combinando la reflectancia espectral y utilizado ampliamente en estudios de monitoreo ambiental debido a la sensibilidad con los cambios biofísicos en la vegetación [41].

- **Índice de vegetación de diferencia normalizada - NDVI.** – Este índice es de los más utilizados en la cuantificación de la actividad fotosintética y distinguir la vegetación de las coberturas del suelo, sus valores van de -1 a 1, siendo los positivos para indicar la presencia de vegetación y los negativos en la presencia de agua, nubes o suelo desnudo [42]. Basándose en el fundamento de la clorofila, la cual absorbe energía de la banda roja y refleja fuertemente en el infrarrojo cercano [43].

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

Ecuación 1 Ecuación del NDVI

Siendo:

NIR = Infrarrojo cercano (B5)

RED = Rojo (B4)

- **Índice de humedad de diferencia normalizada – NDMI.** – Este índice permite detectar la humedad contenida en la vegetación y niveles de estrés hídricos, utilizando bandas de infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, los cuales responden a los cambios en el contenido del agua, esto acompañado de valores cercanos a 1 con la representación de índices con alto contenido hídrico y los valores negativos con índices de sequedad del suelo [44].

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

Ecuación 2 Ecuación del NDMI

Siendo:

NIR = Infrarrojo cercano (B5)

SWIR = Infrarrojo de banda corta (B6)

- **Índice de diferencia normalizada fraccional – NDFI.** – Este índice está preparado para detectar cambios en la degradación de las áreas forestales, considerando la mezcla

espectral dentro de cada píxel, basado en fracciones estimadas mediante este análisis, los valores altos de este índice indican bosques densos sin perturbación, mientras que los valores cercanos a -1 son áreas degradadas o sin vegetación [45].

$$NDFI = \frac{GV_{sh} - (NPV + So)}{GV_{sh} + NPV + So}$$

Ecuación 3 Ecuación del NDFI

Donde el termino GV_{sh} es el coeficiente que mejora la discriminación entre el tipo de la cobertura forestal y permite detectar los niveles de degradación.

$$GV_{sh} = \frac{GV}{100 - sh}$$

Ecuación 4 Ecuación del coeficiente

Siendo:

GV – Vegetación verde

NPV – Vegetación no fotosintética

So – Suelo

Sh – Sombra

4.7. ANÁLISIS DE MEZCLAS ESPECTRALES

En el análisis de mezclas espectrales está diseñado para interpretar la composición interna de cada píxel en una imagen satelital, siendo esto por la información contenida en cada píxel, el SMA es la diferencia entre pixeles puros que represan a una sola clase y los pixeles mixto, que combinan señale de distintas coberturas, esto en áreas de transición o bordes entre tipos de suelos [46]. Esta metodología modela la reflectancia observada como una combinación lineal de los valores espectrales de distintos componentes, ponderados según su proporción dentro del píxel, con un proceso análogo a una regresión lineal múltiple, generando imágenes fraccionales que representan la abundancia estimada en cada cobertura [47]. Siendo esta la ecuación básica del modelo:

$$R_i = \sum_{j=1}^q r_{ij} * x_j + e_i$$

Ecuación 5 Ecuación del modelo lineal

Siendo:

Ri – Reflectancia observada en la banda

r_{ij} – Reflectancia del miembro puro en la banda

x_j – Proporción del componente en el píxel

e_i – Error residual

Q – Número de componentes considerados

Este modelo requiere que se cumplan con dos condiciones, la primera que la sumatoria de x_j sea igual a 1, y la segunda condición es que x_j este entre 0 a 1, para que las fracciones representen valores físicamente coherentes, aplicando una solución sin restricciones podrían tomar valores negativos o no sumar 1, lo que se debe corregir antes de interpretar los resultados [48].

4.8. ANÁLISIS DE TENDENCIA DE VEGETACIÓN

En el análisis de tendencias se evalúa el comportamiento de una variable ecológicas, en este caso un índice de vegetación a lo largo del tiempo, siendo esta técnica esencial al interpretar procesos de regeneración, degradación o estabilidad de la cobertura del suelo, aunque una revisión visual de la serie temporal puede tener patrones, en lo que será mejor aportación modelos matemáticos para el objetivo de la tendencia [49], este enfoque es el modelo de regresión lineal simple, ajustándose a un recta de los valores del índice en función del tiempo, la ecuación general es la siguiente:

$$Y = a + bX$$

Ecuación 6 Ecuación del modelo de regresión lineal

Siendo:

Y – Valor estimado del índice de vegetación

a – Intercepto o valor del índice cuando $X = 0$

b – Pendiente de la tendencia

X – Variable independiente (tiempo, años de análisis)

En esta investigación el eje temporal suele cubrir los años o décadas, y la variable independiente corresponde a los valores de NDVI, NDMI, NDFI u otros índices derivados de las imágenes satelitales, para eso diagnosticar la pendiente es clave, en lo que tendremos tres condiciones y la ecuación a utilizar:

$$b = \frac{\sum(XY - nXY)}{\sum(X^2 - nX^2)}$$

Ecuación 7 Ecuación de la pendiente

Siendo:

N – Número de observaciones

XY – Valores del tiempo e índice

Criterios para la pendiente:

- Pendiente positiva = aumento de la vegetación
- Pendiente negativa = pérdida o degradación
- Pendiente cercano a cero = estabilidad

El coeficiente de determinación (R^2) se añade para evaluar la recta que se representa en los datos, permitiendo cuantificar de manera robusta las variaciones temporales de la vegetación. Este método estadístico mide la proporción de la varianza total de la variable dependencia que es explicada por variable dependencia a través del modelo ajustado y la ecuación a usar [49]:

$$R^2 = \frac{\sum(Y - Yp)^2}{\sum(Yi - Yp)^2}$$

Ecuación 8 Ecuación del coeficiente

Siendo:

Yp : Promedio de los valores observados en el índice en la serie de tiempo

Y : Valor del índice predicho por la recta de regresión

Yi : Valor observado del índice para un año

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La investigación se inicia con la delimitación espacial precisa de la unidad hidrográfica, para lo cual se empleó el software de Sistemas de Información Geográfica QGIS. Este proceso se ejecutó mediante la digitalización y el procesamiento de modelos digitales de elevación, permitiendo establecer con exactitud los límites divisorios de la cuenca del Río Cutuchi. Al definir este polígono vectorial, se garantizó que la extracción de valores de reflectancia y la

posterior aplicación de índices espectrales se limitaran estrictamente al área de drenaje del río, evitando la interferencia de coberturas terrestres ajenas al ecosistema de estudio y asegurando que los datos de humedad del suelo correspondan efectivamente a la dinámica hidrológica de la zona.

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de adquisición y filtrado de datos geospaciales mediante herramientas de programación avanzada, utilizando el lenguaje Python y la librería especializada geemap para la interacción con la plataforma Google Earth Engine (GEE). Este enfoque automatizado permitió realizar una auditoría exhaustiva sobre la colección de datos LANDSAT/LC08/C02/T1_L2, que corresponde al Nivel 2 de procesamiento de Landsat 8, proporcionando datos de reflectancia de superficie ya corregidos atmosféricamente. La búsqueda se extendió a lo largo de una serie temporal comprendida entre enero de 2023 y diciembre de 2024, con el objetivo de identificar las condiciones atmosféricas más favorables. El script diseñado no solo facilitó el acceso a un volumen masivo de información satelital, sino que permitió implementar un rigor técnico superior al filtrar automáticamente las escenas basándose en metadatos específicos, asegurando que la calidad del dato primario no se viera comprometida por ruidos externos o errores de sensor.

Como resultado de esta verificación algorítmica, se analizaron un total de 65 imágenes que presentaban intersección geográfica con la cuenca delimitada. Tras aplicar un criterio de selección estricto que limitaba la presencia de nubosidad a un máximo del 80%, el sistema validó 54 escenas como técnicamente viables. Sin embargo, para efectos de la evaluación de los índices de vegetación, humedad y degradación (NDVI, NDMI y NDFI), se priorizó aquella imagen que presentara la menor interferencia atmosférica posible sobre el cuerpo principal de la cuenca y sus zonas de recarga. Tras un ordenamiento jerárquico basado en la calidad de los píxeles, se seleccionó la escena capturada el 03 de junio de 2024. Este insumo fue catalogado como el más idóneo debido a que su nitidez permite una discriminación precisa de las bandas del infrarrojo cercano y de onda corta, componentes esenciales para el cálculo de los índices que actuarán como predictores de la humedad del suelo en este estudio.

A continuación, se presenta el insumo satelital seleccionado que servirá como base para el procesamiento de resultados:

Tabla 3 Detalles del satélite Landsat 8

Parámetro Técnico	Detalle del Insumo
Satélite	Landsat 8

Instrumento (Sensor)	OLI (Operational Land Imager) / TIRS
Plataforma de procesamiento	Google Earth Engine (GEE)
Colección de datos	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 (Nivel 2, Reflectancia de Superficie)
Fecha de adquisición	03-06-2024
Resolución Espacial	30 metros (Bandas ópticas y SWIR)
Criterio de Calidad	Cobertura de nubes < 80% (Filtrado por script)

5.2.PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Una vez seleccionados los insumos satelitales, se procedió a la fase de procesamiento digital, la cual tuvo como objetivo principal la estandarización de los datos para eliminar distorsiones causadas por la atmósfera y la topografía irregular de la cuenca del Río Cutuchi. Para ello, se implementó un flujo de trabajo automatizado en Google Earth Engine (GEE) que inició con la creación de un mosaico anual mediante el uso del reductor de mediana. Esta técnica estadística permitió sintetizar las mejores observaciones de píxeles a lo largo de todo el periodo por ejemplo para el 2024, eliminando eficazmente valores atípicos, ruidos remanentes y nubes que no fueron detectadas en el filtrado inicial. Dada la compleja orografía de la zona de estudio, caracterizada por las pendientes pronunciadas de los flancos del volcán Cotopaxi y las zonas de páramo, se aplicó una corrección topográfica basada en el modelo de Minnaert. Este procedimiento es de vital importancia en cuencas andinas, ya que los efectos de iluminación y sombra generados por el relieve pueden alterar significativamente los valores de reflectancia, induciendo a errores en la interpretación de la humedad. Utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) SRTM de 30 metros, el algoritmo calculó el ángulo de incidencia solar para cada píxel, considerando el azimut y la elevación del sol al momento de la captura. Mediante la integración de la pendiente y la orientación, se normalizó la respuesta espectral de las bandas roja (B4), infrarrojo cercano (B5) e infrarrojo de onda corta (B6), garantizando que las variaciones observadas correspondan a cambios reales en la cobertura y no a distorsiones lumínicas provocadas por el relieve.

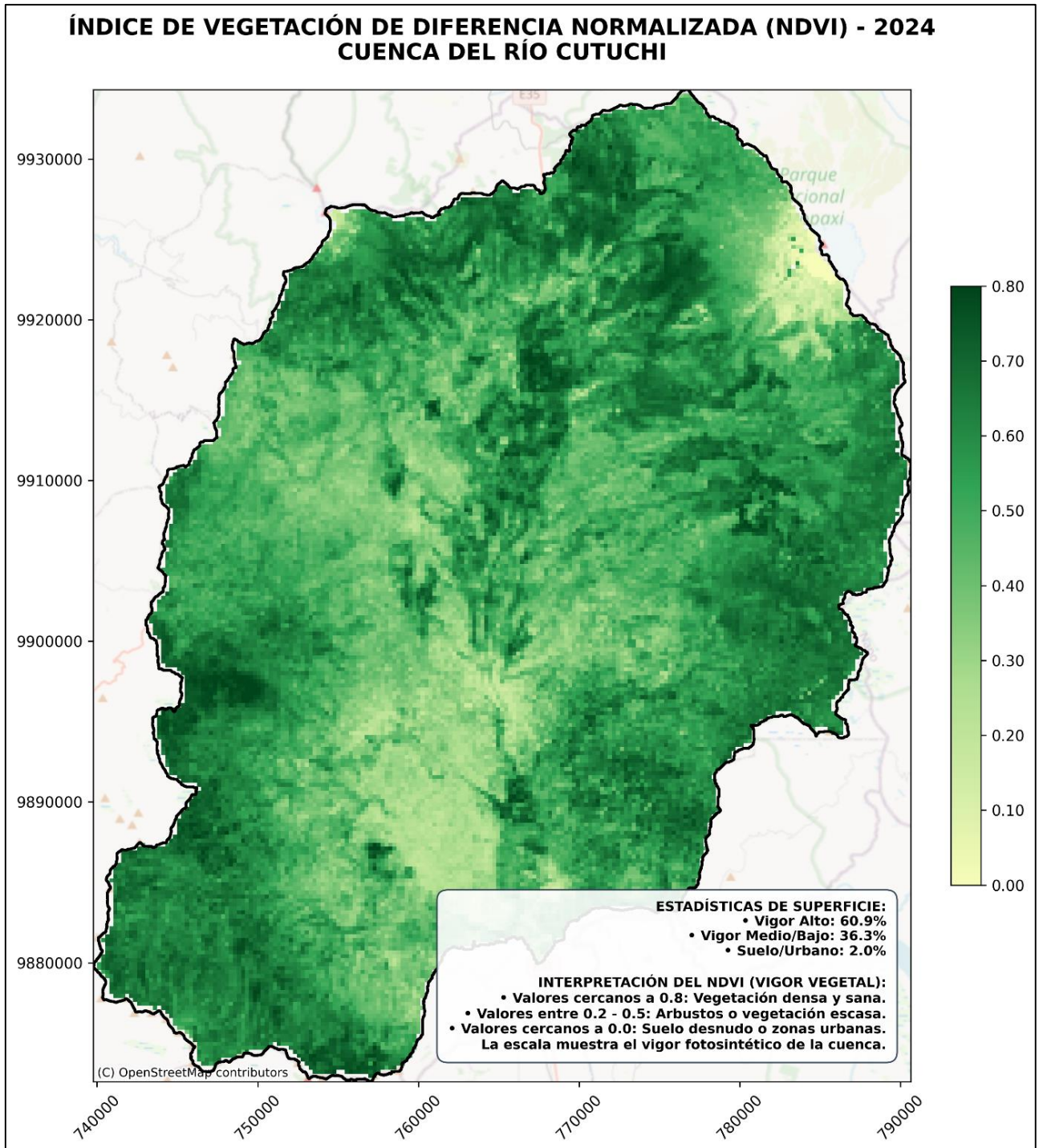


Figura 3. NDVI 2024

Finalmente, sobre la base de las bandas corregidas topográficamente, se ejecutó el cálculo de los índices espectrales que actuarán como predictores de la humedad del suelo. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se procesó para evaluar el vigor fotosintético y la densidad de la biomasa en la cuenca, mientras que el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) se calculó para cuantificar el contenido hídrico en el dosel de la vegetación y la humedad superficial. La integración de estos índices, visualizados mediante

paletas de colores especializadas, permitió identificar patrones espaciales de degradación y estrés hídrico. El procesamiento concluyó con la estructuración de una serie temporal que permite comparar la dinámica de estos indicadores, proporcionando una base cuantitativa robusta para la validación de la humedad edáfica en los cantones de Latacunga, Salcedo, Pujilí y Saquisilí.

Tabla 4 Detalles técnicos del proceso

Etapa de Procesamiento	Algoritmo / Parámetro Aplicado	Descripción Técnica
Composición de Imagen	Reductor de Mediana (<i>Median</i>)	Consolidación anual de píxeles para remoción de ruido y nubes.
Corrección Radiométrica	Modelo de Minnaert	Normalización de reflectancia por efectos de relieve y sombras.
Insumo de Elevación	USGS SRTMGL1_003	DEM de 30m para cálculo de pendiente y orientación
Cálculo de Vigor (NDVI)	$(B5 - B4) / (B5 + B4)$	Evaluación de biomasa y salud de la cobertura vegetal.
Cálculo de Humedad (NDMI)	$(B5 - B6) / (B5 + B6)$	Estimación del contenido de agua en vegetación y suelo superficial.
Geometría Solar	Azimuth y Elevation (Metadatos)	Datos extraídos de la escena original para ajuste de incidencia.

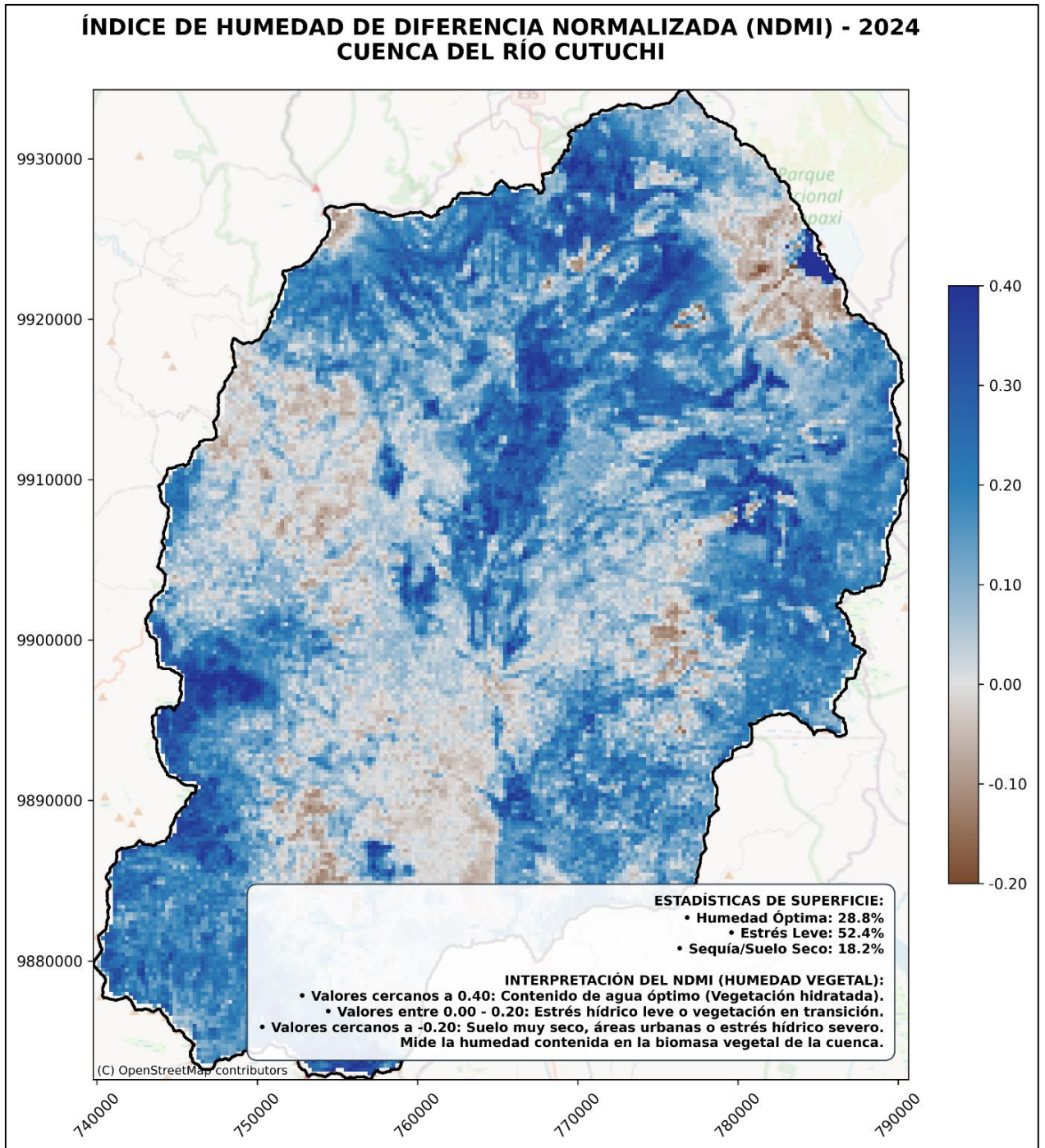


Figura 4. NDMI 2024

Tras la normalización radiométrica de las imágenes, se implementó un modelo de Análisis de Mezcla Espectral, una técnica avanzada de teledetección que permite superar las limitaciones de los índices tradicionales al abordar el problema del "píxel mixto". En la cuenca del Río Cutuchi, debido a la heterogeneidad de su relieve y la transición entre zonas urbanas, agrícolas y de páramo, un solo píxel de 30 metros suele contener una combinación de diversos materiales. Mediante la aplicación del algoritmo de desmezclado lineal en la plataforma Google Earth

Engine, se logró descomponer la firma espectral de cada píxel en proporciones o fracciones de cuatro componentes fundamentales denominados *Endmembers*: Vegetación Verde (GV), Vegetación No Fotosintética (NPV), Suelo Desnudo (Soil) y Sombra (Shade). Este procedimiento permitió cuantificar con precisión el porcentaje de superficie ocupado por suelo expuesto, lo cual constituye una variable crítica para el modelado de la humedad edáfica, ya que las áreas con mayores fracciones de suelo tienden a presentar tasas de evaporación más altas y menor retención hídrica en comparación con aquellas cubiertas por biomasa densa.

La ejecución técnica del modelo SMA se fundamentó en la selección de firmas espectrales puras extraídas de la literatura técnica para el sensor Landsat 8, las cuales actúan como la base matemática para la resolución de las ecuaciones de desmezclado. Para garantizar la consistencia física de los resultados, se aplicaron restricciones de suma de unidad y no negatividad, asegurando que la suma de las cuatro fracciones en cada punto geográfico sea exactamente igual al 100% y que no existan valores negativos carentes de sentido físico. Por otro lado, la diferenciación entre la Vegetación Verde (GV) y la Vegetación No Fotosintética (NPV) permitió identificar áreas de pastizales secos y rastrojos, los cuales influyen de manera distinta en el balance hídrico superficial de la cuenca.

Los resultados del procesamiento SMA fueron integrados en la serie temporal para el año 2024, generando mapas de fracciones que ofrecen una visión mucho más detallada que los índices de vigor tradicionales. Al visualizar la composición en un espacio de color RGB (donde el Rojo representa el Suelo, el Verde la Vegetación y el Azul la Sombra), se pudieron identificar claramente los núcleos de degradación y los frentes de expansión agrícola en las zonas altas de la cuenca. Esta caracterización subpíxel es el insumo fundamental para la fase de validación, ya que permite correlacionar la fracción de suelo detectada remotamente con los niveles de desecación observados en los perfiles hidrológicos de la zona de estudio, estableciendo así una base cuantitativa para el uso de estos datos como predictores confiables de la humedad del suelo.

Por ello se prepara la configuración del modelo en la Tabla 5, detallando las firmas espectrales para la descomposición de cada píxel proveniente del modelo SMA, lo que permite que el modelo diferenciar con precisión las superficies desnudas con potencial de desecación del material vegetal seco en senescencia. Con el componente de las sombras, los valores del modelo son constante en el mínimo (0.010) en todas las bandas, siendo un factor de ajuste crítico para mitigar los efectos de relieve topográfico y la presencia de cuerpos hídricos, garantizando que

los índices derivados como el NDFI reflejen fielmente el estado de degradación o conservación del Río Cutuchi.

Tabla 5 Configuración del modelo

Componente (Endmember)	B2 (Blue)	B3 (Green)	B4 (Red)	B5 (NIR)	B6 (SWIR1)	B7 (SWIR2)	Significado en el Estudio
Vegetación Verde (GV)	0.050	0.090	0.040	0.610	0.210	0.100	Vigor biológico y retención de humedad.
Veg. No Fotosintética (NPV)	0.120	0.140	0.170	0.250	0.400	0.350	Material vegetal seco o senescencia.
Suelo (Soil)	0.150	0.200	0.250	0.350	0.450	0.400	Superficie expuesta y potencial desecación.
Sombra (Shade)	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	Ajuste por relieve y cuerpos hídricos.

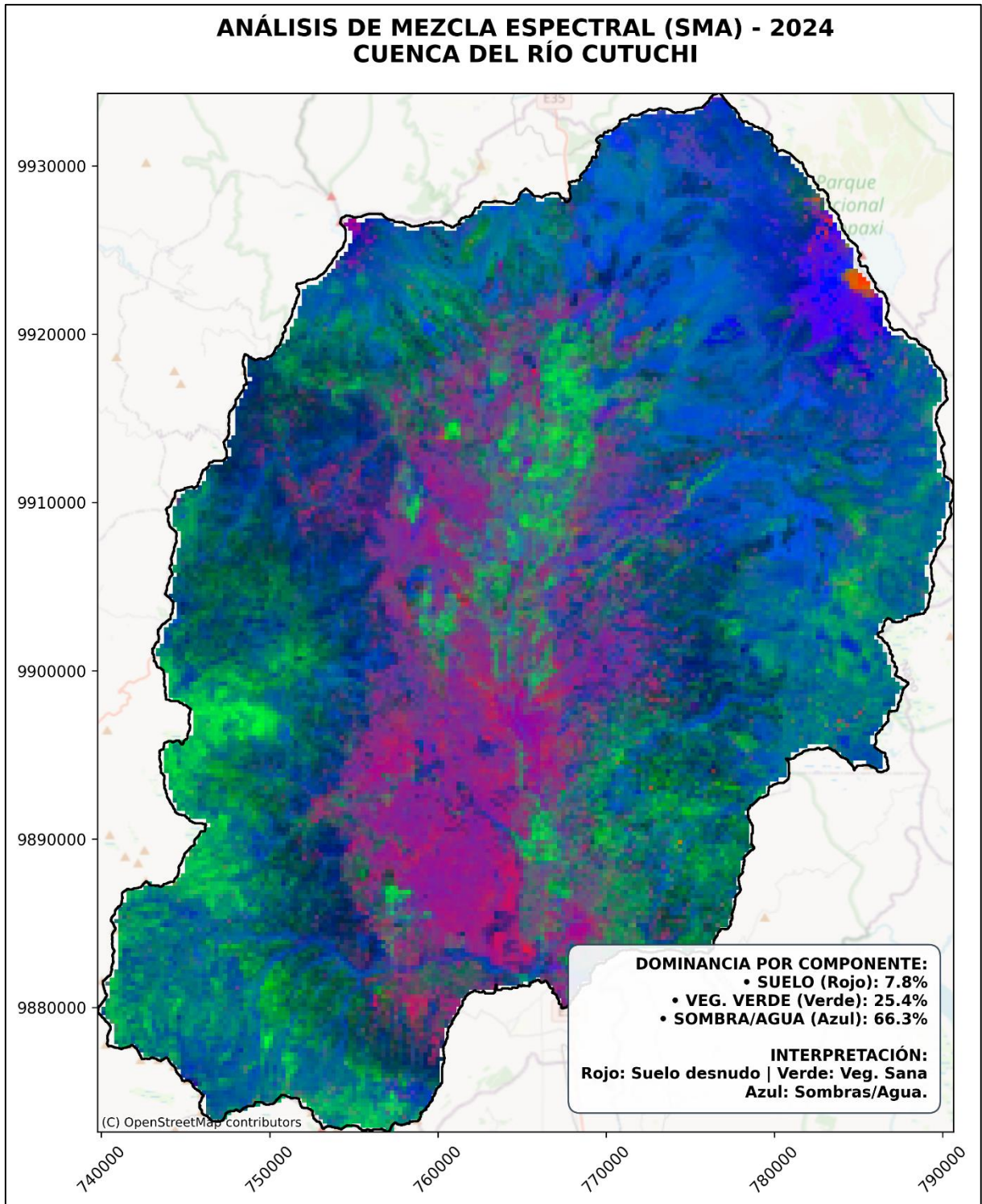


Figura 5. SMA 2024

Una vez obtenidas las fracciones de cobertura subpíxel mediante el modelo SMA, se procedió al cálculo del Índice de Diferencia Normalizada Fraccional (NDFI). A diferencia de los índices tradicionales como el NDVI, que solo miden el verdor, el NDFI sintetiza la relación entre la vegetación fotosintéticamente activa y los componentes de degradación (suelo expuesto y vegetación seca). En el contexto de la cuenca del Río Cutuchi, este índice resulta fundamental

para identificar zonas donde la capacidad de retención de humedad del suelo se ha visto comprometida por la pérdida de cobertura vegetal o por procesos de erosión. La implementación de este índice permitió transformar los mapas de fracciones en una métrica continua de integridad ambiental, facilitando la detección de áreas críticas en los cantones de Latacunga, Salcedo, Pujilí y Saquisilí que presentan una transición de ecosistemas húmedos hacia estados de aridez o degradación antrópica. Desde una perspectiva técnica, el cálculo del NDFI incorporó una etapa crítica de normalización por sombra. Dado que el relieve andino genera variaciones en la luminosidad que pueden sesgar los resultados, se calculó el componente GV (Vegetación Verde normalizada por sombra), el cual redistribuye la fracción de vegetación considerando el factor de iluminación del píxel. Posteriormente, se aplicó la ecuación que contrasta este componente con la suma de las fracciones de suelo (Soil) y vegetación no fotosintética (NPV). Este proceso matemático permite que el índice sea extremadamente sensible a perturbaciones mínimas en el dosel o en la superficie del suelo; los valores cercanos a +1 indican áreas con vegetación densa y saludable (alta capacidad hídrica), mientras que los valores que tienden a -1 señalan superficies degradadas o suelos desnudos con baja presencia de humedad, proporcionando así una base predictiva de alta precisión para el análisis hidrológico. Finalmente, el procesamiento del NDFI para el periodo 2024 permitió generar una cartografía de diagnóstico sobre el estado actual de la cuenca. La visualización de este índice, mediante una paleta de gradiente que transita desde el rojo (degradación severa) hasta el verde intenso (conservación), reveló patrones espaciales de estrés hídrico vinculados directamente con las zonas de mayor exposición edáfica. Estos resultados consolidan la serie de variables independientes necesarias para el modelo de predicción de humedad del suelo, permitiendo que el estudio no solo se base en la observación del verdor superficial, sino en la comprensión profunda de la composición del terreno y su estado de degradación estructural.

Tabla 6 Parámetros para el NDFI

Parámetro del Proceso	Ecuación / Valor de Referencia	Aplicación en la Cuenca del Cutuchi
Normalización (GVsh)	$GV / (1 - \text{Shade})$	Eliminación del ruido por sombras proyectadas en los flancos del volcán.
Componente Degradado	$NPV + \text{Soil}$	Sumatoria de elementos que reducen la retención hídrica superficial.
Ecuación NDFI	$GV - (NPV + \text{Soil})$	Métrica de integridad que varía entre -1 y 1.

	GV+ (NPV + Soil)	
Rango Crítico (Rojo)	Valores < 0	Identificación de suelos desnudos y zonas con alta evaporación.
Rango Óptimo (Verde)	Valores > 0.75	Zonas de recarga hídrica y vegetación densa protegida.
Plataforma de Cálculo	GEE API (Python)	Procesamiento paralelo de la serie temporal 2024.

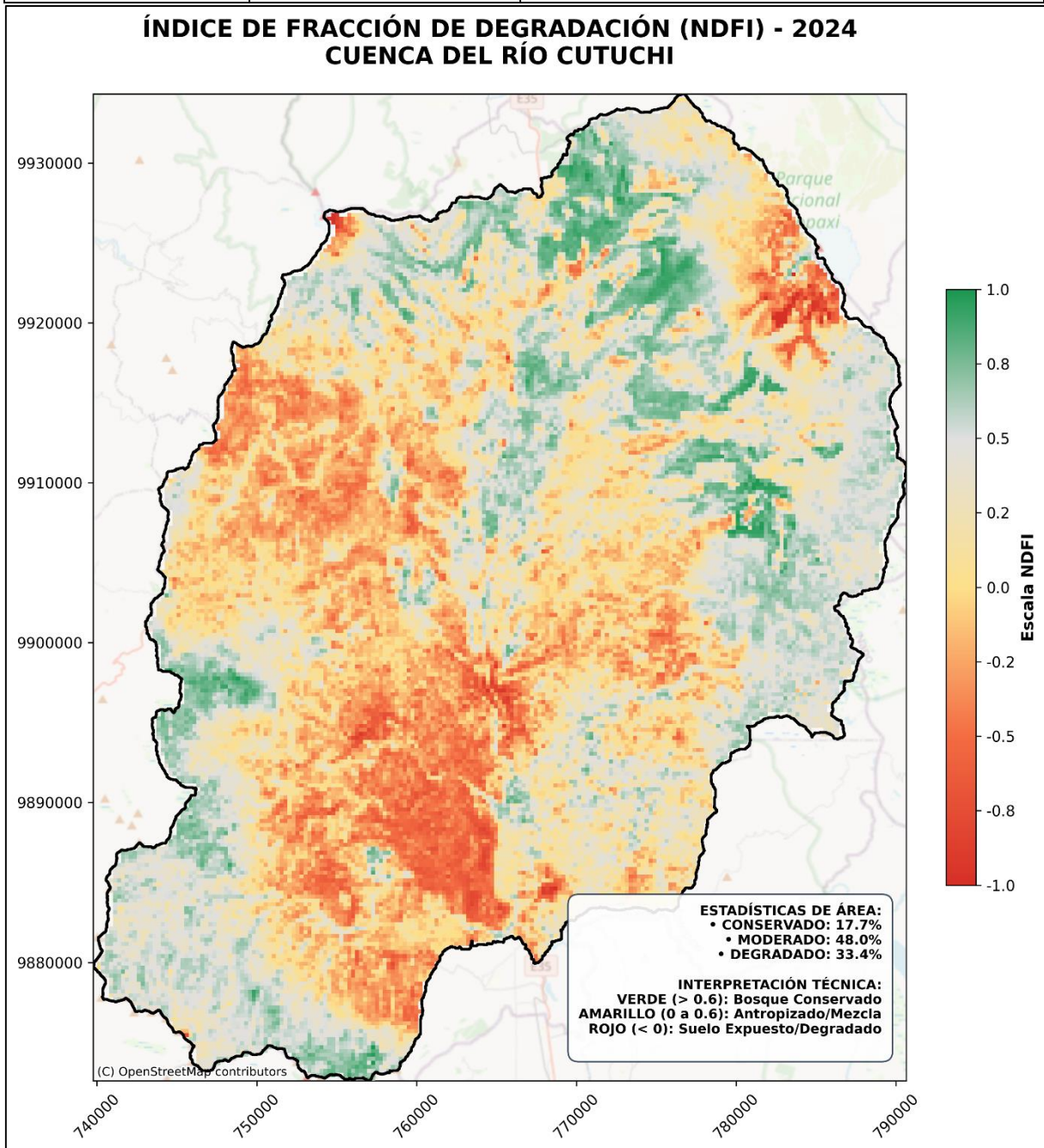


Figura 6. NDFI 2024

5.3. ANÁLISIS DE TENDENCIA

Como fase final del procesamiento de datos, se implementó un modelo de regresión lineal basado en el tiempo para evaluar la dinámica evolutiva de la humedad en la cuenca del Río Cutuchi. Este análisis de tendencia, ejecutado mediante el reductor lineal Fit de Google Earth Engine, constituye un modelo predictivo de primer orden que permite cuantificar la tasa de cambio anual del índice NDMI. Para su ejecución, se transformó la variable temporal (años) en una banda de datos flotantes, actuando como la variable independiente (X), mientras que los valores de reflectancia de humedad actuaron como la variable dependiente (Y). Al ajustar una línea de mínimos cuadrados para cada píxel de 30 metros a lo largo de la serie histórica, el modelo permite discriminar no solo el estado actual de la cuenca, sino la dirección y la magnitud de su transformación hidrológica a largo plazo.

El resultado principal de este modelo es la generación de una capa de "Pendiente de Tendencia", la cual es fundamental para la predicción de riesgos ambientales en los cantones de Latacunga, Salcedo, Pujilí y Saquisilí. Técnicamente, una pendiente negativa en el modelo indica un proceso de desecación o pérdida progresiva de humedad edáfica, lo cual es un predictor directo de degradación del suelo y potencial desertificación. Por el contrario, valores de pendiente positivos sugieren una recuperación de la capacidad de almacenamiento hídrico en la biomasa o el suelo. Este enfoque permite que la investigación trascienda la observación estática y proporcione una herramienta de pronóstico, donde las áreas marcadas en color rojo en la cartografía resultante representan zonas con una tendencia predictiva hacia el estrés hídrico severo, requiriendo intervención prioritaria en términos de gestión de recursos hídricos.

La robustez de este modelo predictivo radica en su capacidad para aislar las fluctuaciones estacionales y centrarse en la variabilidad interanual de la cuenca. Al integrar este análisis con los índices NDVI y NDFI procesados anteriormente, se logra una caracterización multidimensional del sistema hídrico. La validación del modelo se visualizó mediante una leyenda categorizada que segmenta la cuenca en áreas de degradación, estabilidad y recuperación. Este hallazgo es de vital importancia para la planificación hidráulica, ya que proporciona a los tomadores de decisiones un mapa de vulnerabilidad futura basado en la evidencia física del comportamiento del satélite, permitiendo anticipar escenarios de escasez de agua en las zonas bajas de la cuenca que dependen del deshielo y la escorrentía de las partes altas.

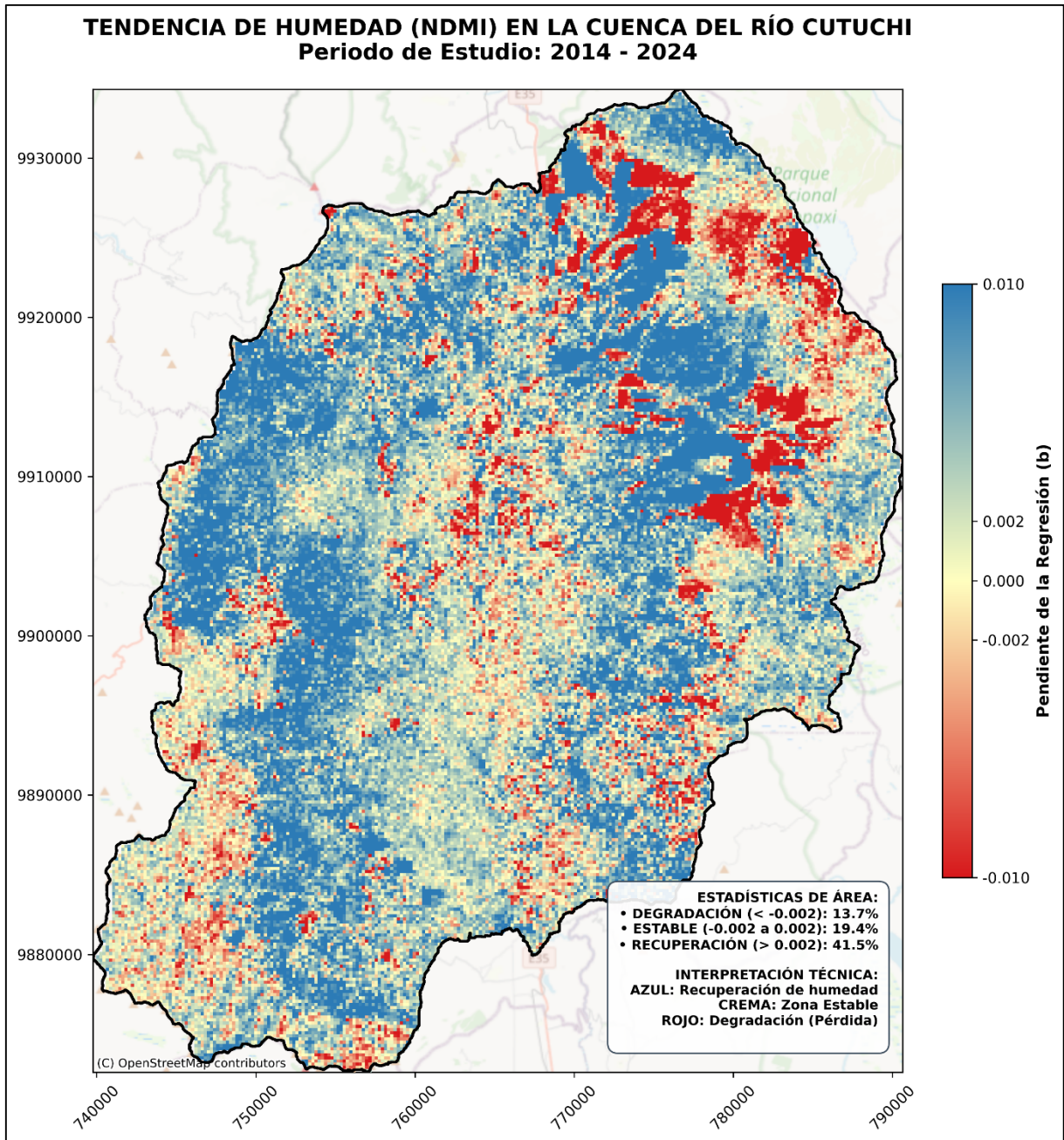


Figura 7. Modelo lineal

Tabla 7 Resultados del coeficiente R²

Parámetro	Valor	Interpretación Técnica
Pendiente (b)	-0.020	Indica una pérdida progresiva de humedad o cobertura vegetal anual.
Intercepto (a)	40.740	Valor teórico del índice en el punto de origen de la serie temporal.

Coefficiente R²	0.973	Ajuste robusto - el tiempo explica la gran mayoría de los cambios observados.
Valor p	0.000	Tendencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza superior al 95%.

El resultado del modelo de regresión revela una dinámica de cambio clara y estadísticamente robusta para la cuenca del Río Cutuchi, siendo un coeficiente con valor de 0.973 indicando que el modelo explica en un 97.30% la variabilidad total de los datos observados en el periodo (2014-2024), esto muestra un ajuste casi perfecto de la recta de regresión, otorgando una alta confiabilidad a la tendencia detectada.

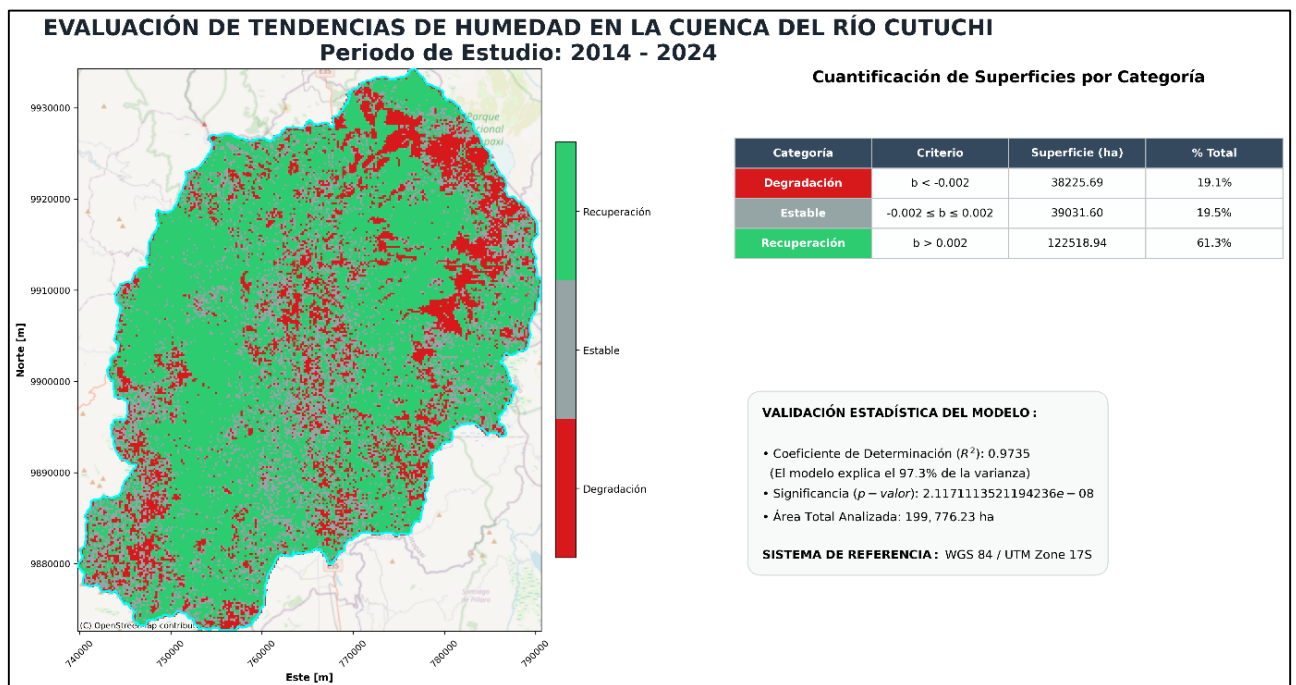


Figura 8. Tendencias y áreas de humedad en la cuenca

5.4.DISCUSIÓN

La evaluación de los índices espectrales en la cuenca del Río Cutuchi demuestra que la teledetección avanzada, integrada con herramientas de procesamiento en la nube como Google Earth Engine (GEE), supera las limitaciones del monitoreo hidrológico convencional en zonas alto andinas. El hallazgo más relevante es la alta precisión del modelo de regresión lineal, respaldado por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.973. Este valor sugiere que el factor temporal explica de manera casi exhaustiva la variabilidad observada en la humedad superficial durante la última década, validando la existencia de una tendencia de desecación sistemática en sectores estratégicos.

En concordancia con los antecedentes teóricos, se observó que el NDVI, si bien es eficaz para medir el vigor fotosintético, presenta limitaciones al ser influenciado por la saturación de la vegetación en zonas de páramo denso. Por el contrario, el NDFI se consolidó como el predictor más sensible de la degradación edáfica. Al integrar las fracciones de suelo, vegetación no fotosintética y sombra mediante el Análisis de Mezcla Espectral (SMA), el NDFI logró identificar procesos de perturbación del dosel que el NDVI suele ignorar. Esta sensibilidad es crítica para la ingeniería hidráulica regional, ya que permite detectar la exposición del suelo desnudo antes de que la pérdida de humedad sea irreversible. Asimismo, el uso del modelo de Minnaert para la corrección topográfica fue determinante. Sin este ajuste radiométrico, las pendientes pronunciadas del flanco del volcán Cotopaxi habrían generado falsos negativos de humedad debido a las sombras proyectadas. Los resultados de la tendencia sistemática hacia el estrés hídrico coinciden con las advertencias globales sobre la variabilidad climática en ecosistemas de montaña, donde la redistribución del recurso hídrico se ve afectada por fluctuaciones en el balance energético superficial. Finalmente, la correlación directa entre el aumento de la fracción de suelo expuesto (fracción *Soil* del SMA) y la pérdida de NDMI confirma que la degradación antropogénica es un factor tan influyente como el climático en la reducción de la humedad superficial de la cuenca.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- En conclusión, se consolidó una base de datos geospaciales e hidrológica robusta mediante la integración de la plataforma GEE, la selección de la escena Landsat 8 con un filtrado de nubosidad menor al 80% y una resolución de 30 metros, demostró que el insumo técnico óptimo para la evaluación multitemporal garantiza que se capturen la dinámica hídrica del área de estudio.
- En la aplicación de los índices permitió una caracterización multivariada del estado de la cuenca, concluyendo que el NDFI es el indicador con mayor sensibilidad para detectar la degradación del suelo y al integrar fracciones de vegetación-suelo-sombra, permiten identificar que la cuenca del Río Cutuchi presente una heterogeneidad, donde las zonas altas de pendientes presentan mayor vulnerabilidad a la pérdida de humedad debido a la exposición del suelo desnudo.
- Al utilizar un modelo de regresión línea basado en el tiempo válido que el índice NDMI es un predictor eficaz de la humedad del suelo a escala regional, obteniendo una

pendiente de tendencia negativa en los sectores críticos de la cuenca, confirmando que el modelo lineal con un coeficiente determinístico de 0.974 permite analizar escenarios de estrés hídricos en la cuenca del Río Cutuchi.

6.2.RECOMENDACIONES

- Se consolida una base de datos geospaciales robustas, recomendando a los organismos de gestión hídrica de la provincia de Cotopaxi adoptar la investigación para un monitoreo en tiempo real, reduciendo así la dependencia de mediciones de campo de alto costo y priorizar los estudios de restauración forestal y conservación de suelos específicamente en las zonas marcadas con pendientes negativas.
- El índice NDFI demostró mayor sensibilidad para la detección de la degradación del suelo por encima de los índices tradicionales, su uso es obligatorio en las evaluaciones de impacto ambiental relacionadas con cambios de uso de suelo en cuencas alto andinas.
- Se recomienda complementar los modelos ópticos de Landsat 8 con datos de radares aprovechando su capacidad para penetrar la nubosidad persistente en las partes altas de la cuenca, además de utilizar el modelo de regresión lineal validado con un R^2 de 0.973 como una herramienta de alerta temprana para anticipar escenarios de escasez hídricas en las zonas de la cuenca que dependen directamente de la escorrentía y recarga de estas mismas.

7. REFERENCIAS

- [1] Dianjun Zhang and Guoqing Zhou, “Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.3390/s16081308.
- [2] Yingxin Gu, Eric Hunt, Brian Wardlow, Jeffrey B. Basara, Jesslyn F. Brown, and James P. Verdin, “Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, no. 22, Nov. 2008, doi: 10.1029/2008GL035772.
- [3] Marcel Urban *et al.*, “Surface moisture and vegetation cover analysis for drought monitoring in the southern Kruger National Park using Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 10, no. 9, Sep. 2018, doi: 10.3390/rs10091482.

- [4] Xin Liu *et al.*, “Inversion of soil moisture and its feedback on ecological restoration in arid and semi-arid areas of northwest China,” *Rev. Bras. Cienc. Solo*, vol. 46, 2022, doi: 10.36783/18069657rbcs20220113.
- [5] Bikash Ranjan Parida, Arvind Chandra Pandey, Randhir Kumar, and Sourav Kumar, “Surface Soil Moisture Retrieval Using Sentinel-1 SAR Data for Crop Planning in Kosi River Basin of North Bihar,” *Agronomy*, vol. 12, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/agronomy12051045.
- [6] Abhilash Singh and Kumar Gaurav, “Deep learning and data fusion to estimate surface soil moisture from multi-sensor satellite images,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-28939-9.
- [7] Hadi Shokati *et al.*, “Random Forest-Based Soil Moisture Estimation Using Sentinel-2, Landsat-8/9, and UAV-Based Hyperspectral Data,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 16, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/rs16111962.
- [8] Y. H. Kerr, “SMOS Soil moisture retrieval Algorithm,” Oct. 2006.
- [9] Dara Entekhabi *et al.*, “The soil moisture active passive (SMAP) mission,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 704–716, 2010, doi: 10.1109/JPROC.2010.2043918.
- [10] Manoj Lamichhane, Sushant Mehan, and Kyle R. Mankin, “Soil Moisture Prediction Using Remote Sensing and Machine Learning Algorithms: A Review on Progress, Challenges, and Opportunities,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 17, no. 14, Jul. 2025, doi: 10.3390/rs17142397.
- [11] Salli F. Dymond, Joseph W. Wagenbrenner, Elizabeth T. Keppeler, and Kevin D. Bladon, “Dynamic Hillslope Soil Moisture in a Mediterranean Montane Watershed,” *Water Resour. Res.*, vol. 57, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.1029/2020WR029170.
- [12] Diego Rivera, Mario Lillo, and Stalin Granda, “Representative locations from time series of soil water content using time stability and wavelet analysis,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 186, no. 12, pp. 9075–9087, Dec. 2014, doi: 10.1007/s10661-014-4067-0.
- [13] Maria Casamitjana, Maria C. Torres-Madroño, Jaime Bernal-Riobo, and Diego Varga, “Soil moisture analysis by means of multispectral images according to land use and spatial resolution on andosols in the colombian andes,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 16, Aug. 2020, doi: 10.3390/app10165540.

- [14] Griselda Ostertag and Miriam Cuello, “CARACTERIZACION CLIMATICA DE LA ALTA CUENCA DEL RIO NEUQUEN, ANDES PATAGONICOS,” *Bolitin Geografico*, vol. 26, pp. 21–32, 2005.
- [15] Mireguli Ainiwaer, Jianli Ding, Nijat Kasim, Jingzhe Wang, and Jinjie Wang, “Regional scale soil moisture content estimation based on multi-source remote sensing parameters,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 41, no. 9, pp. 3346–3367, May 2020, doi: 10.1080/01431161.2019.1701723.
- [16] IPCC, “IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report,” Jul. 2023. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- [17] Diego Cruz Galván, “SOIL MOISTURE ASSESMENT IN HIGH MOUNTAIN AREAS BY REMOTE SENSING TECHNIQUES,” Jun. 2020.
- [18] Franchesca Nikole Granja Hidalgo, “Análisis multitemporal de los cambios de cobertura vegetal en el cantón Latacunga durante el periodo 2015-2023,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2024.
- [19] Kerly Dayanna Shigui Lema, “Análisis multitemporal del cambio de la cobertura vegetal (2013 al 2023) de la parroquia Belisario Quevedo, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2025.
- [20] María de las Mercedes Abril, “Modelos para el Análisis de las Series de Tiempo,” *RInCE*, vol. 11, no. 1851–3239, Aug. 2021, [Online]. Available: <http://rince.unlam.edu.ar>
- [21] Nathaly Karolina Amaguaña Guanochangea, “Restauración forestal de suelos secos en el sector de Alpamalag del cantón Pujilí en el periodo de 2019-2020,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2020.
- [22] Jaboury Ghazoul and Robin Chazdon, “Annual Review of Environment and Resources Degradation and Recovery in Changing Forest Landscapes: A Multiscale Conceptual Framework,” *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 42, pp. 88–161, Jul. 2017, doi: 10.1146/annurev-environ.
- [23] Jaboury Ghazoul, Zuzana Burivalova, John Garcia-Ulloa, and Lisa A. King, “Conceptualizing Forest Degradation,” *Trends Ecol. Evol.*, vol. 30, no. 10, pp. 622–632, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.tree.2015.08.001.

- [24] Patricia Priscila Maldonado Campaño, “Estudio de datos climáticos históricos y actuales para crear visualizaciones que muestren el impacto climático en las parroquias urbanas del cantón Latacunga, mediante el uso de árboles de decisión binaria,” Universidad Técnica de Cotopaci, Latacunga, 2025.
- [25] Raúl Aguirre Gómez, “Bases físicas de la percepción remota,” in *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, Universidad Nacional Autónoma de México and Instituto de Geografía, Eds., México: UNAM, Instituto de Geografía, 2009, ch. 1, p. 301.
- [26] Paul Moizo Marrubio, “LA PERCEPCIÓN REMOTA Y LA TECNOLOGÍA SIG: Una aplicación en Ecología de Paisaje,” *GeoFocus*, vol. 4, no. 1578–5157, pp. 1–24, 2004, [Online]. Available: www.geo-focus.org
- [27] Amparo Molina, Consuelo Molina, and Philippe Chevillot, “La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo De Uraba y las variaciones de su línea de costa,” *Bol. Cient.*, vol. 11, no. 0120 0542, pp. 43–58, Jul. 1992.
- [28] Ángel Luis Ruiz Fernández, “Análisis de mezclas espectrales,” Valencia, 2020.
- [29] Ángel Natal Tello and Rafael García Rodríguez, “Análisis de Mezclas Espectrales para el estudio de la deforestación y establecimiento de la línea de referencia de emisiones en el marco del programa REDD. Aplicación a la región de San Martín, Perú.,” *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 3, no. 1, p. 033543, Aug. 2009, doi: 10.1117/1.3223675.
- [30] E. Walker, G. A. García, and V. Venturini, “Actual evapotranspiration estimation over flat lands using soil moisture products from SMAP mission,” *Revista de Teledeteccion*, vol. 2018, no. 52, pp. 17–26, 2018, doi: 10.4995/raet.2018.10566.
- [31] C. Mattar, J. A. Sobrino, J. P. Wigneron, J. C. Jiménez-Muñoz, and Y. Kerr, “Estimación de la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas,” *Revista de Teledeteccion*, vol. 36, no. 1988–8740, pp. 62–72, Nov. 2011.
- [32] Javier Rubio, “Las negociaciones internacionales sobre el cambio climático,” *PROTOCOLO DE KIOTOICE*, vol. 822, May 2005.
- [33] Luca Congedo, “Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS,” Aug. 2021. doi: <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.

- [34] Rafael Navarro Cerrillo, Ángeles Varo Martínez, and Antonio Ariza Salamanca, “Sensores, acceso y procesado de imágenes multiespectrales y térmicas de interés forestal,” 2024.
- [35] Rohit Singh, Mahesh Pal, and Mantosh Biswas, “Cloud Detection Methods for Optical Satellite Imagery: A Comprehensive Review,” Sep. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/geomatics5030027.
- [36] Jesús A. Prieto-Ampan, Federico Villarreal-Guerrero, M. Martinez-Salvador, Carlos Manjarrez-Domínguez, Eduardo Santellano-Estrada, and Alfredo Pinedo-Alvarez, “Atmospheric and radiometric correction algorithms for the multitemporal assessment of grasslands productivity,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 10, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.3390/rs10020219.
- [37] Cristopher Edgar Camargo Roa, Carlos Eduardo Pacheco Angulo, and Roberto López Falcón, “Assessment of atmospheric and topographic correction methods in Landsat 8 OLI imagery on a semi-arid mountainous area,” *REVISTA UD Y LA GEOMÁTICA*, vol. 16, pp. 23–29, 2021, doi: <https://doi.org/10.14483/23448407.17040>.
- [38] Magda Alexandra Trujillo-Jiménez, Ana Laura Liberoff, Natalia Pessacg, Cristian Pacheco, and Silvia Flaherty, “Metodología de clasificación automática de uso y cobertura de suelo,” *XIII Congreso de AgroInformática (CAI 2021)-JAIHO 50*, 2021, doi: 10.5281/zenodo.5338597.
- [39] Yoan Poveda-Sotelo, Mauricio A. Bermúdez-Cella, and Pablo Gil-Leguizamón, “Evaluation of supervised classification methods for the estimation of spatiotemporal changes in the Merchán and Telecom paramos, Colombia,” *Boletín de Geología*, vol. 44, no. 2, pp. 51–72, 2022, doi: 10.18273/revbol.v44n2-2022002.
- [40] Serkan Girgin, Jay Gohil, and Indupriya Mydur, “A streamlined GIS interface for Citizen Science activities: QGIS Light,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Jul. 2025, pp. 127–134. doi: 10.5194/isprs-Archives-XLVIII-4-W13-2025-127-2025.
- [41] Pedro Muñoz Aguayo, “Índices de vegetación,” Chile, Apr. 2013.
- [42] Fernando Tun-Dzul, Hans Vester, Rafael Durán, and Birgit Schmook, “ESTRUCTURA ARBÓREA Y VARIABILIDAD TEMPORAL DEL NDVI EN LOS

- ‘BAJOS INUNDABLES’ DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO,”
Polibotanica, vol. 25, no. 1405–2768, pp. 69–90, Jun. 2008.
- [43] Domingo Castro, “MONITOREO DE BOSQUES UTILIZANDO NDVI REDEDGE DE RAPIDEYE,” *GEOESPACIAL*, vol. 10, no. 1390–3993, pp. 58–71, Dec. 2013.
- [44] Daniel Delgado, “MONITOREO DE LA DEGRADACIÓN FORESTAL POR MEDIO DE ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO (2010-2020) DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN, HUMEDAD Y FRACCIÓN DERIVADOS DEL SENSOR LANDSAT,” Universidad Nacional Autónoma de México, Michoacán, 2022.
- [45] Carlos M. Souza *et al.*, “Ten-year landsat classification of deforestation and forest degradation in the brazilian amazon,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 5, no. 2072–4292, pp. 5493–5513, 2013, doi: 10.3390/rs5115493.
- [46] Lilian Blanc, Valery Gond, and Dinh Ho Tong Minh, “Remote Sensing and Measuring Deforestation,” in *Land Surface Remote Sensing: Environment and Risks*, Elsevier Inc., 2016, ch. 2, pp. 27–53. doi: 10.1016/B978-1-78548-105-5.50002-5.
- [47] M A Mohammed-Aslam, Z E Salem, and Ts Javzandulam, “Linear Mixture Model Applied to the Land-Cover Classification in an Alluvial Plain Using Landsat TM Data,” *Journal of Environmental Informatics*, vol. 7, no. 1726–2135, pp. 95–101, 2006, [Online]. Available: www.iseis.org/jei
- [48] C. Quintano, J. Delgado, J. Ramírez, and A. Fernández-Manso, “Estimación del área quemada por incendios forestales empleando el modelo de mezclas espectrales desde una perspectiva multitemporal,” *Teledetección y Desarrollo Regional*, pp. 175–178, 2003.
- [49] Jorge Domínguez Domínguez and Jorge Domínguez López, *Estadística : para administración y economía*, Primera. México: Alfaomega Grupo Editor, 2015.