



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA EN LOS CAMBIOS DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO EN EL
ÁREA DE INFLUENCIA DEL CANAL DE RIEGO CAYAMBE-PEDRO MONCAYO**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniera Ambiental

AUTORA: JESSICA PAOLA MORALES CHICAIZA

TUTOR: CHARLES JIM CACHIPUENDO ULCUANGO

Quito - Ecuador

2025

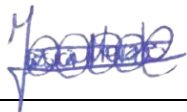
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Jessica Paola Morales Chicaiza con documento de identificación N° 1723002885
manifiesto que:

Soy la autora responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la
Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total
o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 1 de agosto del año 2025

Atentamente,



Jessica Paola Morales Chicaiza

1723002885

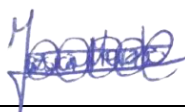
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jessica Paola Morales Chicaiza con documento de identificación No. 1723002885, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy la autora del Trabajo Experimental: “Aplicación de la Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en los Cambios del Uso y Cobertura del Suelo en el Área de Influencia del Canal de Riego Cayambe-Pedro Moncayo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 1 de agosto del año 2025

Atentamente,



Jessica Paola Morales Chicaiza

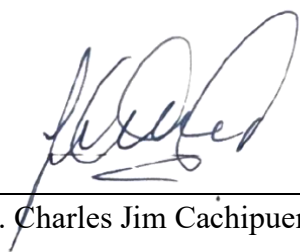
1723002885

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Charles Jim Cachipueno Ulcuango con documento de identificación N° 1711651040, docente de la Universidad Politécnica Salesiana extensión Cayambe, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LOS CAMBIOS DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL CANAL DE RIEGO CAYAMBE-PEDRO MONCAYO, realizado por Jessica Paola Morales Chicaiza con documento de identificación N° 1723002885, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo Experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 1 de agosto del año 2025

Atentamente,



Ing. Charles Jim Cachipueno Ulcuango PhD.
C.I. 1711651040

DEDICATORIA

A mis padres amados, quienes con su amor, sacrificio y sabias palabras me guiaron en cada paso.

A mi padre Freddy Fuentes por tu apoyo y cariño incondicional, por estar ahí cuando más lo necesite y por brindarme siempre palabras de aliento y comprensión.

A mis hermanos por ser mi apoyo silencioso, como pilares de apoyo constante en cada jornada.

A mi querido sobrino Gustavo, cuya ternura y sonrisa siempre me dieron un motivo para seguir adelante.

A mis primos Jordan y Shantal por su cercanía, alegría, su sincera compañía.

A Marcelo por su paciencia, comprensión y amor en los momentos más difíciles.

A mi querido padrino Gustavo Grijalva que, aunque ya no está físicamente conmigo, pero vive en mi memoria y en mi corazón gracias por tu carisma, tus consejos y por haber creído en mí.

Y con todo el amor de mi alma, a mi fiel compañero Wally, que me acompañó silenciosamente en cada momento de esta travesía. Aunque ya no estes a mi lado tu presencia fue un bálsamo en mis días más difíciles y una compañía fiel e incondicional que jamás olvidare.

Esta tesis es para ustedes, que, con su amor, su apoyo y su huella imborrable me impulsaron a llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza y salud para culminar esta etapa.

A mis padres por todo su apoyo durante la carrera universitaria, por su esfuerzo, dedicación y entera confianza, a Andrés, Carlos, Erick, Marcelo, mi sobrino Gustavo, gracias por su apoyo inquebrantable, por su comprensión en los momentos difíciles y por ser mi inspiración constante.

A mi director de tesis Ing. Charles Cachipundo por su orientación académica sus valiosas observaciones y su compromiso con este trabajo.

A mi querida Ing. Catalina Sandoval quien con su enseñanza y orientación me ha motivado a seguir creciendo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Problema	14
1.2 Delimitación.....	16
1.3 Pregunta de investigación	18
1.4 Objetivos generales y específicos	18
1.5 Hipótesis	18
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	19
2.1 Teledetección aplicada al monitoreo de uso de suelo.....	19
2.1.1 Evolución de la teledetección:.....	20
2.1.2 Tecnologías y plataformas de teledetección:.....	22
2.1.3 Satélites y sensores más utilizados	23
2.1.3 Índices de vegetación e indicadores relevantes	26
2.2 Métodos de análisis de datos para la clasificación del uso y cobertura del suelo con teledetección. 28	
2.2.1 Técnicas de clasificación de imágenes:	28
2.2.2 Análisis temporal y multitemporal.	30
2.2.3 Uso de algoritmos y machine learning.....	30
2.3 Detección de cambio de uso de suelo y cobertura con teledetección	32
2.3.1 Investigaciones internacionales y regionales.	32
2.3.2 Estudios específicos en Ecuador.....	33
2.3.3 Impacto ambiental de los sistemas de riego comunitarios	34
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1 Materiales.....	37
3.2 Metodología	37
3.3 Diseño	45
3.4 Población y muestra	45
3.5 Variables.....	46
3.6 Recogida de datos.....	46
3.7 Protocolos	47
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1 Leyenda sistema de clasificación de la cobertura de la Tierra.....	48
4.2 Análisis de cambio de uso de suelo 2012 - 2023	49
4.3 Sin dato	50
4.4 Análisis de la clasificación supervisada.....	51

4.5 Mapas.....	53
4.6 Discusión	67
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
5.1 Conclusiones	69
5.2 Recomendaciones.....	70
6. BIBLIOGRAFÍA	71
7. ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Comparación de Técnicas de Clasificación de Imágenes</i>	29
Tabla 2 <i>Leyenda oficial del sistema nacional de cobertura y uso de tierra</i>	38
Tabla 3 <i>Mapa de las muestras de las clases de cobertura y uso del suelo</i>	41
Tabla 4 <i>Descripción de los datos aplicados en el área de estudio</i>	43
Tabla 5 <i>Variables de estudio</i>	46
Tabla 6 <i>Coberturas en el área de estudio</i>	48
Tabla 7 <i>Taza de cambio de los años 2012-2023</i>	50
Tabla 8 <i>Exactitud e índice Kappa de la clasificación supervisada</i>	51
Tabla 9 <i>Exactitud producto</i>	52
Tabla 10 <i>Precisión por clase</i>	52
Tabla 11 <i>Tabla comparativa de la Parroquia Malchingui de los años 2012 2023</i>	55
Tabla 12 <i>Tabla comparativa de la Parroquia Tocachi de los años 2012 2023</i>	57
Tabla 13 <i>Tabla comparativa de la Parroquia La Esperanza de los años 2012 2023</i>	59
Tabla 14 <i>Tabla comparativa de la parroquia Tabacundo de los años 2012 2023</i>	61
Tabla 15 <i>Tabla comparativa de la parroquia Tupigachi de los años 2012 2023</i>	63
Tabla 16 <i>Tabla comparativa de la parroquia Ayora de los años 2012 2023</i>	65
Tabla 17 <i>Tabla comparativa de la parroquia Olmedo de los años 2012 2023</i>	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Mapa delimitación</i>	16
Figura 2 <i>Evolución histórica de los sistemas de teledetección</i>	21
Figura 3 <i>Sensor activo</i>	22
Figura 4 <i>Sensor pasivo</i>	23
Figura 5 <i>Misión cronológica Landsat</i>	24
Figura 6 <i>Satélite Sentinel-2 en el espacio</i>	25
Figura 7 <i>Proceso metodológico para la clasificación supervisada del uso y cobertura de suelo del territorio en estudio</i>	44
Figura 8 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Malchingui del Cantón Pedro Moncayo</i>	54
Figura 9 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Tocachi del Cantón Pedro Moncayo</i>	56
Figura 10 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia La Esperanza del Cantón Pedro Moncayo</i>	58
Figura 11 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Tabacundo del Cantón Pedro Moncayo</i>	60
Figura 12 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Tupigachi del Cantón Pedro Moncayo</i>	62
Figura 13 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Ayora del Cantón Cayambe</i>	64
Figura 14 <i>Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Olmedo del Cantón Cayambe</i>	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo. 1 <i>Mapa cobertura del suelo año 2012</i>	74
Anexo. 2 <i>Mapa cobertura del suelo año 2023</i>	75

RESUMEN

El presente estudio analiza los cambios en el uso y cobertura del suelo en el área de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo entre los años 2012 y 2023, mediante el uso de imágenes satelitales y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La implementación de este canal ha generado transformaciones sustanciales en la estructura del paisaje, especialmente en los sectores agrícolas y urbanos.

Utilizando técnicas de teledetección multitemporal con sensores Landsat 8 y Sentinel-2, se aplicó una clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest para identificar ocho clases de cobertura: pasto, rosas, maíz, bosque, misceláneos, otros, reservorios y poblados. Los resultados muestran una disminución significativa de pastizales, atribuida a la conversión hacia cultivos agrícolas intensivos o expansión urbana.

El cultivo de maíz experimentó un crecimiento notable, duplicando su extensión en varias parroquias, mientras que el cultivo de rosas también aumentó, consolidando su importancia económica en la región. La categoría de bosque presentó dinámicas variables según la parroquia, en algunos casos con disminución por presión antrópica y en otros con recuperación parcial. Los reservorios aumentaron de manera considerable, reflejo de la mejora en infraestructura hídrica. Asimismo, las zonas pobladas crecieron, evidenciando procesos de urbanización.

A pesar de estos cambios internos, la superficie total del área de estudio se mantiene prácticamente constante, lo que indica una reorganización del uso del suelo más que una expansión territorial. Esta redistribución resalta la importancia de integrar la gestión hídrica con la planificación territorial y la conservación ambiental.

El estudio concluye que la teledetección y los SIG son herramientas efectivas para monitorear los cambios en el paisaje y apoyar decisiones informadas sobre el uso sostenible del suelo.

Palabras claves: Teledetección, uso del suelo, SIG, cambio de cobertura, riego tecnificado, maíz, pasto, reservorios, Random Forest, Landsat, Sentinel-2, Pedro Moncayo, desarrollo agrícola, conservación ambiental, clasificación supervisada.

ABSTRACT

This study analyzes land use and land cover changes in the area influenced by the Cayambe-Pedro Moncayo irrigation canal between 2012 and 2023, using satellite imagery and Geographic Information Systems (GIS) tools. The implementation of this canal has led to significant transformations in the landscape structure, particularly in agricultural and urban sectors.

Using multitemporal remote sensing techniques with Landsat 8 and Sentinel-2 sensors, a supervised classification was applied through the Random Forest algorithm to identify eight land cover classes: pasture, roses, maize, forest, miscellaneous, others, reservoirs, and populated areas. Results show a significant reduction in pasturelands, likely due to conversion into intensive agricultural land or urban expansion.

Maize cultivation showed a notable increase, doubling its area in several parishes, while rose cultivation also expanded, strengthening its economic relevance in the region. Forest cover exhibited variable dynamics depending on the parish, with some areas experiencing loss due to anthropogenic pressure and others showing partial recovery. Reservoirs expanded significantly, reflecting improvements in water infrastructure. Additionally, urban areas grew, highlighting ongoing urbanization processes.

Despite these internal changes, the total area of the study region remained practically constant, indicating a reorganization of land use rather than territorial expansion. This redistribution emphasizes the need to integrate water management with territorial planning and environmental conservation.

The study concludes that remote sensing and GIS are effective tools for monitoring landscape transformations and supporting informed decisions toward sustainable land use.

Keywords: Remote sensing, land use, GIS, land cover change, irrigation systems, maize, pasture, reservoirs, Random Forest, Landsat 8, Sentinel-2, Pedro Moncayo, agricultural development, environmental conservation, supervised classification.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

1.1.1 Importancia y alcances

El 1 de octubre de 2020, el Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pichincha suscribió la recepción definitiva del Canal de Riego Cayambe Pedro Moncayo (GAD Pichincha, 2020), siendo una de las infraestructuras hidráulicas más relevantes para el desarrollo agro productivo, causando cambios significativos en el uso y cobertura del suelo, aunque ha contribuido al incremento en la productividad agrícola y mejora socioeconómica de comunidades locales implicando presión creciente en el cambio de ecosistemas naturales, fragmentación del paisaje y alteraciones de las áreas de recarga hídrica. “El estudio de la dinámica en el uso y cobertura de suelo, considerando el espacio como el tiempo resulta fundamental para la gestión adecuada de los recursos naturales, examinado como varia el uso del suelo permite identificar tendencias y comportamientos en distintas escalas tanto temporales como espaciales, debido a que estos cambios son continuos se hace imprescindible realizar investigaciones detalladas que analicen los patrones de transformación en los diferentes contextos como espacio-tiempo” (Campaña Hidalgo B., 2024. p. 11).

El deterioro de la cobertura vegetal y la transformación del uso del suelo han generado la necesidad de implementar de estrategias de restauración ecológica permitiendo mitigar los impactos, con la implementación de tecnologías como herramientas de teledetección satelital permitan la identificación y recuperación del suelo, sin embargo, esto representa un desafío para la elaboración de políticas territoriales que consideren el desarrollo agrícola como conservación ambiental (Chuvienco E., 1995. .).

“Los cambios ecológicos y sociales han creado una crisis global, cambios climáticos y de uso del suelo han provocado la pérdida de biodiversidad, poniendo en duda la correcta

aplicación de las políticas de gestión de ecosistemas y gestión territorial” (Anderson et al., 2021). Es importante analizar el impacto de las acciones humanas sobre los ecosistemas, así como la forma en que la sociedad interpreta y reacciona frente a dichos cambios. Las dinámicas de cambios de uso del suelo son complejas y pueden provocar cambios inesperados en la estructura y funciones del medio ambiente, amenazando así la sostenibilidad de las generaciones futuras (Pinos Arévalo Nancy Jaqueline, 2017).

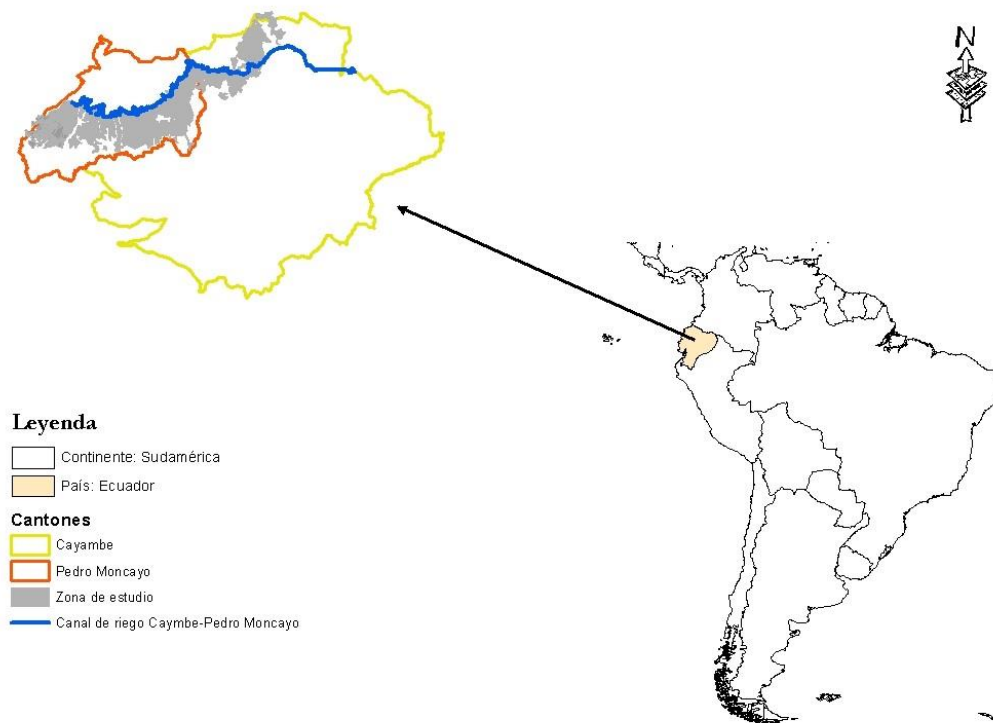
Los cambios en el uso del suelo son producto de acciones humanas a lo largo del tiempo pueden ser estudiados mediante técnicas de teledetección permitiendo realizar el seguimiento temporal por medio de imágenes satelitales (Campaña Hidalgo B., 2024), la identificación de zonas con alta transformación del uso y cobertura del suelo aporta información crítica para una planificación territorial eficiente y para una gestión racional del recurso hídrico (García-Santos V., 2012), dando conocimiento el grado de pérdida coberturas naturales permitiendo orientar acciones de conservación y restauración ecológica favoreciendo la sostenibilidad ambiental (Anderson et al., 2021), desde un enfoque rural la integración de tecnologías de teledetección y SIG puede beneficiar al sector agrícola con el uso eficiente del suelo y del agua, promoviendo sistemas productivos sostenibles a largo plazo, el área de investigación se enfoca en la zona del canal de riego Cayambe -Pedro Moncayo constituye el espacio principal abarcando ecosistemas naturales, zonas agrícolas y urbanas, se realiza un análisis multitemporal comparando el menos diez años que siendo periodos claves con la utilización de imágenes satelitales de fuentes como Landsat 8 y Sentinel-2 combinadas con técnicas de clasificación y análisis espacial en software SIG como QGIS o ArcGIS (Bonilla D. & Taipe J., 2021).

1.2 Delimitación

El canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo se abastece de agua proveniente de los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro. El recurso hídrico es transportado mediante tres túneles de aducción que en conjunto tienen una longitud aproximadamente de 4.1 km y conducen el caudal hasta el embalse de San Marcos. En esta infraestructura se almacenan 10 millones de metros cúbicos de agua, volumen que permiten irrigar más de 14 mil familias, aportando el desarrollo agrícola y a la mejora de la calidad de vida en dos parroquias de Cayambe y cinco parroquias de Pedro Moncayo. (Hidalgo et al., 2018).

Figura 1

Mapa delimitación



Fuente: Laboratorio SIG-UPS

1.2.1 *Delimitar geográfica (espacial)*

La presente investigación se desarrolla en el área de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo, situada en la región nororiental del Ecuador, aproximadamente a 80 km de Quito. Geográficamente, el área de estudio se encuentra entre las coordenadas 809644,59 UTM Este y 10009153,3 UTM Norte, con una altitud que varía entre los 1730 y 2952 metros sobre el nivel del mar. Esta zona presenta un clima templado, con temperaturas que oscilan entre los 10 °C y 20 °C. Según el censo del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), los cantones Cayambe y Pedro Moncayo cuentan en conjunto con una población aproximada de 118.967 habitantes. El área total de estudio abarca alrededor de 16.600 hectáreas (Hidalgo et al., 2018).

1.2.2 *Delimitación temporal*

El estudio tiene un enfoque multitemporal, abarcando un periodo de análisis de diez años, durante los cuales se examinan los cambios en el uso y cobertura del suelo en el área de influencia del canal de riego. Para ello, se utilizan imágenes satelitales disponibles correspondientes a los años seleccionados. El desarrollo del proyecto contempla una duración estimada de seis meses.

1.2.3 *Sectorial e institucionalmente*

La delimitación sectorial e institucional del proyecto responde a los objetivos de formación profesional en el campo de la Ingeniería Ambiental. Se aplican conocimientos adquiridos en áreas como manejo de cuencas hidrográficas, cartografía temática, interpretación de ortofotos, metodologías de investigación, y sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de integrar teoría y práctica en un contexto aplicado.

1.3 Pregunta de investigación

Para realizar este estudio se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles han sido los cambios en el uso y cobertura del suelo en el área de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo durante los últimos diez años y cómo contribuyen la teledetección y los sistemas de información geográfica al análisis de estos cambios?

1.4 Objetivos generales y específicos

1.4.1 Objetivo general:

Analizar la evolución temporal y espacial del uso y cobertura del suelo en base a la teledetección y sistemas de información geográfica para cuantificar los cambios del uso y cobertura del suelo, de los últimos 10 años, en la zona de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar la clasificación temporal y espacial del uso y cobertura del suelo con el método de clasificación supervisada Random Forest y teledetección.
- Cuantificar los cambios del uso y cobertura del suelo de los últimos 10 años, mediante la teledetección y sistemas de información geográfica.
- Generar 15 mapas temáticos por parroquia para evidenciar los cambios de cobertura y uso de suelo de los últimos 10 años y la clasificación actual del uso y cobertura del suelo utilizando los sistemas de información geográfica.

1.5 Hipótesis

La implementación del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo ha provocado cambios significativos en el uso y la cobertura del suelo en su área de influencia, evidenciados por la expansión de zonas agrícolas y la disminución de coberturas naturales, cambios que pueden

ser detectados y analizados mediante herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG).

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Teledetección aplicada al monitoreo de uso de suelo

Desde sus inicios han ocurridos eventos significativos que permiten una comprensión detallada y precisa de los cambios en la superficie de la tierra a lo largo del tiempo (Chuvieco E., 1995), la distinción entre estos conceptos es relevante para el análisis espacial y ambiental, ya que permite comprender tanto la dimensión ecológica como socioeconómica de los cambios en el territorio. El estudio de estas variables posibilita la identificación de transformaciones que pueden tener implicaciones sobre los ecosistemas, la productividad agrícola o el ordenamiento territorial.

La teledetección se ha consolidado como una herramienta eficaz para la identificación y clasificación de áreas de uso del suelo en la superficie terrestre, empleando métodos de interpretación tanto visuales como digitales, y optimizando el análisis de datos multiespectrales. Las imágenes obtenidas por satélite proporcionan información suficiente para trazar con exactitud los límites de las unidades de suelo mediante un proceso sistemático de interpretación. Los elementos presentes en la superficie, responsables de la reflectancia del suelo, son diversos, complejos y variables, actuando de manera conjunta. Entre estos factores se incluyen la rugosidad superficial, la presencia de agregados, el contenido de carbono orgánico, la concentración de hierro, el nivel de humedad, así como la proporción de carbonatos y las características texturales de las capas superficiales (Gema Marco Dos Santos, 2022).

2.1.1 Evolución de la teledetección:

En sus inicios estuvo más relacionada con fines cartográficos y militares con el tiempo se han incorporado nuevos sensores tanto aerotransportados como espaciales (Chuvienco E, 2016)

Primeras etapas (1859-1970)

- **Sensores pasivos y fotos aéreas:** Las primeras aplicaciones de teledetección usaban fotografías aéreas de baja resolución. Estas imágenes eran tomadas desde aviones y requerían un análisis manual, tenían una resolución temporal de aproximadamente 18 días.
- **1859** primeras imágenes tomadas con un globo cautivo, **1909** las imágenes fueron tomadas con una cámara aérea desde un avión, en **1957** lanzamiento del satélite soviético Sputnik, **1960** la NASA pone en órbita al primer satélite de serie TIROS (Chuvienco E, 2016).
- **Satélites meteorológicos:** Los primeros satélites meteorológicos permitieron observar la superficie terrestre desde el espacio, aunque la resolución espacial y temporal era limitada (López-Montecinos, 2019).

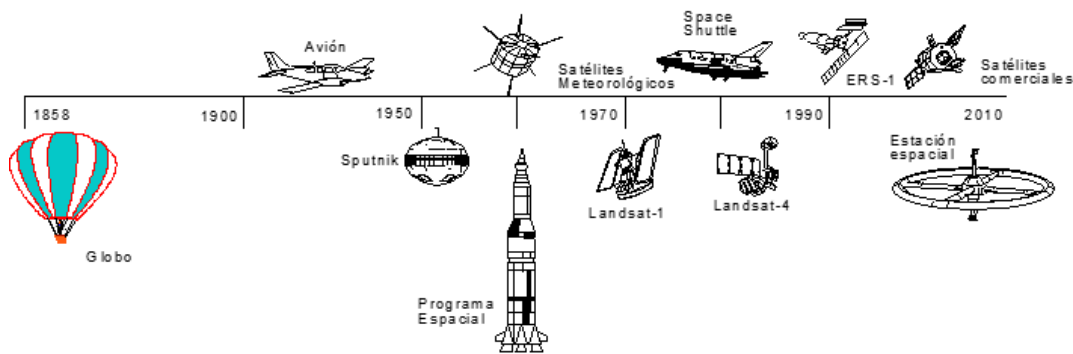
Desarrollo de satélites especializados (1970-1990)

- **Landsat:** En **1972**, la NASA lanzó el satélite ERTS (Earth Resources Technology Satellite) lo bautizaron como Landsat, lo que marcó un hito en la monitorización del uso del suelo. Landsat 8 ofreció imágenes multiespectrales de resolución moderada (30 m), disponibles de forma periódica, lo que permitió observar cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo, la resolución temporal fue de 16 días.
- **Modificación de sensores:** A medida que la tecnología mejoraba, los sensores comenzaron a captar una mayor cantidad de longitudes de onda, lo que permitió diferenciar mejor los

distintos tipos de cobertura y uso del suelo como son el satélite europeo ERS-1 y el satélite canadiense Radarsat (Chuvieco E, 2016).

Figura 2

Evolución histórica de los sistemas de teledetección



Fuente: (Mártinez R., 2016)

2.1.2 Avances en el siglo XXI (2000-presente)

- **Sensores de alta resolución:** Con el lanzamiento de satélites como WorldView (0.3 m de resolución espacial), Sentinel-2 (10-60 m), y otros sistemas de observación de la Tierra, la resolución espacial mejoró drásticamente, permitiendo el monitoreo detallado de áreas urbanas y rurales y la resolución temporal fueron de menorando a 5 días.
- **Big Data y análisis automatizado:** El uso de algoritmos de inteligencia artificial, machine learning y análisis de grandes volúmenes de datos ha mejorado la capacidad de clasificar y analizar el uso del suelo de forma más eficiente y precisa (Almeida Miranda A, 2019).
- **Programa Copernicus:** la implementación del programa y el lanzamiento de los satélites Sentinel-2^a y 2B han transformado la observación de la Tierra ofrece una resolución temporal de 5 días mejorando en latitudes, permitiendo monitorear de manera más efectiva los cambios estacionales (Glez F., 2024).

2.1.3 Tecnologías y plataformas de teledetección:

Las tecnologías de teledetección se agrupan en dos categorías que son sensores pasivos y sensores activos:

2.1.3.1 Sensores activos: A diferencia de los pasivos, los sensores activos generan su propia fuente de energía para iluminar el objeto de estudio. Emiten una señal (generalmente en forma de microondas o láser), que luego es reflejada por la superficie terrestre y captada nuevamente por el sensor. Este tipo de tecnología permite obtener datos en condiciones climáticas adversas o en ausencia de luz solar, siendo útil para monitoreo continuo. Entre los sensores activos más comunes se encuentran el RADAR (Radio Detection and Ranging) y el LiDAR (Light Detection and Ranging), ampliamente utilizados en estudios topográficos, análisis de vegetación y modelado digital del terreno.

Figura 3

Sensor activo



Fuente: (NASA ARSET, n.d.).

2.1.3.2 Sensores pasivos: Los sensores pasivos capturan la radiación electromagnética natural reflejada o emitida por la superficie terrestre, principalmente la proveniente del sol. Estos sensores son ampliamente utilizados para el monitoreo ambiental, ya que permiten obtener información sobre la cobertura vegetal, cuerpos de agua y uso del suelo. Ejemplos de sensores pasivos son los instalados en satélites como Landsat, Sentinel-2 y MODIS, los cuales operan en diversas bandas del espectro electromagnético (Lillesand et al., 2004).

Figura 4

Sensor pasivo



2.1.3 Satélites y sensores más utilizados

2.1.3.1 Satélites

Las imágenes satelitales se elaboran mediante matrices, donde cada celda se encuentra en una de ellas ilustra un píxel, las medidas estarán determinadas por la Resolución espacial de la lámpara. Los sensores registran la radiación electromagnética que surge de las fuentes de radiación electromagnética, varias coberturas y las guarda en cada píxel, conforme a los intervalos de tiempo establecidos en los intervalos de tiempo longitudes de onda, donde el sensor esté configurado para capturar (Néstor Di Leo, 2015).

2.1.3.2 Satélite Landsat

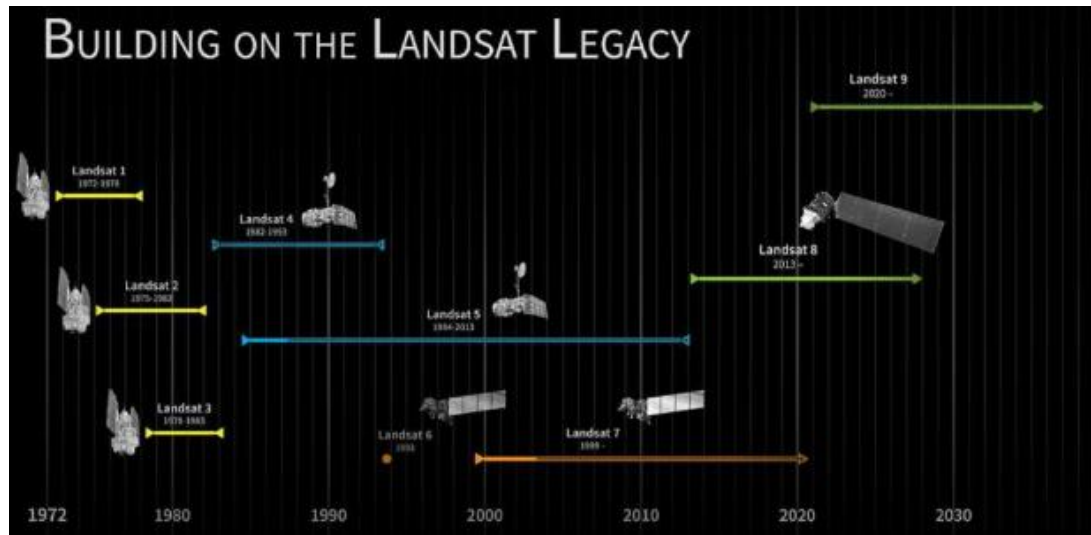
El programa Landsat, desarrollado por la NASA en conjunto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), es una de las misiones de observación terrestre más antiguas y completas. Desde el lanzamiento del primer satélite en 1972 (ERTS-1, luego llamado Landsat 1), esta serie ha proporcionado imágenes multiespectrales de la superficie terrestre con una resolución espacial de 30 metros y una resolución temporal de 16 días (Bravo Morales Nino, 2017).

El satélite **Landsat 8**, lanzado en 2013, incorpora sensores avanzados como el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS), que permiten obtener datos precisos sobre la cobertura del suelo, cuerpos de agua y salud de la vegetación (Chuvieco,

2016). Las imágenes de Landsat se utilizan ampliamente en estudios de cambio de uso del suelo por su consistencia histórica y acceso gratuito.

Figura 5

Misión cronológica Landsat



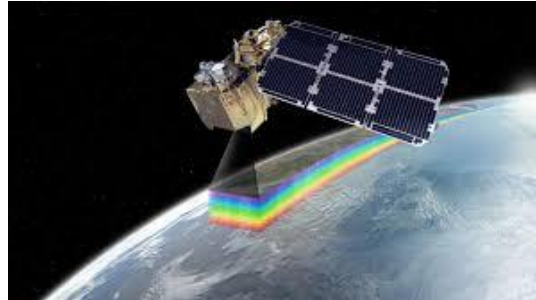
2.1.3.3 Satélite Sentinel-2

La misión Sentinel-2 forma parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Está compuesta por dos satélites: **Sentinel-2A** (lanzado en 2015) y **Sentinel-2B** (en 2017). Ambos operan en órbitas sincrónicas al sol y proporcionan imágenes multiespectrales de alta resolución espacial (10, 20 y 60 metros, según la banda) cada cinco días (Glez F., 2024)

El sensor MSI (MultiSpectral Instrument) del Sentinel-2 permite capturar 13 bandas espectrales que incluyen longitudes de onda visibles, infrarrojas y de borde rojo, lo que resulta útil para la detección de cobertura vegetal, cuerpos de agua, áreas urbanas y cambios estacionales (Bravo Morales Nino, 2017). Las imágenes son gratuitas y accesibles desde plataformas como Copernicus Open Access Hub.

Figura 6

Satélite Sentinel-2 en el espacio



2.1.3.4 Sensor MODIS

El **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)** es un sensor abordo de los satélites Terra (lanzado en 1999) y Aqua (2002), ambos pertenecientes a la NASA. MODIS captura datos en 36 bandas espectrales que abarcan desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico, con resoluciones espaciales de 250, 500 y 1000 metros, dependiendo de la banda. El sensor forma parte de la misión EOS (Earth Observing System) de la NASA, fue creado para capturar imágenes de la atmósfera, océano y superficie, transmitiendo datos en 36 bandas, que van desde el espectro visible hasta el infra rojo térmico, con resoluciones espaciales de 250, 500 y 1000 metros (Song et al., 2021).

Aunque su resolución espacial es menor que la de Landsat o Sentinel-2, MODIS ofrece una alta resolución temporal, proporcionando imágenes casi diarias a escala global. Este sensor es especialmente útil en estudios de monitoreo continuo de vegetación, incendios, temperatura superficial, cambios estacionales y cobertura de nubes.

2.1.3.5 SNAP

El **Sentinel Application Platform (SNAP)** es un software desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus, diseñado para el

procesamiento y análisis de imágenes satelitales, especialmente de la serie Sentinel. Esta plataforma permite realizar operaciones avanzadas como corrección atmosférica, mosaico, reproyección, combinaciones multibanda y generación de índices espectrales.

Una de sus principales ventajas es la compatibilidad con datos ópticos (como Sentinel-2) y radar (como Sentinel-1), lo cual amplía su utilidad en estudios de uso y cobertura del suelo, monitoreo de cultivos, detección de cambios y análisis hidrológicos.

Aunque SNAP es una herramienta gratuita y con una amplia gama de funcionalidades, su principal limitación radica en la velocidad de procesamiento, ya que puede ser lento al manejar grandes volúmenes de datos o procesos multitemporales (Chuvienco, 2016). Sin embargo, su capacidad para integrar algoritmos como Random Forest lo convierte en una opción robusta para estudios de teledetección ambiental.

2.1.4 Índices de vegetación e indicadores relevantes

Los índices espectrales de vegetación son operaciones matemáticas que combinan distintas bandas espectrales con el objetivo de resaltar características específicas de la cubierta vegetal. Estos índices permiten detectar áreas con estrés hídrico, evaluar la biomasa o identificar zonas agrícolas y forestales con mayor precisión (Arthur Charoyan et al., 2022).

2.1.4.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): este índice utiliza la reflectancia en el rojo y en el infrarrojo cercano para evaluar la salud y densidad de la vegetación. El NDVI varía de -1 a 1, donde los valores más altos indican una vegetación más saludable.

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

donde RED ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación roja incidente sobre la superficie vegetal y NIR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es la radiación infrarroja cercana reflejada por ella (Arthur Charoyan et al., 2022).

2.1.4.2 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI): es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección del brillo del suelo. Esto se usa a menudo en regiones áridas donde la cubierta vegetal es baja (Arthur Charoyan et al., 2022).

$$SAVI = \frac{(NIR - Red) * (1 + L)}{(NIR + Red + L)}$$

2.1.4.3 Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI): se utiliza para extraer características construidas y tiene índices que van de -1 a 1. Estos procedimientos son similares a la creación de salida (Arthur Charoyan et al., 2022)..

$$NDVI. NDBI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$$

(Carbajal-Morán & Onofre-Enriquez, 2020).

2.1.4.4 Greenseeker: (green = verde y seek = buscar) el GreenSeeker es un sensor de mano que emite luz roja e infrarroja y calcula el NDVI directamente en campo. Esta herramienta se usa principalmente para el diagnóstico del estado fisiológico de cultivos y niveles de nitrógeno. La lectura instantánea del NDVI permite una rápida evaluación del rendimiento potencial y necesidades nutricionales de los cultivos (Gutiérrez-Soto M., 2011).

2.2 Métodos de análisis de datos para la clasificación del uso y cobertura del suelo con teledetección.

El análisis de imágenes satelitales mediante herramientas de teledetección permite generar mapas temáticos que representan con precisión el uso y cobertura del suelo permiten el análisis espacial temporal de los cambios inducidos por las actividades agrícolas, expansión urbana, combinas imágenes satelitales multitemporales con herramientas SIG facilita la cuantificación e identificación de los tipos de cobertura en la zona de estudio.

El análisis de los datos de clasificación del uso y cobertura del suelo con teledetección se realiza utilizando una variedad de métodos y enfoques que varían un complejidad y tecnología. Estas técnicas permiten la identificación, mapeo y monitoreo de los diferentes tipos de cobertura utilizando imágenes de satélite u otros datos de teledetección (Cárcamo A. y Rejas J., 2015).

2.2.1 Técnicas de clasificación de imágenes:

Existen diversos métodos de análisis de datos que pueden agruparse en técnicas de clasificación supervisada, no supervisada e híbridas, es el proceso de asignar una etiqueta o clase a cada píxel de una imagen de teledetección basándose en características espectrales de superficie la clasificación de imágenes:

2.2.1.1 Clasificación supervisada: La clasificación supervisada consiste en entrenar un algoritmo para que reconozca distintas clases de uso del suelo a partir de muestras previamente definidas por el usuario, denominadas “áreas de entrenamiento”. Estas muestras son seleccionadas a partir de conocimientos previos del área de estudio, imágenes de alta resolución o levantamientos de campo.

Entre los algoritmos más utilizados destaca el Random Forest, que se basa en un conjunto de árboles de decisión. Este enfoque es robusto frente al sobreajuste y ofrece buenos resultados al clasificar datos complejos y multiespectrales (Song et al., 2021).

2.2.1.2 Clasificación No Supervisada: La clasificación no supervisada no requiere muestras previas. El software agrupa automáticamente los píxeles de una imagen en categorías espectralmente similares mediante algoritmos como K-means o ISODATA. Posteriormente, el analista debe interpretar y asignar una categoría temática a cada grupo resultante (Chuvienco, 2016). Aunque es útil en áreas poco conocidas, su precisión puede ser limitada en comparación con los métodos supervisados.

2.2.1.3 Técnicas Híbridas: Este enfoque combina lo mejor de los métodos supervisados y no supervisados. Se inicia con una agrupación automática de datos espectrales y luego se refinan los resultados con información de entrenamiento validada por el usuario. La clasificación híbrida es especialmente útil cuando se trabaja con imágenes de múltiples fuentes o cuando se busca mejorar la precisión en zonas con alta heterogeneidad (Bravo Morales Niño, 2017).

Tabla 1.

Comparación de Técnicas de Clasificación de Imágenes

Técnica	Descripción	Ventajas	Desventajas
Clasificación Supervisada	Utiliza datos de entrenamiento para asignar clases a los píxeles.	Alta precisión con muestras representativas	Requiere conocimiento previo y datos de calidad.
Clasificación No Supervisada	Agrupa píxeles en clases basadas en similares espectrales sin datos de entrenamiento.	Útil cuando no se dispone de datos	Menos precisión y dificultad para interpretar las clases resultantes.

Técnicas Híbridas	Combina métodos supervisados y no supervisados para mejorar la clasificación.	Mayor flexibilidad y precisión en la clasificación	Mayor complejidad en la implementación y análisis.
-------------------	---	--	--

Fuente: (Lizarazo I., 2008)

2.2.2 Análisis temporal y multitemporal

Análisis temporal y multitemporal: Revisión de cómo los análisis temporales ayudan a identificar patrones de cambio de uso de suelo.

2.2.2.1 Análisis temporal: el análisis temporal implica examinar series temporales de imágenes captadas remotamente para observar como las características del uso del suelo cambian a lo largo del tiempo en el canal de riego posibilita identificar como ha variado la distribución de la cobertura, zona agrícola y zonas urbanas. Tomando en cuenta las técnicas de análisis de series temporales que permiten examinar el comportamiento de las señales espectrales junto con los índices de vegetación que son útiles para monitorear la salud de la vegetación y detectar cambios.

2.2.2.2 Análisis multitemporal: el análisis multitemporal se centra en la comparación de imágenes obtenidas en diferentes momentos para estudiar la evolución de un área específica detectando y mapeando los patrones de uso del suelo de manera más precisa (Cárcamo A. & Rejas J., 2015; Cossio Madrid O. & Herrera Palacio J., 2024).

2.2.3 Uso de algoritmos y machine learning.

Uso de algoritmos y machine learning: permite clasificaciones precisas y automatizadas lo que facilita el procesamiento de grandes volúmenes de datos, entre los más empleados:

Random Forest (RF): ensamble de árboles de decisión que maneja datos no lineales y evita el sobreajuste (Belgiu & Drăguț, 2016).

Support Vector Machines (SVM): algoritmo supervisado eficaz en espacios de alta dimensionalidad.

k-Nearest Neighbors (k-NN): clasifica con base similar entre píxeles

Redes Neuronales Artificiales (ANN): modelo capaz de aprender relaciones complejas entre variables espectrales (Belgiu & Drăguț, 2016; Maxwell et al., 2018; Mountrakis et al., 2011).

2.2.4 Índice de coeficiente Kappa

Se trata de un método que analiza el grado de concordancia entre los datos observados y los valores esperados. Este indicador permite realizar ajustes en los resultados con el fin de corregir posibles errores o inconsistencias, proporcionando así una medida cuantitativa del nivel de adecuación del modelo final.

Refleja el grado de precisión del análisis donde un valor alto indica mayor fiabilidad en la clasificación. La fórmula para el cálculo de dicho coeficiente se presenta a continuación

$$k = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Donde

k= Kappa

Po= Precisión total

Pe= Precisión aleatoria

2.2.5 Matriz de confusión

ayuda a evaluar el rendimiento del modelo de clasificación en el machine learning comparando los valores predichos con los valores reales de un conjunto de datos.

2.3 Detección de cambio de uso de suelo y cobertura con teledetección

Mediante imágenes satelitales multitemporales es posible detectar y cuantificar los cambios en el uso y cobertura del suelo (Cárcamo A. & Rejas J., 2015).

2.3.1 Investigaciones internacionales y regionales.

Diversos estudios a nivel internacional y regional han demostrado la utilidad de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis de cambios en el uso y cobertura del suelo, especialmente en contextos agrícolas, urbanos y forestales, por ejemplo:

Assessment of Land Use and Land Cover Change Using GIS and Remote Sensing: A Case Study of Kieni, Central Kenya

Para explorar los cambios en el recubrimiento del suelo debido al uso de la tierra (LULCC) Kieni Sub -Council, en el Centro de Kenia de 1987 a 2017, utilizó un sistema remoto de medición e información geográfica (SIG). Esto se realizó prescribiendo y procesando la imagen Landsat de 1987, 1995, 2000, 2010 y 2017. Los métodos utilizados fueron la identificación y obtención, imágenes, validación y presentación de datos. Se analizaron seis clasificaciones: áreas desnudas, matorrales, tierras agrícolas, bosques, césped y cuerpos de agua. Los resultados mostraron un aumento en los cuerpos de agua, la tierra agrícola y las áreas desnudas y las áreas desnudas con 314.86%, 160.45% y 73.18% en 30 años. Los resultados también mostraron una reducción en las clases de recubrimiento del suelo debido a 45.94%, 38.73% y 29.66% de suelo forestal, matorrales y pastizales, respectivamente. Por

lo tanto, de 1987 a 2017, como se muestra, se cambió el uso de la tierra y la cobertura de investigación demostró que la clasificación de los territorios agrícolas aumentó más de una vez, pero el recubrimiento del bosque se redujo en aproximadamente la mitad (Maina J. et al., 2020).

Análisis multitemporal mediante teledetección espacial y SIG del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Danlí, El Paraíso, en los años 1987 -2011. El municipio de Danlí se ubica en la región oriental de Honduras, la teledetección permite la disponibilidad de imágenes satelitales, que pueden analizarse mediante SIG para establecer automáticamente los cambios en el territorio a lo largo del tiempo, en este artículo describe el análisis multitemporal de Landsat 8 y la evaluación de los cambios en la cobertura del suelo ocurridos en un período de 11 años, entre 1987 y 2011. Esta clasificación se desarrolló a partir de imágenes digitales que se monitorearon en el área de estudio. El mapeo temático presenta los resultados generados e indica los usos dinámicos del suelo en la región. Finalmente, analizamos la metodología aplicada en relación con su impacto como herramienta de diagnóstico importante, así como las tendencias que serán útiles para una mejor toma de decisiones para el desarrollo y el bienestar de la zona y sus habitantes (Cárcamo A. & Rejas J., 2015),

(Salazar Quiroz et al., 2012), (Pabón, 2022).

2.3.2 Estudios específicos en Ecuador.

Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo en la isla Santa Cruz, archipiélago de las Galápagos, periodo 1991 – 2023

Las transformaciones en el uso del suelo ocasionados por la actividad humana ocurren tanto a nivel local como global, en este trabajo se enfoca en analizar de manera temporal los

cambios en el uso del suelo en la Isla Santa Cruz, ubicada en el archipiélago de Galápagos, se llevó a cabo un estudio detallado de las distintas categorías de uso del suelo y su relación con la cobertura vegetal, con el objetivo de comprender su evolución a lo largo del tiempo.

Se emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica junto con la clasificación supervisada de imágenes satelitales gratuitas permitiendo identificar cuatro clases principales de cobertura. Esta metodología facilitó la identificación de cambios ocurridos durante un periodo de 32 años, analizando las causas que motivaron dichas modificaciones.

Los resultados evidenciaron que las zonas estudiadas presentaron variaciones atribuibles tanto a causas naturales como intervención humana destacando la expansión agrícola, actividad ganadera y aumento de población para precisión de los resultados se aplicó la matriz de confusión, se usó el cálculo coeficiente kappa lo cual confirmó una elevada concordancia entre los datos clasificados y la realidad del terreno (González Soto et al., 2024).

2.3.3 *Impacto ambiental de los sistemas de riego comunitarios*

Durante largo tiempo el suministro de agua destinado a las actividades agropecuarias se ha realizado a través de prácticas y saberes tradicionales, no obstante, estas formas de manejo no han logrado resolver ciertos inconvenientes recurrentes entre los que destacan acaparamiento y apropiación de agua, una distribución desigual y un aprovechamiento ineficiente del agua. Estas problemáticas han generado limitaciones en la producción agrícola y han impactado negativamente en las condiciones de vida de los agricultores, siendo que diversas investigaciones se han enfocado en el análisis del riego tecnificado ya sea desde una perspectiva técnica o evaluando el impacto ambiental asociado al uso de

eficiente del agua especialmente al volumen de agua empleado (Domínguez Armijos T. & Paredes Izquierdo E., 2024).

Los sistemas de riego y drenaje están diseñados para gestionar eficientemente los recursos hídricos con el objetivo de impulsar la producción agrícola, los efectos que generan dependen de diversos factores, tales como el tipo de riego empleado, el origen del agua (ya sea superficial o subterránea), su almacenamiento, mecanismos de transporte y distribución, así como métodos utilizados para aplicarla en el terreno agrícola.

Entre los posibles impactos ambientales negativos que tiene grandes proyectos de riego se encuentran la saturación y salinización de los suelos, incremento de enfermedades vinculadas con el agua, el desplazamiento de comunidades o cambios en sus modos de vida, aumento de plagas y enfermedades agrícolas por la alteración del equilibrio natural en épocas secas, formación de microclimas con mayor humedad, expansión e intensificación de la agricultura impulsada por el riego genera erosión del suelo, contaminación de cuerpos de agua con agroquímicos, reducción de calidad de agua y mayor carga de nutrientes provocando proliferación de algas, malezas acuáticas y fenómenos de eutrofización en canales de riego.

Las grandes infraestructuras de riego que implican el represamiento y desvío de ríos pueden ocasionar alteraciones importantes en la dinámica hidrológica y ecológica de las cuencas, la reducción del caudal fluvial puede modificar el uso del suelo en zonas aluviales, afecta la pesca en ríos y estuarios y favorece la intrusión salina en agua continentales y subterráneas cercanas a la costa asimismo el desvío y pérdida de agua destinada al riego disminuye la disponibilidad para otros usuarios aguas abajo como comunidades, industrias y sectores agrícolas.

La disminución del caudal base también reduce la capacidad de diluir aguas residuales domésticas e industriales vertidas generando contaminación y riesgos sanitarios. La degradación de la calidad de agua puede afectar su disponibilidad para otros usos, perjudica la fauna acuática y favorece el crecimiento excesivo de vegetación acuática lo que entorpece la navegación y genera impactos ambientales y sanitarios.

El uso intensivo de aguas subterráneas para riego puede traer consigo consecuencias ambientales, si la extracción supera la tasa natural de recarga provoca el descenso del nivel freático, la subsidencia del terreno (Castillo Vásquez V., 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Información

- ✓ Imágenes ópticas
- ✓ Ortofotografía
- ✓ Polígonos de las parcelas del área de influencia

Equipos

- ✓ GPS
- ✓ CELULAR
- ✓ Ordenador

Softwares

- ✓ QGIS
- ✓ SNAP
- ✓ COPERNICUS open Access Hub
- ✓ Earth Explorer
- ✓ QFIELD
- ✓ Excel

3.2 Metodología

3.2.1 Estimación de la tasa de cambio de la cobertura y uso de suelo con teledetección

La tasa de cambio fue calculada según la metodología propuesta por la FAO (García Hernández et al., 2020). Se utilizaron datos satelitales que proceden de las fechas 2012 y

2023 descargadas de Landsat 8 y Sentinel 2 se realizó la clasificación supervisada con el algoritmo de Random Forest, implementado en SNAP, previo a un proceso de re muestreo, re proyección, recorte del área de estudio, y mosaico con el mismo software. De las muestras identificadas por cada clase y año, se consideró el 80% de las muestras para el entrenamiento y el 20% de muestras restantes para la evaluación por cada clase.

Las clases temáticas utilizadas corresponden a la leyenda oficial del sistema nacional de cobertura y uso de la Tierra (CUT), elaborado por el MAGAP y el MAE en escala 1:100.000, lo que garantiza una estandarización nacional. Esta clasificación incluye categorías jerárquicas desde el nivel I (por ejemplo, bosque, páramo, agrícola) hasta el nivel IV (tipos específicos de cultivo o cobertura),

Tabla 2

Leyenda oficial del sistema nacional de cobertura y uso de tierra

NIVEL I	Bosque, Tierras Agropecuarias, Vegetación Herbácea y Arbustiva, Zona Antrópica, Cuerpos de agua y Otras Tierras
NIVEL II	Bosque Nativo, Plantación Forestal, Vegetación Herbácea, Cultivo Anual, Permanente, Semipermanente, Otras Tierras Agropecuarias, Pastizal, Mosaico Agropecuario, etc.
NIVEL III	Cereales, Leguminosas, Raíces y Tubérculos, Hortalizas, Industrias, Frutas, Tierras en Transición, Pasto Cultivado y Misceláneos
NIVEL IV	Maíz, Café, Cacao, Arroz, Trigo, Granos Andinos, Papa, Banano, Plátano, Tierras Agrícola sin cultivos y Barbecho

Fuente: (MAGAP & MAE, 2015).

La exactitud de la clasificación se estimó con la validación que arroja el propio algoritmo en el software SNAP y consecutivamente para saber la precisión de la clasificación o algún error que se haya producido y conocer las clases de cobertura y uso de suelo que se clasificaron con mayor confianza, con la elaboración de la matriz de confusión e índice

Kappa con las muestras de validación que son independientes a las muestras con el software SNAP y Microsoft Excel.

Aunque no existe una escala oficial universal, se ha propuesto rangos de interpretación cualitativa que permiten valorar el desempeño de una clasificación supervisada. Para la exactitud global están los siguientes rangos:

- < 70% Baja
- 70 – 80% Moderada (aceptable)
- 80 – 90% Buena
- > 90% Excelente

Y para la precisión de clases son los siguientes rangos:

- < 70% Baja
- 70 – 80% Moderada (aceptable)
- 80 – 90% Alta
- > 90% Muy alta

El índice Kappa se le considera un coeficiente más robusto que la exactitud global cuando las clases están desbalanceadas, ya que tiene en cuenta la proporción esperada de coincidencias aleatorias. De acuerdo con la escala propuesta por (Hasmadi et al., 2009; Poveda-Sotelo et al., 2022), el valor del índice Kappa puede interpretarse cualitativamente en los siguientes rangos:

- < 0.00: Concordancia pobre (poor)
- 0.00 – 0.20: Concordancia leve (slight)

- 0.21 – 0.40: Concordancia aceptable (fair)
- 0.41 – 0.60: Concordancia moderada (moderate)
- 0.61 – 0.80: Concordancia sustancial (substantial)
- 0.81 – 1.00: Concordancia casi perfecta (almost perfect)

Los datos obtenidos de la clasificación supervisada por cada año fueron exportados a formato geotiff. Los datos fueron cargados y procesados con el software QGIS, con el cual se calculó la superficie de cada clase por cada año, previo a una conversión de formato ráster a vector. Para la estimación de la tasa de cambio para las clases de cobertura y uso de suelo como: pasto, invernaderos, maíz, misceláneos, bosque, sin vegetación, reservorios y poblados para los diez años del área de estudio se utilizó la siguiente ecuación de la FAO (García Hernández et al., 2020).

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Donde δ_n representa la tasa cambio (para expresar en % se debe multiplicar por 100), S_1 es la superficie en la fecha 1, S_2 es la superficie en la fecha 2, n es el número de años entre las dos fechas.

3.2.2 Monitoreo del desarrollo de los cultivos principales a través de imágenes satelitales.

Para mapear el uso y cobertura de suelo de la zona de estudio de los diez años, se descargaron los datos de las plataformas de acceso gratuito del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y del programa Copernicus de la Unión Europea, que proporcionan datos de la atmósfera corregidos (United States Geological Survey (USGS), n.d.).

El mapeo de las muestras de entrenamiento para incorporar en la clasificación supervisada a las imágenes satelitales proceden de la georreferenciación en campo, la fotointerpretación con técnicos expertos y cartografía del área de estudio. Las muestras fueron distribuidas espacialmente en el área de estudio por cada fecha y la cantidad de muestras por clases se describe en la (Tabla 2), de las cuales el 80% fueron muestras de entrenamiento y el 20% muestras de validación.

Tabla 3.

Mapa de las muestras de las clases de cobertura y uso del suelo

Clases	2012	2023	Total, muestras por Clase
Pasto	1075	439	1514
Invernaderos	708	2061	2769
Maíz	732	79	811
Bosque	608	302	910
Misceláneos	356	198	554
Sin Vegetación	432	245	677
Poblados	241	250	491
Reservorios	29	248	277
Total, muestras por año	4181	3822	8003

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7, se detalla la metodología aplicada para la clasificación supervisada y análisis de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 se estructuró en las siguientes etapas:

Preprocesamiento de imágenes

- Entrada de datos: Se utilizaron imágenes Sentinel-2 (Nivel 2A) y Landsat 8, las cuales fueron sometidas a una corrección atmosférica mediante el software QGIS para eliminar distorsiones provocadas por la atmósfera (Gonzalez & Woods, 2018).

- Recorte y re muestreo: Las imágenes fueron recortadas utilizando la herramienta SNAP para delimitar la zona de estudio. Posteriormente, se realizó un re muestreo de las imágenes a resoluciones espaciales de 10 metros y 20 metros para estandarizar los datos.
- Re proyección: Las imágenes fueron re proyectadas al sistema de coordenadas WGS84/UTM Zona 17S para garantizar la compatibilidad espacial.

Máscara y mosaico

Se aplicó una máscara en SNAP utilizando el archivo vectorial de la zona de estudio. A continuación, las imágenes individuales fueron combinadas en un mosaico para generar un producto continuo de la región.

Clasificación supervisada

- Selección de datos de entrenamiento: Se recolectaron muestras representativas (muestras de entrenamiento) de diferentes clases de cobertura del suelo.
- Clasificación: Se utilizó el algoritmo Random Forest en SNAP, un modelo de aprendizaje supervisado eficiente para la clasificación de imágenes satelitales (Belgiu & Drăguț, 2016).
- Evaluación de precisión: Los resultados de la clasificación fueron validados utilizando muestras de validación para calcular los índices de precisión y la matriz de confusión.

Decisión y refinamiento

En función de los resultados de precisión obtenidos, se evaluó la calidad del modelo. Si la precisión no cumplía con los criterios establecidos, se ajustaría las muestras de entrenamiento y validación para mejorar el modelo. Si los resultados son satisfactorios, se procede con la exportación de las clasificaciones.

Conversión de ráster a vector

Las imágenes clasificadas (ráster) fueron convertidas a formato vectorial utilizando QGIS. Este proceso facilitó la segmentación en áreas de clases correspondientes a distintas fechas de análisis.

Productos finales

Los resultados finales incluyen mapas vectoriales de cobertura del suelo en diferentes periodos, permitiendo evaluar los cambios espaciales y temporales en la zona de estudio (Richards & Jia, 2013).

Tabla 4.

Descripción de los datos aplicados en el área de estudio

Tipo de dato/Formato	Fuente/Resolución espacial/espectral
Datos de teledetección/raster	Landsat 8 30 m/ 5 bandas
	Sentinel 2 10 m/11 bandas
Datos de uso y cobertura de suelo/vector	Cartografía de la cobertura y uso de suelo del Ecuador a escala 1:25000 del MAG del año 2012
	Georreferenciación de las clases de uso y cobertura de suelo en campo
Datos geográficos/vector	División Administrativa
Ortofotografía	Sistema Nacional de Información (SIN)
Datos prediales/vector	Universidad Politécnica Salesiana

Fuente: Elaboración propia

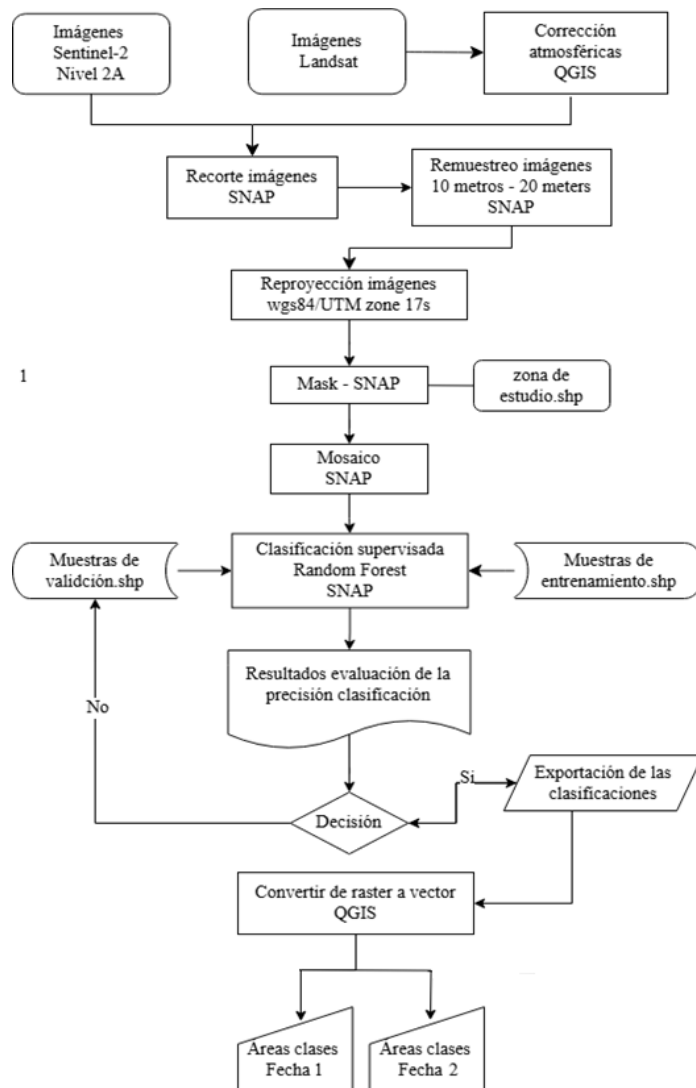
Para el análisis del uso y cobertura del suelo en la zona de estudio se, emplearon datos de teledetección en formato ráster provenientes de los satélites Landsat 8 y Sentinel-2 con resoluciones espaciales de 30 m y 10 m respectivamente y múltiples bandas espectrales, que

proporcionan información espectral clave para la clasificación supervisada. Además, se incorporaron datos vectoriales como cartografía oficial de cobertura del suelo del MAG, junto con georreferenciación de datos recolectados en campo, lo cual permitió validar y complementar la interpretación de imágenes.

También se integraron datos geográficos administrativos, ortofotos y registros prediales, fortaleciendo el análisis espacial mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección.

Figura 7

Proceso metodológico para la clasificación supervisada del uso y cobertura de suelo del territorio en estudio



Fuente: Sandoval Catalina, 2025 Cayambe

3.3 Diseño

La presente investigación adopta un diseño cuantitativo de tipo cuasi-experimental adecuado a la asignación aleatoria de unidades de análisis no es viable (Mousalli, 2016), pero es necesario evaluar la relación causal entre variables analizando el impacto de la de la implementación del canal de riego Cayambe- Pedro Moncayo como variable independiente y cambios en el uso y cobertura del suelo como variable dependiente.

La intervención de la investigación se manifiesta en la manipulación metodológica de la variable independiente por medio de la selección y análisis de imágenes multitemporales aplicando técnicas de teledetección y SIG para la identificación, cuantificando así los cambios en la cobertura del suelo (Fernández-García et al., 2014).

Para fortalecer la validez interna del estudio se han implementado diversas estrategias:

- Selección de imágenes satelitales con características homogéneas en resolución espacial.
- Aplicación de técnicas de clasificación asegurando la precisión en la identificación de las clases de uso y cobertura del suelo (Melita et al., 2023).

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población.

La población está representada el total del área de influencia del canal de riego Cayambe- Pedro Moncayo, las áreas geográficas que han experimentado cambios en el uso y cobertura de suelo durante el tiempo de estudio incluyendo los diferentes tipos de ecosistemas urbano, agrícola, forestal, etc.

3.4.2 Muestra.

La muestra está definida por la zona de influencia directa e indirecta del canal, de los cuales se han seleccionado áreas representativas mediante buffers sobre los tipos de suelo que son áreas urbanas, agrícolas, y forestales en periodos de tiempo como imágenes satelitales de los últimos 10 años.

3.5 Variables

Tabla 5.

Variables de estudio

Variable	Tipo	Descripción
Uso y cobertura del suelo (UCS)	Dependiente	Tipo y extensión de las clases de cobertura
Tiempo	Independiente	Momentos temporales de los años
Distancia canal de riego	Independiente	Distancia medida en km o buffers
Uso de canal de riego	Cualitativa	Información referencial para interpretación de patrones

Fuente: Elaboración propia

3.6 Recogida de datos

La recolección de datos se realiza mediante fuentes secundarias de libre acceso:

- Imágenes satelitales: imágenes multiespectrales de landsat 8 y sentinel-2, portal USGS (European Space Agency (ESA), n.d.; United States Geological Survey (USGS), n.d.).
- Cartografía base: mapas del Instituto Geográfico Militar
- Información del canal riego: documentación técnica y cartografía(Gadip Municipio Cayambe, n.d.).

3.7 Protocolos

- Descarga de imágenes: selección de imágenes libres de nubes
- Clasificación supervisada: aplicación de algoritmo Random forest en software QGIS
- Validación de resultados: Calculo de matriz de confusión e índice kappa para determinar la precisión de las clasificaciones
- Análisis SIG: superposición de mapas por año, cálculo de cambios y tasa de cambio por categoría.
- Elaboración de mapas: representación cartográfica de los resultados

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Leyenda sistema de clasificación de la cobertura de la Tierra

A través del análisis de las coberturas en la zona de estudio se identificaron 8 categorías basadas en la adaptación de descriptores relacionados con aspectos fisonómicos, tipos de cultivo, características visuales o morfológicas, la leyenda utilizada permitió una clasificación adecuada de las distintas clases de cobertura mostrando flexibilidad para adaptarse a categorías definidas.

Tabla 6.

Coberturas en el área de estudio

Cobertura	Descripción
Pasto	Área cubierta por vegetación herbácea de bajo porte, generalmente utilizada para el pastoreo de ganado o como cobertura vegetal permanente.
Rosas	Terreno destinado al cultivo especializado de rosas, caracterizado por una disposición ordenada en surcos o invernaderos.
Maíz	Superficie agrícola dedicada al cultivo de maíz, identificable por patrones lineales de siembra y cambios estacionales en la densidad del follaje.
Bosque	Zonas densamente cubiertas por vegetación arbórea ya sea nativa o secundaria con estructura vertical compleja y escasa intervención humana.
Misceláneos	Áreas con cobertura mixta o sin un uso específico que puede incluir vegetación secundaria.
Otros	Superficies que no encajan en las categorías anteriores como áreas de recreación, instalaciones rurales o espacios sin clasificación clara.
Reservorio	Cuerpo de agua artificial o natural utilizados para almacenamiento de agua, irrigación, pesca o abastecimiento local.
Poblados	Zonas urbanizadas o semiurbanizadas con infraestructura permanente como vivienda, calles y servicios básicos

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de cambio de uso de suelo 2012 - 2023

El área total de estudio comprende 24381,59 hectáreas, en las cuales se analizó el cambio de uso del suelo en ocho clases distintas (Pasto, Rosas, Maíz, Bosque, Misceláneos, Otros, Reservorio y Poblados). Para ello se calcularon las superficies en hectáreas correspondientes a los años 2012 y 2023, así como la tasa de cambio y los porcentajes de variación, con el fin de identificar las transformaciones más relevantes dentro del área de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

La clase pasto disminuye de 5177,07 ha en 2012 a 3841,97 ha en 2023 lo que representa pérdida sugiere un proceso de reemplazo por cultivos o asentamientos humanos, lo cual puede tener implicaciones en el equilibrio ecológico del paisaje. La clase rosa ha aumentado 2468,93 ha en 2023, reflejando una expansión de la floricultura, actividad económica dominante en la zona de estudio, que probablemente ha desplazado áreas de pastizales y misceláneos.

La clase maíz tiene un mayor crecimiento duplicando su superficie de 2311,98 ha en 2012 a 5236,71 ha en 2023, este cambio evidencia un claro proceso de intensificación agrícola y uso eficiente del recurso hídrico proporcionado por el canal de riego. La clase bosque presenta una leve disminución, aunque no es una pérdida abrupta, si es preocupante desde el punto de vista de la conservación, ya que estos ecosistemas desempeñan un papel clave en la regulación hídrica y climática local.

La clase misceláneos aumenta de 3048,63 ha en el año 2012 a 3334,51 ha en el año 2023, puede ser absorbiendo áreas anteriormente dedicadas al pastoreo o cultivo extensivo. La clase otros se observan que disminuye de forma significativa, lo que indica un

reordenamiento del uso del suelo, posiblemente asociado a una reclasificación o cambios hacia usos específicos como agricultura o urbanización.

En reservorio se muestra un crecimiento de 31,00 ha en 2012 a 889,26 ha de 2023 refleja una inversión en infraestructura. En la clase poblados se muestra una expansión de 215, ha en 2012 a 1369,03 ha en 2023, mostrando un proceso de urbanización y crecimiento demográfico. En la clase sin dato se muestra una reducción lo que permite una mejora en la calidad y cobertura de la información espacial.

Tabla 7.

Taza de cambio de los años 2012-2023

Clase	Área_ha año_2012	Área_ha año_2023	Tasa cambio	Tasa cambio %	Porcentaje Áreas_2012	Porcentaje Áreas_2023
Pasto	5177,07	3841,97	-0,027	-2,67	21,23	15,76
Rosas	2134,32	2468,93	0,013	1,33	8,75	10,13
Maíz	2311,98	5236,71	0,077	7,72	9,48	21,48
Bosque	4342,79	3914,36	-0,009	-0,94	17,81	16,05
Misceláneos	3048,63	3334,51	0,008	0,82	12,50	13,68
Otros	7082,64	3306,96	-0,067	-6,69	29,05	13,56
Reservorio	31,00	889,26	0,357	35,68	0,13	3,65
Poblados	215,37	1369,03	0,183	18,310	0,88	5,62
Total	24343,80	24361,73			99,85	99,92
sin dato	37,79	19,86			0,15	0,08
					100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia

4.3 Sin dato

En la clasificación supervisada de cobertura y uso del suelo, la categoría ‘Sin dato’ suele deberse principalmente a nubosidad persistente, sombras o limitaciones del sensor que impiden registrar información espectral válida (Zhu & Woodcock, 2014).

4.4 Análisis de la clasificación supervisada

Se evaluó la precisión de la clasificación supervisada de cobertura y uso del suelo para los años 2012 y 2023 mediante matrices de confusión y métricas de validación como la exactitud global, el índice Kappa, la exactitud y precisión por clase.

La exactitud global en el año 2023 fue de 94,75%, lo que representa una mejora significativa respecto al año 2012, que alcanzó un 88,82%. Esta diferencia indica un mejor desempeño en la clasificación reciente. Asimismo, el coeficiente Kappa aumento de 0,87 en 2012 a 0,94 en 2023, reflejando un alto grado de concordancia entre los datos clasificados y los datos de referencia.

Tabla 8.

Exactitud e índice Kappa de la clasificación supervisada

	2012	2023
Precisión global (overall Accuracy)	88,82	94,75
Kappa	0,87	0,94

Fuente: Elaboración propia

La exactitud producto representa el porcentaje de píxeles clasificados correctamente dentro de cada clase respecto al total real de esa clase. Para cada año de se detalla en la tabla 8, la exactitud. Comparativamente, se observa una mejora generalizada en todas las clases respecto a 2012, por ejemplo, la clase Misceláneos paso de una exactitud productora de 47,73 en 2012 a 83,33 en 2023, mostrando un avance notable.

Tabla 9.

Exactitud producto

Exactitud producto								
Años/Cultivos	Bosque	Maíz	Misceláneos	Pasto	Rosas	Poblados	Reservorio	Otros usos
2012	98,85	91,67	47,73	90,79	99,08	75,00	83,33	89,36
2023	93,88	92,42	83,33	94,12	97,48	100,00	100,00	94,44

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9, se muestra la precisión por clase, que representa la proporción de píxeles asignados correctamente dentro de cada categoría respecto al total clasificado como tal, también reflejo mejoras importantes. Los resultados obtenidos en 2023 evidencian una clasificación más precisa y robusta, atribuida posiblemente a mejoras en la calidad de las imágenes, mayor disponibilidad de muestras, o uso de algoritmos más refinados. Las clases que representan valores por debajo del 90% (como Reservorios u otros usos) podrían estar asociados a confusión espectral o a la similitud con coberturas adyacentes, por lo cual se recomienda un análisis más detallado.

Tabla 10.

Precisión por clase

Precisión por clase		
Cultivos/Años	2012	2023
Bosque	90,53	93,88
Maíz	84,62	96,83
Misceláneos	84,00	89,29
Pasto	83,13	92,31
Rosas	90,76	98,31
Poblados	100,00	95,00
Reservorios	83,33	83,33
Otros usos	93,33	89,47

Fuente: Elaboración propia

4.5 Mapas

Desde las figuras 8 a la 14, se presenta los mapas de uso y cobertura de suelo de los años 2012 y 2023, obtenidos en el estudio.

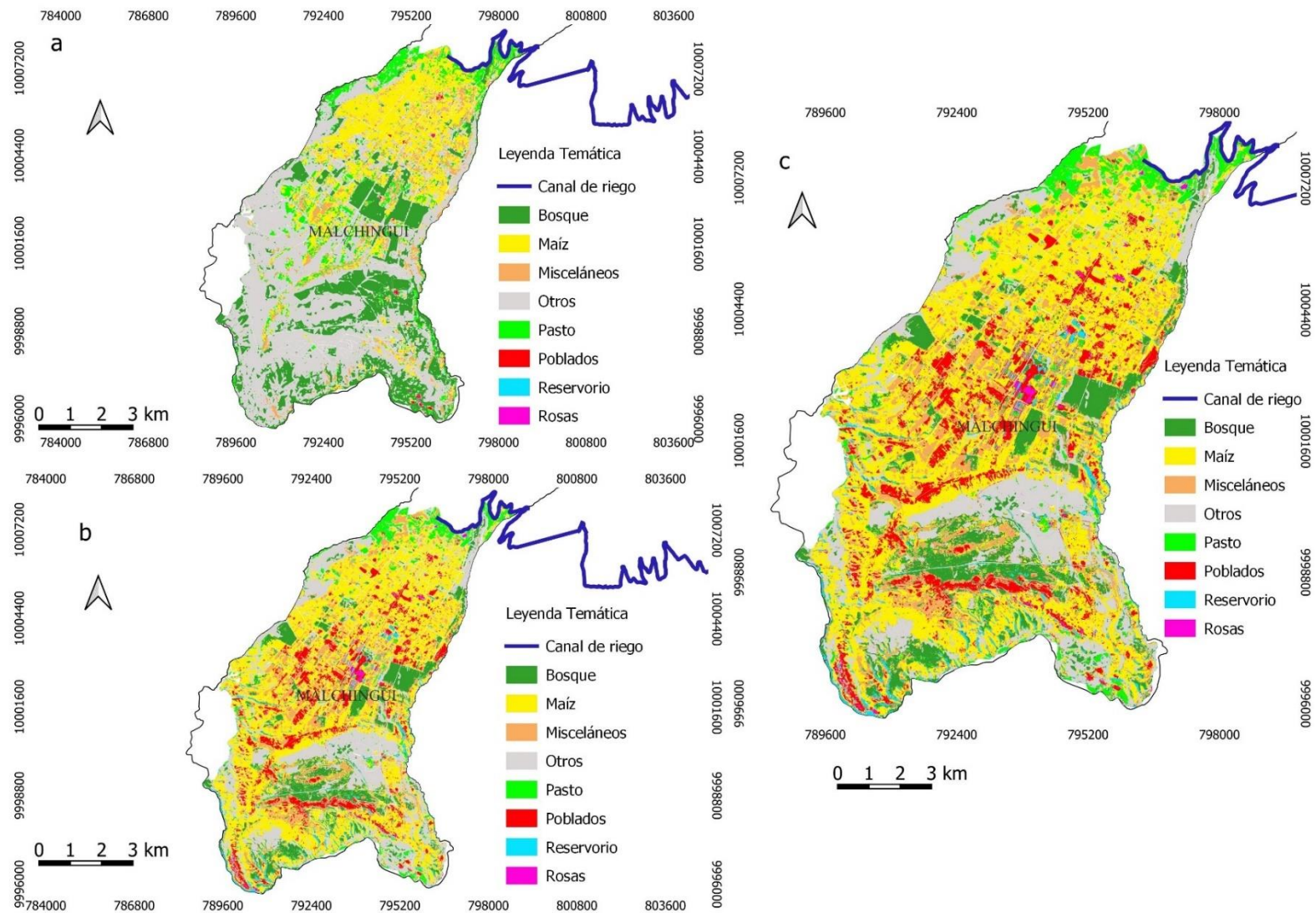


Figura 8

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Malchingui del Cantón Pedro Moncayo

Tabla 11.

Tabla comparativa de la Parroquia Malchingui de los años 2012 2023

Parroquia Malchingui			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	540,07	Pasto	329,60
Rosas	9,40	Rosas	74,19
Maíz	1179,14	Maíz	2473,16
Bosque	1659,16	Bosque	803,34
Misceláneos	563,64	Misceláneos	1064,97
Otros	2833,63	Otros	1383,97
Reservorio	0,54	Reservorio	142,06
Poblados	16,79	Poblados	533,41
Sin dato	4,50	Sin dato	2,77
Total	6806,87	Total	6086,87

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia Malchingui

Se observa

una transformación significativa del paisaje rural. El pasto disminuye considerablemente de 540,07 ha en el 2012 a 329,60 ha en el 2023, lo que refleja un abandono o reemplazo de áreas ganaderas. A la par, el maíz casi se duplica de 1179,14 ha en el 2012 a 2473,16 ha en el 2023, evidenciando una intensificación agrícola. La superficie de bosque se reduce drásticamente de 1659,16 ha en el 2012 a 803,34 ha en el 2023, una pérdida preocupante desde el punto de vista ambiental.

Los misceláneos y los poblados muestran fuertes incrementos de 563,64 ha en el 2012 a 1064,97 ha en el 2023 y de 16,79 ha en el 2012 a 533,41 ha en el 2023, respectivamente, lo que sugiere procesos de urbanización y expansión no planificada. El crecimiento del área de reservorios de 0,54 ha en el 2012 a 142,06 ha en el 2023 indica mejoras en infraestructura hídrica, probablemente asociadas al canal de riego. La clase otros se reducen notablemente, lo que podría estar relacionado con una reclasificación del suelo hacia usos más específicos.

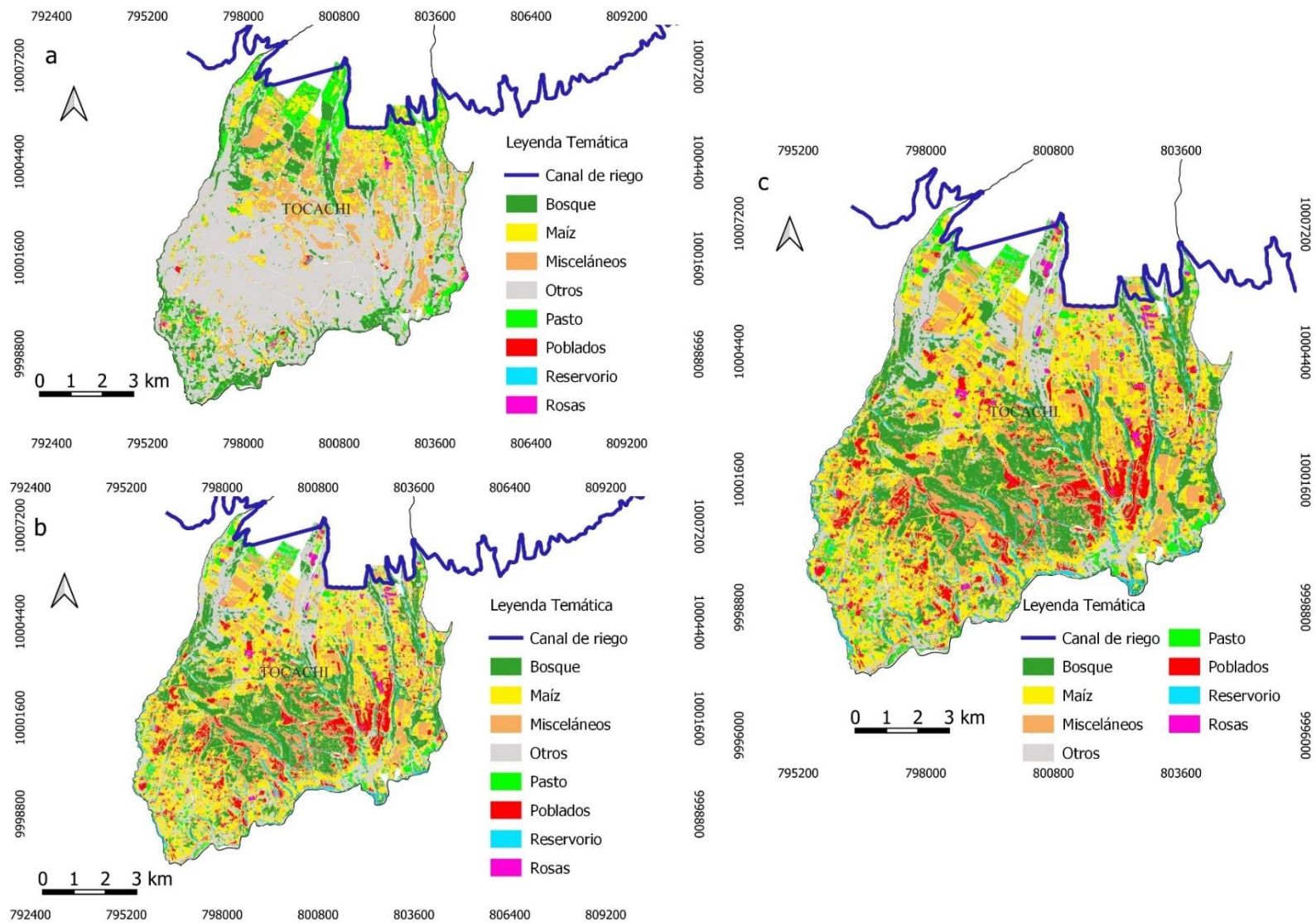


Figura 9

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Tocachi del Cantón Pedro Moncayo

Tabla 12.

Tabla comparativa de la Parroquia Tocachi de los años 2012 2023

Parroquia Tocachi			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	525,55	Pasto	264,01
Rosas	29,58	Rosas	94,89
Maíz	587,88	Maíz	1444,05
Bosque	1061,98	Bosque	1254,27
Misceláneos	934,75	Misceláneos	1224,01
Otros	2878,23	Otros	1174,87
Reservorio	1,39	Reservorio	191,17
Poblados	26,70	Poblados	403,21
Sin dato	4,50	Sin dato	0,49
Total	6050,96	Total	6050,96

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia Tocachi

Tocachi presenta una notable expansión del uso agrícola, especialmente del maíz de 587,88 ha en 2012 a 1444,05 ha en 2023 y un incremento importante en rosas de 29,58 ha en 2012 a 94,89 ha en 2023. Aunque se reduce el pasto de 525,55 ha en 2012 a 264,01 ha en el 2023, el bosque aumenta levemente de 1061,98 ha en el 2012 a 1254,27 ha en el 2023, lo que podría deberse a procesos de regeneración natural o a políticas de conservación.

La superficie de misceláneos también crece, lo cual podría indicar una transición hacia usos mixtos. El aumento en poblados de 26,70 ha en el 2012 a 403,21 ha en el 2023 y en reservorios aumenta de 1,39 ha en el 2012 a 191,17 ha en el 2023, refleja una transformación productiva e hídrica vinculada al aprovechamiento del canal de riego confirma una expansión urbana y de infraestructura. La reducción de la clase otros de 2878,23 ha en el 2012 a 1174,87 ha en el 2023 respalda esta transformación hacia usos definidos.

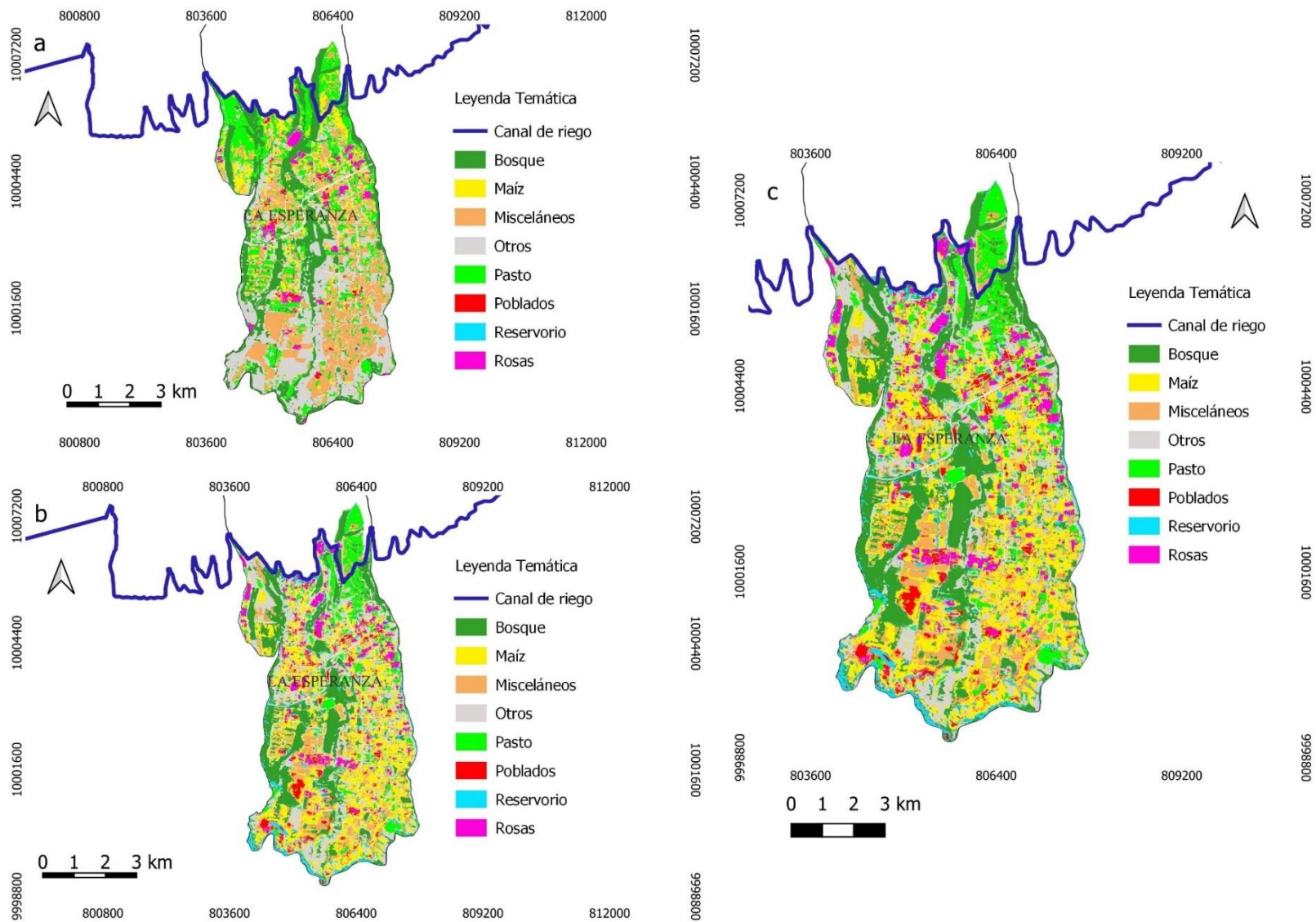


Figura 10

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia La Esperanza del Cantón Pedro Moncayo

Tabla 13.

Tabla comparativa de la Parroquia La Esperanza de los años 2012 2023

Parroquia La Esperanza			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	393,66	Pasto	209,55
Rosas	59,42	Rosas	133,63
Maíz	165,79	Maíz	471,92
Bosque	443,90	Bosque	473,27
Misceláneos	541,52	Misceláneos	300,36
Otros	476,01	Otros	358,54
Reservorio	0,56	Reservorio	86,95
Poblados	23,65	Poblados	71,11
Sin dato	2,89	Sin dato	2,03
Total	2107,40	Total	2107,40

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia La Esperanza

En esta parroquia se observa una marcada intensificación del cultivo de maíz de 165,79 ha en 2012 a 471,92 ha en 2023 y rosas de 59,42 ha en 2012 a 133,63 ha en 2023. El pasto disminuye considerablemente de 393,66 ha en 2012 a 209,55 ha en 2023, lo que sugiere cambios en la vocación productiva. La cobertura de bosque aumenta levemente de 443,90 ha en 2012 a 473,27 ha en 2023, indicando cierta estabilidad ambiental.

Los misceláneos y la clase otros disminuyen, lo que podría representar una consolidación de usos definidos. El incremento de poblados de 23,65 ha en 2012 a 71,11 ha en 2023 y de reservorios de 0,56 ha en 2012 a 86,95 ha en 2023, apunta a la expansión urbana e inversiones en almacenamiento hídrico.

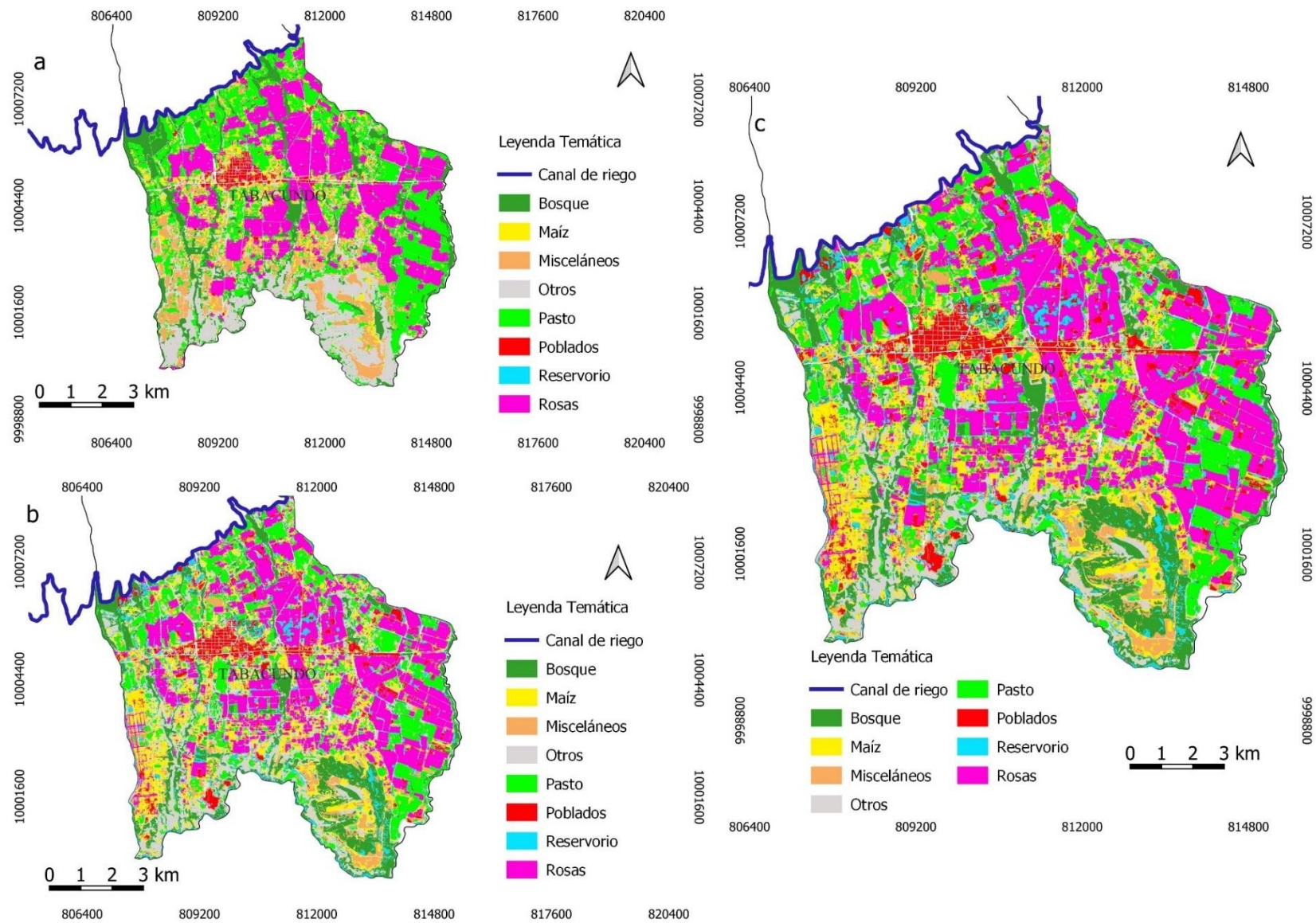


Figura 11

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Tabacundo del Cantón Pedro Moncayo

Tabla 14.

Tabla comparativa de la parroquia Tabacundo de los años 2012 2023

Parroquia Tabacundo			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	1195,22	Pasto	748,80
Rosas	1171,03	Rosas	1260,75
Maíz	271,87	Maíz	561,45
Bosque	636,25	Bosque	680,68
Misceláneos	659,69	Misceláneos	450,76
Otros	823,68	Otros	604,82
Reservorio	7,81	Reservorio	282,69
Poblados	111,59	Poblados	290,28
Sin dato	6,90	Sin dato	3,80
Total	4884,04	Total	4884,03

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia Tabacundo

Tabacundo se destaca por una importante expansión de maíz de 271,87 ha en 2012 a 561,45 ha en 2023 y un leve crecimiento en el cultivo de rosas de 1171,03 ha en 2012 a 1260,75 ha en 2023. El pasto y la clase misceláneos disminuyen considerablemente, reflejando una conversión de usos. La cobertura de bosque crece ligeramente de 636,25 ha en 2012 a 680,68 ha en 2023, mientras que la clase otros y sin dato se reducen.

El crecimiento de reservorios de 7,81 ha en 2012 a 282,69 ha en 2023 y poblados de 111,59 ha en 2012 a 290,28 ha en 2023 evidencia una urbanización progresiva y mejora en infraestructura para manejo del agua.

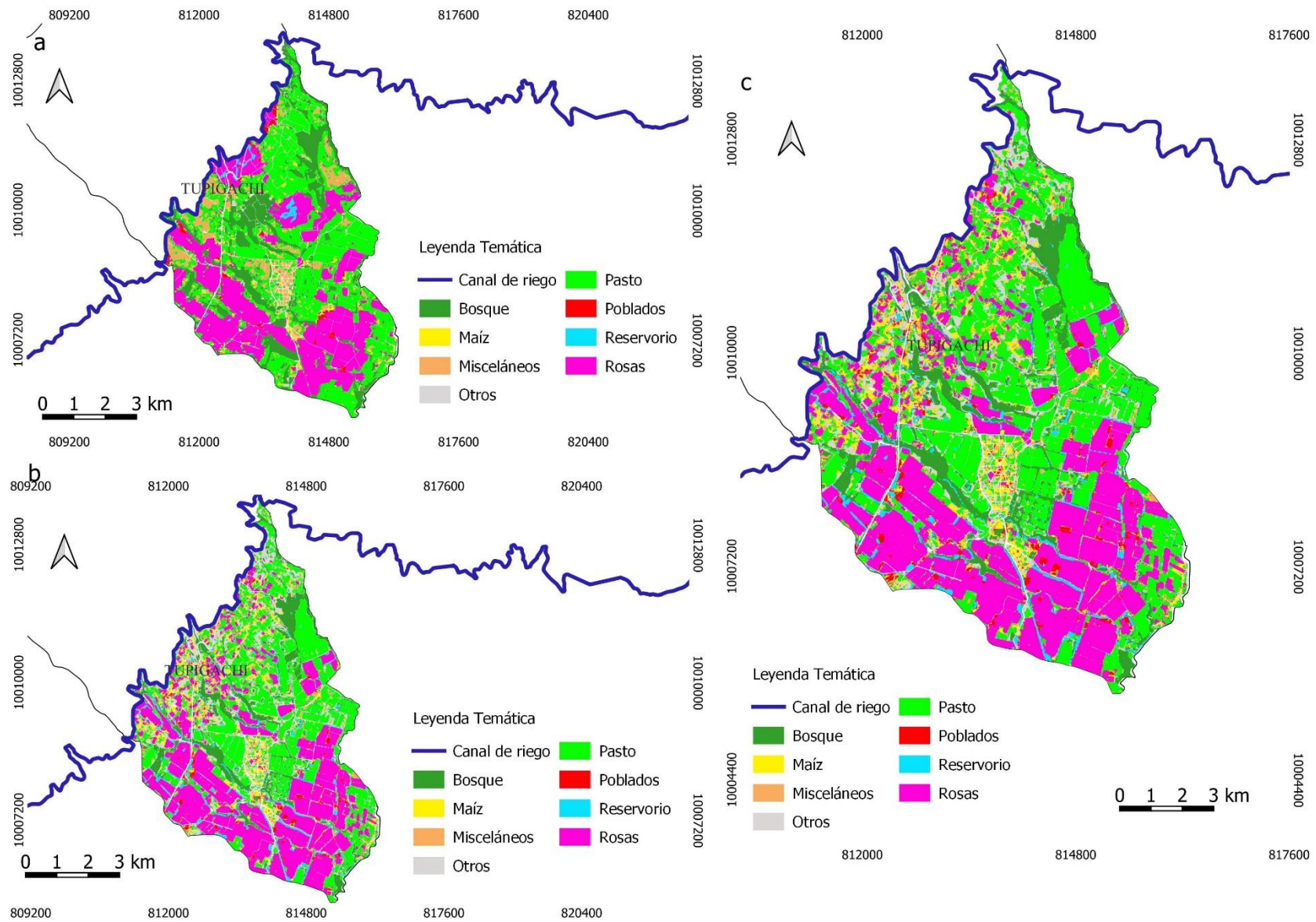


Figura 12

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Tupigachi del Cantón Pedro Moncayo

Tabla 15.

Tabla comparativa de la parroquia Tupigachi de los años 2012 2023

Parroquia Tupigachi			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	769,34	Pasto	634,36
Rosas	663,40	Rosas	698,17
Maíz	35,49	Maíz	114,93
Bosque	368,58	Bosque	223,44
Misceláneos	188,46	Misceláneos	97,39
Otros	14,73	Otros	177,16
Reservorio	16,60	Reservorio	96,83
Poblados	26,31	Poblados	42,21
Sin dato	6,30	Sin dato	4,70
Total	2089,20	Total	2089,20

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia Tupigachi

Esta parroquia muestra una caída en bosque de 368,58 ha en 2012 a 223,44 ha en 2023 y misceláneos, junto con un aumento del uso agrícola, especialmente en maíz de 35,49 ha en 2012 a 114,93 ha en 2023 y un pequeño crecimiento en rosas. El pasto también disminuye, mientras que la categoría otros muestran un aumento notable de 14,73 ha en 2012 a 177,16 ha en 2023, posiblemente debido a reclasificaciones.

La superficie de reservorios crece de 16,60 ha en 2012 a 96,83 ha en 2023, y la de poblados aumenta levemente. Este patrón sugiere una transformación moderada del paisaje rural, combinada con infraestructura hídrica.

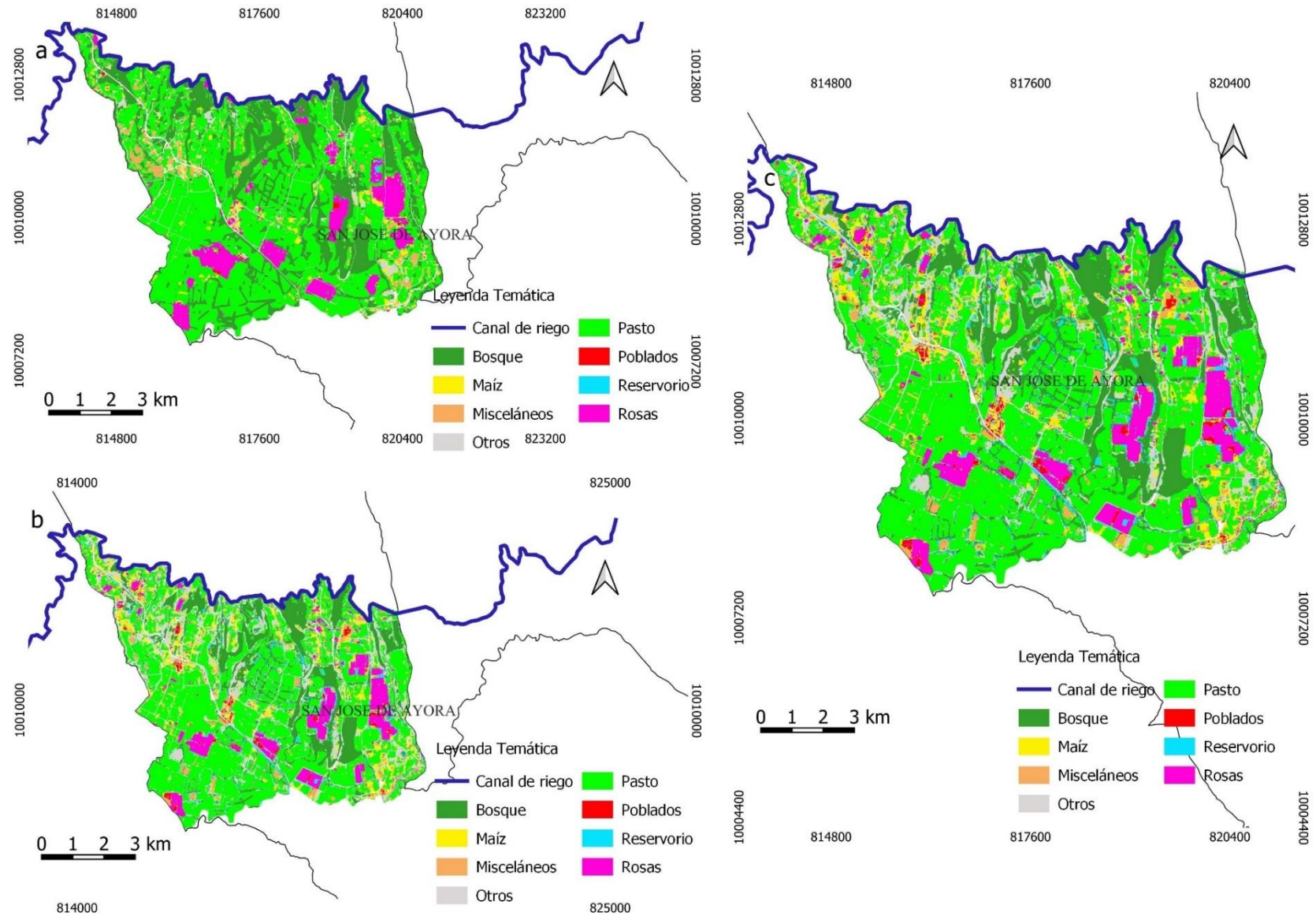


Figura 13

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Ayora del Cantón Cayambe

Tabla 16.

Tabla comparativa de la parroquia Ayora de los años 2012 2023

Parroquia Ayora			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	1283,51	Pasto	616,99
Rosas	195,51	Rosas	187,19
Maíz	54,76	Maíz	138,76
Bosque	117,92	Bosque	344,49
Misceláneos	63,79	Misceláneos	143,22
Otros	46,11	Otros	237,85
Reservorio	2,66	Reservorio	79,89
Poblados	8,48	Poblados	26,63
Sin dato	5,50	Sin dato	3,23
Total	1778,24	Total	1778,25

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia Ayora

Los resultados para la parroquia Ayora presenta una reducción drástica de pasto (de 1283,51 ha en 2012 a 616,99 ha en 2023, lo que evidencia un cambio radical en la cobertura natural. El cultivo de maíz duplica su extensión de 54,76 ha en 2012 a 138,76 ha en 2023, mientras que el bosque aumenta significativamente de 117,92 ha en 2012 a 344,49 ha en 2023, lo cual es un indicador positivo para la conservación ecológica.

Las clases misceláneos aumenta de 63,79 ha en 2012 a 143,22 ha en 2023, otros, y reservorio muestran aumentos importantes, lo que indica nuevos usos del suelo y gestión de recursos hídricos. También se registra un crecimiento en poblados de 8,48 ha en 2012 a 26,63 ha en 2023.

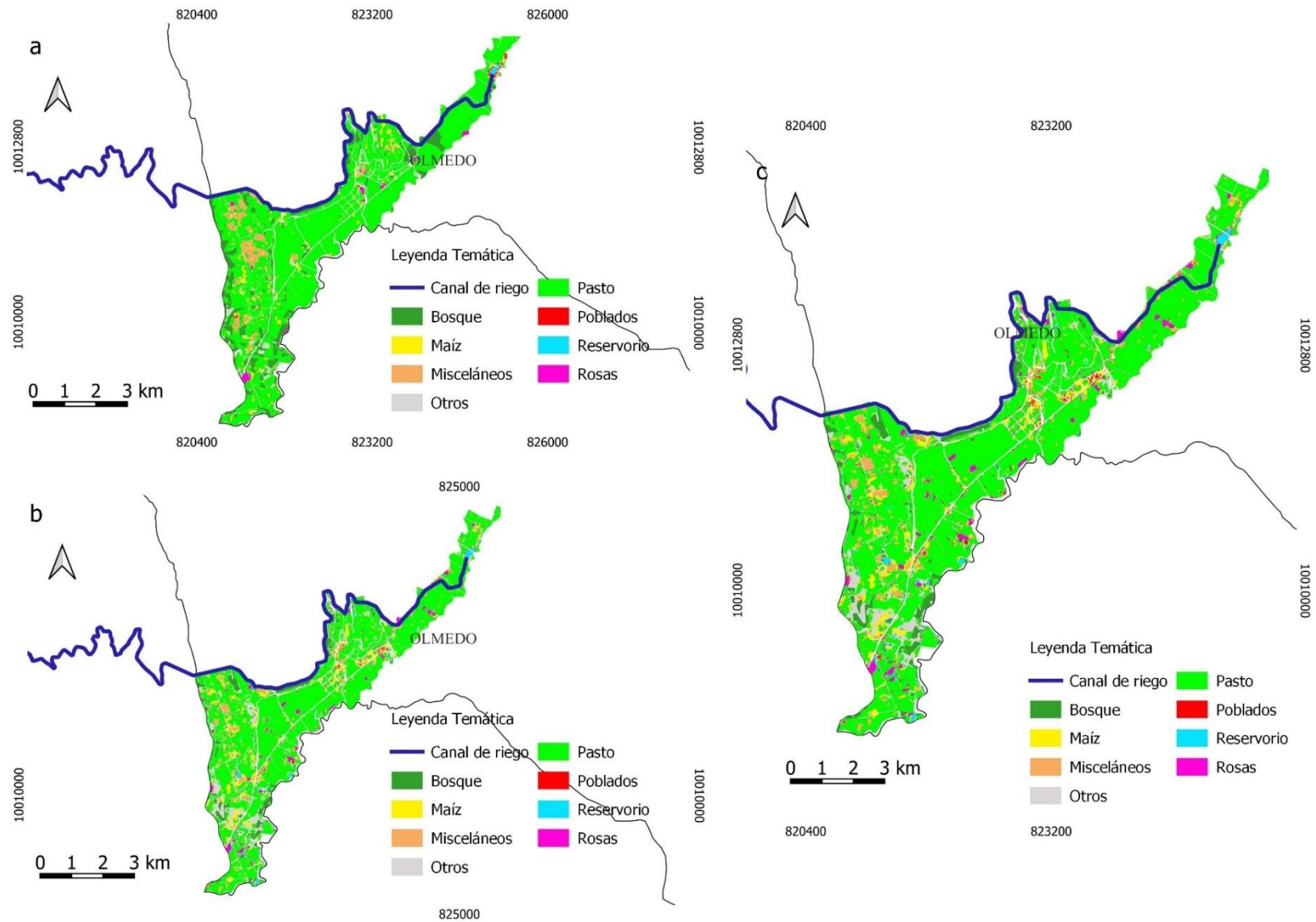


Figura 14

Mapa comparativo de los años 2012(a), 2023(b) y 2012-2023(c), de la Parroquia Olmedo del Cantón Cayambe

Tabla 17.

Tabla comparativa de la parroquia Olmedo de los años 2012 2023

Parroquia Olmedo			
Clase	Área_ha año_2012	Clase	Área_ha año_2023
Pasto	469,72	Pasto	477,71
Rosas	5,98	Rosas	20,11
Maíz	17,06	Maíz	32,44
Bosque	105,23	Bosque	34,86
Misceláneos	46,54	Misceláneos	43,39
Otros	10,25	Otros	41,68
Reservorio	1,44	Reservorio	9,67
Poblados	1,85	Poblados	2,18
Sin dato	6,80	Sin dato	2,84
Total	664,87	Total	664,87

Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos de la parroquia Olmedo

Olmedo es la parroquia que presenta la menor variación en el uso y cobertura del suelo durante el período 2012–2023. El pasto permanece relativamente estable 469,72 ha en 2012 a 477,71 ha en 2023, al igual que los misceláneos de 46,54 ha en 2012 a 43,39 ha en 2023. Sin embargo, se registra un incremento en rosas y maíz, mientras que el bosque disminuye significativamente de 105,23 ha en 2012 a 34,86 ha en 2023.

La clase otros crecen de 10,25 ha en 2012 a 41,68 ha en 2023, al igual que los reservorios y poblados, aunque en menor escala. Sin dato refleja una mejora en la precisión de los datos.

4.6 Discusión

4.6.1 Análisis de los datos en general de las parroquias

Este estudio revela una transición de usos naturales hacia usos más intensivos y económicos, aunque la superficie del territorio se mantiene constante las variaciones

se reflejan en procesos de transformación vinculados al desarrollo agrícola, ganadero, urbano y cambio en la gestión de los recursos.

El análisis multitemporal del uso y cobertura del suelo entre los años 2012 y 2023 evidencia transformaciones sustanciales en la dinámica territorial del área de estudio. Sin embargo, la superficie total no muestra un cambio significativo en todas las parroquias se detectan redistribuciones de las distintas clases de cobertura lo que se entiende como una reorganización del uso del suelo más que una expansión.

La más marcada es la reducción de la cobertura pasto que en casi todas las parroquias se han analizados, esta disminución podría estar asociada a una reducción en actividades ganaderas o la conversión de estos terrenos hacia otros usos ya sean construcción, cultivos comerciales, etc. Los bosques presentan una dinámica mixta, en algunas parroquias ha disminuido, y en otras han crecido ligeramente puede ser por influencia de presión urbana, cambios en la cobertura vegetal.

Se destaca un notable incremento en la cobertura maíz que en muchas parroquias se duplicó del año 2012 al año 2023, lo que refleja una intensificación de la actividad agrícola, posiblemente impulsada por el acceso al riego proporcional del canal y una creciente demanda en productos agrícolas. La cobertura rosa de carácter más especializado muestra un crecimiento constante, tiene más expansión de la floricultura como actividad económica clave para la región.

Se observa un aumento significativo en reservorios lo que se relaciona con la infraestructura hídrica desarrollada durante este periodo, lo que respalda la hipótesis de una mayor capacidad de almacenamiento y gestión de agua para el desarrollo agrícola y urbano. Los poblados han crecido considerablemente en varias parroquias lo que se asocia a procesos de urbanización, sin embargo, no ha sido uniforme y en ciertos casos se mantiene dentro de límites. (Campaña Hidalgo B., 2024).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El análisis multitemporal realizado en los 10 años reveló las modificaciones notables sobre el uso y cobertura del suelo en el área de influencia del canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo, la disponibilidad de riego ha sido un factor clave en la expansión de la actividad agrícola, forestal y expansión de zonas urbanas.
- En conjunto con la combinación de imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica (SIG) permitió un entendimiento profundo de los procesos de cambio en el territorio facilitando en conjunto con la metodología la detección de tendencias como la medición precisa de las superficies.
- El uso del algoritmo de clasificación supervisada Random Forest ofreció resultados confiables alcanzando precisiones globales permitiendo diferenciar las áreas agrícolas, forestales y urbanas en territorios con alta diversidad espacial.
- Este estudio permitió detectar un aumento importante de las superficies de actividad agrícola, forestal y zona urbana refleja una transformación en el uso del suelo con fines productivos y presión sobre los recursos naturales.
- La elaboración de los mapas temáticos por parroquia permitió de forma clara ilustrar los cambios ocurridos durante los 10 años siendo clave para la gestión territorial y la toma de decisiones en el ámbito local.

5.2 Recomendaciones

- Es importante que los gobiernos locales aprovechen los resultados de este estudio para formular políticas de ordenamiento territorial que equilibren el crecimiento agrícola y forestal con la protección ambiental.
- Promover la capacitación en teledetección y sistemas de información geográficas entre los técnicos de juntas de riego, municipios y gobiernos parroquiales para fortalecer la gestión del territorio, implementado un sistema de seguimiento continuo que permita evaluar y anticipar los impactos del cambio del uso del suelo.
- Los mapas generados pueden servir como herramientas técnicas para delimitar zonas con enfoque de vocación de uso agrícola, conservación o desarrollo urbano, ampliar el análisis en impactos sociales y económicos para una evaluación integral del canal de riego y su influencia en el territorio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Almeida Miranda A. (2019). *Desarrollo de la Teledetección en Ecuador*.
<https://Periodicoopcion.Com/Desarrollo-de-La-Teledeteccion-En-Ecuador/>.
- Anderson, R. G., Vázquez-Amábile, G., & Huffaker, R. (2021). Remote sensing applications for environmental sustainability. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1–16.
- Arthur Charoyan, Del Pilar, M., & Rodríguez, G. (2022). *UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID TRABAJO FIN DE MÁSTER*.
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *Revista ISPRS de Fotogrametría y Teledetección*, 24–31.
- Bonilla D., & Taípe J. (2021). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL A PARTIR DE LA IMAGEN SATELITAL SENTINEL-2 Y LANDSAT-8 MEDIANTE EL USO DE ALGORITMOS DE CLASIFICACIÓN, EN LA RESERVA ECOLÓGICA EL ÁNGEL Y RESERVA ECOLÓGICA ARENILLAS*.
- Bravo Morales Nino. (2017). *Geomatica Ambiental SRL, QGIS mas el complemento clasificación Semi-automático Teledetección LANDSAT, SENTINEL2, ASTER LIT y MODISEspacial*.
<https://sites.google.com/view/geomatica-ambiental-srl/>
- Campaña Hidalgo B. (2024). *Análisis multitemporal de cobertura de uso del suelo Cayambe-Pedro Moncayo*.
- Carbajal-Morán, H. I., & Onofre-Enriquez, F. I. (2020). *Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja Determination with satellite images of the normalized difference vegetation index of the Pampas-Tayacaja valley Determinação com imagens de satélite do índice de vegetação de diferença normalizada do vale Pampas-Tayacaja Ciencias técnica y aplicada Artículo de investigación*. 5(1), 228–245.
<https://doi.org/10.23857/pc.v5i1.1893>
- Cárcamo A., & Rojas J. (2015). *Análisis multitemporal mediante teledetección espacial y SIG del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Danlí, El Paraíso, en los años 1987-2011*.
- Castillo Vásquez V. (2014). *Evaluación de impactos ambientales en el sistema de riego Vilcabamba*.
- Chuvieco E. (1995). *FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION*.
- Chuvieco E. (2016). *FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO*.
- Cossio Madrid O., & Herrera Palacio J. (2024). *Evaluación de algoritmos de aprendizaje automático en la clasificación supervisada de imágenes satelitales multitemporales para el análisis de coberturas de suelo en Rionegro, Colombia*.
- Domínguez Armijos T., & Paredes Izquierdo E. (2024). *Riego tecnificado y su impacto en la calidad de vida de los hogares: un estudio de caso de la Junta de Riego y Drenaje Zhilla. Universidad de Cuenca*.
- European Space Agency (ESA). (n.d.). *Sentinel Application Platform (SNAP) [Software]*.
- Fernández-García, P., Vallejo-Seco, G., Livacic-Rojas, P. E., & Tuero-Herrero, E. (2014). Validez Estructurada para una investigación cuasi-experimental de calidad. Se cumplen 50 años de la presentación en sociedad de los diseños cuasi-experimentales. *Anales de Psicología*, 30(2), 756–771. <https://doi.org/10.6018/analesps.30.2.166911>
- GAD Pichincha. (2020, October 2). *Firmamos la recepción definitiva del Canal de Riego Cayambe – Pedro Moncayo*.
- Gadip municipio cayambe. (n.d.). *Gadip Municipio de Cayambe*.

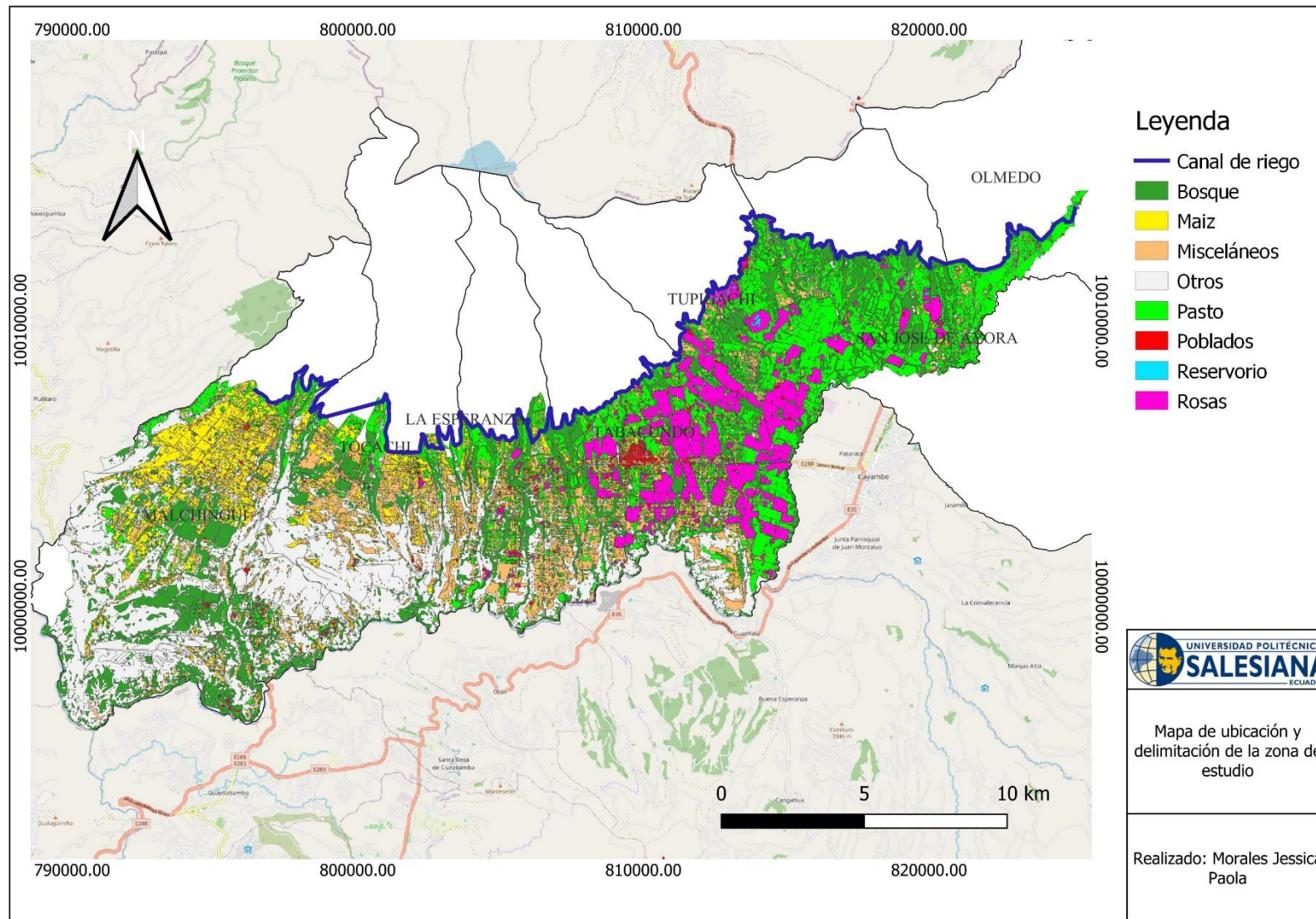
- García Hernández, M., Pérez Magaña, A., Martínez Corona, B., & Gutiérrez Villalpando, V. (2020). Cambio de uso de suelo y variabilidad climática en Chiantzingo, Puebla, México. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 6(11), 1295–1315. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v6i11.9421>
- García-Santos V., V. E. , C. V. , B. M. A. , y C. (2012). *Revista de Teledetección*.
- Gema Marco Dos Santos. (2022). *APLICACIÓN DE TELEDECCIÓN Y GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA EN ZONAS SEMIÁRIDAS*.
- Glez F. (2024). *Evolución y Futuro de la Teledetección*. <https://Evenor-Tech.Com/Evolucion-y-Futuro-de-La-Teledeteccion/>.
- Gonzalez, R., & Woods, R. (2018). Procesamiento de imágenes digitales. *Pearson Educación, Nueva York, 4ta edición*.
- González Soto, F., Ullón, D., Yaguachi Alarcón, A. L., Ramos Alcivar, J. A., Montenegro Benalcázar, V. E., & Loján Córdova, J. I. (2024). Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo en la isla Santa Cruz, archipiélago de las Galápagos, periodo 1991 - 2023. *Ciencia y Tecnología*, 17(1), 1–9. <https://doi.org/10.18779/cyt.v17i1.521>
- Gutiérrez-Soto M., C.-P. E. , R.-M. W. , A.-A. J. M. (2011). *EL GREENSEEKER Y EL DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE SALUD DE LOS CULTIVOS I*.
- Hasmadi, M., Hz, P., & Mf, S. (2009). *Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data*.
- Hidalgo, K., Chontasí, L., Jaramillo, J., Guerrero, R., Gallardo, J., Robalino, L. &, & Quiroz, H. (2018). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial PDOT 2018-2025. *Documento Ejecutivo Para Autoridades Provinciales*, 3–200.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition*.
- Lizarazo I. (2008). *Clasificación de la cobertura y uso del suelo urbano usando imágenes de satélite y algoritmos supervisados de inteligencia artificial*.
- López-Montecinos, C. (2019). *Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>
- MAGAP & MAE. (2015). *Mapa de cobertura y uso de la tierra*. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/06/Mapa-de-Cobertua-y-uso-de-la-Tierra.pdf>
- Maina J., Wandiga S., Gyampoh B., & Charles KKG. (2020). Assessment of Land Use and Land Cover Change Using GIS and Remote Sensing: A Case Study of Kieni, Central Kenya. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 09(01). <https://doi.org/10.35248/2469-4134.20.9.270>
- Maxwell, A. E., Warner, T. A., & Fang, F. (2018). Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. In *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 39, Issue 9, pp. 2784–2817). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>
- Melita, D., Torres-Vega, L. del C., & Ruiz Romero, J. (2023). Aplicación de diseños cuasi-experimentales a la evaluación de dos proyectos de intervención social: “Relaciones en positivo” e “Informacarpa.” In *Ejemplos de método en investigaciones sociales. Aplicaciones en psicología organizacional y del trabajo y en psicología social. Volumen II*. Universidad del Valle. <https://doi.org/10.25100/peu.858.cap18>
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247–259.
- Mousalli, G. (2016). *Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2633.9446>
- NASA ARSET. (n.d.). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota) NASA ARSET*. Retrieved June 6, 2025, from <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/capacity-building/arset>

- Néstor Di Leo. (2015). Artículo de divulgación Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión. In *AGROMENSAJES* (Vol. 41).
- Pinos Arévalo Nancy Jaqueline. (2017). *Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca*.
- Poveda-Sotelo, Y., Bermúdez-Cella, M. A., & Gil-Leguizamón, P. (2022). Evaluation of supervised classification methods for the estimation of spatiotemporal changes in the Merchán and Telecom paramos, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51–72. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>
- Richards, J. A., & Jia, X. (2013). Remote sensing digital image analysis: An introduction . *Springer*, 5th ed.
- Salazar Quiroz, E., Gámez, S., González, N., & Siles, P. (2012). Caracterización de la vegetación arbórea y arbustiva con potencial de servicios ambientales, al este del lago de Nicaragua. *Nexo Revista Científica*, 25(1), 02–08. <https://doi.org/10.5377/nexo.v25i1.782>
- Song, X. P., Huang, W., Hansen, M. C., & Potapov, P. (2021). An evaluation of Landsat, Sentinel-2, Sentinel-1 and MODIS data for crop type mapping. *Science of Remote Sensing*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100018>
- United States Geological Survey (USGS). (n.d.). *EarthExplorer [Base de datos]*.
- Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>

7. ANEXOS

Anexo. 1

Mapa cobertura del suelo año 2012



Anexo. 2

Mapa cobertura del suelo año 2023

