



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Análisis del cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota en la  
microcuenca del Río Luis, Provincia de El Oro.**

**FAJARDO JUMBO JEAN CARLOS  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AGILA SANDOVAL ARIANA LISSBETH  
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Análisis del cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota  
en la microcuenca del Río Luis, Provincia de El Oro.**

**FAJARDO JUMBO JEAN CARLOS  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AGILA SANDOVAL ARIANA LISSBETH  
INGENIERA AMBIENTAL**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Análisis del cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota  
en la microcuenca del Río Luis, Provincia de El Oro.**

**FAJARDO JUMBO JEAN CARLOS  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AGILA SANDOVAL ARIANA LISSBETH  
INGENIERA AMBIENTAL**

**TUSA JUMBO EDUARDO ALEJANDRO**

**MACHALA  
2024**

# Análisis del cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota en la microcuenca del Río Luis, Provincia de El Oro.

*by* Eduardo A. Tusa J.

---

**Submission date:** 07-Aug-2024 06:35AM (UTC-0500)

**Submission ID:** 2380929572

**File name:** TESIS\_FINAL\_F--\_1.docx (4.83M)

**Word count:** 12800

**Character count:** 67345

# Análisis del cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota en la microcuenca del Río Luis, Provincia de El Oro.

## ORIGINALITY REPORT

5%

SIMILARITY INDEX

4%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

1%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1 Submitted to Universidad Catolica del Norte <1%  
Student Paper

2 qdoc.tips <1%  
Internet Source

3 fliphtml5.com <1%  
Internet Source

4 www.slideshare.net <1%  
Internet Source

5 dokumen.pub <1%  
Internet Source

6 Submitted to Universidad Nacional del Centro <1%  
del Peru  
Student Paper

7 "XIX reunión nacional SELPER-México: <1%  
Memorias", Universidad Nacional Autonoma  
de Mexico, 2011  
Publication

8 reddecuador.ambiente.gob.ec <1%  
Internet Source

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

Los que suscriben, FAJARDO JUMBO JEAN CARLOS y AGILA SANDOVAL ARIANA LISSBETH, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Análisis del cambio de uso de suelo mediante Percepción Remota en la microcuenca del Río Luis, Provincia de El Oro., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

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

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

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

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



FAJARDO JUMBO JEAN CARLOS

0706514098



AGILA SANDOVAL ARIANA LISSBETH

0705841310

### **Dedicatoria**

Esta tesis está dedicada especialmente a mi madre Marcia Sandoval, pilar fundamental y fuente inagotable de amor y apoyo.

En este trayecto su presencia ha sido una luz que me ha guiado y la fortaleza que me ha impulsado a seguir luchando por mis sueños. Con profunda nostalgia y agradecimiento le dedico este proyecto por ser una persona maravillosa e importante para mi vida. Este logro es para ella, mi mayor inspiración, mi confidente y mi mejor amiga. Valoro considerablemente su sacrificio, paciencia, bondad y apoyo incondicional a lo largo de este camino.

**Ariana Lissbeth Agila Sandoval**

Este trabajo va dedicado a mis padres que siempre se han encontrado a mi lado en cada paso que he dado sin importar la ruta, siempre han sido una guía para mí, me han apoyado incondicionalmente en cada decisión tomada en busca mis metas a cumplir. A lo largo de mi formación académica siempre me inculcaron valores como la perseverancia para no rendirme a pesar de todos los tropiezos que se me han presentado en mi camino. En general a cada uno de los miembros de mi familia que estuvieron para mí, le dedico este logro como parte de un homenaje a su entrega y sacrificio a mi persona.

**Jean Carlos Fajardo Jumbo**

### **Agradecimientos**

En el transcurso de esta investigación, han sido fundamentales estas personas en mi desarrollo académico, por ello, quiero expresarles mi agradecimiento:

A mi familia, especialmente a mi mamá Marcia Sandoval, por su amor inquebrantable, inspiración y apoyo constante en los momentos más difíciles.

A mi abuelita Rosita Eumelia Díaz, mi ángel, por guiar mis pasos y haber creído en mí desde el primero momento.

A mi compañero de titulación Jean Carlos Fajardo, por su confianza, paciencia y amistad durante este proceso.

A mi tutor de Titulación Ing. Eduardo Tusa, por su sabiduría, guía y experiencia enriquecedora.

A mis docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental, por compartir sus conocimientos, valiosas sugerencias y por su confianza en mi trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a Dios, por todas las oportunidades que me ha dado y por guiarme en cada paso.

#### **Ariana Lissbeth Agila Sandoval**

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios por estar presente en mis decisiones de día a día, de igual manera agradezco a esta Universidad donde me he preparado para formarme como profesional, a los docentes que me guiaron e impartieron su conocimiento que me servirá cuando me desempeñe en algún puesto laboral a futuro. Por último, un especial agradecimiento a mis padres que son una pieza fundamental de mi vida, sin el apoyo de ellos me sería imposible llegar a este punto en mi formación académica.

#### **Jean Carlos Fajardo Jumbo**

## RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis para evaluar el cambio de uso de suelo en la microcuenca del río Luis, provincia de El Oro, en un lapso de tiempo entre 2000, 2010, 2020. Por medio del proceso de clasificación supervisada de las imágenes de teledetección Landsat se identificaron alteraciones precisas y, con los índices espectrales NDVI y NDWI se encontraron las zonas con mayor vegetación y humedad. Dentro de la microcuenca se identificaron cinco usos de suelo: cuerpo de agua, bosque, vegetación arbustiva y herbácea, tierra agropecuaria y zona antrópica. Se denotó el avance de la frontera agrícola, mientras que para las zonas boscosas se observó una disminución durante los periodos de estudio. Se utilizó la plataforma de QGIS para la obtención de los datos sobre los elementos mencionados anteriormente. Este estudio demostró una influencia notable en el cambio de uso de suelo por actividades agropecuarias. Para el año 2010 se representó un avance notorio de tierras agropecuarias y una minimización de la cobertura de bosques, mientras que los valores del NDVI y NDWI evidenciaron que cuando hay saludable vegetación también hay presencia de humedad. A partir del estudio, se puede establecer que la reducción de la cobertura de bosque debido a la modificación del uso de suelo tiene repercusiones negativas para la integridad de la microcuenca.

***Palabras clave* - cambio de uso de suelo, NDVI, NDWI, clasificación supervisada.**

## ABSTRACT

In the present study, an analysis was carried out to evaluate land use change in the micro-watershed of the Luis river, El Oro province, over a period of time between 2000, 2010 and 2020. Through the process of supervised classification of Landsat remote sensing images, precise alterations were identified and, with the NDVI and NDWI spectral indices, the areas with greater vegetation and humidity were found. Five land uses were identified within the micro-watershed: water body, forest, shrub and herbaceous vegetation, agricultural land and anthropic zone. The advance of the agricultural frontier was noted, while for the forested areas a decrease was observed during the study periods. The QGIS platform was used to obtain data on the aforementioned elements. This study showed a notable influence on the change in land use due to agricultural and livestock activities. For the year 2010 there was a notorious advance of agricultural land and a minimization of forest cover, while the NDVI and NDWI values showed that when there is healthy vegetation there is also the presence of moisture. From the study, it can be established that the reduction of forest cover due to land use modification has negative repercussions for the integrity of the micro-watershed.

***Keywords* - land use change, NDVI, NDWI, supervised classification.**

## TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN .....	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
Antecedentes .....	17
Evolución de la Teledetección .....	18
III. JUSTIFICACIÓN.....	22
IV. OBJETIVOS .....	23
A. Objetivo general .....	23
B. Objetivos específicos.....	23
V. HIPÓTESIS .....	24
Hipótesis nula:.....	24
Hipótesis alterna:.....	24
VI. MARCO TEÓRICO.....	25
A. Factores ambientales .....	25
1) Uso y cobertura del suelo .....	25
2) Tipos de coberturas del suelo .....	25
3) Bosques y sus características.....	26
4) Cuencas hidrográficas.....	26
5) Modelos y análisis de cambios de uso de suelo.....	26
B. Sistemas de información .....	27
1) Sistemas de Información Geográfica.....	27
2) Análisis multitemporal .....	27
3) Percepción remota (teledetección).....	28
4) Sensores Remotos.....	28
5) Imágenes de satélite Landsat .....	28

6) Clasificación de imágenes .....	29
7) Corrección Radiométrica.....	29
8) Corrección geométrica.....	29
9) Corrección atmosférica.....	30
10) Índices espectrales.....	30
11) NDVI.....	30
12) NDWI.....	30
VII. METODOLOGÍA.....	31
A. ANTECEDENTES CONTEXTUALES .....	31
B. Materiales y Equipos .....	32
C. Fase metodológica.....	33
1) Primera Fase: Análisis de esquemas que describen el cambio de uso de suelo por medio de revisión literaria.....	33
2) Segunda Fase: Descripción cartográfica del cambio de uso de suelo mediante análisis multitemporal.....	33
a) Obtención de imágenes satelitales y software empleado .....	33
b) Preprocesamiento de imágenes .....	34
c) Corrección de error de banda .....	34
d) Corrección atmosférica y Pansharepening (SCP) .....	35
e) Aplicación de enmascaramiento de nubes.....	36
f) Recorte de Área de Estudio.....	36
g) Combinación de bandas .....	37
h) Clasificación de cobertura de uso de suelo .....	37
i) Clasificación de imágenes satelitales.....	38
j) Elección de regiones de interés .....	38

k)    Análisis Multitemporal.....	39
3) Tercera Fase: Evaluación de índices espectrales mediante la aplicación del NDVI Y NDWI.....	39
a)    Análisis estadístico.....	39
VIII. RESULTADOS .....	42
A.    Índices espectrales.....	45
B.    Análisis estadístico de índices espectrales .....	50
IX DISCUSIÓN .....	55
A.    Diagnóstico del cambio de uso de suelo .....	55
B.    Comparación de variabilidad en los índices espectrales .....	57
X. CONCLUSIONES.....	61
XI. RECOMENDACIONES .....	63
REFERENCIAS .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Fig 1: Línea de tiempo de las metodologías aplicadas en la percepción remota.....	21
Fig. 2 Tipos de cobertura .....	25
Fig 3: Mapa de ubicación del área de estudio .....	31
Fig 4 Filtros para la descarga de imágenes satelitales.....	33
Fig 5 Nubosidad presente en una imagen satelital .....	34
Fig 6 Complemento SCP.....	35
Fig 7 Resultado de imagen aplicando el Pansharepening .....	36
Fig 8 Complemento Cloud Masking .....	36
Fig 9 Resultado de corta por mascara de la microcuenca con las bandas .....	37
Fig 10 Mapa de cobertura de la Microcuenca Río Luis 2000 .....	42
Fig 11 Mapa de cobertura de la Microcuenca Río Luis 2010 .....	43
Fig 12 Mapa de cobertura de la Microcuenca Río Luis 2020 .....	44
Fig 13 Mapa de NDVI de la Microcuenca Río Luis 2000 .....	46
Fig 14 Mapa de NDVI de la Microcuenca Río Luis 2010 .....	46
Fig 15 Mapa de NDVI de la Microcuenca Río Luis 2020 .....	47
Fig 16 Mapa de NDWI de la Microcuenca Río Luis 2000 .....	48
Fig 17 Mapa de NDWI de la Microcuenca Río Luis 2010 .....	48
Fig 18 Mapa de NDWI de la Microcuenca Río Luis 2020 .....	49
Fig 19 Coberturas presentes en la microcuenca del Río Luis en el periodo 2000-2020 .....	55
Fig 20 Valores del NDVI en la microcuenca del Río Luis en el periodo 2000-2020 .....	58
Fig 21 Valores del NDWI en la microcuenca del Río Luis en el periodo 2000-2020 .....	59

## TABLA DE ILUSTRACIONES

$NDVI = (NIR - ROJO)/(NIR + ROJO)$ (1).....	39
$NDWI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$ (2).....	39
$float(B5 - B4)/(float B5 + B4)$ (3).....	45
$float(B4 - B3)/(float B4 + B3)$ (4).....	45
$float(B3 - B5)/(float B3 + B5)$ (5).....	47
$float(B2 - B4)/(float B2 + B4)$ (6).....	47

## LISTA DE TABLAS

TABLA I BANDAS DE LANDSAT-7 Y LANDSAT-8 .....	29
TABLA II DATOS DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	31
TABLA III MATERIALES Y EQUIPOS .....	32
TABLA IV TIPOS DE COBERTURAS .....	37
TABLA V ÁREA DE LAS DIFERENTES COBERTURAS ESTUDIADAS EN CADA AÑO DE ANÁLISIS.....	44
TABLA VI DATOS ESTADÍSTICOS DE NDVI Y NDWI PARA CADA PERIODO DE ESTUDIO.....	49
TABLA VII PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS DESCONOCIDAS IGUALES NDVI 2000-2010 .....	51
TABLA VIII PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS DESCONOCIDAS DIFERENTES NDVI 2010-2020 .....	52
TABLA IX PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS DESCONOCIDAS IGUALES NDWI 2000-2010 .....	53
TABLA X PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS DESCONOCIDAS DIFERENTES NDWI 2010-2020 .....	54

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>IGM</b>	Instituto Geográfico Militar
<b>MAATE</b>	Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica
<b>MAG</b>	Ministerio de Agricultura y Ganadería
<b>NDVI</b>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
<b>NDWI</b>	Índice de Agua de Diferencia Normalizada
<b>NIR</b>	Infrarrojo Cercano
<b>SCP</b>	Semiautomatic Classification Plugin
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>SWIR</b>	Infrarrojo de Onda Corta
<b>USGS</b>	United States Geological Survey

## I. INTRODUCCIÓN

La microcuenca del río Luis es una zona que ha experimentado una afectación severa por el cambio de uso de suelo. En el transcurso de los últimos años, se ha generado un aumento de la urbanización, la actividad agropecuaria y la minería. Estos factores afectan a la integridad de la microcuenca y, en consecuencia, dejan un déficit hídrico que amenaza a la sostenibilidad. También, esto ha provocado una reducción de cobertura vegetal. La modificación de uso de suelo no solo altera el paisaje, sino también compromete al líquido vital para la subsistencia, principalmente de la comunidad local [1].

El uso del suelo y la disponibilidad del recurso hídrico se relacionan mutuamente, puesto que, al precipitarse como parte del ciclo hidrológico, el agua se drena desde diferentes tipos de uso de suelo, trayendo consigo distintas clases de contaminantes generados por actividades cotidianas, dando lugar a un cambio en las condiciones iniciales de las fuentes hídricas. En diferentes tipos de suelo, ya sea en los sectores urbano o rural, difieren los tipos de sustancias que terminan alterando los recursos hídricos, por lo que es necesaria una gestión de riesgo ambiental hacia las cuencas hidrográficas [2].

El repentino cambio en una cobertura del suelo afecta al nivel de escurrimiento dentro de una cuenca hidrográfica, empobreciendo la disponibilidad del recurso hídrico tanto en la superficie como en las zonas subterráneas que esta se almacene [3]. La gestión eficaz e integral de los recursos naturales es un desafío prioritario en la actualidad, especialmente en regiones donde la actividad humana afecta en gran medida al medio ambiente y a la disponibilidad del agua, un recurso indispensable para la vida en nuestro planeta [4].

Muchas de las cuencas de nuestro país, en especial aquellas que se ubican en los Andes, sufren de presiones asociadas a cultivos agrícolas. La aplicación de productos químicos, establecimientos de monocultivos y expansión de terrenos agrícolas repercuten en las cuencas andinas. Estas prácticas agrícolas causan una inestabilidad y fragilidad en los ecosistemas, y esta dinámica producida por un cambio de uso de suelo deterioran el suministro de servicios que proveen los ecosistemas asociados a cuencas hidrográficas [5].

Con la utilización de herramientas geoespaciales podemos comprender las causas impulsoras de cambio de uso de suelo en una cuenca hidrográfica [5]. Se puede evaluar las condiciones sociales, económicas, políticas, económicas y culturales que motiven esta transición en los usos de suelo. Ante este escenario, la respuesta más adecuada es la toma de decisiones y

una adecuada planificación del uso de suelo, tomando en cuenta la percepción de los actores intervinientes. Esto se debe a que sus motivos para desarrollar actividades económicas son los factores que impulsan los cambios espaciales de usos de suelo de forma inevitable.

En este contexto, la investigación actual se centra en analizar el cambio de uso del suelo en la microcuenca hidrográfica del río Luis a lo largo del tiempo, con el objetivo de comprender sus efectos en la disponibilidad de agua y proponer estrategias para un manejo responsable de los recursos naturales regionales. Con este fin, se emplearán herramientas como imágenes geoespaciales, sistemas de información geográfica y el análisis remoto, que permitirán realizar una caracterización detallada de los cambios en el paisaje y su relación con el déficit hídrico observado en la zona.

La presente investigación propone abordar exhaustivamente esta problemática mediante el uso de tecnologías de percepción remota, transformándose en una herramienta clave que permitirá explorar y comprender los patrones que conllevan el cambio de uso del suelo, evaluar el impacto en el recurso hídrico accesible y plantear soluciones que fusionen el desarrollo humano junto a la conservación ambiental. Además, se pretende proporcionar un fundamento sólido para tomar decisiones informadas, permitiendo una gestión más precisa y adaptativa que proteja la integridad de la microcuenca del río Luis.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo del tiempo, la humanidad ha desarrollado y construido sus civilizaciones sobre la superficie terrestre, dando como resultado una serie de diversas transformaciones en los sitios donde se han asentado. Influenciados por su presencia y sus actividades antrópicas, los seres humanos han buscado cubrir sus necesidades básicas como prioridad. Que han buscado cubrir las necesidades básicas como prioridad [6].

Una gran cantidad de países han presentado cambios en el uso de suelo, donde se observa pérdidas de bosques nativos que son transformadas, principalmente, en zonas de uso agrícola[6]. Esta acción ha causado un gran impacto en el entorno natural y ha contribuido al cambio climático global al interferir con procesos y ciclos importantes.

Una herramienta para entender la mecánica de este fenómeno son los estudios de las dinámicas especiales de la cobertura del suelo, que nos proporcionan una base de entendimiento sobre posibles procesos de erosión, desertificación, empobrecimiento de diversidad, etc. Sin embargo, el recurso agua también se ve plenamente afectado por estas prácticas de modificaciones de cambios de uso y cobertura, ya que el ciclo hidrológico se ve perjudicado: escasea la retención de agua en zonas de recarga hídrica y se dificulta el escurrimiento e infiltración del agua hacia el subsuelo, causando una disminución del volumen de este recurso hídrico [7].

Ante el notable aumento de los pobladores y el incremento en la demanda de los recursos para su subsistencia, se ha propiciado una alteración en el suelo. Esta transición y conversión de vegetación primaria a ecosistemas degradados trae consigo cambios en el estado físico y químico tanto del suelo y del agua, lo que repercute en todos los organismos que habitan en estos medios, provocando reducción de los servicios ecosistémicos disponibles [8].

Según Mestanza Ramón et al., [9], el uso de suelo dentro de nuestro país ha estado sujeto a constantes cambios debido a que es un país con incontables riquezas que han sido explotadas desde épocas ancestrales. Un caso de esto es la minería, que ha existido desde la época precolombina en nuestro territorio. Al despertar el interés por este mineral precioso en las últimas décadas, el país se vio obligado a crear leyes para controlar este sector. La provincia de El Oro registra numerosas concesiones auríferas y ha sido catalogada como una de las zonas más conflictivas geográficamente, debido a la ausencia de control y la informalidad [9].

En el altiplano orense, se puede observar una fuerte presencia de la industria minera. Esta actividad tiene un impacto significativo en la economía local, beneficiando a las comunidades cercanas, aunque a expensas de los cambios que el entorno debe soportar debido a las prácticas de extracción mineral. La minería informal y a pequeña escala afecta a los ríos por trazas de metales pesados (Hg, CN) que se ocupan para extraer estos metales preciosos [10]. La minería descontrolada ha modificado completamente el paisaje del distrito minero (Zaruma-Portovelo), con la presencia de socavones e hundimientos que significación la destrucción de infraestructura urbana y pérdidas monetarias en este sector [11].

Para garantizar la salud y productividad de las cuencas hidrográficas en el transcurso del tiempo, es necesario realizar una gestión sostenible. Esto implica la coordinación de políticas y estrategias con el objetivo de garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos, protegiendo al mismo tiempo la integridad ecológica. Se reconoce la interconexión entre los aspectos sociales, económicos y ambientales, buscando mantener la salud de las cuencas y respaldar el bienestar de las comunidades [6].

Un cambio de uso y cobertura de suelo que se encuentra relacionado a la minería es el establecimiento de las plantas de beneficio que se ubican a lo largo de los ríos de estos cantones, resultando un cambio de la vegetación ribereña de ese sector. Por efecto de estas obras de infraestructura, se ha modificado el ecosistema en su totalidad, conduciendo a la degradación de aguas subterráneas y superficiales, desencadenando malestar entre los residentes locales [10]. La construcción de las denominadas relaveras genera un cambio total del paisaje que afecta sin duda a las actividades que se encuentren cercanas a esta zona de influencia, ya sea en terrenos agrícolas o zonas de vegetación endémica [10].

Un riesgo a tener en cuenta es la falla o rotura de las piscinas de relaves, lo que conduciría al deterioro de las aguas superficiales y subterráneas, desencadenando malestar entre los residentes locales. La construcción de estas relaveras, sin ninguna planificación ni análisis de los riesgos asociados, infringe la normativa de las autoridades de control, quienes deben establecer directrices eficaces para el desarrollo de esa actividad sin perjudicar al medio biótico [12].

El presente trabajo pretende abordar la necesidad de plantear un estudio multitemporal en la microcuenca hidrográfica del río Luis, mediante imágenes satelitales, sensores remotos y cartografía temática, con el propósito de cuantificar los efectos producidos por la modificación de suelo generada por actividades antrópicas en la zona de estudio.

### *Antecedentes*

Los estudios de la dinámica del uso de suelo se han desarrollado durante algunas décadas atrás en el Ecuador. Un ejemplo de esto es el arduo trabajo que desarrolló el histórico Centro de Levantamiento Integrado de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), el cual generó y distribuyó geoinformación al país, utilizando herramientas de SIG y teledetección en proyectos caracterizaban elementos bióticos, socioeconómicos, físicos y de índole ambiental en Ecuador continental e insular [13].

Durante sus años de funcionamiento, desarrolló un estudio multitemporal de información sobre el cambio de coberturas asociadas al ecosistema manglar, con la ayuda de sensores remotos. Tomando datos e información del año 1969 al 1984 se desarrolló el primer estudio de áreas salinas, camaroneras y zonas de manglar [13]. Teniendo una actualización en el año 1987 y otra posterior en el año 2006.

Por otra parte, la empresa Geoplades, que se dedica a realizar estudios y proyectos encaminados a las ciencias geográficas y ambientales [14], llevó a cabo en el año 2009 un estudio acerca del estudio multitemporal de la vegetación presente en zona nororiental del país y los cambios que se ha suscitado desde 1990 hasta 2008. Su metodología se basó en la utilización de sensores remotos, donde se evidenció un avance de la frontera agrícola y ciertas alteraciones antrópicas en dicho escenario. Obteniendo diversas clases de mapas donde se apreciaba los cambios en este sector [14].

Valencia [15], en el año 2014, analiza las deficiencias hidrológicas en su área de estudio a través de alteraciones en el uso y ocupación del sustrato, empleando ortofotos y mapas temáticos. Además, considera datos meteorológicos, como la precipitación en el periodo de 1976 al 2010, caudales y derechos de uso de agua en la zona. Con estos datos recopilados, obtiene y genera los coeficientes de escorrentía. Los resultados hallados asocian el aumento de zonas cultivables en las zonas altas con una reducción de la retención de agua del páramo perteneciente al área de estudio.

Mientras que Velázquez et al., [16], en su estudio, concluyó que la transición de bosques a otros usos incide en el azolvamiento de embalses. Mediante el análisis de datos retrospectivos y prospectivos, se determinaron los cambios en la ocupación del suelo y la carga sedimentaria en el período 1995 al 2015 en el embalse Esperanza. Mediante visitas, encuestas, tratamiento de

imágenes satelitales se obtuvo una tasa de deforestación. Para determinar la producción de sedimentos, se utilizó la ecuación universal de pérdida del suelo (EUPS). Confirmándose la alteración de uso de suelo aporta a la generación de sedimentos. Velázquez propone una herramienta eficaz para la gestión hídrica que puede ser utilizada por las entidades de seguimiento, control y fiscalizadores.

El monitoreo de las áreas protegidas en Ecuador es fundamental para preservar la biodiversidad que nos enriquece. Por lo tanto, Rosero et al., [17], en su estudio publicado en el año 2023, estimó las alteraciones de los paisajes pertenecientes al Parque Nacional Llanganates mediante la utilización de los sensores remotos. Para obtener la cobertura del suelo, procesaron ortofotos usando el algoritmo de Clasificación de Máxima Verosimilitud (CMV). Al revisar los resultados, no se hallaron anomalías desde 1991 hasta 2016, lo que indica un bajo nivel de fragmentación en este parque nacional. Sus condiciones iniciales se mantienen debido al estricto mecanismo de protección con el que cuenta. Concluyendo que la conservación de este ecosistema y las acciones asociadas a la protección de su biodiversidad son efectivas [17].

#### *Evolución de la Teledetección*

La evaluación del análisis del cambio de uso del suelo mediante teledetección es una forma de estudiar los impactos generados por la expansión demográfica y el crecimiento de las actividades productivas. A lo largo de los años, se han empleado muchas herramientas para la realización de estos estudios, destacando el uso de ortofotos como las presentadas por Landsat, que son las más usadas debido a su disponibilidad y cobertura a nivel mundial. Además, las diferentes bandas espectrales con las que cuentan permiten la obtención de datos más precisos de la cobertura terrestre [18].

Este satélite permite realizar estudios de una forma local, regional o global de los cambios que se presentan en la superficie terrestre, los datos generados son de fácil manejo y acceso libre para la realización de investigaciones en diferentes ramas de la ciencia, [19] se aplica este modelo de análisis a nivel mundial para identificar el cambio de suelo a lo largo del tiempo, pues nos aporta datos históricos que facilita la aplicación de modelos para la estimación de la dinámica del uso de suelo de una área específica. Zhang et al [20] en 2020, aplicó este método para la evaluación de los cambios generados en un periodo de 20 años, evidenciando el desarrollo urbano en esa área con suma precisión.

Estudios que describen los cambios en el uso del suelo de un área se convierten en una herramienta importante para la gestión e implementación de actividades, Ding et al [18], en 2022, indican que los resultados obtenidos de su estudio multitemporal permiten a los gobiernos a tomar mejores decisiones enfocadas a resolver problemas como falta de agua o deforestación excesiva.

En el 2011, Gil et al [22] planteó un enfoque multitemporal para estudiar las modificaciones de cobertura que se presentan en el Santuario de Flora y Fauna ubicado en el sitio de los Flamencos. Estas modificaciones están interfiriendo en el correcto funcionamiento de los sistemas naturales presentes. El estudio consistió en la preparación e interpretación de imágenes durante un lapso de dos décadas, aplicando la metodología Corine Land Cover en los años 1987 y 2007, para determinar los cambios de cobertura que se presentaron dentro de esta área por acciones antrópicas [22].

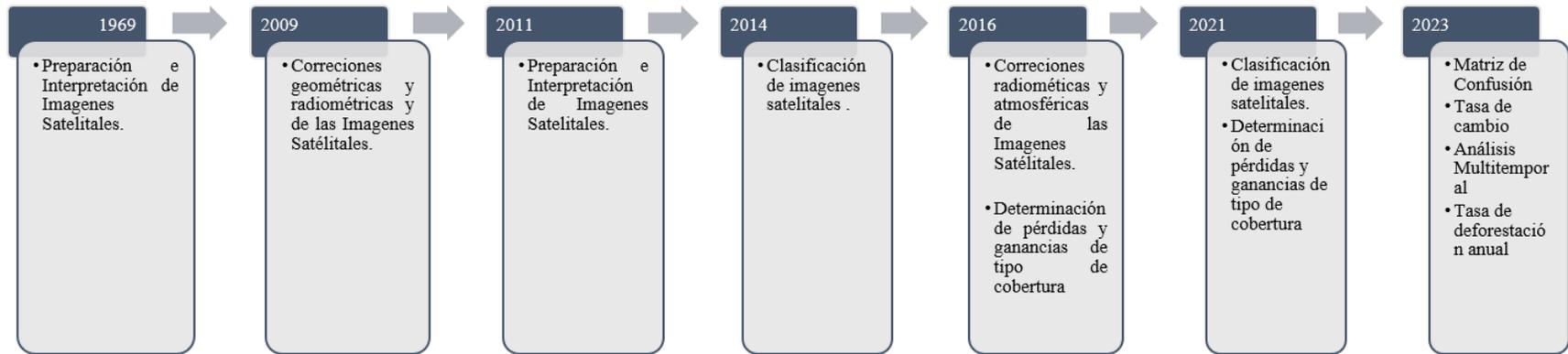
La aplicación de análisis con percepción remota permite realizar estudios a diferentes escalas sobre el cambio de cobertura. Osuna-Osuna et al [23], en 2015, realizó el análisis detallado del cambio de cobertura forestal y agrícola de la cuenca del río Tecolutla, ubicado en México. En este estudio, utilizó imágenes Landsat, este satélite que permite realizar estudios de una forma local, regional o global sobre los cambios que se presentan en la superficie terrestre. Los datos generados son de fácil manejo y acceso libre, lo que facilita la realización de investigaciones en diferentes ramas de la ciencia [19].

Anguisaca [24], en 2021, realizó una clasificación supervisada de 6 clases de cobertura dentro de la cuenca del Jubones para identificar los cambios que sufrió en los años 1991 y 2016. Se evidenciaron los cambios más notorios en el aumento de la TA (tierra agropecuaria) en un 0.76 % y la disminución de los BO (bosques), lo que se atribuye a la intervención y uso de los recursos naturales. Estos resultados demuestran la utilidad de las imágenes Landsat para realizar análisis multitemporales del suelo de forma remota en distintos años.

Los estudios mediante percepción remota son de gran utilidad en la determinación de las modificaciones de cobertura o el uso del suelo que se presentan en una área determinada por efecto de actividades productivas o el crecimiento demográfico, Sandoval y Cantú [19], en el 2022, llevaron a cabo un análisis geomático en la subcuenca del río Copalita en México sobre el cambio de uso de suelo, en el cual determinaron el porcentaje de pérdida y ganancia de las diferentes coberturas que se identificaron tras el trabajo realizado. De esta manera, se determinó que tipo de cobertura experimentó más cambios dentro del periodo de estudio (1995-2015), obteniendo

resultados que las coberturas de bosque sufrieron una disminución y las tierras agrícolas experimentaron un aumento en dicho periodo estudiado.

Hernandez et al [20], en 2023, efectuó un análisis multitemporal en municipio de Linares sobre la alteración de uso de suelo. Aplicó varios periodos de estudio que abarcaban desde 1995 hasta 2021 para determinar los cambios efectuados en este municipio. Además, determinó la tasa de deforestación anual que se presentaba en la zona estudiada [20].



<p>IMÁGENES SATELITALES Y FOTOGRAFÍAS CONVENCIONALES</p>	<p>CORRECCIONES EMPLEANDO ARCGIS</p>	<p>IMÁGENES DE SATÉLITE USGS</p>	<p>CARTOGRAFIA TEMÁTICA-IMÁGENES SATELITALES - ARCGIS</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CORRECCIONES EMPLEANDO QGIS</li> <li>• ARCGIS – CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CARTOGRAFIA TEMÁTICA-IMÁGENES SATELITALES – QGIS</li> <li>• QGIS – MATRIZ DE TRANSICIÓN</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ECUACIÓN DE TASAS DE CAMBIO</li> <li>• ECUACIÓN DE “TASAS DE CAMBIO” Y DE “PUYRAVAUD”</li> </ul>
----------------------------------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fig 1: Línea de tiempo de las metodologías aplicadas en la percepción remota

### III. JUSTIFICACIÓN

La microcuenca del Río Luis se ubica dentro de los cantones Portovelo y una parte de la cuenca alta en el cantón Zaruma. Este cuerpo hídrico se considera el afluente de mayor importancia en el Cantón Portovelo, ya que alimenta a gran parte de la subcuenca a la que pertenece y lleva su mismo nombre.

Los poblados ubicados a sus orillas se benefician de los servicios ecosistémicos proporcionados por este río, siendo el más relevante el aprovisionamiento de agua. Dentro del cantón Portovelo, el sistema de captación ubicado en el río Luis presenta ciertas falencias en la red de distribución hacia los hogares. Al encontrarse a cielo abierto, esta propenso a recibir deslizamiento de lodo y tierra. Esto lleva a la obstrucción y una turbidez elevada en épocas de lluvias intensas a inicios del año, dando como resultado un déficit de este líquido en la comunidad [21].

La importancia de este trabajo radica en caracterizar y analizar los cambios notorios en el suelo y la gestión del suelo en la microcuenca río Luis, ya que al transcurso de varias décadas se observa un empobrecimiento de los ecosistemas asociados a este cuerpo hídrico. Esto ha desencadenado consecuencias negativas como reducción del caudal, avance de las tierras de producción agropecuaria, sin olvidar el aumento de concesiones mineras en este sector, lo cual se presenta como un problema notable para este cuerpo de agua.

Las diversas actividades antrópicas desarrolladas en los márgenes de este curso de agua han acabado con la vegetación ripícola, trayendo como consecuencia deslizamientos de tierra y erosión del suelo. La cubierta forestal presente en la rivera de este río debe considerarse como prioridad en su cuidado y preservación para la población residente. Para esto, se busca emplear una plataforma de sistemas geográficos, ortofotos, métodos de percepción remota y mapas temáticos para identificar un estudio válido que permita detectar alteraciones que se presenten a los márgenes de la microcuenca del río Luis en un periodo de tiempo de veinte años.

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Proponer una metodología que describa el cambio de uso de suelo por medio de imágenes satelitales durante los años 2000, 2010, 2020 para una gestión ambiental sostenible de la microcuenca hidrográfica.

### *B. Objetivos específicos*

- Analizar los esquemas que describen el cambio de uso de suelo mediante revisión literaria para la selección de una metodología de tratamiento de imágenes satelitales.
- Describir cartográficamente el cambio de uso de suelo en la microcuenca del río Luis, provincia de El Oro utilizando el análisis multitemporal de las imágenes satelitales.
- Evaluar índices espectrales mediante la aplicación del NDVI y el NDWI para la descripción del cambio de uso de suelo en el área de estudio.

## V. HIPÓTESIS

Por medio de un análisis temporal de imágenes satelitales y con el empleo de cartografía temática es posible determinar las áreas sujetas a cambios en sus coberturas iniciales dentro de la microcuenca del Río Luis en un periodo de veinte años.

### *Hipótesis nula:*

El análisis multitemporal realizado dentro de la microcuenca del Río Luis no refleja ningún cambio en sus coberturas iniciales.

### *Hipótesis alterna:*

La microcuenca del Río Luis ha sufrido cambios en sus usos de suelo, evidenciándose en los resultados del análisis multitemporal realizado.

## VI. MARCO TEÓRICO

En este capítulo abordaremos dos secciones principales: factores ambientales y sistemas de información. La comprensión integral de estas secciones es importante para el desarrollo del estudio de la microcuenca del río Luis. La primera sección (A) detallará los distintos factores ambientales que impulsan en la dinámica del uso y cobertura de suelo, centrándose en aspectos como los tipos de coberturas de suelo, bosques y sus características, cuencas hidrográficas, modelos y estudios de cambios de uso de suelo.

### A. Factores ambientales

#### 1) Uso y cobertura del suelo

La cubierta vegetal representa varios de ecosistemas presentes a nivel mundial, estas coberturas influyen de manera directa en los cambios climáticos [22], por su influencia y características, por otra parte los cambios de uso de suelo generan un impacto directo en la cobertura vegetal por el crecimiento exponencial de la demografía y las actividades antrópicas dentro de las diversas áreas[22].

#### 2) Tipos de coberturas del suelo

Los diferentes estudios sobre los aspectos físicos de la superficie terrestre se deben categorizar por tipos o grupos de acuerdo a las características que se presenten en los mismos, es así que las coberturas se encuentran definidas de acuerdo a su jerarquización e importancia [28], de esta forma podemos observar en la Fig. 2:

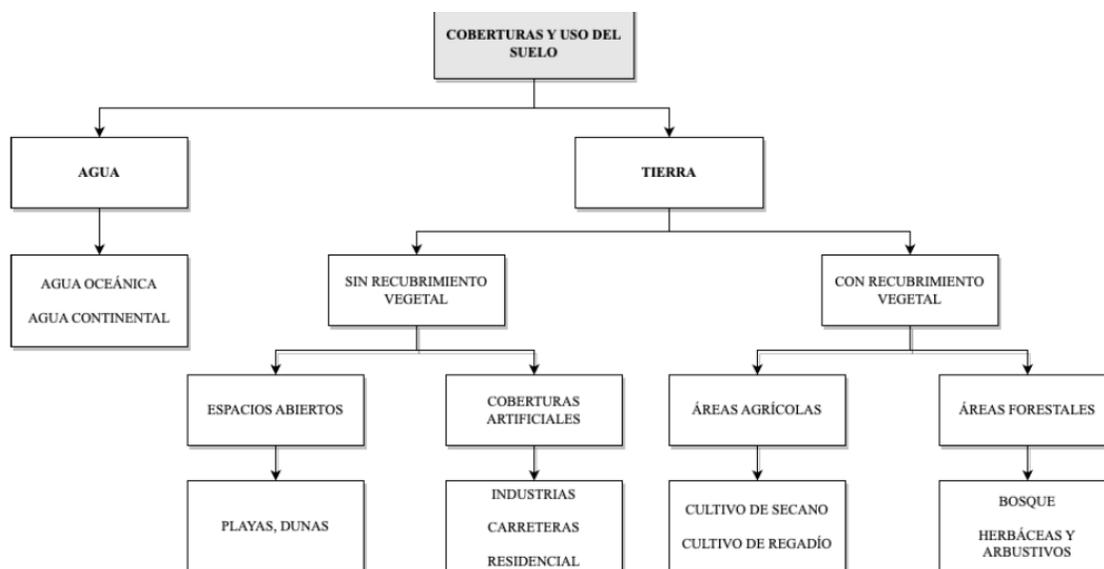


Fig. 2 Tipos de cobertura [28]

### 3) Bosques y sus características

Los bosques albergan una inmensa biodiversidad. Abarcan superficies mayores a 0,5 hectáreas y se caracterizan por contar con árboles de al menos cinco metros de altura y cubierta de copas mayor al 10%. Esto significa que el dosel del bosque debe ser lo suficientemente denso como para proporcionar sombra y cobijo a diversas especies vegetales y animales [23].

### 4) Cuencas hidrográficas

Corresponde al espacio geográfico limitado por la divisoria de agua, sobre la cual existen redes de drenaje en una misma dirección, las cuales se encargan de drenar la precipitación hacia un mismo punto dentro del área delimitada. Existen varios criterios para delimitar una cuenca tenemos los topográficos y superficiales, en la topografía define como el área de terreno que recepta la lluvia y la drena hacia un punto de desagüe, de la misma manera existen otras características dentro de las cuencas hídricas como lo es la cantidad de precipitación, extensión, uso de suelo y cobertura vegetal y condiciones climáticas [24].

El correcto manejo de las cuencas hidrográficas representa muchos beneficios tanto para el medio ambiente como para los servicios ecosistémicos que estos brindan, también el correcto manejo de las mismas, generan una serie de beneficios para las personas pues aplicando una gestión correcta se puede realizar una serie de actividades productivas como la agricultura y la producción ganadera de una forma responsable y sostenible sin poner en riesgo la estabilidad de la cuenca hídrica [25].

La microcuenca se delimita por partes altas, donde las aguas de lluvia forman arroyos, en ellas se encuentran comunidades, fincas y poblados, la gente hace uso de estas aguas para las actividades agropecuarias, también se encuentran familias que forman bases sociales y culturales en la misma [31].

### 5) Modelos y análisis de cambios de uso de suelo

Los análisis acerca del cambio y uso del suelo son muy fundamentales a nivel mundial, ya que permiten reflejar el comportamiento de las diversas coberturas tanto de forma global como regional. Nos orientan hacia decisiones más certeras y, de esta forma, contrarrestar los efectos generados sobre los ecosistemas, cuencas y regiones de las actividades antrópicas que van ganando terreno a lo largo de los años [26].

Estos modelos permiten identificar la dinámica de la cobertura y uso de suelo en un área determinada. Por ejemplo, en un estudio realizado en Tabasco en 2021[32], se implementó un

enfoque multitemporal utilizando el Land Change Modeler for Ecological Sustainability para definir usos de suelo en el área de estudio con mucha precisión y detalles a lo largo de un periodo determinado.

### *B. Sistemas de información*

En esta segunda sección (B) nos centraremos en los sistemas de información que serán utilizados para estudiar los cambios en el uso de suelo, destacando conceptos como sistemas de información geográfica, análisis multitemporal, percepción remota, sensores remotos, imágenes de satélite Landsat, clasificación de imágenes, corrección radiométrica, corrección geométrica, corrección atmosférica, índices espectrales, NDVI y NDWI.

#### 1) Sistemas de Información Geográfica

Son herramientas informáticas que analizan, modelan y organizan toda clase de datos que se vinculan a un sistema de referencia espacial, incorporando además modelos de localización y asignación óptima. Entre las diversas aplicaciones de estas herramientas están la identificación de los sitios óptimos para instalar servicios de asistencia ante un riesgo natural inminente en cuanto a la demanda, acortando el recorrido hasta dar con estos puntos [32].

Con la ayuda de tecnologías como software, drones, GPS, plataformas digitales cartográficas, algoritmos de clasificación. Surge la necesidad de investigación actualizada para implementar estrategias que se ajusten con los planes de ordenamiento territorial para proteger y conservar los recursos naturales, entre otros objetivos [28].

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas indispensables para comprender las características ecológicas de un territorio. A través del análisis espacial, los SIG nos permiten identificar los elementos clave que estructuran el ecosistema y son fundamentales para la planificación urbana. Esta metodología, basada en la evaluación de métricas del paisaje, facilita la obtención de información detallada sobre la estructura ecológica del territorio [29].

#### 2) Análisis multitemporal

Son muy empleados en análisis regionales y globales, por el dinamismo que representan al momento de representar el comportamiento del uso de suelo en un área determinada a lo largo de los años, pues reflejan con precisión tanto las coberturas como cambios de uso de suelo en una superficie terrestre, pero así mismo representan limitantes al momento de analizar gran cantidad de datos por el peso con el que cuentan los mismos [35].

### 3) Percepción remota (teledetección)

La teledetección es un método que permite obtener información sobre objetos terrestres sin necesidad de contacto físico. Esta técnica se basa en la captura de datos a distancia mediante sensores que interactúan con la energía reflejada o emitida por los objetos observados. [35].

Estos elementos permiten emplear la teledetección o percepción remota para el estudio de la superficie terrestre, pues nos ofrece una imagen de forma mundial o regional según de muy buena calidad para el respectivo análisis.

La aplicación de técnicas de teledetección es un método idóneo para estudiar los cambios dinámicos en la cobertura terrestre a través del tiempo. Esta metodología ha evolucionado con el transcurso del tiempo y ha mejorado las herramientas que se usan para realizar el estudio [30]. Podemos observar cómo, mediante la teledetección, es posible analizar las transformaciones experimentadas por la cobertura inicial de una zona a lo largo de un periodo de veinte años, donde se obtienen datos precisos sobre los diversos cambios que han experimentado estas coberturas a lo largo de ese periodo, ya sea por presiones humanas o por la expansión urbana. Además, nos permite identificar el tipo de cobertura que existe en cada una de las áreas de la zona estudiada.

### 4) Sensores Remotos

La teledetección emplea instrumentos especializados para recopilar datos a distancia de una amplia gama de objetos y fenómenos. Estos sensores registran la energía electromagnética reflejada o emitida por las superficies, proporcionando información detallada en diferentes longitudes de onda, desde las microondas hasta los rayos ultravioleta. Los datos obtenidos se analizan con sistemas de información geográfica para generar conocimiento sobre el entorno [31].

### 5) Imágenes de satélite Landsat

La NASA lanzó el satélite Landsat el cual provee datos de la superficie terrestre que tiene que ver con la cobertura vegetal a nivel global, tiene una serie de datos almacenados de las últimas décadas, estos datos ofrecidos por el satélite que cuenta con una base de datos de la Tierra completa permiten realizar investigaciones y análisis sobre el cambio y uso del suelo tanto a nivel regional o local dentro de un espacio determinado [32].

Emplea varios instrumentos como el sensor térmico infrarrojo (TIRS) y el Operational Land Imager (OLI) que se encargan de proporcionar imágenes de la superficie terrestre cada estación del año con una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR (Infrarrojo de onda Corta)), 15 m (pancromático) y 100 m (térmica) [33].

La escena generada por Landsat 8 va de 180 km de trayectoria y 185 km de trayectoria transversal, con una altitud nominal de 605 km de la nave espacial y precisión cartográfica de 12 metros [33], la resolución de las bandas que componen el Landsat 7 y 8 se presentan en la siguiente TABLA I.

TABLA I  
BANDAS DE LANDSAT-7 Y LANDSAT-8 [39]

Landsat - 7 ETM+ Bandas ( $\mu\text{m}$ )			Landsat - 8 OLI and TIRS Bandas ( $\mu\text{m}$ )		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 – 0.451	Banda 1
Banda 1	30 m. Azul	0.441 – 0.514	30 m. Azul	0.452 – 0.512	Banda 2
Banda 2	30 m. Verde	0.519 – 0.601	30 m. Verde	0.533 – 0.590	Banda 3
Banda 3	30 m. Rojo	0.631 – 0.692	30 m. Rojo	0.636 – 0.673	Banda 4
Banda 4	30 m. NIR	0.772 – 0.898	30 m. NIR	0.851 – 0.879	Banda 5
Banda 5	30 m. SWIT-1	1.547 – 1749	30 m. SWIR-1	1.566 – 1.651	Banda 6
Banda 6	60 m. TIR	10.31 – 12.36	100 m. TIR-1	10.60 – 11.19	Banda 10
			100 m. TIR-2	11.50 – 12.51	Banda 11
Banda 7	30 m. SWIR-2	2.064 – 2.345	30 m. SWIR-2	2.107 – 2.294	Banda 7
Banda 8	15 m. Pam	0.515 – 0.896	15 m. Pan	0.503 – 0.676	Banda 8
			30 m. Cirrus	1.363 – 1.384	Banda 9

#### 6) Clasificación de imágenes

Para optimizar el análisis de los cambios en el uso del suelo, las imágenes obtenidas mediante teledetección requieren un proceso de clasificación riguroso. Este proceso implica agrupar los píxeles de la imagen en categorías basadas en sus características espectrales y vectoriales, lo que permite mejorar la resolución y precisión de los resultados. Por ejemplo, un estudio realizado en la cuenca del río Grijalva [34] demostró cómo se redujo la cantidad de categorías iniciales de 40 a solo 7, facilitando así la evaluación de los impactos de las actividades humanas en la región

#### 7) Corrección Radiométrica

Dentro de este proceso se restablecen y asignan valores de la imagen satelital, se depura cualquier irregularidad en la radiancia de la superficie, generada por parte de la atmósfera o simplemente por alguna mala calibración del sensor que estemos empleando [31].

#### 8) Corrección geométrica

Se encarga de ajustar a la imagen al sistema de coordenadas y la proyección cartográfica del área que se piensa analizar esta corrección, también se la denomina georreferenciación. Estas

distorsiones se originan por el relieve, rotación del planeta, por movimientos, diferencias de altitud de la plataforma donde está instalado el sensor [31].

#### 9) Corrección atmosférica

Al momento de llevar a cabo un análisis temporal de imágenes satelitales, es necesario corregir, llevar las condiciones propias de la atmósfera a una imagen de referencia depurando efecto de aerosoles, vapor de agua, nubosidad y sombras, si se pudieran depurar todos estos factores de las imágenes de las plataformas satelitales, éstas serían de mayor utilidad para el análisis multitemporal a aplicarse [35].

#### 10) Índices espectrales

A partir de las bandas espectrales de las imágenes satelitales, se calculan índices que representan propiedades específicas de la superficie terrestre. Estos índices se obtienen mediante operaciones matemáticas realizadas en un sistema de información geográfica, independientemente de la longitud de onda de la radiación. La reflectancia de cada píxel se utiliza para determinar la firma espectral única de cada objeto, lo que permite clasificarlos en categorías según sus características similares [36].

#### 11) NDVI

El índice de vegetación se calcula a partir de las bandas roja (RED) e infrarroja cercana (NIR) de una imagen satelital. La vegetación absorbe fuertemente la luz roja, mientras que refleja la luz infrarroja cercana. Esta diferencia en la reflectancia se utiliza para determinar la vigorosidad de la vegetación, su biomasa y los cambios en la cobertura vegetal. Los valores del índice varían entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican vegetación saludable y los cercanos a 0 corresponden a áreas desnudas o cuerpos de agua [37].

#### 12) NDWI

La aplicación de este índice se deriva a la estimación de coberturas hídricas y nace de una modificación del NDVI, además de cuantificar los cuerpos de agua, el NDWI estima la humedad presente dentro la escena. Donde ya no emplea en su fórmula algebraica la banda RED sino que utiliza una banda SWIR de infrarrojo con una onda corta. Cuenta con el mismo intervalo de valoración (-1 a 1) donde su valor más elevado se asocia con presencia de cuerpos de agua, agua en presente en las plantas y humedad tanto en vegetación como suelo. Aquellos valores que se encuentren cercanos o por debajo del cero se relacionan con superficies sin agua o con zonas áridas o susceptibles a sequías [38].

## VII. METODOLOGÍA

### A. ANTECEDENTES CONTEXTUALES

El área de estudio se encuentra entre los cantones de Zaruma y Portovelo como se puede observar en la Fig 3 presenta una serie de características las cuales se detallan en la TABLA II, tales como: pendiente, precipitación, temperatura, rango altitudinal y área.

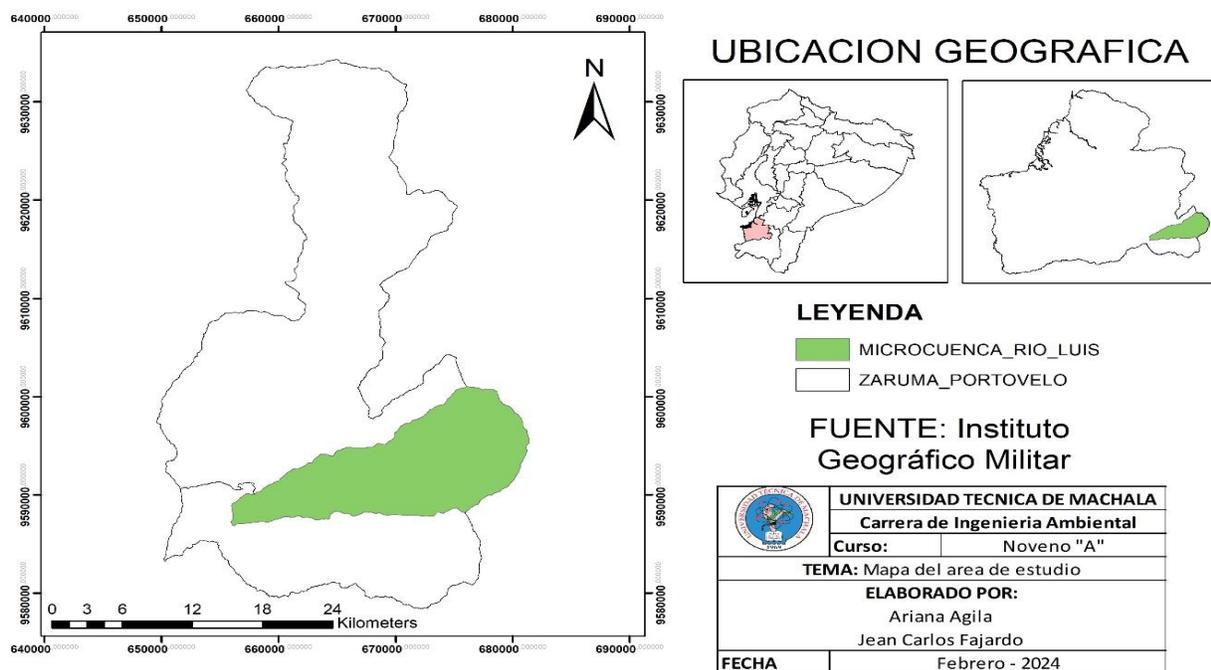


Fig 3: Mapa de ubicación del área de estudio

TABLA II  
DATOS DEL ÁREA DE ESTUDIO [27]

Datos generales de la Microcuenca Río Luis	
<b>Ubicación</b>	Cantón Portovelo y Zaruma
<b>Río Principal</b>	Río Luis
<b>Área</b>	185,68 km <sup>2</sup>
<b>Pendientes</b>	De 0 a 49 °
<b>Rango altitudinal</b>	900 a 3600 msnm
<b>Temperatura</b>	6 a 22 °C
<b>Precipitación</b>	1250 A 2500 mm
<b>Limites</b>	Norte limita con la parroquia Salvias en el cantón Zaruma y al sur limita con Salati en el cantón Portovelo, al este con la parroquia Portovelo y al oeste con Saraguro en Loja

La clasificación de la cobertura y uso de suelo que se realizara dentro de microcuenca del Río Luis funcionara como una herramienta integral para gobiernos locales tomen decisiones sobre la correcta gestión que se debe aplicar dentro de la misma, además para la ejecución de proyectos que no generen riesgo de afectación sobre los recursos naturales, así mismo permitirá definir áreas de interés para el desarrollo económico y áreas que conserven la flora y fauna nativa de la zona, para garantizar un desarrollo sostenible de la microcuenca.

En el cantón Portovelo, con una población de aproximadamente 13000 personas, gran parte de la comunidad depende de los recursos proporcionados por la microcuenca del río Luis. Entre las diversas actividades productivas tenemos producción agropecuaria, silvicultura y explotación minera. Las coberturas predominantes del suelo incluyen pastizales, vegetación arbustiva, vegetación herbácea, páramo y bosque nativo [27].

En cuanto al cantón Zaruma, con una población alrededor de 24097 habitantes, solo un número limitado se beneficia directamente de la microcuenca. Las principales actividades productivas en el cantón son la explotación de minas y canteras, producción agrícola, ganadería, pesca y comercio. Las coberturas y uso de suelo son pastizales, vegetación arbustiva, páramo, vegetación herbácea y bosque nativo [11].

## B. Materiales y Equipos

En la TABLA III que se detalla a continuación, se muestran los insumos que han sido empleados para la elaboración del presente trabajo de investigación.

TABLA III  
MATERIALES Y EQUIPOS

<b>Equipos</b>	Laptop Lenovo AMD Ryzen 7 3700U
	Geoposicionador espacial
	Cámara fotográfica
<b>Software</b>	QGIS 3.8.3
	Microsoft Word
	Google Earth Pro
	Microsoft Excel
<b>Información Cartográfica</b>	Cartografía Base (IGM)
	Cobertura y uso de Suelo (MAATE, MAG)
	Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ (USGS)
	Imágenes Satelitales Landsat 8 OLI/TIRS (USGS)

## C. Fase metodológica

Para la ejecución del presente trabajo la metodología empleada se dividió en tres fases para de esta forma cumplir con cada uno de los objetivos planteados en el trabajo.

- 1) Primera Fase: Análisis de esquemas que describen el cambio de uso de suelo por medio de revisión literaria

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica para identificar y analizar esquemas y modelos conceptuales que describen los procesos de cambio de uso del suelo. Esta revisión complementará los resultados obtenidos mediante teledetección, proporcionando un marco teórico sólido para la interpretación de los cambios observados en la provincia de El Oro.

- 2) Segunda Fase: Descripción cartográfica del cambio de uso de suelo mediante análisis multitemporal

En esta fase de la investigación, la metodología empleada se basó en el análisis de series temporales de imágenes satelitales para estudiar la evolución del uso de suelo.

### a) Obtención de imágenes satelitales y software empleado

Se descargaron imágenes del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) por medio de la página de EarthExplorer [39].

Es necesario emplear los filtros que se muestran en la Fig 4 para obtener las imágenes con las características óptimas para el desarrollo de este trabajo. Se recomienda escoger un periodo donde no existan valores elevados de precipitación, para no tener complicaciones con la nubosidad.

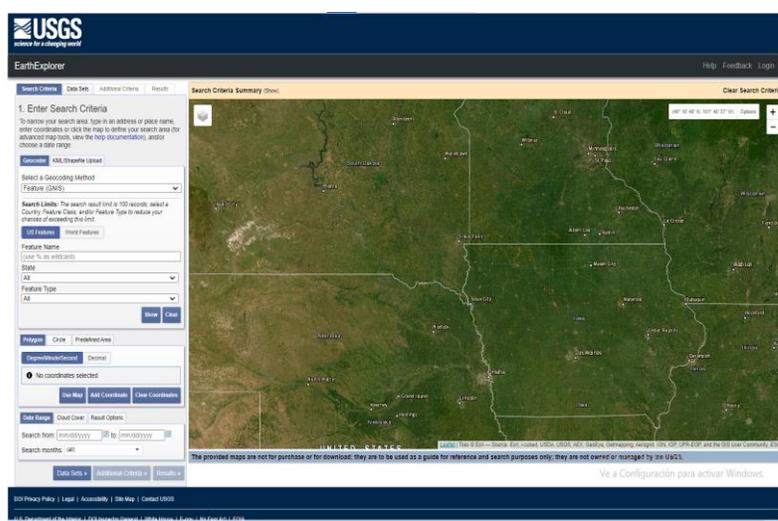


Fig 4 Filtros para la descarga de imágenes satelitales

Las imágenes escogidas se remontan al año 2000 del día 31 de octubre proveniente del satélite Landsat 7 ETM+. En el periodo intermedio al año 2010 la imagen tomada pertenece al mes de agosto en el día 24 procedente de este mismo satélite.

Mientras que para el año 2020 la imagen que se obtuvo pertenece al satélite Landsat 8 OLI/TIRS el 27 de agosto.

### b) Preprocesamiento de imágenes

Una vez aplicados los criterios en cada una de las imágenes anteriores podemos cargarlas dentro de QGIS. Sin embargo, aunque los datos proporcionados por el USGS son de buena calidad, se debe aplicar correcciones para eliminar ciertos factores ambientales como neblina, nubosidad, etc.

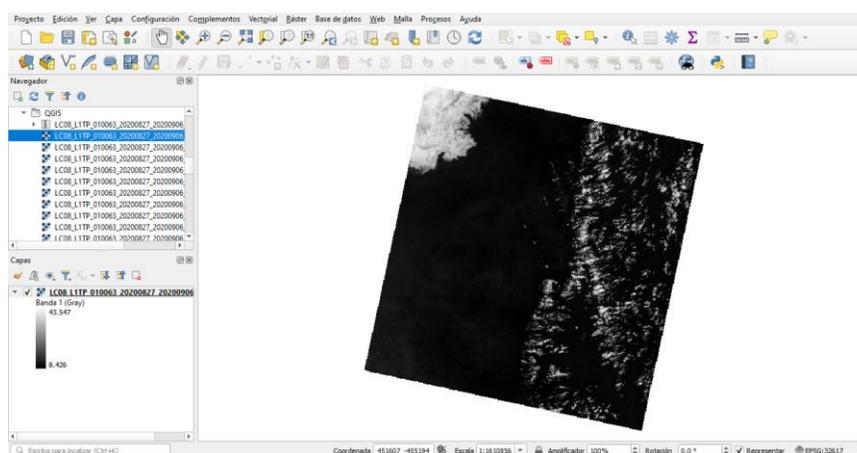


Fig 5 Nubosidad presente en una imagen satelital

### c) Corrección de error de banda

Este error se manifiesta en la imagen correspondiente al satélite Landsat 7 para el año 2010, se deriva a una indebida calibración de los detectores en el sensor (SLR-OFF). En las imágenes descargadas se visualizan líneas que distorsionan la misma.

Una solución a este error es emplear la herramienta de llenado de espacios en QGIS (Gap.mask). Donde se coloca la capa de entrada y las bandas a corregir, otorgando una distancia máxima de píxeles de 20 así corrigiendo los defectos de los valores de estos píxeles. Como complemento se puede aplicar una máscara de validación, añadiendo una capa de (Gap.mask) sin embargo es opcional aplicado esto se ejecuta esta herramienta y se obtiene una imagen corregida con información que se encuentra incluida dentro de la imagen satelital descargada.

#### d) Corrección atmosférica y Pansharing (SCP)

Empleando el complemento de SCP (Complemento de Clasificación Semiautomática) en QGIS nos permite aumentar la precisión de clasificación de estas imágenes satelitales, como se puede observar en la Fig 6.

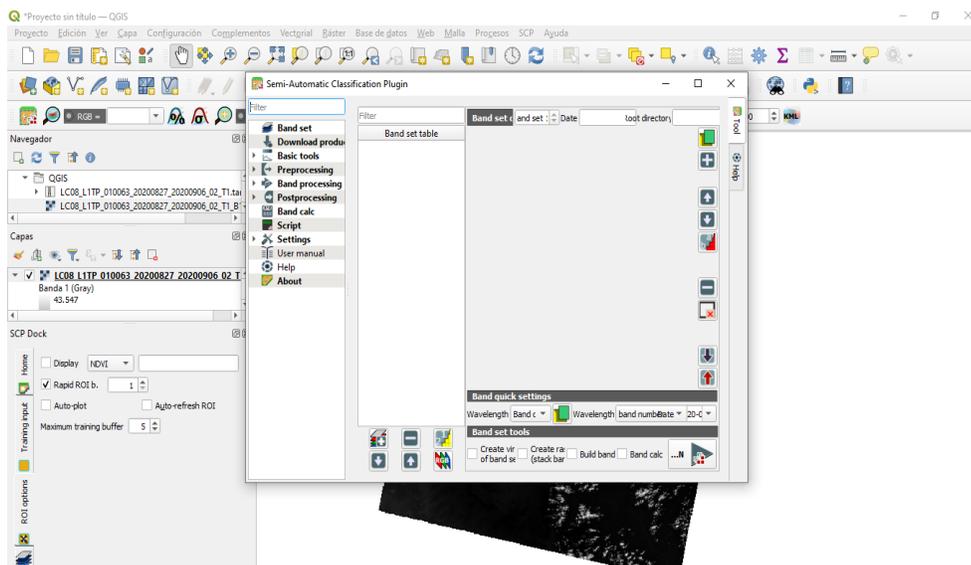


Fig 6 Complemento SCP

Este complemento una vez instalado se escoge las opciones de corrección atmosférica, realizar pansharing que mejora la resolución de 30m a 15m. Estos archivos Landsat descomprimidos de Earth Explorer se extraen los metadatos y se complementan automáticamente a las condiciones geográficas del área de estudio, como ubicación, elevación y distancia de la Tierra y el Sol [40].

Una vez que se reconocieron los metadatos y bandas este complemento aplica la corrección atmosférica de DOS1 donde se debe escoger un directorio de salida para las imágenes satelitales corregidas.

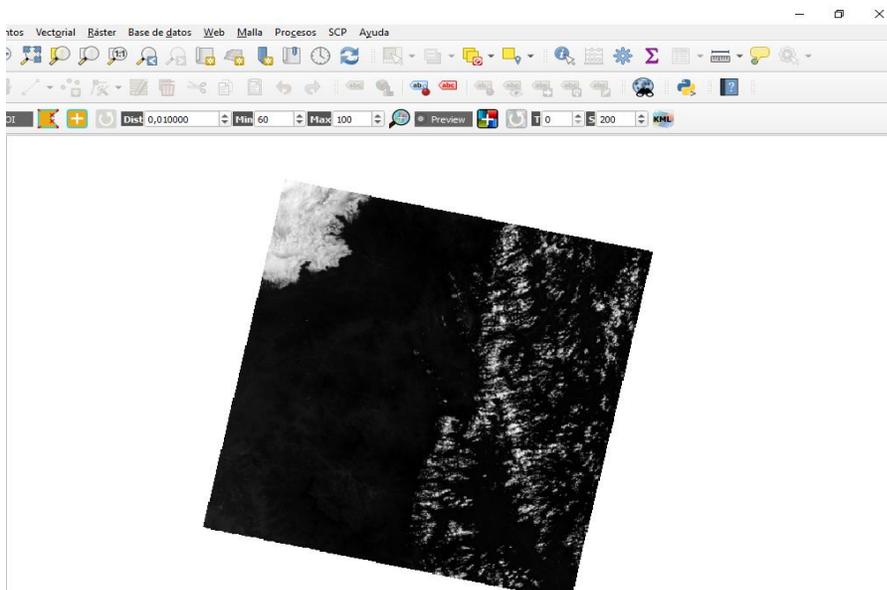


Fig 7 Resultado de imagen aplicando el Pansharping

#### e) Aplicación de enmascaramiento de nubes

Para aquellas imágenes satelitales que presentan un alto grado de nubes superior al 30 % dentro del área de estudio. Este porcentaje dificulta el trabajo, por ello existe un complemento Cloud Masking del software Qgis como observamos en la Fig 8, que ayuda a identificar y eliminar los pixeles contaminados por nubes y sombras, facilitando la obtención de imágenes más claras y precisas [41].

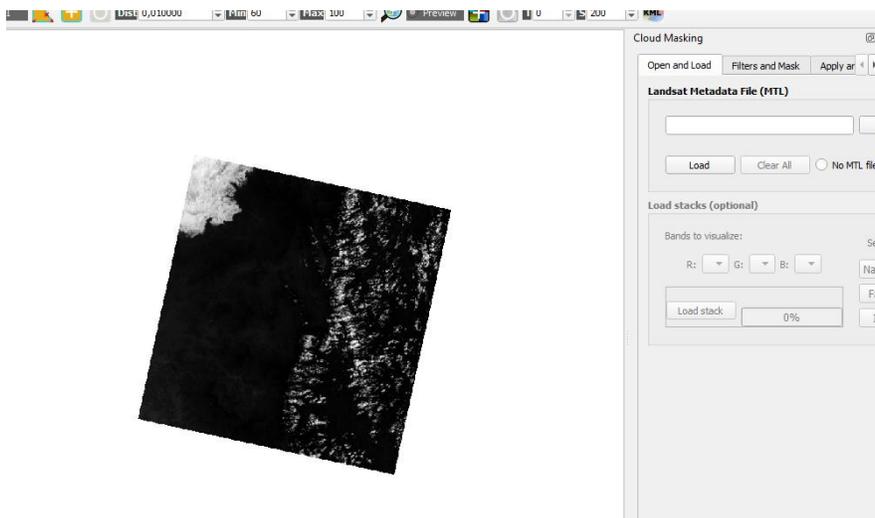


Fig 8 Complemento Cloud Masking

#### f) Recorte de Área de Estudio

Con imágenes satelitales en el formato raster ya corregidas, procedemos a agregar la capa vectorial de la microcuenca del río Luis. De esta manera con la herramienta de extracción cortamos

el raster por capa de mascara, se ejecuta por procesamiento por lotes seleccionando las bandas desde la 2 a la 7 tanto para las imágenes Landsat 7 y 8. Dando como resultado un raster del área de estudio para cada periodo nombrado anteriormente [42], como se observa en la Fig 9.

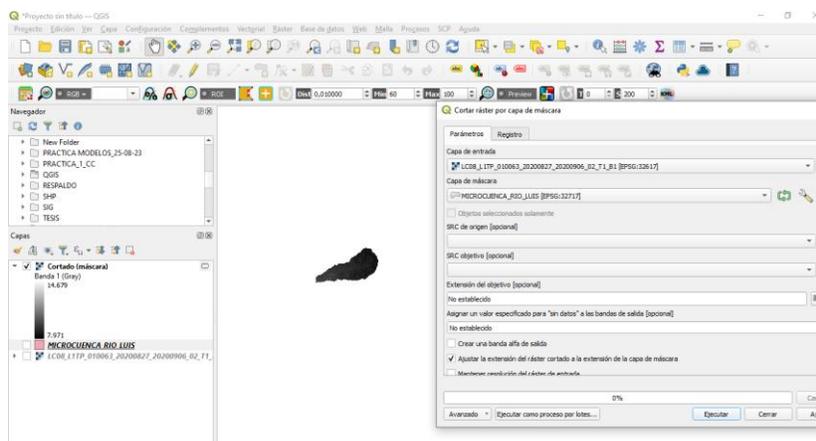


Fig 9 Resultado de corta por mascara de la microcuenca con las bandas

### g) Combinación de bandas

Al obtener las bandas ya recortadas y corregidas, es necesario realizar la composición de las bandas en orden descendente 4-3-2, en la pestaña Raster-Miscelánea-Combinar dentro de QGIS y se coloca la transparencia de 0 obteniendo nuestras bandas combinadas al color natural con una resolución espacial de 15m [42].

### h) Clasificación de cobertura de uso de suelo

Con el fin de analizar los cambios en el uso del suelo, se adaptó la clasificación de cobertura y uso de la tierra establecida por el Ministerio de Agricultura y Ganadería. Esta clasificación considera categorías como bosques, vegetación arbustiva, tierras agropecuarias, cuerpo de agua, zona antrópica y áreas sin vegetación.

TABLA IV  
TIPOS DE COBERTURAS

COBERTURA Y USO DE LA TIERRA Y SISTEMAS PRODUCTIVOS AGROPECUARIOS 1:25000
TIERRA FORESTAL
TIERRA ARBUSTIVA E HERBACEA
TIERRA AGROPECUARIA
CUERPO DE AGUA
ZONA ANTRÓPICA

Fuente: [Geoportal del Agro Ecuatoriano \(agricultura.gob.ec\)](http://Geoportal del Agro Ecuatoriano (agricultura.gob.ec))

### **i) Clasificación de imágenes satelitales**

Antes de realizar una clasificación de esta índole es indispensable conocer previamente la zona que se va a aplicar este estudio, a través de visitas, recorridos, imágenes, etc. Con la finalidad de realizar una correcta clasificación de las coberturas predominantes ya que debido a la resolución de las imágenes, no se puede apreciar plenamente las coberturas de menores dimensiones [42].

Para este proceso se llevó a cabo con el complemento de Clasificación Semi-automática (SCP) de QGIS usando el método de clasificación supervisada, donde se escoge un área representativa para cada clase o cobertura terrestre en la imagen satelital disponible. Estos ejemplares se denominan sitios de entrenamiento con los que identificamos las superficies, con los pixeles de valores parecidos en distintas bandas de la imagen satelital [42].

### **j) Elección de regiones de interés**

Para realizar una clasificación supervisada de las imágenes, emplearemos la imagen de nuestra área de estudio con los procedimientos preliminares antes mencionados. Donde haremos un acercamiento a cada una de las superficies que podamos distinguir visualmente como, por ejemplo: embalses de agua, cultivos, edificaciones, etc [42].

Una vez que ya identificamos aquellas coberturas diferenciadas a simple vista procedemos a situarnos en la herramienta Training input del complemento SCP, donde se lleva a cabo la clasificación.

Al momento de generar inputs de nuestra área de estudio podemos asignarle un color cada cobertura y facilitar la clasificación, la misma puede variar dependiendo de cuántos inputs de entrenamiento generemos.

Estas regiones o áreas de interés serán dibujadas de forma de polígonos, tratando de abarcar solo pixeles que sean de la misma clase espectral. Es recomendable que se escoja un número decente de áreas de entrenamiento dando como resultado mayor precisión en este apartado.

Después de definir las áreas de interés, con resultados obtenidos se usó el algoritmo de clasificación para mínima distancia, Que se encuentra en la pestaña de "Clasificación" que se puede localizar en el DOCK o en la barra de herramientas del complemento SCP. Este algoritmo de distancia mínima halla la longitud entre la media de las firmas espectrales de banda y se calcula el valor de cada píxel banda por banda. Marcaremos las opciones de "C ID", aplicar máscara y luego pulsamos el botón Run [43].

### **k) Análisis Multitemporal**

Con los resultados obtenidos se efectuó el análisis bajo los tipos de cobertura, que decrecieron y aumentaron. En relación a la cobertura decreciente, se consideró que la presión antrópica produjo esta variación en el uso de suelo y coberturas en estas zonas. Por otra parte, en territorios donde se regeneró la vegetación se deben analizar qué tipo de factores o características propiciaron estos cambios [43].

### **3) Tercera Fase: Evaluación de índices espectrales mediante la aplicación del NDVI Y NDWI.**

Para el cumplimiento del último objetivo, se busca establecer una relación entre los cambios en el uso de suelo y el déficit hídrico a través de la información proporcionada por las imágenes satelitales, la aplicación y comparación de índices asociados a la vegetación y el líquido vital en el área de estudio.

Determinamos tres índices espectrales utilizando a las bandas de imágenes Landsat. NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) desarrollado por Rouse et al. (1973) para estimar la cantidad de biomasa. Toma en consideración las bandas rojas (RED) e infrarroja cercana (NIR), en el caso del Landsat-7 fue la banda#3 y banda#4, respectivamente [44].

$$NDVI = (NIR - ROJO)/(NIR + ROJO) \quad (1)$$

Para los datos de Landsat 7,  $NDVI = (Banda\ 4 - Banda\ 3) / (Banda\ 4 + Banda\ 3)$ .

Para los datos de Landsat 8,  $NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4)$ .

El NDWI (Índice de Diferencia Normalizada del Agua) fue diseñado para mejorar las características de los paisajes relacionadas con el agua. Dentro del software QGIS mediante el complemento (Moisture and Water Index).

El NDWI fue desarrollado por Gao (1996) para mejorar las características de los paisajes relacionadas con el agua. Este índice utiliza las bandas con infrarrojo cercano (NIR) y con onda corta (SWIR). El NDWI puede ser calculado a través de la siguiente fórmula:

$$NDWI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR) \quad (2)$$

Para los datos de Landsat 7,  $NDWI = (Banda\ 4 - Banda\ 5) / (Banda\ 4 + Banda\ 5)$

Para los datos de Landsat 8,  $NDWI = (Banda\ 5 - Banda\ 6) / (Banda\ 5 + Banda\ 6)$

### **a) Análisis estadístico**

Para analizar los datos obtenidos a partir de los índices espectrales, se realizaron pruebas estadísticas. Específicamente, se emplearon pruebas t para comparar las medias de cada año de

estudio, asumiendo que los datos siguen una distribución normal. Se consideraron dos escenarios: uno en el que se supone que las varianzas de las poblaciones son iguales y otro en el que se asume que las varianzas son diferentes [44].

Para ello se realizan análisis estadístico con prueba de hipótesis para la diferenciación en medias de las varianzas desconocidas.

**Primer caso:** Varianzas son desconocidas pero iguales.

Tenemos 2 poblaciones normales independientes con valores medios poblacionales desconocidos y varianzas desconocidas pero iguales. Deseamos probar:

$$\mathbf{H_0: \mu_1 = \mu_2}$$

$$\mathbf{H_1: \mu_1 \neq \mu_2}$$

Con hipótesis nula afirmamos que las medias son iguales, mientras que la hipótesis alternativa niega la afirmación anterior.

Empleamos las fórmulas:

**Estimador agrupado de varianza:** Donde empleamos el número y varianzas de las muestras.

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

**Estadístico t:** Usamos las medias y números de las muestras

$$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Para afirmar la hipótesis nula planteada el valor de  $t_0$  debe encontrarse dentro del rango siguiente recordando que para los grados de libertad vienen dados por la sumatoria de la  $n$  muestras, menos el valor de 2. Los valores de  $t_0$  los extraemos de la Tabla V del libro de Douglas C. Montgomery.

$$t_0 > t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$$

$$t_0 < -t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$$

**Segundo caso:** Varianzas son desconocidas pero diferentes.

Tenemos 2 poblaciones normales independientes con valores medios poblacionales desconocidos y varianzas desconocidas pero diferentes. Deseamos probar:

$$\mathbf{H_0: \mu_1 = \mu_2}$$

$$\mathbf{H}_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

En determinados casos, no podemos suponer que las varianzas desconocidas son iguales. No hay una estadística t exacta favorable para probar la hipótesis planteada.

$$\nu = \frac{\left( \frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1 + 1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2 + 1}} \qquad t_0^* = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

Si la hipótesis nula  $\mathbf{H}_0: \mu_1 = \mu_2$  es cierta. Por tanto, se usan la  $t_0^*$  estadística de prueba y  $n_1 + n_2 - 2$  se reemplaza por  $\nu$  para la determinación de los grados de libertad para extraer el valor la Tabla V del libro de Montgomery y cerciorase si se encuentra en el intervalo de datos el  $t_0^*$  para aceptar o rechazar la hipótesis.

## VIII. RESULTADOS

Tras aplicar la metodología en los diferentes años, se realizó el pre-procesamiento de las bandas Landsat 8 y 7 respectivamente, mediante el complemento SCP en QGIS, se crea la combinación de bandas, posterior agregamos el entrenamiento dentro del complemento, el cual consistió en colocar puntos en cada una de las coberturas, bosque 600 puntos, cuerpo de agua 400, tierra agropecuaria 400, vegetación arbustiva 1000 y zona antrópica 200, estos puntos se los colocó en cada uno de los años, obteniendo los resultados que se observan en las Fig 10, Fig 11 y Fig 12.

Para el año 2000 como observamos en la Fig 10, obtuvimos las siguientes coberturas, zona antrópica, bosque, vegetación arbustiva y herbácea, cuerpo de agua y tierra agropecuaria:

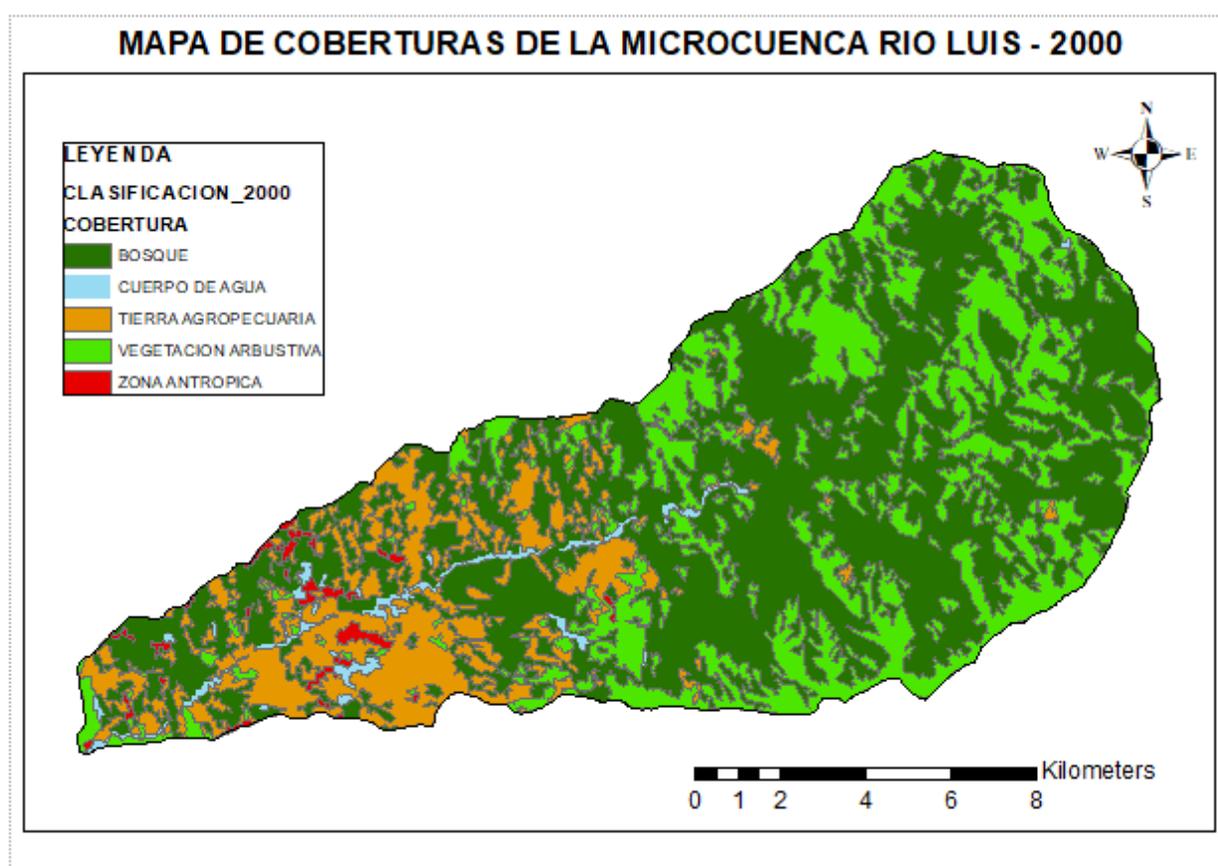


Fig 10 Mapa de cobertura de la Microcuenca Río Luis 2000

Donde podemos identificar una mayor cobertura de bosque, en la parte alta de la microcuenca, la cual era poco intervenida en ese año. Así mismo la tierra agropecuaria y la vegetación arbustiva cuentan con una gran cantidad de extensión dentro de la microcuenca. Pero el área de zona antrópica se encuentra concentrada en la parte baja y en las áreas cerca al cuerpo de agua.

En el año 2010, como podemos evidenciar en la Fig 11, el crecimiento de la zona antrópica, se da en la parte baja de la microcuenca donde queda la evidencia que dentro que el crecimiento demográfico de la zona se centra en las áreas bajas y sobre todo a orillas del río, pues la economía local depende principalmente de la agricultura.

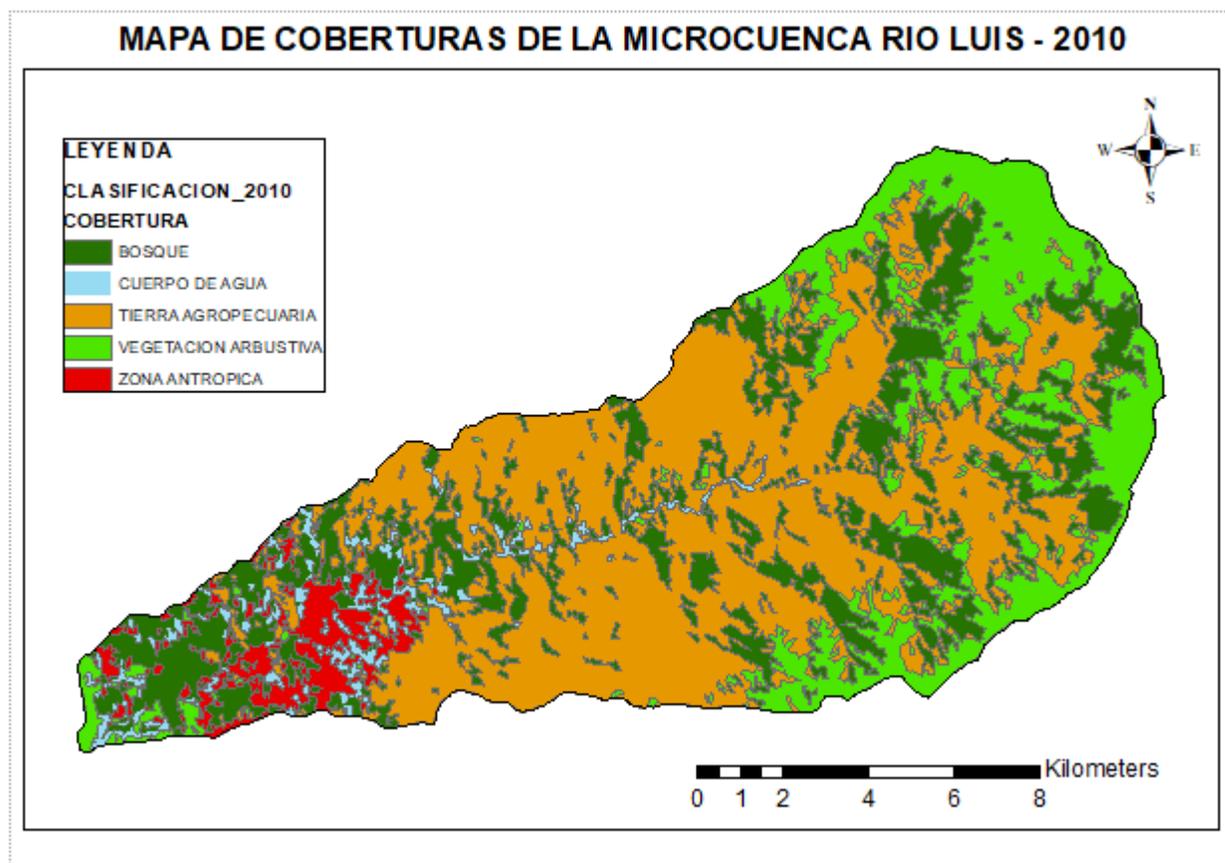


Fig 11 Mapa de cobertura de la Microcuenca Río Luis 2010

Para el año 2020 una vez realizada la clasificación supervisada obtuvimos la siguiente distribución de las coberturas para el año mencionado Fig 12, evidenciando un incremento de la zona de tierra agropecuaria en la parte más alta de la microcuenca, así mismo podemos evidenciar un incremento la zona antrópica en la parte de la cuenca baja por el crecimiento demográfico que se presentó en la zona.

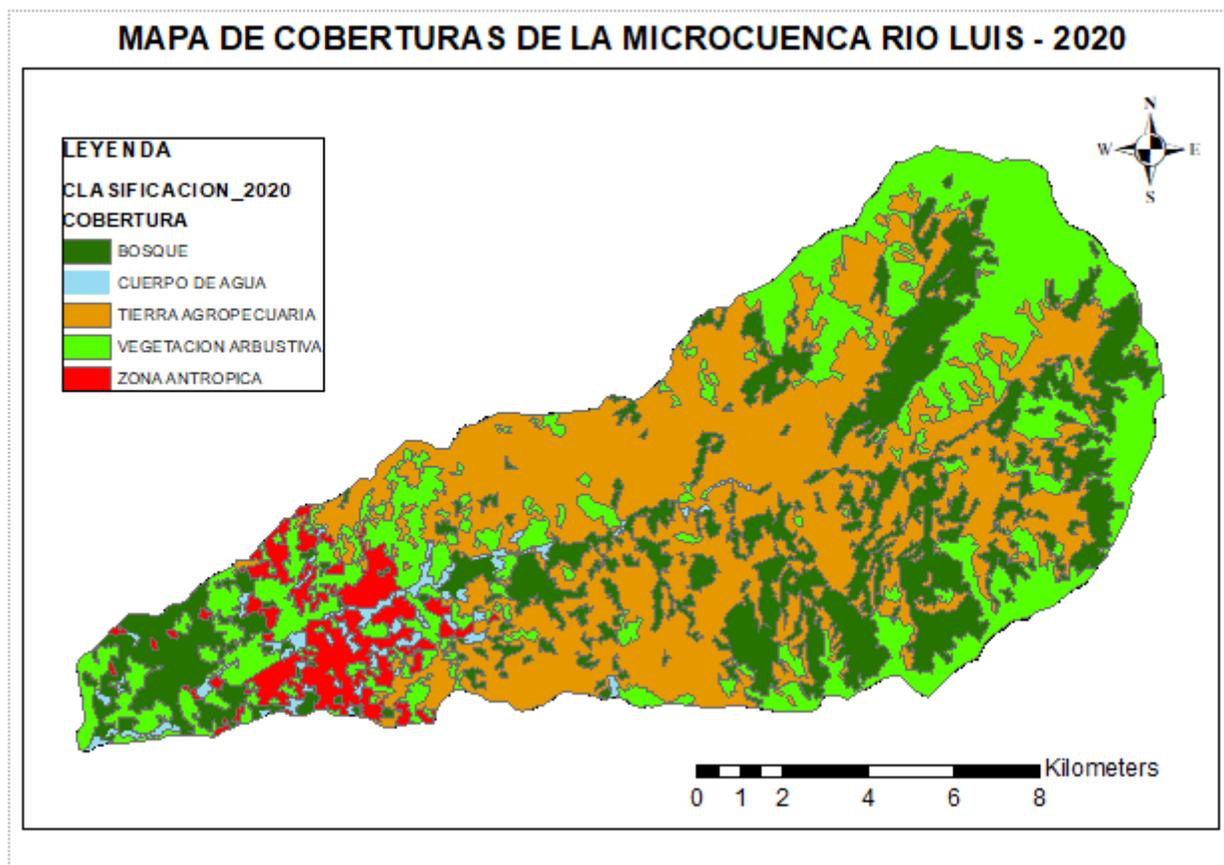


Fig 12 Mapa de cobertura de la Microcuenca Río Luis 2020

Una vez obtenidas las coberturas para los diferentes años, se calculó el área de cada una de las mismas, en los diferentes años de estudio obteniendo los siguientes resultados:

TABLA V  
 ÁREA DE LAS DIFERENTES COBERTURAS ESTUDIADAS EN CADA AÑO DE ANÁLISIS

	2000	2010	2020	CAMBIO DE SUPERFICIE TOTAL EN 20 AÑOS	% CAMBIO DE SUPERFICIE TOTAL EN 20 AÑOS
<b>BOSQUE</b>	AREA EN HECTAREAS 10.332	AREA EN HECTAREAS 4701	AREA EN HECTAREAS 4605	-5.727	44,57
<b>CUERPO DE AGUA</b>	265	500	344	79	129,83
<b>TIERRA AGROPECUARIA</b>	2666	8863	7696	5030	288,72
<b>VEGETACION ARBUSTIVA</b>	5095	3643	4990	-105	97,94
<b>ZONA ANTROPICA</b>	215	868	938	723	435,98
<b>TOTAL</b>	<b>18573</b>	<b>18573</b>	<b>18573</b>		

Observamos que en la TABLA V, que al pasar de los años dentro del área de estudio ha existido una disminución de cobertura bosque la cual se evidencia altamente afectada por el crecimiento antrópico y sobre todo por el aumento de la frontera agropecuaria, afectado tanto a las coberturas naturales como al nivel de caudal y de extensión de la cobertura de agua, donde observamos que del año 2010 al 2020 existió una disminución de 166 hectáreas de esta cobertura dentro de la zona, todo esto se debe al crecimiento demográfico y las actividades antrópicas dentro de la zona. En cuanto a la cobertura de bosque del año 2000 al 2020 existió una disminución de 5727 hectáreas dentro de la microcuenca, las cuales fueron reemplazadas por tierras agropecuarias y zonas antrópicas con un crecimiento de 5030 y 723 hectáreas respectivamente.

#### A. Índices espectrales

Para complementar el análisis y la relación del crecimiento de la zona antrópica y la disminución de cantidad de cobertura de agua dentro de la microcuenca, se analizaron dos índices los cuales son NDVI (índice de vegetación normalizada) que permite identificar el curso de la salud de la vegetación con un rango de -1 a 1 siendo los valores más cercanos a 1 vegetación saludable y los más cercanos a -1 cuerpos de agua o vegetación desnuda y el NDWI (Índice Diferencial Normalizado de Agua ) que nos permite evaluar la presencia y distribución de agua en la superficie terrestre, el NDWI está específicamente diseñado para resaltar las masas de agua.

Para esto mediante el QGIS y empleando las bandas previamente corregidas se procedió a la obtención de los valores de estos índices empleando las siguientes ecuaciones:

Para el NDVI en el satélite de Landsat 8 se emplea la siguiente ecuación en raster calculator:

$$\text{float}(B5 - B4)/(\text{float}(B5 + B4)) \quad (3)$$

Para el Landsat 7 se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{float}(B4 - B3)/(\text{float}(B4 + B3)) \quad (4)$$

Aplicando la fórmula en el QGIS obtenemos las siguientes imágenes dentro de cada uno de los años de estudio.

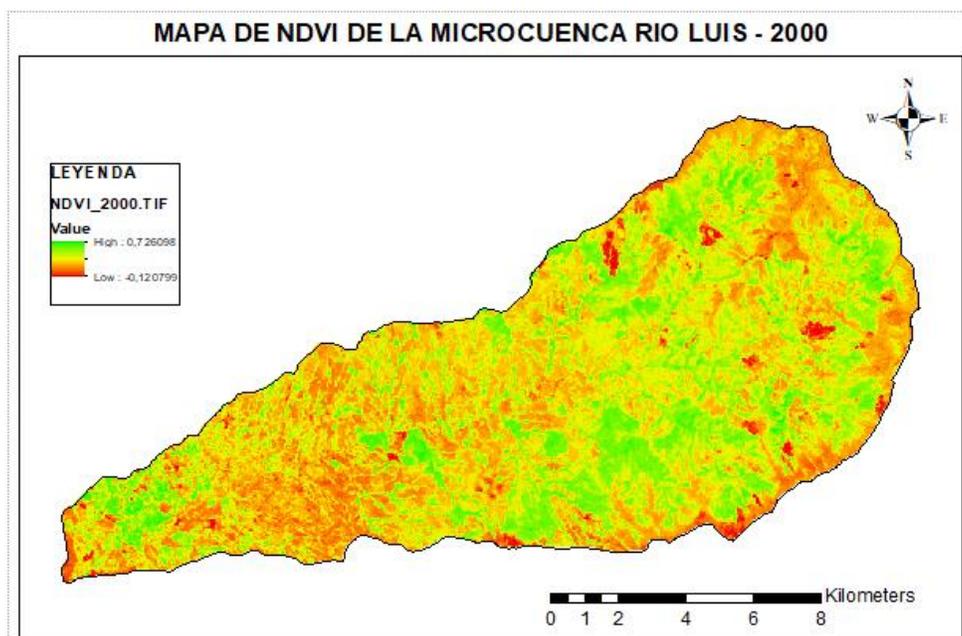


Fig 13 Mapa de NDVI de la Microcuenca Río Luis 2000

**Elaboración:** Los Autores

En este año podemos observar como los valores de NDVI tiene rangos variables siendo en la cobertura de bosque donde obtenemos un valor cercano a 1 que nos indica que dicha cobertura se encuentra en buen estado dentro de este periodo.

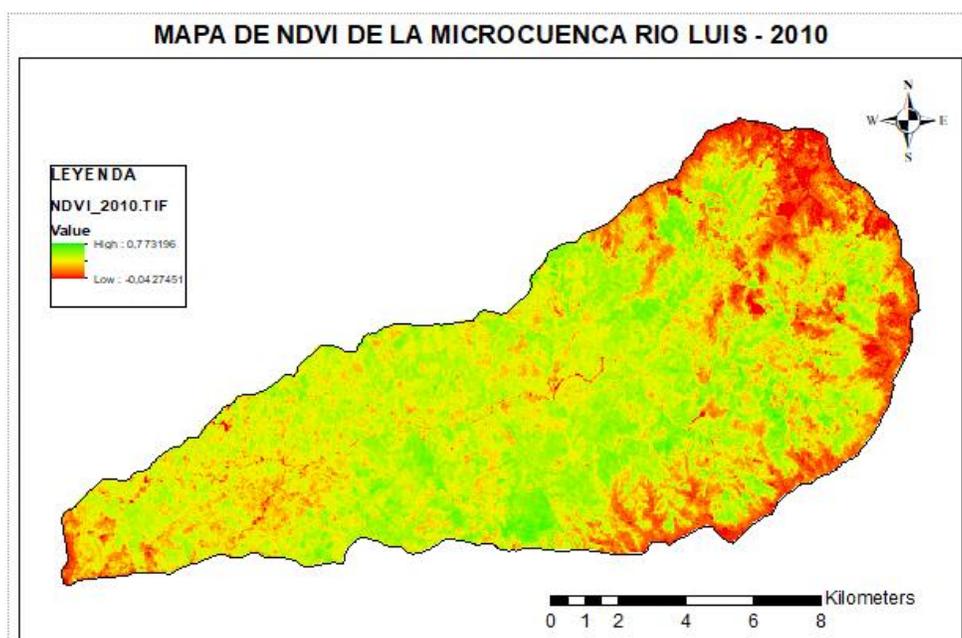


Fig 14 Mapa de NDVI de la Microcuenca Río Luis 2010

**Elaboración:** Los Autores

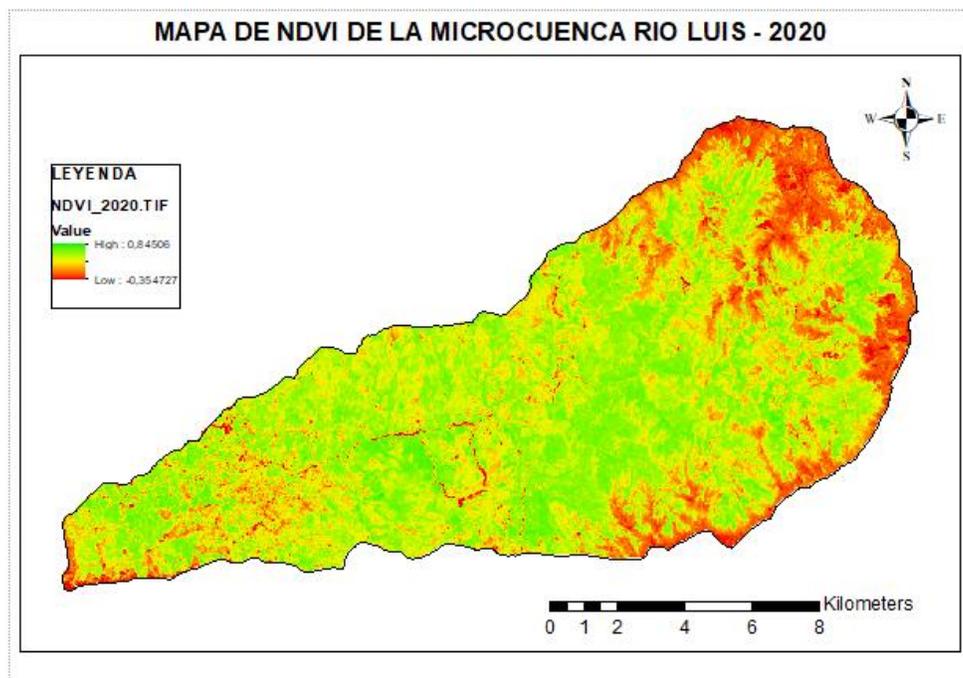


Fig 15 Mapa de NDVI de la Microcuenca Río Luis 2020

**Elaboración:** Los Autores

Para el cálculo del índice de NDWI en las bandas obtenidas del Landsat 8 se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{float}(B3 - B5) / (\text{float}(B3 + B5)) \quad (5)$$

Para el Landsat 7 se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{float}(B2 - B4) / (\text{float}(B2 + B4)) \quad (6)$$

Una vez aplicadas las formulas correspondientes a cada una de las bandas de acuerdo al satélite que se obtuvieron se generaron los siguientes mapas como se puede observar en las Fig 16, Fig 17 y Fig 18, que nos muestra el comportamiento del NDWI en la microcuenca para los tres años de estudio que fueron 2000, 2010 y 2020.

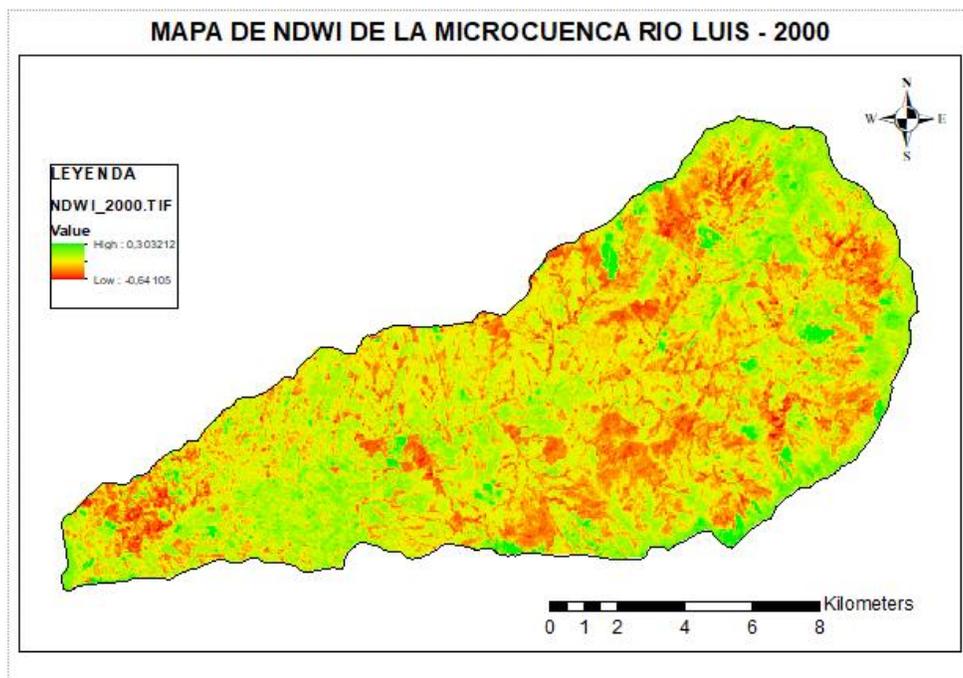


Fig 16 Mapa de NDWI de la Microcuenca Río Luis 2000

**Elaboración:** Los Autores

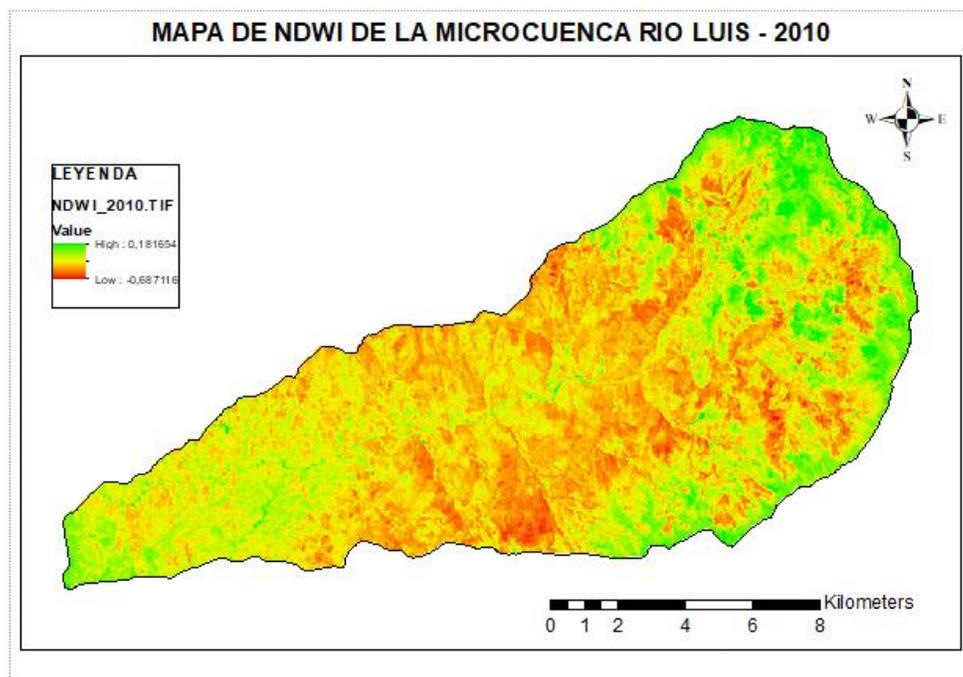


Fig 17 Mapa de NDWI de la Microcuenca Río Luis 2010

**Elaboración:** Los Autores

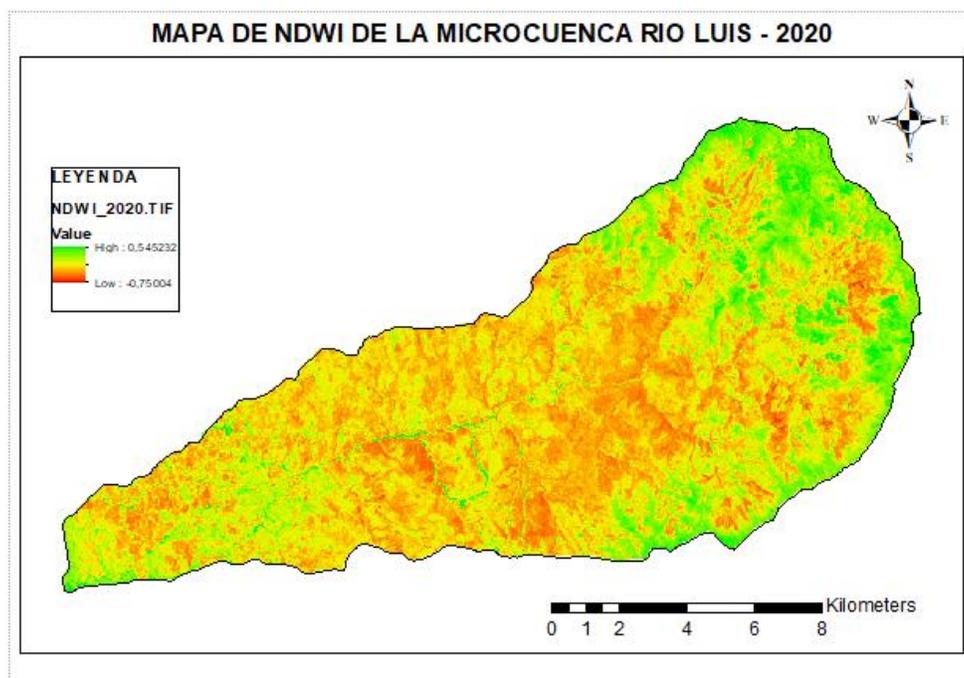


Fig 18 Mapa de NDWI de la Microcuenca Río Luis 2020

**Elaboración:** Los Autores

Una vez obtenidos los datos de cada una de las coberturas en los puntos de muestreo se procedió a obtener las medias, desviación estándar y varianzas para cada periodo de estudio, como podemos observar en la TABLA VI.

TABLA VI  
DATOS ESTADÍSTICOS DE NDVI Y NDWI PARA CADA PERIODO DE ESTUDIO

COBERTURA	PUNTOS	NDVI						NDWI					
		2000		2010		2020		2000		2010		2020	
		$\mu$	$\sigma$										
CUERPO DE AGUA	268	0,39	0,08	0,46	0,06	0,49	0,13	0,49	0,18	0,4	0,164	0,38	0,190
BOSQUE	560	0,55	0,09	0,58	0,05	0,7	0,06	0,87	0,17	0,39	0,131	0,1	0,088

TIERRA AGROPECUARIA	<b>232</b>	0,52	0,11	0,66	0,04	0,72	0,07	0,47	0,19	0,46	0,191	0,26	0,138
VEGETACION ARBUSTIVA	<b>964</b>	0,28	0,08	0,39	0,04	0,48	0,07	0,55	0,08	0,4	0,079	0,32	0,089
ZONA ANTROPICA	<b>116</b>	0,36	0,07	0,47	0,06	0,49	0,07	0,39	0,2	0,32	0,232	0,32	0,261

**Elaboración:** Los Autores

Donde  $\bar{X}$  representa la media y  $O$  corresponde a desviación estándar y  $O^2$  la varianza entre los diferentes puntos obtenidos, por ende, evidenciamos que la vegetación más saludable de acuerdo al NDVI la encontramos en la cobertura de bosque y tierra agropecuaria en los tres años de estudio, observándose una vegetación más sana para el año 2020 con un valor de 0.70, de la misma forma para el año 2020 tenemos en tierra agropecuaria un valor de 0,72 para esta cobertura.

En cuando el NDWI podemos observar que la cobertura de bosque para el año 2000 tiene un valor de 0.87 que corresponde a una superficie con una hidratación creciente, debido al buen estado de la salud de la vegetación, pero no se puede decir lo mismo se la zona antrópica la cual tiene un valor de 0.32 para el año 2020 el cual corresponde a un área desnuda sin cobertura vegetal y árida, que no presenta agua en la superficie.

**B. Análisis estadístico de índices espectrales**

Los datos previamente obtenidos por medio de las medias en cada uno de los años de estudio y coberturas, los relacionamos los datos de cada índice con la cobertura donde se encuentran, así mismo le aplicamos las pruebas de hipótesis a los datos obtenidos para cada índice.

**Primer caso:** Las varianzas son desconocidas pero iguales.

Para los años 2000 a 2010 asumimos que las dos poblaciones están distribuidas normalmente como independientes con las medias desconocidas y varianzas desconocidas iguales asumimos esto ya que ambas imágenes provienen del mismo satélite Landsat 7. Deseamos probar:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Empleamos las fórmulas anteriormente nombradas para el primer caso y evaluamos si el valor de  $T_0$  se encuentra en el intervalo para aceptar o rechazar la hipótesis.

TABLA VII  
PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS  
DESCONOCIDAS IGUALES NDVI 2000-2010

COBERTURAS	$S_p^2$	$S_p$	$T_0$	$t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$	$H_0$
CUERPO DE AGUA	0,004887224	0,069908685	-0,0897181	1,96	No puede ser rechazada
BOSQUE	0,00529811	0,072788115	-0,0273239	1,96	No puede ser rechazada
TIERRA AGROPECUARIA	0,007398553	0,086014839	-0,1562398	1,96	No puede ser rechazada
VEGETACION ARBUSTIVA	0,003716512	0,060963202	-0,082501	1,96	No puede ser rechazada
ZONA ANTROPICA	0,00429392	0,06552801	-0,2230212	1,96	No puede ser rechazada

Una vez aplicada la correspondiente prueba de hipótesis aceptamos la hipótesis nula y observamos que cada uno de los valores de  $T_0$  de cada una de las coberturas de la microcuenca en los años 2000 a 2010 se encuentran dentro del rango de  $t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$  con un valor de 1,96 y los valores de estadístico  $t$  son valores que encajan en este valor.

**Segundo caso:** Las varianzas son desconocidas pero diferentes.

Tenemos 2 poblaciones normales independientes que contienen medias desconocidas y varianzas desconocidas pero diferentes. En este caso se asume que existen variaciones entre una imagen y otra al ya no ser pertenecientes al mismo satélite ya que las imágenes del año 2010 son proporcionadas del satélite Landsat 7 y las del 2020 por el satélite Landsat 8. Deseamos probar:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

En esta situación, no podemos suponer que las varianzas desconocidas son iguales por lo cual se aplica el segundo caso para estas imágenes.

TABLA VIII  
PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS  
DESCONOCIDAS DIFERENTES NDVI 2010-2020

COBERTURAS		$S_1^2$	$S_2^2$	$V$	$T_0^*$	$t(v)$	Ho
CUERPO DE AGUA		0,00394169	0,01647144	715,985393	-2,914958219	1,96	Es rechazada
BOSQUE		0,00226392	0,00396805	423,485261	-35,42897456	1,96	Es rechazada
TIERRA AGROPECUARIA		0,00194412	0,00489377	285,664436	-11,34826543	1,96	Es rechazada
VEGETACION ARBUSTIVA		0,00151876	0,00434076	1433,31108	-36,45931033	1,96	Es rechazada
ZONA ANTROPICA		0,00368893	0,00436672	547,401113	-2,971598751	1,96	Es rechazada

Para estas imágenes se logró observar que existe una disparidad en los datos y se rechaza la hipótesis planteada ya que ninguno de los valores de las coberturas del NDVI en los años 2010 y 2020 cumplen con el enunciado de la hipótesis todos los valores de  $T_0^*$  se encuentran muy lejos del rango de 1,96 que se obtuvo para aquellos valores  $v$  calculados con los parámetros estadísticos para este periodo.

### Análisis estadístico del NDWI

Para esto datos aplicamos el mismo proceso anterior para cada uno de los años de estudio y coberturas, aplicando las pruebas de hipótesis a los datos obtenidos para este índice.

**Primer caso:** Las varianzas son desconocidas pero iguales.

De igual manera que con el índice anterior asumimos que las dos poblaciones están distribuidas normalmente independientes con medias desconocidas y varianzas desconocidas similares por la misma razón que provienen del mismo sensor en el periodo 2000-2010. Entonces planteamos las siguientes hipótesis.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Con el uso de las fórmulas para este caso buscamos demostrar la hipótesis nula.

TABLA IX  
PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS  
DESCONOCIDAS IGUALES NDWI 2000-2010

COBERTURAS	$S_p^2$	$S_p$	$T_o$	$t \alpha/2, n_1+n_2-2$	$H_0$
CUERPO DE AGUA	0,030105525	0,173509437	0,048110474	1,96	No puede ser rechazada
BOSQUE	0,022316541	0,149387217	0,192917368	1,96	No puede ser rechazada
TIERRA AGROPECUARIA	0,035517453	0,188460746	0,000914306	1,96	No puede ser rechazada
VEGETACION ARBUSTIVA	0,00617593	0,078587088	0,08970941	1,96	No puede ser rechazada
ZONA ANTROPICA	0,047699529	0,218402219	0,038465869	1,96	No puede ser rechazada

En esta prueba hipótesis se evidencia lo planteado con anterioridad que las hipótesis de ambas medias de estos dos periodos son iguales y los valores de las firmas espectrales se mantienen similares, al plantear el rango de  $t \alpha/2, n_1+n_2-2$  se observa que los valores calculados del  $t$  estadístico se encuentran en el intervalo de -1,96 y 1,96 con el valor de 0,0009 como más bajo y 0,19 como más elevado. Con estos resultados se acepta la hipótesis nula.

**Segundo caso:** Las varianzas son desconocidas pero diferentes.

Para el último periodo del año 2010 al 2020 se aplica el mismo caso aplicado en este periodo para el NDVI difiriendo en las varianzas y probar que hipótesis resulta verdadera.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Para esta prueba se evidencia cambios notables a comparación con las anteriores tablas reflejando una aceptación y rechazo de las hipótesis planteadas.

TABLA X  
PRUEBA DE HIPÓTESIS DE LAS MEDIAS DE DOS DISTRIBUCIONES NORMALES CON VARIANZAS  
DESCONOCIDAS DIFERENTES NDWI 2010-2020

COBERTURAS		$S_1^2$	$S_2^2$	$\nu$	$T_0^*$	$t(\nu)$	Ho
CUERPO DE AGUA		0,027166244	0,036164823	1450,061035	0,930136093	1,96	No puede ser rechazada
BOSQUE		0,017187144	0,00774796	1175,594268	43,02966436	1,96	Es rechazada
TIERRA AGROPECUARIA		0,036486498	0,019092678	535,0086785	13,34253342	1,96	Es rechazada
VEGETACION ARBUSTIVA		0,006278972	0,007967822	4956,736974	20,86232486	1,96	Es rechazada
ZONA ANTROPICA		0,053916365	0,068249694	589,4155133	-0,029603708	1,96	No puede ser rechazada

En estas últimas imágenes satelitales se presenta una situación que no se observó en los productos anteriores, ya que todas las pruebas de hipótesis se aceptaban en un primer caso aplicado, mientras que para el segundo caso existía un total rechazo de las hipótesis planteadas. Sin embargo, se observa que para las coberturas de cuerpos de agua y zonas antrópicas las medias si son consideradas como iguales y se asume que los valores de las firmas espectrales en estas coberturas también serían similares en estos casos.

No obstante en las cubiertas de bosque nativo, tierra agropecuaria y vegetación arbustiva aceptarían totalmente la hipótesis alternativa que se planteó para este periodo.

## IX DISCUSIÓN

### A. Diagnóstico del cambio de uso de suelo

En este apartado, el cambio en el uso de suelo, se convierte en el eje de discusión tomando como punto de partida los mapas de uso de suelo en el periodo propuesto anteriormente. Donde el crecimiento demográfico y la incorporación de diferentes actividades dentro de la microcuenca del río Luis han presentado cambios visibles en las coberturas existentes.

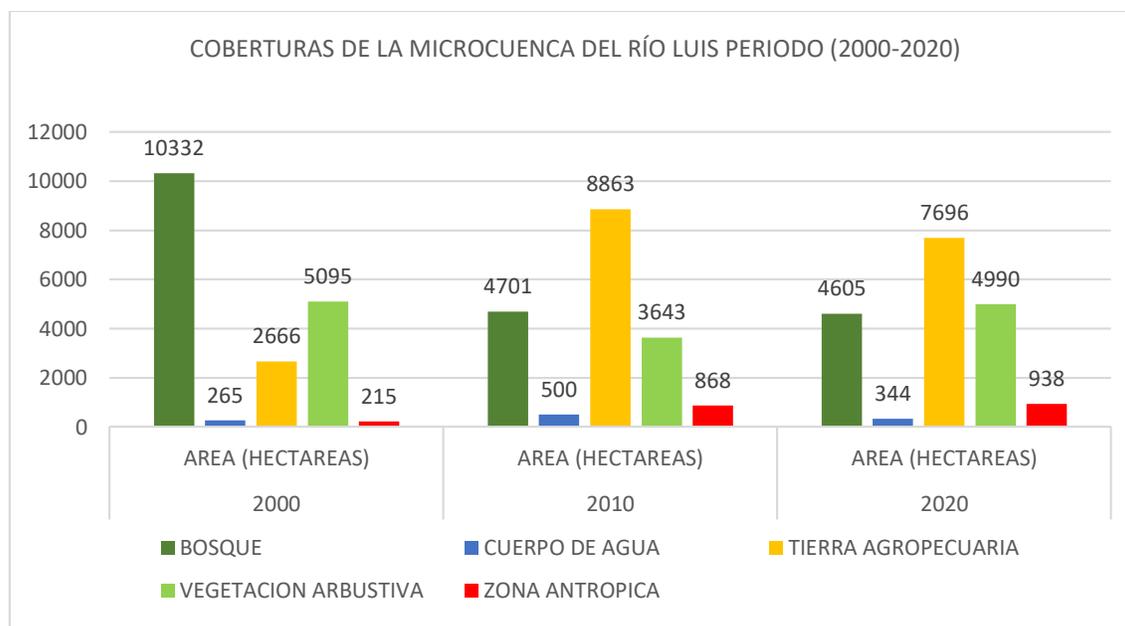


Fig 19 Coberturas presentes en la microcuenca del Río Luis en el periodo 2000-2020

En los resultados de la investigación de Baque Solis & Camargo Mora [45], se observó un incremento en el uso del suelo urbano, lo cual se relaciona con el desplazamiento de personas desde áreas rurales hacia ciudades en busca de mejores oportunidades para cubrir sus necesidades fundamentales. Al examinar los indicadores territoriales en las áreas rurales, se evidencian valores reducidos que reflejan una carencia de infraestructuras y servicios básicos, así como una situación de pobreza.

Estos resultados concuerdan con la información obtenida en nuestro estudio; debido que para el año 2020 la zona antrópica del área de estudio se incrementó notablemente, pasó de 215 a 938 hectáreas en solo veinte años obteniendo un crecimiento de casi 5 veces su valor inicial.

Por otra parte, el uso de suelo de Bosque es el que más cambio presentó en comparación a otros. Cobos Anguisaca [46], en su estudio, manifiesta en primera instancia que la cobertura de Bosque muestra una notable disminución, que concuerda con la realidad nacional y global con

respecto a la pérdida de áreas forestales, estos cambios pueden ser atribuidos a la intensa influencia humana, especialmente debido a la agricultura y al desarrollo de áreas urbanas. Los valores de reducción observados están en línea con los hallazgos de investigaciones previas.

Dentro de la microcuenca del río Luis, estos valores también se reflejan en una disminución drástica de superficie boscosa, pasando de ser la cobertura dominante con 10332 hectáreas a principios de este milenio, a quedar en tercer lugar con una superficie de 4605 hectáreas.

Estos cambios en las coberturas de vegetación nativa a otros usos, como el caso de las tierras agropecuarias, han ocasionado el empobrecimiento de la cubierta vegetal y forestal. Luna Florin et al.,[47], obtuvo en los resultados de su investigación una ampliación en la cobertura de tierras agropecuarias como consecuencia de la ampliación de la expansión agrícola, dada a partir del establecimiento de varios monocultivos propios de esta localidad y de cultivos intensivos de ciclo corto. En este estudio se enfatiza la presencia de monocultivos permanentes de banano y cacao, puesto que requieren un riego permanente en la época seca de la región.

Dentro del área perteneciente a este estudio se presenta este mismo fenómeno, ya que las tierras agropecuarias se expandieron a lo largo de la microcuenca, incrementándose paulatinamente con el pasar de las décadas. Con una superficie inicial de 2666 hectáreas en el año 2000, estas tierras ocuparon el primer lugar como la cobertura de mayor extensión geográfica para el año 2020 con un total de 7696 hectáreas.

Las actividades agrícolas y ganaderas ejercen presión sobre la cubierta forestal y la vegetación arbustiva del sector, que disminuye por el avance de la frontera agropecuaria.

Desde el año 2000, gracias al BID y el Banco Mundial, se otorgaron beneficios a las zonas agrícolas del país. La aparición de políticas desarrolló competencia en el cultivo de los productos primarios no tradicionales y para la seguridad alimentaria. Sin embargo, la vulnerabilidad del mercado y la dependencia de las transnacionales generaron algunos programas agrícolas que permitieron la liberalización de mercados internos y la apertura de la economía al comercio internacional, promoviendo el progreso de la actividad agropecuaria [45].

La accesibilidad del recurso hídrico en zonas cultivadas es indispensable para la producción agrícola. Ecuador, al ser un país agrícola por excelencia, dependen de gran medida de los cuerpos de agua para el riego, los cuales proveen aproximadamente el 98% del agua necesaria. En el trabajo realizado por Luna Florin et al.[47], se observó que estos cuerpos de agua, sean estos: lagos, ríos e incluso lagunas se han mejorado, de tal manera que el único año en el que se ha perdido la cobertura

ha sido para el año 2000, ya que para el año de 1990 hasta 2018, se ha observado un aumento del 27.33%, lo que representa un incremento de 456.3 hectáreas en relación con los cuerpos de agua.

Ante el notable crecimiento de actividades agrícolas y ganaderas en la microcuenca del río Luis, los resultados evidencian un incremento en la cantidad de cuerpos de agua. Desde el año 2000, gracias a las facilidades otorgados por instituciones de desarrollo internacional y al aumento de la agricultura, se produjo un incremento en las masas de agua debido a la construcción de albarradas y embalses. Estas obras de infraestructura sustentaron el uso agrícola, ganadero y avícola de la zona. En el transcurso de una década, la superficie de cuerpo de agua paso de 256 a 500 hectáreas.

Al ser este río de gran importancia para los centros poblados a lo largo de su cauce, se mantienen estos terrenos protegidos con vegetación natural, que cumple funciones de protección y conservación a la zona de captación y almacenamiento de agua, siendo una fuente de materia prima y de salud para la población [21].

Sin embargo, estos cuerpos de agua no se encuentran completamente blindados. Existen ciertas amenazas que afectan o alteran las características saludables de esta microcuenca, ya sea en las aguas superficiales o en aquellas que se encuentran en el subsuelo. Los residuos provenientes de actividades extractivas o de agroquímicos alterarían la composición de este recurso. La degradación del suelo, ya sea por deforestación, sobrepastoreo o ineficiencia en las operaciones y mantenimiento de sistemas de riego, conllevaría a la disminución de reservas de agua, resultando en problemas para la microcuenca si no se manejan adecuadamente.

### **B. Comparación de variabilidad en los índices espectrales**

La existencia de alteraciones en el tiempo y el espacio de coberturas vegetales a lo largo de un cuerpo de agua se convierte en un indicador del dinamismo presente en los ecosistemas. La aplicación de herramientas de teledetección se convierte en una ayuda importante para este fin. Con el uso de datos satelitales, se pueden obtener ciertos índices espectrales que nos permiten entender estas dinámicas de manera más precisa.

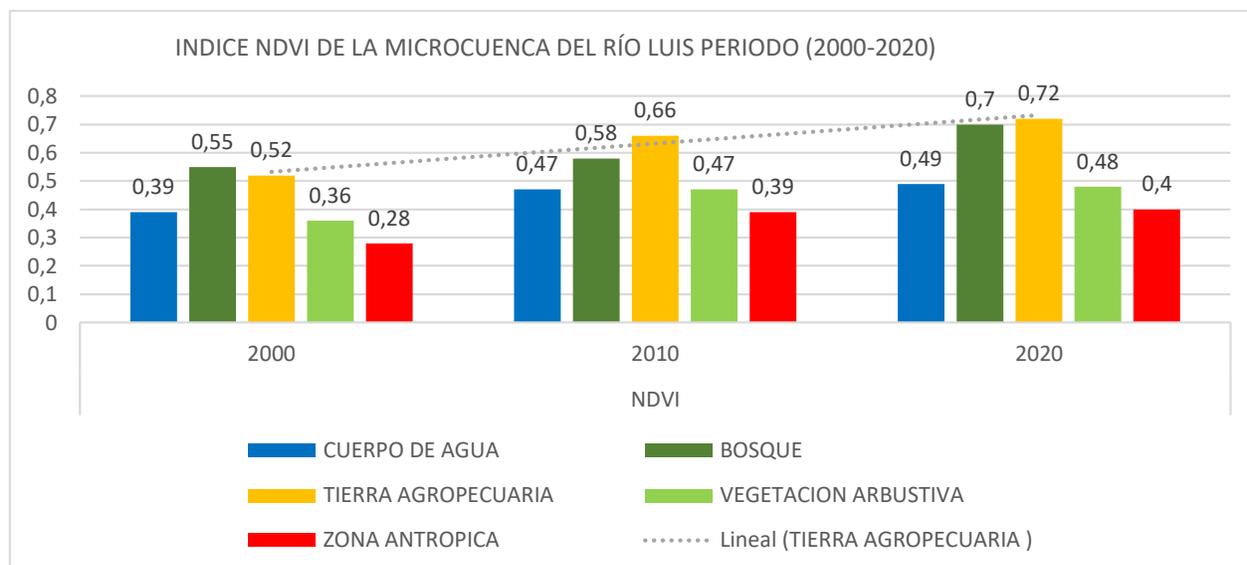


Fig 20 Valores del NDVI en la microcuenca del Río Luis en el periodo 2000-2020

En el estudio realizado por Alvarado et al. [48], obtuvo como resultado que el comportamiento de la vegetación sigue una tendencia de crecimiento y mayor humedad en aquellas zonas donde existe un aporte de agua, mientras que en zonas donde existen menos cultivos, los valores de NDVI se mantienen constantes en valores por abajo del 0.30. El autor menciona que los aumentos en los valores del NDVI se asocian con un mayor consumo de agua en la vegetación, la cual es abastecida por los sistemas de riego existentes en la cuenca de su área de estudio.

Mientras que en la microcuenca del río Luis, el valor más elevado para inicios de este milenio se denota en la cobertura de bosque, difiriendo poco de las tierras agropecuarias con valores de 0,55 y 0,52 respectivamente. Sin embargo, para la siguiente década, al existir un manejo adecuado y mejora en los sistemas de irrigación, se concuerda con el estudio realizado por Alvarado. En las tierras agrícolas y pecuarias se observa un incremento en sus resultados del NDVI, llegando a alcanzar un valor de 0,72 frente a los 0,70 de la superficie de bosque en el año 2020.

Por otra parte, Szabó et al. [44], en su estudio, buscó mapear la cobertura de los suelos y monitorear cada cambio presentado por cada cobertura indicada por medio de la aplicación de índices espectrales. El autor pudo observar que ciertos tipos de coberturas diferían unas de las otras. Se encontraron correlaciones débiles entre los índices debido a ciertas disparidades por la clase de cobertura hídrica del suelo. En sus resultados, observaron que el NDWI no era apropiado para aplicarse como índice de agua, optando por emplear el MNDWI ya que este índice mejoró la clasificación de coberturas sin discriminar cuerpos de agua existentes en la zona de estudio.

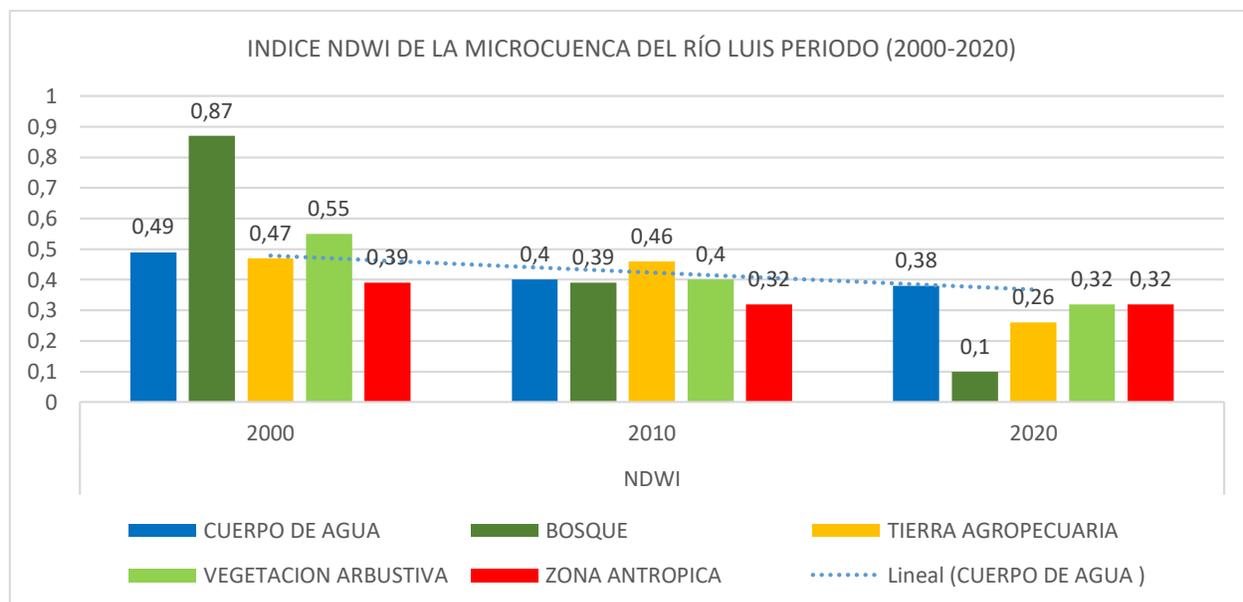


Fig 21 Valores del NDWI en la microcuenca del Río Luis en el periodo 2000-2020

En nuestro estudio, para evaluar los cuerpos de agua, optamos por emplear el Índice de Diferencia Normalizada de Agua. Se aprecia una singularidad: todos los valores arrojados por el índice se encuentran en rangos por debajo de 0,5 desde el año 2010 al 2020.

En comparación con el estudio de Szabó et al. [44], también se obtuvo valores muy por debajo de lo normal, yendo de -0,36 a 0,21 en los valores de sus coberturas. Por ello, Szabó recomienda emplear el índice MNDWI para evitar una discriminación de coberturas hídricas y que los valores reflejen la realidad del área de estudio.

En valores obtenidos de NDWI en la microcuenca del Río Luis, no se reflejan los valores considerados como correctos en cuanto a los cuerpos de agua, a diferencia de lo que se observa en la clasificación supervisada y en el cálculo del NDVI del área de estudio. Existe una tendencia anormal: se observa que los valores superiores a 0,5 pertenecen a coberturas vegetales, ya sea de bosque o vegetación arbustiva, para el año 2000, respectivamente.

Otra de las incongruencias presentadas en los resultados es la cobertura de Cuerpos de Agua que se aleja de la realidad al presentar un rango de valores de 0,49 a 0,38 con una línea tendencia negativa. Al coincidir con Szabó et al. [44], se considera que existe una discriminación en coberturas hídricas por parte de este índice, arrojando valores que difieren de la realidad de esta microcuenca.

En cuanto a las pruebas de hipótesis en este estudio, no se manifestó mucha aceptación de las hipótesis alternativas. Solo en los tests donde la varianza era desconocida y diferente se

mostraba aceptación de  $H_1$ . Este fenómeno se evidenciaba en los índices espectrales para los años 2010 y 2020, tanto para el NDVI como para el NDWI.

Por otra parte, en los resultados que obtuvo Muñoz [49], se concluyó que los modelos de pruebas de hipótesis proporcionan menos error en comparación con solo aplicar intervalos de confianza, ya que no reflejan la magnitud de diferencias de gran significancia en sus resultados. Por otro lado, Cascante [50] recalca que las hipótesis que se plantean deben ser pensadas para que los valores estadísticos sean similares entre los grupos a evaluar. Aquellos valores que se encuentren sin afectar a ningún grupo se denominan hipótesis nula, mientras que la hipótesis alternativa se cumple al existir una diferencia entre estos grupos que se evalúan. Este autor recalca que, entre más cantidad de datos tenga la muestra, más precisa se vuelve esta prueba, ya que se aproxima a la curva de normalidad al incrementarse sus grados de libertad, dando una mayor exactitud en las estimaciones que se realicen con este test estadístico.

## X. CONCLUSIONES

En el periodo de estudio, dentro de la microcuenca, se manifestaron cambios notorios en las coberturas analizadas a lo largo de los años 2000 a 2020. La adquisición de imágenes satelitales y el uso de sistemas de información geográfica se han convertido en herramientas fundamentales para evidenciar los cambios en un intervalo de tiempo determinado. Con la creación de mapas de cobertura y el uso de la tierra, se ha tomado en consideración para la clasificación supervisada el nivel I, provisto en los mapas interactivos del MAATE y el MAG. Con los datos obtenidos del estudio, se observó que las áreas de bosque nativo fueron decreciendo con el pasar de las décadas, ganando más terreno aquellas tierras dedicadas a las actividades agrícolas y pecuarias debido al crecimiento demográfico en este sector. La cobertura de cuerpos de agua ha fluctuado con aumentos y disminuciones a lo largo de las décadas. En el año 2010 se mostraba una extensión de 500 hectáreas que ha ido decreciendo hasta las 344 hectáreas en 2020. Estos decrecimientos van de la mano con una falta de cuidado y protección de las fuentes hídricas. Se espera que los resultados obtenidos sirvan de apoyo a las decisiones y acciones políticas de los gobiernos autónomos descentralizados que se encuentran internamente en el área de influencia del río Luis, enfocándose principalmente en el uso y gestión del suelo dentro de este cuerpo hídrico.

El uso de índices espectrales nos permite reconocer y clasificar ciertas características que definen un escenario o cobertura determinada, aunque existe un sesgo en esta interpretación por parte de la percepción remota. Los valores obtenidos de la aplicación de estos índices pueden asemejarse en distintas clases de cubiertas terrestres, lo que implica que exista una discriminación entre estas clases. El uso del NDVI se implementó para distinguir las coberturas de vegetación saludable con valores máximos, mientras que los valores de menor ponderación se asocian a coberturas con escasa o nula vegetación. De igual manera, la implementación del NDWI buscó asociar los valores más altos a los cuerpos de agua o zonas con abundante hidratación, y aquellos rangos más cercanos a 0 se vinculaban con coberturas y áreas desnudas o áridas.

En cuanto a las pruebas de hipótesis aplicadas para el NDVI y NDWI proporcionan menos error en comparación con solo aplicar intervalos de confianza. Estas hipótesis fueron aceptadas para el caso de medias de distribuciones normales con varianzas desconocidas iguales para ambos índices en el periodo 2000 a 2010. Sin embargo para los años 2010 a 2020 en el caso medias de distribuciones normales con varianzas desconocidas diferentes, en el índice NDVI se rechazaban las  $H_0$  evidenciándose que existe una diferencia significativa entre las dos medias de las coberturas

para la última década. Mientras que en el caso del NDWI en la última década se aceptaba la hipótesis nula solo para las coberturas de cuerpos de agua y zona antrópica estableciendo que no existe una diferencia significativa en ambas medias de las coberturas anteriormente mencionadas. Esta variabilidad en cuanto a la aceptación y rechazo de las hipótesis se asocian con el uso de diferentes satélites para la comparación de índices espectrales en la última década en el área de estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos, llegamos a la conclusión de que es indispensable el cuidado de la vegetación nativa, sea esta de bosque, vegetación arbustiva o herbácea, ya que la expansión de tierras agropecuarias está dominando esta microcuenca y las actividades antrópicas han repercutido en la cobertura de cuerpos de agua. Por eso, es necesaria una participación conjunta de actores e instituciones de forma coordinada con el fin de cuidar los recursos naturales y gestionar los recursos hídricos en esta zona de estudio. Un diagnóstico estratégico para el manejo de esta microcuenca, considerando las potencialidades y las debilidades de esta área de estudio, se convierte en un apoyo para la preservación de esta área geográfica.

## **XI. RECOMENDACIONES**

La recopilación de imágenes satelitales para esta clase de estudios es fundamental para el análisis de datos multitemporales. Existen una variedad de satélites y productos para emplear. Se recomienda usar imágenes con la menor cantidad de perturbaciones por factores ambientales, como la presencia de nubes, y de mayor resolución por píxel. Los datos obtenidos se encontrarán con menor cantidad de sesgos, proporcionándonos mayor fiabilidad al estudio.

Antes de realizar un estudio que implique esta temática, es indispensable conocer el medio a analizar, las condiciones actuales del territorio y las problemáticas que motivan el cambio en el uso del suelo. Comprendiendo estas transiciones desde una perspectiva más técnica, las tendencias que surgen en cada una de las coberturas en el año a evaluar se entienden mejor. Interpretar estos resultados con mayor detenimiento resulta en un análisis más robusto y contundente.

El uso de índices espectrales como complemento a los mapas de uso del suelo obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales se convierte en una herramienta útil para la diferenciación de coberturas terrestres. Sin embargo, estos índices pueden variar entre sí, incluso si pertenecen a la misma clase. El NDVI y el NDWI se asemejan en sus rangos y valores asociados a vegetación y agua, respectivamente. No obstante, este último puede discriminar unas coberturas de otras, especialmente aquellas que se refieren a cuerpos de agua. Por ello, es recomendable aplicar otros índices asociados al recurso hídrico; uno de ellos es el MNDWI que, según la bibliografía, es más eficiente para caracterizar cuerpos de agua, evitando que se superpongan con cubiertas terrestres de otra clase.

## REFERENCIAS

- [1] D. C. P. Pozo, «¿Después de la minería qué? Análisis del impacto socioeconómico y ambiental de la minería Caso South American Development Company (SADCO- CIMA), Portovelo y Zaruma- El Oro - Ecuador».
- [2] Universidad Técnica Estatal de Quevedo *et al.*, «Impacto del uso de suelo y la fragmentación del paisaje sobre la calidad del agua del río Teaone en Ecuador», *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 40, pp. 15-36, ene. 2024, doi: 10.20937/RICA.54900.
- [3] Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México *et al.*, «Impacto del cambio de cobertura y uso de suelo y cambio climático en la respuesta hidrológica de la cuenca de la presa El Rejón mediante el uso de inteligencia artificial», *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 14, n.º 4, pp. 456-494, jul. 2023, doi: 10.24850/j-tyca-14-04-10.
- [4] Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias de la Vida, FCV, Centro de Investigaciones Biotecnológicas del Ecuador, CIBE, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. *et al.*, «Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera», *Bionatura*, vol. 2, n.º 4, pp. 437-441, dic. 2017, doi: 10.21931/RB/2017.02.04.5.
- [5] D. M. Ruiz-Ordóñez, Y. T. Solano-Correa, R. Maysels, y A. Figueroa-Casas, «Land-Use Dynamics and Water Quality in Andean Basins», *Sustainability*, vol. 15, n.º 22, p. 15965, nov. 2023, doi: 10.3390/su152215965.
- [6] R. A. Murillo Castañeda, «Implementación del método máquinas de soporte vectorial en bases de datos espaciales para análisis de clasificación supervisada en imágenes de sensores remotos», *Rev. Cartográfica*, n.º 102, pp. 27-42, ene. 2021, doi: 10.35424/rcarto.i102.830.
- [7] Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, F. J. Gaspari, A. R. Díaz-Gómez, Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, F. A. Montealegre-Medina, y Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, «Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina», *Tecnol. Cienc. Agua*, vol. 12, n.º 1, pp. 74-112, ene. 2021, doi: 10.24850/j-tyca-2021-01-03.

- [8] M. M. Castillo y Departamento de Ciencias de la Sustentabilidad, El colegio de Frontera Sur, Unidad Villahermosa., «Land use changes affect water quality and chlorophyll concentration in tropical streams», *Hidrobiológica*, vol. 33, n.º 1, pp. 59-72, abr. 2023, doi: 10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2023v33n1/Castillo.
- [9] C. Mestanza-Ramón, R. Ordoñez-Alcivar, C. Arguello-Guadalupe, K. Carrera-Silva, G. D’Orio, y S. Straface, «History, Socioeconomic Problems and Environmental Impacts of Gold Mining in the Andean Region of Ecuador», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 19, n.º 3, p. 1190, ene. 2022, doi: 10.3390/ijerph19031190.
- [10] People’s Friendship University of Russia, Moscow, Russia, A. E. Apolo Herrera, Y. K. Chàvez Ferreyra, Plekhanov Russian University of Economic, Moscow, Russia, I. M. Potravny, y Plekhanov Russian University of Economic, Moscow, Russia, «Gold mining impact assessment on the economy and the environment in Ecuador», *Gorn. Zhurnal*, pp. 62-65, feb. 2020, doi: 10.17580/gzh.2020.02.08.
- [11] P. Carrión-Mero *et al.*, «Surface and Underground Geomechanical Characterization of an Area Affected by Instability Phenomena in Zaruma Mining Zone (Ecuador)», *Sustainability*, vol. 13, n.º 6, p. 3272, mar. 2021, doi: 10.3390/su13063272.
- [12] J. L. Rivera-Parra, B. Beate, X. Diaz, y M. B. Ochoa, «Artisanal and Small Gold Mining and Petroleum Production as Potential Sources of Heavy Metal Contamination in Ecuador: A Call to Action», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 18, n.º 6, p. 2794, mar. 2021, doi: 10.3390/ijerph18062794.
- [13] Clirsen, «Estudio Multitemporal de los Manglares, Camaroneras y Areas Salinas de la Costa Ecuatoriana, Mediante Informacion de Sensores Remotos», 1990.
- [14] GEOPLADES CIA. LTDA., «ESTUDIO MULTITEMPORAL DEL NOR---ORIENTE DEL ECUADOR», 2009.
- [15] R. Valencia, D. D. Serrano, y R. Galárraga-Sánchez, «Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la oferta hídrica. Caso de estudio microcuenca del río Blanco, páramos del Nevado Cayambe, Ecuador.», vol. 34, n.º 1, 2014.
- [16] F. Velásquez, J. Calderón, L. Urdánigo, y F. Cárdenas, «Cambio de uso de suelo en el azolvamiento del embalse “La Esperanza” Manabí-Ecuador», vol. 19, n.º 37, 2016.

- [17] C. Rosero, X. Otero, C. Bravo, y C. Frey, «Multitemporal Incidence of Landscape Fragmentation in a Protected Area of Central Andean Ecuador», *Land*, vol. 12, n.º 2, p. 500, feb. 2023, doi: 10.3390/land12020500.
- [18] K. Ding *et al.*, «Time Series Analysis of Land Cover Change Using Remotely Sensed and Multisource Urban Data Based on Machine Learning: A Case Study of Shenzhen, China from 1979 to 2022», *Remote Sens.*, vol. 14, n.º 22, p. 5706, nov. 2022, doi: 10.3390/rs14225706.
- [19] C. Sandoval-García y I. Cantú-Silva, «Análisis geomático del cambio de uso del suelo en la subcuenca río Copalita, Oaxaca», *Ecosistemas Recur. Agropecu.*, vol. 8, n.º II, ene. 2022, doi: 10.19136/era.a8nII.2915.
- [20] M. C. Hernández Cavazos, R. Sandoval García, V. Molina Guerra, y E. Alanís Rodríguez, «Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León», *ERA*, 2023, doi: <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3743>.
- [21] S. P. L. Sigüenza, «AUTORIDADES GAD DEL CANTÓN PORTOVELO», 2019.
- [22] B. Pradhan, S. Yoon, y S. Lee, «Examining the Dynamics of Vegetation in South Korea: An Integrated Analysis Using Remote Sensing and In Situ Data», *Remote Sens.*, vol. 16, n.º 2, p. 300, ene. 2024, doi: 10.3390/rs16020300.
- [23] FAO, «SITUACIÓN Y ACONTECIMIENTOS RECIENTES EN EL SECTOR FORESTAL», Roma, 2005.
- [24] C. Matovelle y D. Heras, «Análisis comparativo de las características morfométricas de sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, Ecuador», *Investig. Cienc. Univ. Autónoma Aguascalientes*, n.º 80, pp. 22-31, jun. 2020, doi: 10.33064/iycuaa2020803000.
- [25] A. M. Braz, P. H. M. Garcia, A. L. Pinto, E. S. Chávez, y I. J. D. Oliveira, «Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra», *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 29, n.º 1, pp. 69-85, ene. 2020, doi: 10.15446/rcdg.v29n1.76232.
- [26] X. Kang, J. Liu, C. Dong, y S. Xu, «Using High-Performance Computing to Address the Challenge of Land Use/Land Cover Change Analysis on Spatial Big Data», *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 7, n.º 7, p. 273, jul. 2018, doi: 10.3390/ijgi7070273.
- [27] F. Mosconi, D. Dombald, N. Moscoso, A. Bandoni, A. Blanco, y S. Moreno, «Estudio de sistemas de emergencias pre-hospitalarias empleando sistemas de información geográficos», *An. Geogr. Univ. Complut.*, vol. 42, n.º 2, pp. 445-461, dic. 2022, doi: 10.5209/aguc.85178.

- [28] R. Guzmán, M. Bezada, y I. Rodríguez-Santalla, «Cartografía de cobertura del suelo mediante datos de teledetección en la planicie de desborde del río Apure (Venezuela)», *Cuad. Investig. Geográfica*, vol. 49, n.º 1, pp. 113-137, jul. 2023, doi: 10.18172/cig.5607.
- [29] M. L. Sánchez, «ARQUITECTURA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: HACIA UN PROYECTO DE PAISAJE INFORMADO / ARCHITECTURE AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS: TOWARDS AN INFORMED LANDSCAPE DESIGN».
- [30] B. Xia y L. Zheng, «Ecological Environmental Effects and Their Driving Factors of Land Use/Cover Change: The Case Study of Baiyangdian Basin, China», *Processes*, vol. 10, n.º 12, p. 2648, dic. 2022, doi: 10.3390/pr10122648.
- [31] J. Veneros, L. García, E. Morales, V. Gómez, M. Torres, y F. López-Morales, «Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua», *Idesia Arica*, vol. 38, n.º 4, pp. 99-107, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-34292020000400099.
- [32] «Landsat 8 Satellite Images», ENOS DATA ANALYTICS. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>
- [33] «Landsat 8», Landsat Science. [En línea]. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>
- [34] M. Silva, A. García, A. Hernando, F. Mauro, y J. Velázquez, «Clasificación supervisada de imágenes Landsat, analizando por secciones el territorio estudiado (Cuenca del Grijalva, Chiapas, México)», *TOPCART XI Congr. Int. GEOMÁTICA Cienc. TIERRA*, vol. 36, n.º 174, pp. 143-148, 2016.
- [35] C. Jara, J. Delegido, J. Ayala, P. Lozano, A. Armas, y V. Flores, «Estudio de bofedales en los Andes ecuatorianos a través de la comparación de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2», *Rev. Teledetec.*, n.º 53, p. 45, jun. 2019, doi: 10.4995/raet.2019.11715.
- [36] J. L. HURTADO ABRIL, «Generación de un índice espectro temporal para la identificación de zonas afectadas por deforestación usando imágenes Landsat.», Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2019.
- [37] H. Carbajal-Morán, «Determination with satellite images of the normalized difference vegetation index of the Pampas-Tayacaja valley», vol. 5, n.º 1, 2020.

- [38] A. D. Alarcón Montaña y M. A. Roza Arango, «Aplicación de índices espectrales para determinar la transformación del bosque seco en Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia)», *Av. Investig. En Ing.*, vol. 18, n.º 1, abr. 2021, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.7070.
- [39] «USGS», Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). [En línea]. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [40] «Remote Sensing Analysis in QGIS», Remote Sensing Analysis in QGIS. [En línea]. Disponible en: [https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Remote\\_Sensing\\_Analysis\\_in\\_QGIS](https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Remote_Sensing_Analysis_in_QGIS)
- [41] W. F. Mejía Sánchez, «Aplicación de técnicas geoespaciales para la evaluación y predicción del cambio de cobertura del suelo en la parroquia Baños Cuenca-Ecuador», Cuenca, 2023.
- [42] «Análisis visual y clasificación de imágenes en QGIS: el plugin Semi-Automatic Classification», Análisis visual y clasificación de imágenes en QGIS: el plugin Semi-Automatic Classification. [En línea]. Disponible en: <https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-5.html>
- [43] M. G. P. Ortega, «ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL PARAMO DE PISBA JURISDICCION DEL MUNICIPIO DE TASCO PARA EL PERIODO 1990 - 2015», 1990.
- [44] S. Szabó, Z. Gácsi, y B. Balázs, «Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories», *Landsc. Environ.*, vol. 10, n.º 3-4, pp. 194-202, sep. 2016, doi: 10.21120/LE/10/3-4/13.
- [45] M. G. Camargo Mora y B. S. Baque- Solis, «Cambios del uso de la tierra y propuesta de zonificación para el cantón de Montecristi, Ecuador (2010-2017)», *AXIOMA*, vol. 1, n.º 29, pp. 5-12, dic. 2023, doi: 10.26621/ra.v1i29.845.
- [46] J. D. C. Anguisaca, «ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIOS DE COBERTURA Y USO DEL SUELO: CUENCA DEL RÍO JUBONES, ECUADOR», 2021.
- [47] A. Luna-Florin, A. Sánchez-Asanza, y M. Guerrero-Azanza, «Cambios del uso de suelo (1990 – 2018) en la cuenca del río Santa Rosa, Ecuador Land use changes (1990 - 2018) in the Santa Rosa river basin, Ecuador», vol. 23, 1990.
- [48] C. Alvarado, A. Leandro, y D. Sarango, «Comparación de Índices de Vegetación con imágenes Landsat usando la computación en la nube: zona Pampa de Majes-Siguas, Arequipa Perú

(Periodo: Jun 1984 a Nov 2018)», *Rev. Investig. Física*, vol. 22, n.º 1, pp. 27-34, may 2021, doi: 10.15381/rif.v22i1.20280.

[49] P. J. Flores Muñoz, «Comparación de la eficiencia de las pruebas de hipótesis e intervalos de confianza en el proceso de inferencia. Estudio sobre medias», *Rev. Cienc.*, vol. 22, n.º 2, may 2019, doi: 10.25100/rc.v22i2.7921.

[50] M. G. Cascante Calderón y I. M. Villacís Altamirano, «Prueba T de Student para una investigación odontológica», *Odontol. Act. Rev. Científica*, vol. 7, n.º 1, pp. 49-54, ene. 2022, doi: 10.31984/oactiva.v7i1.562.

## ANEXOS

ANEXO 1 Datos obtenidos del índice espectral del NDVI para los años 2000-2010-2020

<b>FID</b>	<b>Shape</b>	<b>Id</b>	<b>COBERTURA</b>	<b>NDVI_2020</b>	<b>NDVI_2010</b>	<b>NDVI_2000</b>
268	Point	0	BOSQUE	0,77205	0,641131	0,655526
269	Point	0	BOSQUE	0,77205	0,641131	0,655526
270	Point	0	BOSQUE	0,783682	0,614022	0,682253
271	Point	0	BOSQUE	0,783682	0,614022	0,682253
272	Point	0	BOSQUE	0,741979	0,626124	0,649902
273	Point	0	BOSQUE	0,791052	0,614022	0,678381
274	Point	0	BOSQUE	0,755254	0,629557	0,64112
275	Point	0	BOSQUE	0,741979	0,626124	0,649902
276	Point	0	BOSQUE	0,758434	0,596612	0,665755
277	Point	0	BOSQUE	0,750405	0,589479	0,616949
278	Point	0	BOSQUE	0,756305	0,605509	0,653876
279	Point	0	BOSQUE	0,781306	0,598371	0,647021
280	Point	0	BOSQUE	0,745455	0,614022	0,662193
281	Point	0	BOSQUE	0,77205	0,641131	0,655526
282	Point	0	BOSQUE	0,759348	0,617212	0,674143
283	Point	0	BOSQUE	0,752525	0,633497	0,674143
284	Point	0	BOSQUE	0,778471	0,612912	0,658787
285	Point	0	BOSQUE	0,778471	0,612912	0,658787
286	Point	0	BOSQUE	0,753068	0,604016	0,667767
287	Point	0	BOSQUE	0,753068	0,604016	0,667767
288	Point	0	BOSQUE	0,736481	0,596612	0,608346
289	Point	0	BOSQUE	0,76562	0,589479	0,603471

ANEXO 2 Datos obtenidos del índice espectral del NDVI para los años 2000-2010-2020

<b>FID</b>	<b>Shape</b>	<b>Id</b>	<b>COBERTURA</b>	<b>NDWI 2020</b>	<b>NDWI 2010</b>	<b>NDWI 2000</b>
268	Point	0	BOSQUE	0	0,23535687	0,66166341
269	Point	0	BOSQUE	0	0,23535687	0,66166341
270	Point	0	BOSQUE	-0,0071278	0,31715277	0,61226062
271	Point	0	BOSQUE	-0,0071278	0,31715277	0,61226062
272	Point	0	BOSQUE	0,04023752	0,2770735	0,6949285
273	Point	0	BOSQUE	-0,02975043	0,28748749	0,59249116
274	Point	0	BOSQUE	0,02988393	0,27406342	0,73143912
275	Point	0	BOSQUE	0,04023752	0,2770735	0,6949285
276	Point	0	BOSQUE	0,02195367	0,37450693	0,67056614
277	Point	0	BOSQUE	0,02937024	0,35972391	0,71655442
278	Point	0	BOSQUE	0,01143756	0,34524134	0,72279094
279	Point	0	BOSQUE	-0,00443166	0,30118722	0,66598859
280	Point	0	BOSQUE	0,04373757	0,28748749	0,6359449
281	Point	0	BOSQUE	0	0,23535687	0,66166341
282	Point	0	BOSQUE	0,02736772	0,31517086	0,62842026
283	Point	0	BOSQUE	0,02306086	0,26090396	0,62842026
284	Point	0	BOSQUE	0,00735707	0,32944393	0,67674779
285	Point	0	BOSQUE	0,00735707	0,32944393	0,67674779
286	Point	0	BOSQUE	0,04505081	0,35890523	0,6397939
287	Point	0	BOSQUE	0,04505081	0,35890523	0,6397939
288	Point	0	BOSQUE	0,06532846	0,34402022	0,76751305
289	Point	0	BOSQUE	0,02572798	0,35972391	0,82633426
290	Point	0	BOSQUE	0,05299122	0,31517086	0,80579017

## ANEXO 3 Datos para la obtención de la prueba de hipótesis de los índices espectrales

COBERTURAS	NDVI									NDWI									
	2000			2010			2020			2000			2010			2020			
	n	$\mu$	$\sigma$	$\sigma^2$															
CUERPO DE AGUA	268	0,39	0,08	0,0064	0,46	0,06	0,0036	0,49	0,13	0,0169	0,49	0,18	0,0324	0,4	0,16	0,0256	0,38	0,19	0,0361
BOSQUE	560	0,55	0,09	0,0081	0,58	0,05	0,0025	0,7	0,06	0,0036	0,87	0,17	0,0289	0,39	0,13	0,0169	0,1	0,09	0,0081
TIERRA AGROPECUARIA	232	0,52	0,11	0,0121	0,66	0,04	0,0016	0,72	0,07	0,0049	0,47	0,19	0,0361	0,46	0,19	0,0361	0,26	0,14	0,0196
VEGETACION ARBUSTIVA	964	0,28	0,08	0,0064	0,39	0,04	0,0016	0,48	0,07	0,0049	0,55	0,08	0,0064	0,4	0,08	0,0064	0,32	0,09	0,0081
ZONA ANTROPICA	116	0,36	0,07	0,0049	0,47	0,06	0,0036	0,49	0,07	0,0049	0,39	0,2	0,04	0,32	0,23	0,0529	0,32	0,26	0,0676

## ANEXO 4 Imágenes de la verificación en el área de estudio

