



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE AGROPECUARIA**

**EVALUACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL DE LA
RESERVA ECOLÓGICA LOMA ALTA-PROVINCIA DE
SANTA ELENA**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERA AGROPECUARIA

Autora: Cinthya Alexandra Yagual Rodríguez.

LA LIBERTAD, JULIO 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE AGROPECUARIA**

**EVALUACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL DE LA
RESERVA ECOLÓGICA LOMA ALTA-PROVINCIA DE
SANTA ELENA**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Requisito parcial para la obtención del título de:

INGENIERA AGROPECUARIA

Autora: Cinthya Alexandra Yagual Rodríguez.

Tutor: Ing. Agr. Daniel Ponce de León, PhD.

Cotutor: Ing. Edwin Pozo Alvarado.

LA LIBERTAD, JULIO 2025

TRIBUNAL DE GRADO

Trabajo de Integración Curricular presentado por **CINTHYA ALEXANDRA YAGUAL RODRIGUEZ** como requisito parcial para la obtención del grado de Ingeniera Agropecuario de la Carrera de Agropecuaria.

Trabajo de Integración Curricular **APROBADO** el: 07/07/2025

Ing. Zoot. Verónica Cristina Andrade
Yucailla, Ph. D

**DIRECTORA DE CARRERA
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Ing. Agr. Nadia Rosaura Quevedo Pinos,
Ph.D.

**PROFESORA ESPECIALISTA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Agr. Daniel Antonio Ponce De León
Lima, Ph.D

**PROFESOR TUTOR
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Agr. Nadia Rosaura Quevedo Pinos,
Ph.D.

**PROFESORA GUÍA DE LA UIC
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Com. Washington Vidal Perero Vera, Mgtr

**ASISTENTE ADMINISTRATIVO
SECRETARIO**

AGRADECIMIENTOS

Expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Edwin Pozo, por su invaluable apoyo y enseñanzas a lo largo de este proceso, sin su guía y paciencia, este trabajo no se hubiera desarrollado de manera exitosa.

De igual manera, al Ing. Daniel Ponce, mi tutor académico, por acompañarme con dedicación, orientación y compromiso a lo largo de esta etapa.

A mi esposo, por todo su amor, comprensión y fortaleza en los momentos más difíciles. A mi familia, y en especial mis hijos, que han sido mi motor, mi inspiración constante, la razón por la que no me he rendido y han sido el impulso para lograr esta meta y no dejarme caer, a todos ustedes mi eterno agradecimiento.

CINTHYA YAGUAL RODRÍGUEZ

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a Dios, por haberme dado fuerza, sabiduría y constancia para llegar hasta aquí. A mi esposo, por estar siempre al lado mío, por su confianza total, su paciencia y ser ese pilar fundamental en este trayecto de camino académico. A mis hijos por brindarme ese estímulo día a día y poder superarme. Cada paso que se da en este camino ha sido por ustedes y para ustedes. A mi familia, por su cariño, sus palabras de aliento y por creer en mí en cada etapa de estudios.

CINTHYA YAGUAL RODRÍGUEZ

RESUMEN

Se realizó la Evaluación forestal de la Reserva Ecológica Loma Alta -Provincia de Santa Elena mediante este análisis buscó investigar los cambios de cobertura que ha tenido esta Reserva durante el periodo 2000-2024, utilizando una clasificación supervisada se usaron imágenes satelitales Landsat TM, ETM+ y OLI de tres fechas diferentes con un porcentaje de nubosidad del 3% al 19 % , la clasificación resultante se validó mediante matrices de confusión, áreas de entrenamiento y evaluación de puntos tomados en el área de estudio, se obtuvo valores de índices Kappa el cual tuvo como resultado 0.35 por lo que se considera justo. Para determinar la clasificación se realizó como muestras ortofotos tomadas con un dron y a su vez se hizo el análisis de índice de vegetación de la Reserva. Esta investigación permitió analizar los cambios que ha sufrido la reserva durante el periodo de evaluación dando a conocer que el bosque en el año 2000 mantenía una superficie de bosque ocupaba aproximadamente 5174,1 ha. Al año 2024, sólo quedan en el estado de bosque 3675,8 ha, lo que representa aproximadamente una pérdida neta de 1498,3 ha. Y por este motivo se tiene que gran parte de esta pérdida corresponde a la transformación del bosque hacia usos agropecuarios (556,6 ha), vegetación herbácea y arbustiva (927,8 ha) y zonas antrópicas (13,9 ha). Las tierras de uso agropecuario pasan de 289,5 ha en el 2000 hasta 1136,6 ha para el 2024 por que esta es la causa más relevante por lo que está perdiendo parte de la Reserva Ecológica.

Palabras claves: Cobertura forestal, deforestación, uso de suelo, desertificación.

ABSTRACT

. The Forest Evaluation of the Loma Alta Ecological Reserve - Santa Elena Province was carried out. This analysis sought to investigate the changes in coverage that this Reserve has had during the period 2000-2024, using a supervised classification, Landsat TM, ETM + and OLI satellite images of three different dates were used with a cloudiness percentage of 3% to 19% , the resulting classification was validated using confusion matrices, training areas and evaluation of points taken in the study area, Kappa index values were obtained which resulted in 0.35, which is considered fair. To determine the classification, orthophoto samples taken with a drone were made and in turn the vegetation index analysis of the Reserve was carried out. This research allows to analyze the changes that the reserve has undergone during the evaluation period, revealing that the forest in 2000 maintained a forest area occupied approximately 5174.1 ha. By 2024, only 3,675.8 ha of forest land will remain, representing a net loss of approximately 1,498.3 ha. For this reason, a large part of this loss is due to the conversion of forests to agricultural use (556.6 ha), herbaceous and shrub vegetation (927.8 ha), and human-caused areas (13.9 ha). Land used for agricultural purposes will decrease from 289.5 ha in 2000 to 1,136.6 ha by 2024, as this is the most significant cause of the loss of part of the Ecological Reserve.

Keywords: forest cover, deforestation, land use, desertification.

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

El presente Trabajo de Integración Curricular titulado **“EVALUACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL DE LA RESERVA ECOLÓGICA LOMA ALTA, PROVINCIA DE SANTA ELENA”** y elaborado por **Cinthy Alexandra Yagual Rodríguez**, declara que la concepción, análisis y resultados son originales y aportan a la actividad científica educativa agropecuaria.

Transferencia de derechos autorales.

"El contenido del presente Trabajo de Graduación es de mi responsabilidad; el patrimonio intelectual del mismo pertenece a la Universidad Estatal Península de Santa Elena".

Firma del estudiante

INDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Problema científico | 2 |
| Justificación | 2 |
| Objetivos | 3 |
| Objetivo General: | 3 |
| Objetivos Específicos: | 3 |
| CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 1.1 Cobertura de suelo | 4 |
| 1.1.2 Coberturas de suelo en Ecuador | 5 |
| 1.1.3 Capacidad de uso de la tierra | 6 |
| 1.1.1.3 Cubierta vegetal..... | 7 |
| 1.2 Procesos de degradación y evaluación de cambios en la cobertura | 8 |
| 1.2.1 Deforestación..... | 8 |
| 1.2.2 Desertificación..... | 9 |
| 1.2.3 Estudios previos en reservas del Ecuador..... | 10 |
| 1.2.3.1 Reserva de Producción de Fauna Chimborazo | 10 |
| 1.2.3.2 Identificación de áreas prioritarias en el Sur del Ecuador | 10 |
| 1.2.3.3 Cerro Blanco, bosque seco tropical | 10 |
| 1.2.3.4 Definición conceptual y operativa de cobertura forestal | 11 |
| 1.3 Fundamentos de la Teledetección | 11 |
| 1.3.1 Teledetección y usos..... | 11 |
| 1.3.2 Sensores remotos | 12 |
| 1.4 Imágenes satelitales | 13 |
| 1.4.1 Imágenes pancromáticas..... | 13 |
| 1.4.2 Imágenes multiespectrales | 14 |
| 1.4.3 Imágenes satelitales Landsat | 15 |
| 1.5 Procesamiento de imágenes | 19 |
| 1.5.1 Nivel de procesamiento de imágenes | 19 |
| 1.5.2 Corrección geométrica..... | 20 |
| 1.5.3 Corrección radiométrica | 21 |
| 1.5.4 Corrección atmosférica..... | 22 |
| 1.5.5 Corrección topográfica | 23 |
| 1.6 Preprocesamiento y clasificación de imágenes | 24 |
| 1.6.1 Combinación de bandas para el procesamiento de imágenes..... | 24 |
| 1.6.1.1 Color natural | 25 |
| 1.6.1.2 Infrarrojo..... | 26 |
| 1.6.2 Clasificación supervisada | 28 |
| 1.6.3 Clasificación no supervisada | 29 |
| 1.7 Post-procesamiento e indicadores de validación | 31 |
| 1.7.1 Matriz de confusión | 31 |
| 1.7.2 Matriz de transición | 33 |
| 1.7.3 Índice de vegetación | 36 |
| CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 38 |
| 2.1 Caracterización del área | 38 |
| 2.2 Materiales y equipos | 39 |
| 2.2.1 Metodología..... | 40 |
| 2.2.2 Delimitación del área de estudio | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.3 Recopilar datos de campo..... | 41 |
| 2.2.4 Selección de imágenes satelitales | 43 |
| 2.3 Preprocesamientos de imágenes | 45 |
| 2.3.1 Corrección atmosférica..... | 45 |
| 2.3.2 Corte de las imágenes satelitales | 45 |
| 2.3.3 Combinación de bandas de imágenes satelitales | 45 |
| 2.4 Clasificación supervisada..... | 46 |
| 2.4.1 Selección de área de entrenamiento..... | 46 |
| 2.4.2 Clasificación de imágenes | 46 |
| 2.4.3 Clases definidas de área de estudio | 46 |
| 2.4.4 Método de clasificación..... | 47 |
| 2.4.5 Evaluación de Exactitud temática..... | 48 |
| 2.4.6 Matriz de confusión | 48 |
| 2.4.7 Cambio de cobertura y uso de suelo..... | 48 |
| 2.4.8 Cálculo de la tasa de cambio | 49 |
| 2.4.9 Cálculo De Índice De Vegetación | 50 |
| 2.4.10 Creación de mapas de cobertura..... | 50 |
| CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 51 |
| 3.1 Uso de suelo año 2000 | 51 |
| 3.2 Uso de suelo año 2010 | 54 |
| 3.3 Uso de suelo año 2024..... | 57 |
| 3.4 Matriz de Confusión año 2024..... | 59 |
| 3.5 Ortofotos de la Reserva Ecológica de Loma Alta y sus respectivos Nivel de índice de Vegetación | 60 |
| 3.6 Cobertura y uso de suelo del año 2000-2024 | 62 |
| 3.7 Matriz de transición de Cobertura y uso de suelo del año 2000..... | 64 |
| 3.8 Tasa de cambios del período 2000-2024 | 65 |
| 3.9 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)..... | 67 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 71 |
| Conclusiones..... | 71 |
| Recomendaciones..... | 71 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |
| ANEXOS..... | 77 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Definiciones de nivel 1 de categorías de uso de suelo. | 6 |
| Tabla 2 Características de las imágenes Landsat bandas 1 a la 7. | 16 |
| Tabla 3. Ejemplo de matriz de transición. | 35 |
| Tabla 4 Valores NDVI y clasificación de cobertura terrestre. | 37 |
| Tabla 5 Coordenadas de los puntos recolectados en campo. | 42 |
| Tabla 6 Características de imágenes satelitales Landsat, de los periodos de interés. | 44 |
| Tabla 7 Clases de cobertura del área de estudio. | 47 |
| Tabla 8 indica los campos que fueron agregados en la tabla de atributos en ARGMAP para determinar los cambios de cobertura durante el periodo 2000-2024 | 49 |
| Tabla 9 Matriz de confusión de las coberturas del año 2024 | 60 |
| Tabla 10 Ilustra las ortofotos obtenidas con el drone y a su vez muestra el índice de vegetación. | 61 |
| Tabla 11 Matriz de transición del uso de suelo del año 2000-2024 | 64 |
| Tabla 12 Matriz de resultados de la tasa de cambio del período 2000-2024. | 65 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Zona de estudio Reserva Ecológica de Loma Alta imagen descargada de la plataforma Earth Explorer con sistema de referencia geodésico WGS 84, zona 17 Sur. | 38 |
| Figura 2. Esquema Metodológico para determinar la Evaluación de la Reserva Ecológica de Loma Alta. | 40 |
| Figura 3. Delimitaciones de la Reserva Ecológica de Loma Alta..... | 41 |
| Figura 4. Imagen Satelital Plataforma Earth Explorer. | 44 |
| Figura 5. Combinación en falso color método infrarrojo Reserva Ecológica Loma Alta, a escala 1:8000 UTM WGS84 17 S. | 45 |
| Figura 6. Cobertura y uso de suelo del año 2000 resultado obtenido mediante el procedimiento de clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud. | 51 |
| Figura 7. Representación de Cobertura de la Reserva Ecológica de Loma Alta año 2000. | 53 |
| Figura 8. Cobertura y uso de suelo del año 2010 resultados obtenidos mediante el procedimiento de clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima verosimilitud. | 54 |
| Figura 9. Representación de Cobertura y uso de suelo de la Reserva Ecológica de Loma Alta año 2010. | 56 |
| Figura 10. Cobertura y Uso de suelo del año 2024 presentación de datos obtenidos mediante la clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud. | 57 |
| Figura 11. Representación de Cobertura y uso de suelo de la Reserva Ecológica de Loma Alta año 2024. | 58 |
| Figura 12. Representación de la Intersección de cobertura y uso de suelo del año 2000 al | 63 |
| Figura 13. Muestra los resultados de la tasa de cambio que se produjo durante el 2000-2024. | 66 |
| Figura 14. Representación del nivel de índice de vegetación año 2000 de la Reserva Ecológica de Loma Alta. | 68 |
| Figura 15. Representación del nivel de índice de vegetación año 2010 de la Reserva Ecológica de Loma Alta. | 69 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Imagen 1 Entrada a la Reserva Ecológica de Loma Alta-Provincia de Santa Elena. | 77 |
| Imagen 2 Registro de coordenadas UTM en campo para validación de clasificación mediante matriz de confusión. | 77 |
| Imagen 3 Recolección de datos botánicos en campo para caracterización de la cobertura forestal | 78 |
| Imagen 4 Levantamiento de puntos georreferenciados (UTM WGS 84) para análisis de precisión en clasificación. | 78 |
| Imagen 5 Captura de imágenes aéreas con dron para análisis espacial en la reserva. | 79 |
| Imagen 6 Registro fotográfico del estado de la cobertura vegetal en la Reserva El Río Seco. | 79 |
| Imagen 7 Despegue del dron para la captura de imágenes aéreas en la Reserva Loma Alta. | 80 |
| Imagen 8 Zona de alta densidad y vigor vegetal observada durante el trabajo de campo. | 80 |

INTRODUCCIÓN

Ecuador es uno de los países más biodiversos del mundo. A pesar de su pequeño tamaño, alberga una gran variedad de ecosistemas y especies, lo que lo convierte en una zona de alta biodiversidad. La riqueza biológica es el producto de su localización geográfica y su topografía y diversidad climática. La biodiversidad ecuatoriana afronta varias amenazas que comprometerían la conservación a largo plazo. Deforestar y fragmentar ecosistemas, además de la contaminación y cambio climático son los principales desafíos que enfrentan los hábitats en el Ecuador (Pozo, 2022).

La comunidad agrícola Loma Alta destaca por la abundancia de recursos naturales como flora, fauna y culturales como sus fiestas populares. Dichos recursos pueden aportar al desarrollo de la población significativamente usando una visión basada en la sostenibilidad. Con esta visión el ecoturismo se muestra como una estrategia precisa que permite el desarrollo sostenible, sacando provecho a la biodiversidad y cultura de la región. (Zambrano, 2017).

La Comuna Loma Alta ha sido pionera en la conservación de su biodiversidad. En 1986, bajo la iniciativa del Sr. Alejandro Cacao, presidente del cabildo de ese año, y con el apoyo del Ministerio de Agricultura y Ganadería, se le declararon 1,845 hectáreas de su mejor bosque húmedo premontado como Bosque Protector Loma Alta, con el objetivo de resguardarlo de la deforestación. Esta decisión impulsó, en 1994, la declaración de 78,151.20 hectáreas de la cordillera Chongón - Colonche como Bosque Protector por parte del Gobierno del Ecuador (Pérez y González, 2015).

En el año 2008, se logró rectificar los límites del bosque y vegetación protectora Loma Alta y ampliar el mismo quedando una superficie definitiva de tres mil doscientos dieciocho con diecinueve hectáreas (3.218,19 ha.), mediante Acuerdo Ministerial · 145 del 24 de septiembre del 2008, publicado en el Registro Oficial No. 450 del 21 de octubre del 2008 (Astudillo-Sánchez et al., 2019).

La práctica del ecoturismo en La Reserva Ecológica Comunal Loma Alta al mismo tiempo se constituye en una contribución al desarrollo sostenible por medio de la sostenibilidad ambiental, de manera que promueve el uso de recursos de forma sostenible, así como por

contribuir a la conservación del recurso natural con sus especies animales y vegetales (Muñoz, 2017).

Esta investigación sobre la evaluación de la cobertura forestal de la Reserva Ecológica de la comuna Loma Alta en la provincia de Santa Elena, a través de la utilización de productos de teledetección y SIG, brindando datos importantes para la toma de decisiones políticas medioambientales.

El uso de SIG permite investigar áreas específicas donde la cobertura forestal ha disminuido, examina las causas subyacentes y evaluar el impacto de las intervenciones de conservación. De igual forma nos facilita una base científica para el desarrollo de estrategias de manejo sostenible y la planificación de actividades ecoturísticas que pueden contribuir a la economía local sin hacer daño a los recursos naturales.

Problema científico

¿Cuáles han sido los cambios en la cobertura forestal del área de la Reserva Ecológica Loma Alta, en la provincia de Santa Elena, durante el período 2000-2024, a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat y el uso del índice de vegetación NDVI?

Justificación

La presente investigación es necesaria ante la creciente pérdida de cobertura vegetal en la Reserva Ecológica Comuna Loma Alta, provocada por actividades antropogénicas como la expansión agropecuaria y la deforestación, se hace necesaria una evaluación sistemática que permita el monitoreo continuo de la cobertura forestal. Aunque existen estudios sobre la dinámica de la vegetación en otras reservas de la región costera del Ecuador, en Loma Alta la información geoespacial actualizada sobre los cambios en el bosque durante los últimos 20 años es escasa, lo que evidencia la necesidad de generar datos recientes y precisos para la toma de decisiones en conservación.

Analizar los cambios en la cobertura forestal mediante herramientas como imágenes satelitales y el índice NDVI permitirá identificar zonas con mayor degradación, establecer prioridades de conservación y diseñar estrategias de manejo sostenible. Además, estos datos pueden ser útiles para fortalecer iniciativas locales de conservación, como proyectos de

reforestación comunitaria o desarrollo de ecoturismo responsable, lo cual generaría beneficios tanto ecológicos como socioeconómicos para las comunidades de la zona.

Objetivos

Objetivo General:

- Evaluar la cobertura forestal de la Reserva Ecológica de la Comuna Loma Alta.

Objetivos Específicos:

- Actualizar la cartografía de la Reserva Ecológica Comuna Loma Alta, mediante la elaboración de mapas temáticos basados en imágenes satelitales multiespectrales Landsat para el año 2024
- Analizar las tendencias y causas de la deforestación y degradación forestal en el período 2000 -2024, mediante análisis multitemporal del índice de vegetación NDVI y la comparación de coberturas en sistemas de información geográfica.
- Identificar áreas de alta prioridad para la conservación y restauración, sobre la base en la evaluación de la pérdida de cobertura forestal.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Cobertura de suelo

La cobertura del suelo es un componente primordial en los estudios medioambientales, permitiendo así la comprensión de su ubicación y el estado de los ecosistemas terrestres. La cobertura del suelo hace referencia a la superficie terrestre que es ocupada por vegetación, cuerpos acuíferos, zonas agrícolas y perímetros urbanos. Desde la visión de planificación y preservación, el análisis de la cobertura del suelo es la base para gestionar los recursos naturales además de monitorear los cambios en los paisajes. Asimismo, su análisis ayuda a revelar patrones de cambio ambiental asociados con las actividades humanas y los fenómenos naturales (Sánchez y Mayorga, 2019). Hoy en día, los avances en teledetección y sistemas de información geográfica han facilitado la detección y el monitoreo de la cobertura del suelo con alta precisión. Las herramientas han facilitado la producción de mapas detallados de la expansión de la frontera agrícola, la tala de árboles y la degradación de ecosistemas estratégicos. A través de estos medios, se ha registrado que hay una disminución en las coberturas naturales y esto ha hecho necesaria la

Es necesario contar con mejores medidas de conservación (García y Jesús, 2018). El estudio de la cobertura del suelo no solo facilita la detección de alteraciones en el paisaje, sino que también proporciona datos importantes acerca de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que respaldan el bienestar de las personas. En este contexto, transformar bosques en zonas de pastoreo o cultivo puede impactar en la regulación del clima, la disponibilidad de agua y la calidad del terreno. Por esta razón, conocer la dinámica de la cobertura del suelo es fundamental en el diseño de políticas de ordenamiento territorial y de sostenibilidad ambiental (Arboit y Maglione, 2018). Con el paso del tiempo, los cambios en la cobertura del terreno han estado relacionados con factores socioeconómicos y climáticos. El crecimiento urbano, el aumento de la población y las necesidades del sector agrícola han sido algunas de las razones principales de las modificaciones en la utilización de la tierra. Al mismo tiempo, el cambio climático también incide en la perturbación de la cubierta vegetal, lo que afecta también a la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y su capacidad de regenerarse (Rama et al., 2018). En el contexto de la Reserva Ecológica Loma Alta, la cobertura vegetal ha cambiado debido a la acción humana y a los procesos naturales. Es imperativo investigar estos cambios para la planificación de la restauración y la gestión

sostenible. Preservar la cobertura vegetal en esta reserva natural supone un reto, lo que exige la incorporación de información científica y participación de la población local en la gestión de los recursos naturales (González et al., 2019).

1.1.2 Coberturas de suelo en Ecuador

Ecuador ofrece una amplia variedad de coberturas de terreno gracias a su diversa geografía y condiciones meteorológicas. Desde los páramos de los Andes hasta las selvas tropicales de la Amazonía y las áreas áridas de la costa, el país acoge ecosistemas con particularidades singulares. En Ecuador, instituciones como el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) han tratado la clasificación de las coberturas de suelo mediante investigaciones fundamentadas en imágenes satelitales y trabajos de campo (Guarderas, Smith, & Dufrene, 2022).

Las coberturas del suelo en Ecuador pueden llegar a clasificarse en categorías primordiales comprendiendo así bosques naturales, zonas de cultivo, cuerpos de agua y vegetación arbustiva. Los bosques, constituyen una parte primordial del territorio, generando interrogantes provocadas por la deforestación producida por el incremento agrícola y la extracción forestal. Contrastando así las zonas de cultivo que experimentan un incremento importante en las últimas décadas, especialmente en áreas como la Costa y la Sierra (Duffau & Guachimboza, 2020).

La vigilancia de las coberturas de suelo ha facilitado la detección de tendencias alarmantes, tales como la rápida desaparición de bosques en la Amazonía y la fragmentación de ecosistemas en la Sierra. De acuerdo con varias investigaciones, el incremento de la deforestación en Ecuador ha sido motivado por el progreso de la ganadería, la producción de palma africana y otros cultivos de carácter comercial. No obstante, acciones de conservación, como la reforestación y la formación de zonas protegidas, han intentado atenuar estos impactos (Martínez-Moscoso, 2019).

La región costera de Ecuador lugar donde está ubicado la Reserva Ecológica de Loma Alta, se evidencia la transformación de la superficie del terreno causado por el empleo agrícola y el aumento de asentamientos humanos. Sin embargo, esta zona también ha sido tomada en cuenta para iniciativas de restauración medioambiental que buscan rescatar la biodiversidad autóctona. (Jaramillo, Vivanco, & Pereira, 2019).

Entender la dinámica de las coberturas de suelo en Ecuador resulta crucial para la administración del medio ambiente y la elaboración de políticas de conservación. La fusión de investigaciones científicas, la implementación de tecnologías de seguimiento y la implicación de la comunidad son factores esenciales para asegurar una gestión sostenible del territorio (Quinaluisa, y otros, 2018).

Tabla 1 Definiciones de nivel 1 de categorías de uso de suelo.

| Nivel 1 | Definiciones |
|-----------------------------|---|
| Bosque | Ecosistema vegetal caracterizado por sus especies arbóreas de regular a gran tamaño |
| Tierra agropecuaria | Se determina como áreas ganaderas y agrícolas |
| Vegetación arbustiva | Se determina como malezas y vegetación herbácea |
| Zonas antrópicas | Actividades humanas que son desarrolladas a lo largo del tiempo. |
| Cuerpo de agua | Zonas con espejos de agua, ya sean ríos, lagunas o represas. |

1.1.3 Capacidad de uso de la tierra

El potencial de uso del suelo es la capacidad que posee un área para diferentes actividades productivas o de conservación según las condiciones climáticas, geomorfológicas y edáficas. Es fundamental en la planificación del manejo del suelo ya que permite establecer las prácticas de manejo más adecuadas para prevenir la degradación ambiental (Ríos et al., 2018). En Ecuador, la clasificación de la capacidad de uso del suelo ha tenido un papel significativo en la planificación del territorio. A través de investigaciones de campo y del clima, se han determinado clasificaciones que van desde tierras aptas para agricultura intensiva hasta tierras que deben reservarse tan sólo para la conservación. Los factores como la pendiente, calidad de suelo, fertilidad y accesibilidad de agua son relevantes al momento de clasificar (Burgos Jiménez, 2018). La sobreexplotación de tierras con limitado potencial agrícola ha generado procesos de erosión y pérdida de fertilidad en diversas zonas del país. En la Sierra ecuatoriana, en particular, el mal uso de la tierra ha dado lugar a páramos.

En la costa zona costera el incremento de procesos agrícolas han generado problemas para la conservación de biomas como los bosques secos y manglares. (Jaramillo et al., 2019).

Un claro ejemplo es lo que sucede en la Reserva Ecológica Loma Alta evidenciando así la necesidad del uso correcto del suelo a partir de sus capacidades. En dicha reserva, el cambio del bosque a terrenos destinados para la agricultura ha impactado negativamente la diversidad y la estabilidad del suelo. Dichos impactos se pueden mitigar aplicando estrategias de gestión sostenible como la agroforestería y la restauración ecológica (Mendoza et al., 2021). Para aprovechar el suelo es crucial comprender que sus condiciones ambientales y la presión social y económica. Necesitando así gestión zonal integrada para lograr el equilibrio entre lo que se produce y lo que se conserva. (Cabrera y Sandoval, 2022).

1.1.1.3 Cubierta vegetal

La flora salvaje constituye un elemento muy importante en la regulación de los ecosistemas, ya que influye en tales procesos como el ciclo hidrológico, la captura de carbono, y la protección contra la erosión. Ecológicamente, la diversidad y la estructuración de la vegetación determinan la existencia de hábitats para la fauna y el equilibrio de los ecosistemas. (Duffau & Guachimboza, 2020)

En Ecuador, la formación vegetal varía de forma considerable de acuerdo con la región y tipo de ecosistema. Los tipos de vegetación de gran relevancia ecológica son los bosques amazónicos, los picachos y los manglares. Sin embargo, el impacto de la actividad humana ha limitado considerablemente su alcance, causando cambios en la evolución natural de los paisajes. (Guarderas, Smith, & Dufrene, 2022).

A lo largo de la costa ecuatoriana, la vegetación se está perdiendo progresivamente debido a la expansión de la agricultura y los desarrollos urbanos. La conservación de la vegetación sigue siendo un reto incluso en espacios naturales protegidos como la Reserva Ecológica Loma Alta. La pérdida de la cobertura vegetal en esta zona afecta la biodiversidad, así como diversos servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, la calidad edáfica y una infinidad de otros recursos. (Jaramillo, Vivanco, & Pereira, 2019).

El monitoreo de la cobertura vegetal es de gran importancia en lo que respecta a la planificación y restauración ecológica. Para enfatizar la importancia de la tecnología satelital y la participación comunitaria en la reforestación, son actividades importantes que podrían ayudar de manera significativa en la rehabilitación de áreas descuidadas (Martínez-Moscoso, 2019).

No solo es un propósito ambiental mantener la cubierta vegetal, sino también una exigencia para asegurar el bienestar de las comunidades locales. Es fundamental la puesta en marcha de políticas de conservación y la promoción de prácticas sustentables para evitar el deterioro de los ecosistemas en Ecuador (Mendoza, Rivera, & Vera, 2021).

1.2 Procesos de degradación y evaluación de cambios en la cobertura

1.2.1 Deforestación

La deforestación es uno de los distintos tipos de degradación ambiental que existe, a la vez, el más peligroso para la biodiversidad y los servicios ecológicos a un ecosistema. Constituye la reducción drástica de los bosques y selvas debido, entre otras causas, a cultivo, al incremento demográfico, a la urbanización y a la explotación industrial. Produce efectos ecológicos y socioeconómicos ya que causa cambios en los ciclos naturales y disminuye la capacidad de fortalecer en la mitigación de los cambios climáticos (Duffau & Guachimboza, 2020).

En Ecuador, la deforestación ha sido un problema constante sobre todo en las regiones de la Amazonía y la Costa. En las últimas décadas, la conversión de bosques en monocultivos de palma africana y la expansión de la ganadería han hecho desaparecer gran parte de la vegetación, también la minería y la tala ilegal han contribuido en forma importante a la fragmentación de los ecosistemas. Según investigaciones recientes, en el país continúa siendo alarmante el índice de deforestación, a pesar de los esfuerzos del gobierno y de organismos ecologistas por controlarlo (Kleemann, Zamora, Villacis-Chiluisa, Cuenca, & Koo, 2022).

Los impactos de la deforestación van más allá de simplemente un área desprovista de árboles. La eliminación de la cobertura vegetal altera el balance hídrico, aumenta la erosión del suelo y disminuye los recursos necesarios para los locales. De manera similar, la disminución de la biomasa forestal aumenta las emisiones de CO₂ y agrava los impactos del cambio climático global. Lugares como la Reserva Ecológica de Loma Alta se han visto afectados por la deforestación, ya que ha reducido la capacidad del ecosistema para retener humedad, impactando así la biodiversidad y la sucesión en los bosques secos (Brancaion, y otros, 2016).

Con el objetivo de cuidar el medio ambiente, se han aplicado diversas estrategias para combatir la deforestación. Estas incluyen la reforestación con especies nativas, la

creación de corredores ecológicos y el fortalecimiento del sistema de áreas protegidas. Además, la agroforestería, así como la adopción de prácticas agrícolas ambientalmente sostenibles, han demostrado reducir efectivamente la presión sobre los recursos forestales mientras aumentan la productividad sin poner en peligro los ecosistemas (Llerena, Arias, Cueva, Almeida, & Salazar, 2020).

El reto de luchar contra la deforestación demanda la incorporación de políticas medioambientales, la formación de las comunidades locales y la implementación de modelos de desarrollo sustentable. Es fundamental la cooperación entre gobiernos, entidades ambientales y entidades privadas para asegurar la preservación de los recursos forestales y atenuar las consecuencias de la degradación del suelo (Martínez-Moscoso, 2019).

1.2.2 Desertificación

La desertificación se define como el decrecimiento en la calidad productiva de la tierra en áreas áridas, semiáridas o subhúmedas secas. Sucede por combinación de factores climáticos, o bien, por intervenciones humanas como la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas agrícolas de baja eficiencia. Este fenómeno impacta directamente a la población, con la reducción de la cobertura vegetal y el incremento en la erosión de suelos. La desertificación está interrelacionada a una gran cantidad de estadísticas socioeconómicas tales como el subsidio que disminuye la recuperación de recursos esenciales, la producción agrícola por erosión catastrófica de recursos naturales fundamentales (Campozano, Ballari, Montenegro, & Avilés, 2020).

La degradación del suelo en Ecuador ha sido uno de los grandes problemas crecientes, especialmente en la zona costera y en algunos tramos de la Sierra. Un crecimiento en las actividades agrícolas, sin una planificación adecuada, ha llevado a la degradación de suelos frágiles, reduciendo aún más su fertilidad y aumentando la extensión de tierras improductivas. En la zona costera, esto se ha agravado por la erosión eólica y la pérdida de vegetación, lo que afecta negativamente el agua, así como la regeneración de ecosistemas. (Rominger, 2020).

La Reserva Ecológica Loma Alta muestra cómo la ausencia de un plan de manejo sostenible puede contribuir a la desertificación de un ecosistema. La reducción de la cobertura superficial ha incrementado la erosión del suelo, y esto a su vez, retrasa el crecimiento de las especies nuevas y compromete la capacidad del ecosistema para retener

humedad. Estos cambios han impactado, no solo la biodiversidad, sino también la estabilidad de los recursos económicos de las comunidades que dependen del bosque para la explotación de recursos naturales (Guarderas, Smith, & Dufrene, 2022).

La restauración ecológica, como la reforestación con especies xerófitas o la agricultura sustentable, ha contribuido en la lucha contra la desertificación. Asimismo, el apropiado empleo de obras de administración de agua y la conservación de suelos mediante el uso de posas vegetales y la agricultura de conservación rotativa ha sido eficaz en la rehabilitación de áreas dañadas (Santana, 2020).

Las batallas contra la desertificación implementan un enfoque holístico al combinar medidas locales con políticas nacionales de conservación y planificación del uso del suelo. La formación en medio ambiente y la sensibilización de las comunidades son elementos esenciales para asegurar la restauración de los terrenos afectados y evitar el progreso de este fenómeno en zonas vulnerables (Chimborazo & Vuille, 2021).

1.2.3 Estudios previos en reservas del Ecuador

1.2.3.1 Reserva de Producción de Fauna Chimborazo

Paula et al. (2018) realizaron un análisis multitemporal (1962–2010) combinando clasificación supervisada y NDVI para evaluar cambios de vegetación en la reserva, vinculados a actividades pastoriles y cambio climático. Reportaron que la vegetación moderada aumentó 17,7 %, y la vegetación vigorosa disminuyó 8,27 %.

1.2.3.2 Identificación de áreas prioritarias en el Sur del Ecuador

Aguirre Mendoza & Zhiñin Quezada (2018) aplicaron un modelo multicriterio (Proceso Analítico Jerárquico + SIG) para definir zonas prioritarias para restauración en Loja, El Oro y Zamora, considerando criterios ambientales, de cobertura, uso del suelo, y valor socioeconómico.

1.2.3.3 Cerro Blanco, bosque seco tropical

Cerro Blanco es un caso bien estudiado de recuperación de bosque seco tropical en Guayas, gestionado por Fundación ProBosque, que muestra estrategias de conservación, reforestación y monitoreo de biodiversidad.

1.2.3.4 Definición conceptual y operativa de cobertura forestal

Conceptual: Se define como la superficie con vegetación arbórea densa, con copas cerradas y estructura de bosque maduro (bosque seco, de transición o garúa en Loma Alta).

Operativa: En este trabajo se clasificó mediante imágenes Landsat utilizando umbrales de NDVI: valores ≥ 0.6 se consideraron como bosque, siguiendo la escala propuesta por Paula et al. (2018), donde NDVI 0.6–0.8 representa vegetación densa.

1.3 Fundamentos de la Teledetección

1.3.1 Teledetección y usos

La teledetección tiene diversas aplicaciones en varias áreas científicas y tecnológicas: observación de la Tierra, predicción del tiempo, ciencias oceanográficas, monitoreo ambiental, entre otras. La teledetección se aplica ampliamente en la detección de alteraciones de la superficie, monitoreo de los recursos naturales e incluso en la planificación espacial porque se obtiene información sin contacto físico en la superficie de la tierra (Aguirre et al., 2018).

El análisis de la variación en la cobertura del suelo es una de las aplicaciones importantes de los datos provenientes de la teledetección. Con el uso de imágenes satelitales y modelos informáticos, se pueden identificar patrones de deforestación, expansión agrícola y urbanización. Una vez realizados estos estudios, es posible evaluar la sostenibilidad de las prácticas relacionadas con el uso del suelo y proponer estrategias para conservar o restaurar (Burgos Jiménez 2018).

Aplicación en la Agricultura: La percepción remota ha revolucionado por completo el manejo de cultivos agrícolas, permitiendo comprobar el estado vegetativo y detección temprana a plagas o enfermedades. A través del análisis de índices espectrales como el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), se puede evaluar la salud de los cultivos, maximizar el uso de recursos como agua y fertilizantes, reducir costos, aprovechar la eficiencia de la productividad en la producción. Las coberturas del suelo en Ecuador pueden llegar a clasificarse en pueden clasificarse en categorías fundamentales, que comprenden bosques naturales, áreas de cultivo, cuerpos de agua, zonas urbanas y vegetación arbustiva. Los bosques, que constituyen una porción importante del territorio, han generado inquietud debido a la deforestación provocada por acciones como el

crecimiento agrícola y la obtención de madera. En contraste, las áreas de cultivo han experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, especialmente en áreas como la Costa y la Sierra (Duffau & Guachimboza, 2020).

Otro ámbito en el que la teledetección desempeña un papel esencial es la gestión del agua y el análisis de las masas de agua. Algunas de las aplicaciones posibilitadas por esta técnica, todas orientadas al manejo eficiente del recurso agua, son la identificación de zonas con estrés hídrico: alerta sobre contaminación en ríos y lagos; seguimiento del derretimiento polar. Además de esto, la percepción remota también se aplica a la predicción y controlar desastres naturales como huracanes, sequías e inundaciones monitorizando áreas problemáticas lo que brinda una información rápida para las autoridades encargadas en situaciones de emergencia (Trujillo & Lomas-Tapia; 2018).

La percepción remota en el Cambio climático se presenta como una herramienta muy importante para la evaluación de sus efectos a nivel mundial. Los datos de satélite se utilizan para observar cambios en la temperatura de la superficie de la Tierra, una disminución del hielo y cambios en los ecosistemas. Esta información es fundamental para la formulación de políticas ambientales y la adaptación a las estrategias de cambio climático (Mendoza et al., 2021).

1.3.2 Sensores remotos

Sensores a distancia es un término general que abarca todos los aparatos utilizados para recopilar datos sin tener que interactuar directamente con la superficie de la tierra o la atmósfera. Estos sensores pueden montarse en plataformas de satélite, aeronaves o drones, y funcionan midiendo la radiación electromagnética de varios tipos que reflectan o emanan los objetos de la Tierra. Los sensores a distancia pueden categorizarse en sensores pasivos y sensores activos (Aguirre, y otros, 2018).

Los sensores pasivos se apoyan en la radiación natural, en particular la luz solar, para recoger datos acerca del ambiente. Los sensores ópticos son uno de los más empleados, ya que capturan imágenes en los espectros visible, infrarrojo y térmico. Estos sensores se emplean extensamente en investigaciones de flora, evaluación de variaciones en la cobertura del suelo y seguimiento de fenómenos climáticos. Estos sensores abarcan los dispositivos que se encuentran en el interior de satélites como Landsat, Sentinel y MODIS (Mendoza, Rivera, & Vera, 2021).

Por otro lado, los sensores activos generan su señal y registran la reacción del suelo. Tal es el caso de los sensores de apertura sintética, que utilizan ondas de microondas para obtener imágenes de alta resolución en condiciones adversas, es decir, con nubosidad y en áreas con iluminación deficiente. Este tipo de sensores se utilizan para detectar movimientos en el terreno, monitorear la deforestación, calificar zonas de sismo y derrumbe, entre otros se ha desarrollado drásticamente en los últimos años. (Trujillo & Lomas-Tapia, 2018).

La teledetección se ha desarrollado enormemente en términos de resoluciones espacial, temporal y espectral. La resolución espacial se refiere al nivel de detalle que un sensor es capaz de capturar, mientras que la resolución temporal está asociada con la frecuencia con la que se toman fotografías de un área similar. Por otro lado, la resolución espectral determina cuántas bandas del espectro electromagnético puede capturar el sensor, lo que permite una discriminación más fina de los elementos en la superficie de la tierra.(Zúñiga, 2018).

Con la implementación de sensores remotos, hay una mejora en la gestión de los recursos naturales y la planificación ambiental. Esto ayuda en la detección temprana de emergencias como la erosión del suelo, la desertificación y la contaminación del agua. La integración de información de diferentes sensores también ha mejorado las capacidades analíticas y de modelado de los procesos ambientales, lo que permite un monitoreo más preciso de los ecosistemas alrededor del mundo. (López & Jesús, 2018).

Conforme la tecnología sigue progresando, los sensores remotos continuarán siendo esenciales en la investigación científica y en la administración del medio ambiente. La miniaturización de sensores y la creación de satélites económicos están democratizando la disponibilidad de datos de teledetección, lo que facilitará la toma de decisiones y promoverá el empleo sostenible de los recursos naturales (Mollo & Pizarro, 2018).

1.4 Imágenes satelitales

1.4.1 Imágenes pancromáticas

Las imágenes pancromáticas son un tipo de fotografía satelital que captura información en un solo canal del espectro electromagnético, generalmente en el visible. Tales fotografías son de mayor resolución espacial y, por lo tanto, permiten mejorar la obtención de detalles más precisos de la superficie terrestre en comparación con otras clases

de imágenes satelitales. Debido a su capacidad de detalle, las imágenes pancromáticas son ampliamente utilizadas en la elaboración de mapas, planificación urbana y monitoreo de obras de infraestructura (Solórzano, Gallardo-Cruz,, & Peralta-Carreta, 2020).

La fusión pancromática su principal ventaja se destaca en radicar su capacidad de aumentar la nitidez de las imágenes multiespectrales y el valor cualitativo de la información. Este procedimiento conocido como pansharpening, ayuda a la interpretación de imágenes para muchos propósitos, como detectar cambios en un área y analizar el uso del suelo. (Rodríguez, y otros, 2021).

La utilización de imágenes pancromáticas también es habitual en la supervisión del medio ambiente y la administración de catástrofes naturales. Estas imágenes, por su alta resolución, son útiles para detectar zonas impactadas por incendios forestales, inundaciones y desplazamientos de la superficie terrestre. Adicionalmente, su habilidad para registrar detalle de infraestructura y redes de transporte las convierte en útiles para la planificación y el crecimiento (Perpinyà, Urrego, Sandoval, Ruiz-Verdú, & Soria, 2020).

Los satélites comerciales que han aportado imágenes pancromáticas de excelente calidad incluyen a QuickBird, WorldView y GeoEye. Estos satélites han sido creados para recolectar información con una resolución espacial de hasta 30 centímetros por píxel, lo que facilita la observación minuciosa de zonas urbanas y rurales (Hurtado & Mario, 2019)

Aunque son útiles, las imágenes pancromáticas poseen restricciones en cuanto a información espectral, dado que no facilitan la distinción entre diferentes tipos de cobertura del suelo con la exactitud que las imágenes multiespectrales. Sin embargo, su mezcla con otras clases de imágenes ha facilitado un incremento notable en la calidad de los análisis de teledetección y la interpretación de las variaciones ambientales (Buzai, Lanzelotti, Viola, & Principi, 2018)

1.4.2 Imágenes multiespectrales

Las imágenes multiespectrales capturan la luz de diferentes bandas en una amplia gama de bandas, el infrarrojo cercano y el infrarrojo medio. Esta característica autoriza el análisis detallado de diferentes características de la superficie de la Tierra, permitiendo así a estudios sobre vegetación, tierras, cuerpos de agua y otros componentes del paisaje. (Perpinyà, Urrego, Sandoval, Ruiz-Verdú, & Soria, 2020).

Una de las aplicaciones más relevantes de las imágenes multiespectrales es el análisis de la cobertura de las plantas a través de índices espectrales como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas). Esta aplicación facilita la identificación del vigor vegetal y la distinción entre zonas de elevada y baja productividad biológica. Además, la implementación del infrarrojo térmico en ciertos sensores multiespectrales ha simplificado la detección de variaciones en la temperatura de la superficie terrestre, aportando a investigaciones sobre el cambio climático y la administración del agua (Buzai, Lanzelotti, Viola, & Principi, 2018).

Las imágenes multiespectrales han jugado un papel crucial en la identificación de contaminación en cuerpos acuáticos, pues facilitan la detección de sedimentos, algas y compuestos químicos que perjudican la calidad del agua. Igualmente, en el sector agrícola, se emplean estas imágenes para supervisar el estrés hídrico en los cultivos y maximizar la utilización de fertilizantes e irrigación (Solórzano, Gallardo-Cruz, & Peralta-Carreta, 2020)

Landsat, Sentinel-2 y MODIS son algunos de los satélites más destacados en la captura de imágenes multiespectrales. Estos sistemas han facilitado la producción de datos esenciales para la administración ambiental y la supervisión de modificaciones en la utilización del suelo a escala mundial (Hurtado & Mario, 2019).

El porvenir de la teledetección multiespectral se dirige a la optimización de la resolución espectral y espacial, con sensores más atractivos que facilitarán una percepción más exacta del ambiente terrestre. Su fusión con la inteligencia artificial y el big data facilitará el procesamiento automático de grandes volúmenes de información, facilitando la gestión de los recursos naturales (Rodríguez, y otros, 2021).

1.4.3 Imágenes satelitales Landsat

Las imágenes satelitales son herramientas de gran importancia para monitorear y estudiar el planeta desde el espacio exterior. Los sensores remotos en satélites permiten la obtención de datos de la superficie terrestre. Por ello, las imágenes satelitales son útiles en múltiples disciplinas, incluso en cartografía, agricultura, administración ambiental y planificación territorial (2020).

Una de las mayores ventajas de las imágenes satelitales es su habilidad para suministrar información de forma regular y metódica, lo que facilita el análisis de la transformación de los paisajes a través del tiempo. Esta característica es crucial para

identificar alteraciones en la cobertura de vegetación, valorar el efecto de fenómenos naturales como inundaciones y sequías, y diseñar tácticas de preservación. Además, las imágenes satelitales, al fusionarse con los sistemas de información geográfica (SIG), posibilitan la creación de mapas de gran exactitud para la administración del territorio (Rodríguez, y otros, 2021).

La evolución de la tecnología de los satélites ha dado lugar a diversos tipos de imágenes, cada una con distintas aplicaciones en función de sus características espectrales y espaciales. Las imágenes pancromáticas incluyen información en un solo canal del espectro visible, mientras que las imágenes multispectrales registran información en varios segmentos del espectro electromagnético. El ajuste de la resolución espectral permite mayor flexibilidad en el uso que se les puede dar, desde la detección de coberturas en el suelo hasta el monitoreo de la contaminación en los cuerpos de agua. (Perpinyà, Urrego, Sandoval, Ruiz-Verdú, & Soria, 2020).

A escala mundial, varias agencias espaciales han implementado programas de observación terrestre a través de satélites expertos en la captura de imágenes de alta resolución. Dentro de estos programas sobresalen Landsat de la NASA, Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA) y otros satélites de negocios que han incrementado notablemente la calidad y accesibilidad de imágenes satelitales para científicos y administradores del medio ambiente (Hurtado & Mario, 2019).

Se espera que el futuro de las imágenes satelitales sea más accesible y preciso debido a la implementación de la automatización y el uso de pequeños satélites (CubeSats), que permiten un monitoreo más regular y detallado de la superficie terrestre. Estos avances facilitarán aún más a los responsables de la formulación de políticas tomar decisiones sobre la gestión ambiental y la planificación espacial. (Buzai, Lanzelotti, Viola, & Principi, 2018).

Tabla 2 Características de las imágenes Landsat bandas 1 a la 7.

| Satélite Sensor | Bandas | Longitud de onda (μm) | Resolución Espacial (m) | Resolución Radiométrica |
|-----------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Landsat 1, 2 Y 3 (MSS) | 4 – Verde | 0.50 - 0.60 | 60 | 8 bits |
| | 5 – Rojo | 0.60 - 0.70 | 60 | 8 bits |
| | 6 - Infrarrojo | 0.70 - 0.80 | 60 | 8 bits |
| | Cercano (NIR1) | 0.80 - 1.10 | 60 | 8 bits |

| | | | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------|-------------|--------|--------|
| | 7 - Infrarrojo Cercano (NIR2) | | | | |
| Landsat 4 (MSS) | 1 – Verde | 0.50 - 0.60 | 60 | 8 bits | |
| | 2 – Rojo | 0.60 - 0.70 | 60 | 8 bits | |
| | 3 - Infrarrojo Cercano (NIR1) | 0.70 - 0.80 | 60 | 8 bits | |
| | 4 - Infrarrojo Cercano (NIR2) | 0.80 - 1.10 | 60 | 8 bits | |
| Landsat 5 (TM) | 1 – Azul | 0.45 - 0.52 | 30 | 8 bits | |
| | 2 – Verde | 0.52 - 0.60 | 30 | 8 bits | |
| | 3 – Rojo | 0.63 - 0.69 | 30 | 8 bits | |
| | 4 - Infrarrojo Cercano (NIR) | 0.76 - 0.90 | 30 | 8 bits | |
| | 5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1 | | | | |
| | 6 – Thermal | 1.55 - 1.75 | 30 | 8 bits | |
| | 7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2 | 2.08 - 2.35 | 30 | 8 bits | |
| | Thermal (Banda 6) | 10.40 - 12.50 | 120 * (30) | 8 bits | |
| | Landsat 7 (ETM+) | 1 – Azul | 0.45 - 0.52 | 30 | 8 bits |
| | | 2 – Verde | 0.52 - 0.60 | 30 | 8 bits |
| 3 – Rojo | | 0.63 - 0.69 | 30 | 8 bits | |
| 4 - Infrarrojo Cercano (NIR) | | 0.76 - 0.90 | 30 | 8 bits | |
| 5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1 | | | | | |
| 6_1 – Termal – Baja ganancia | | 1.55 - 1.75 | 30 | 8 bits | |
| 6_2 – Termal – Alta ganancia | | 10.40 - 12.50 | 60 * (30) | 8 bits | |
| 7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2 | | 2.08 - 2.35 | 30 | 8 bits | |

La evolución de los satélites Landsat, desde las primeras misiones (Landsat 1-3) hasta Landsat 7, ha transformado la teledetección mediante mejoras técnicas progresivas en

sensores, bandas espectrales y resoluciones, como se detalla en la Tabla 2. Los satélites Landsat 1, 2 y 3, equipados con el sistema MSS (Multispectral Scanner System), operaron cuatro bandas espectrales (verde, rojo, NIR1 y NIR2) con una resolución espacial de 60 metros y radiométrica de 8 bits. Aunque limitados en precisión, estos sensores sentaron las bases para el monitoreo de cobertura vegetal a gran escala, como lo evidencian Boccardo et al. (2017), quienes destacan su papel en protocolos de autocorrección aplicables incluso en misiones modernas. Además, Drusch et al. (2012) resaltan que el MSS permitió estandarizar metodologías clave para proyectos posteriores, como el programa Sentinel-2 de la ESA.

Con Landsat 4, aunque se mantuvo el MSS, se introdujo el sensor Thematic Mapper (TM) en paralelo, mejorando la calibración radiométrica. Este avance fue crucial para la investigación sobre ecosistemas secos, donde Arboit y Maglione (2018) donde utilizaron sus datos para estudiar cambios en el NDVI bajo estrés hídrico. Sin embargo, la verdadera revolución llegó con Landsat 5 y su TM que añadió 7 bandas incluyendo SWIR (Infrarrojo de Onda Corta) y Térmico, con una resolución espacial de 30 metros (excepto para el térmico que era de 120m al principio). Estas innovaciones permitieron un monitoreo más avanzado de la humedad del suelo e incluso la detección de la deforestación. Por ejemplo, Silva et al. (2018) aplicaron imágenes Landsat 5 en México para prospectiva territorial, mientras Solórzano et al. (2020) destacan su utilidad en Google Earth Engine para análisis continentales de cambios en la cobertura forestal.

Posteriormente, Landsat 7 (ETM+) introdujo mejoras significativas, como una banda pancromática de 15 m y dos modos de ganancia para la banda térmica, elevando la precisión en fusión de datos. Fragoso-Campón et al. (2020) mostraron cómo estas imágenes combinadas con LiDAR facilitan la gestión del inventario forestal en España. Sin embargo, el error SLC-off en 2003 limitó el uso de este material para métricas de precisión absoluta. Tales problemas fueron solucionados por Gaida et al. (2020) utilizando métodos de corrección atmosférica.

Este desarrollo tecnológico ha impulsado no solo la investigación científica, sino también políticas ambientales. Por un lado, Kleemann et al. (2022) usaron series temporales de Landsat para medir la deforestación en reservas ecuatorianas, mientras Chimborazo y Vuille (2021) integraron datos térmicos en modelos climáticos para proyectar el estrés hídrico en bosques secos. Además, la interoperabilidad entre misiones, como se señaló por Drusch et al. (2012), hace posible paralelizar datos de los años 70 hasta la actualidad, crítico para entender el cambio global en relevancia.

En resumen, la estandarización de bandas, las mejoras en la resolución y la integración con tecnologías complementarias como lidar y plataformas en la nube han convertido a Landsat en un pilar de la teledetección. Estudios como los de Yarahmadi et al. (2024), que validan su calibración radiométrica, analizando los humedales argentinos, enfatizando cómo estas herramientas no solo registran el pasado, sino que también informan sobre acciones futuras en conservación y gestión del territorio.

1.5 Procesamiento de imágenes

1.5.1 Nivel de procesamiento de imágenes

El nivel de procesamiento de imágenes se refiere a las fases de tratamiento por las que pasa la información tras ser recopilada mediante sensores remotos con el fin de optimizar su calidad y utilidad. Cada fase es de refinamiento y satisface diferentes requisitos en el estudio de la información satelital. Estos niveles pueden abarcar desde información sin procesamiento hasta imágenes preparadas para su utilización en aplicaciones especializadas (Drusch, y otros, 2012).

El primer nivel de procesamiento se refiere a la información bruta o de nivel 0, que son fotografías sin alteraciones, tal como las capturó el sensor. Estas fotografías pueden incluir ruido, alteraciones geométricas y fluctuaciones en la fuerza de la señal a causa de las condiciones climáticas. Por lo tanto, son poco frecuentes su uso directo en investigaciones científicas o en usos prácticos (Escalona, Huertero, Granados, & Chavez, 2018).

La primera clase de procesamiento considera aquellas imágenes que han sido suprimidas mediante recortes geométricos y ajustes radiométricos simples. Aunque tales imágenes parecen estar mejor alineadas y presentan un valor más uniforme en reflectancia, así como menor ruido, es probable que requieran cambios adicionales para su uso en estudios específicos. En este momento se consideran imágenes con posibilidad de ortorrectificación, modificaciones para eliminar las distorsiones derivadas de la proyección y ajustar a un sistema de coordenadas geográficas. (Pinheiro & Muniz, 2019).

El paso de procesamiento de nivel dos implica el uso de correcciones atmosféricas complejas que intentan suprimir los efectos que la atmósfera ejerce en la radiación que el sensor recibe. Este nivel es un requerimiento mínimo en investigaciones que requieren

realizar estimaciones precisas de la reflectancia de la superficie, tales como el monitoreo de la vegetación o la detección de contaminación en los cuerpos de agua (2020).

Finalmente, los niveles 3 y 4 son indicativos de productos mucho más elaborados que están listos para ser utilizados en aplicaciones de especialidad. Estos artículos comprenden mapas temáticos, índices de flora y modelos espaciales obtenidos a partir de imágenes de satélite. Su aplicación es habitual en la planificación territorial, la administración de recursos naturales y la supervisión ambiental a gran magnitud (Solórzano, Gallardo-Cruz,, & Peralta-Carreta, 2020).

1.5.2 Corrección geométrica

La sectorización de imágenes por satélite es un proceso de gran relevancia a nivel espacial y por tal razón, el ajuste a coordenadas geográficas también se le denomina alineamiento por corrección geométrica. Este tipo de corrección es un proceso que abarca la eliminación de distorsiones espaciales. Como resultado se obtienen imágenes que guardan ciertos principios de exactitud con relación a la posición geográfica del área que cubre la imagen. Las distorsiones geométricas pueden desprenderse de la rotación de los satélites; el ángulo del horizonte de tierra, así como la inclinación del sensor. (Rodríguez, y otros, 2021).

La resolución de las disparidades geométricas brinda la corrección necesaria en la presentación de la fotografía, analizando la disposición espacial del sistema de coordenadas impulsando un control de distorsión de imagen. Este procedimiento generalmente implica el uso de puntos de control terrestre (GCP, en inglés) y métodos de interpolación para incrementar la exactitud del ajuste (Buzai, Lanzelotti, Viola, & Principi, 2018).

Es imprescindible la corrección geométrica en usos que demandan un análisis espacial exacto, tales como la cartografía, la planificación urbana y el seguimiento de variaciones en la cobertura del terreno. Sin este procedimiento, las fotografías podrían tener fallos en la localización de los objetos, lo que pone en riesgo la confiabilidad de las investigaciones fundamentadas en datos de satélite (Morillo, Villasmil, Pineda, & Orozco, 2018).

Las imágenes que ya han sido corregidas geométricamente son susceptibles de ser sometidas a ortorrectificación, es decir, pueden ser rectificadas con el objetivo de eliminar de manera radical las distorsiones que en ella puedan surgir y alinearlas con un sistema de coordenadas homogéneo. Este tipo de rectificación es de gran utilidad en todos aquellos

estudios que requieren la superposición de varias imágenes durante un periodo de tiempo, permitiendo de esta manera realizar comparaciones muy (Boccardo, Borgogno, Giulio, & Lingua, 2017).

Con el progreso tecnológico, la corrección geométrica se ha hecho más eficaz a través de algoritmos automáticos y datos adicionales de sensores GPS y modelos digitales de altitud. Estos progresos, a su vez, han aumentado la precisión de la información y su integración en sistemas de información geográfica para usos múltiples se ha facilitado. (Antón, 2019).

1.5.3 Corrección radiométrica

La corrección radiométrica es un proceso clave cuando se trata de imágenes satelitales, ya que se encarga de ajustar todos los valores de reflectancia que los sensores remotos capturan. Estos valores pueden verse afectados por cambios en la iluminación, el ángulo de observación y el rendimiento del sensor a lo largo del tiempo. Por eso, es esencial llevar a cabo la corrección radiométrica para garantizar que las imágenes sean comparables y, sobre todo, que sean precisas desde una perspectiva científica. (Wang, Yang, Khan, & Kootstra, 2024).

La variabilidad de la luz solar es uno de los factores que influye en la calidad radiométrica de una imagen. La radiación solar presenta variaciones a lo largo del día y del año, lo que afecta la reflexión de diferentes objetos en la superficie terrestre. Gracias a la corrección radiométrica, podemos ajustar estos cambios y mantener los datos con mayor fiabilidad (González-Guerrero & Pons, 2020).

Otro aspecto que se corrige mediante este procedimiento es la degradación temporal de los sensores. A medida que un satélite envejece, sus sensores pueden volverse menos sensibles, lo que altera el valor de la reflectancia que se detecta. La calibración regular y la aplicación de algoritmos de mitigación ayudan a reducir estos efectos y mantener la calidad de la información. Además de estas mejoras, la corrección (Yarahmadi, Thome, Wenny, & Czapla-Myers, 2024).

Además de estas modificaciones, la corrección radiométrica también se utiliza para suprimir el ruido que se encuentra en las imágenes, originado por interferencias atmosféricas, fluctuaciones de la temperatura y fallos electrónicos en los sensores. Al incrementar la calidad de la imagen, se simplifica la identificación de patrones y el análisis

de datos en investigaciones ambientales, agrícolas y urbanas (Astudillo-Sánchez, Pérez, Troccoli, & Aponte, 2019).

Debido a los progresos tecnológicos, actualmente existen modelos automatizados de corrección radiométrica que facilitan un procesamiento más veloz y exacto. Estas mejoras han mejorado la confiabilidad de las imágenes satelitales en la toma de decisiones, favoreciendo su uso en campos como la detección remota, la vigilancia ambiental y la organización del uso del suelo (Chang & Li, 2019).

1.5.4 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica es fundamental en el procesamiento de imágenes satelitales, ya que ayuda a eliminar los efectos que la atmósfera tiene sobre la radiación que capturan los sensores remotos. Cuando se toman las imágenes, la radiación solar interactúa con la atmósfera y puede ser reflejada, dispersada o absorbida, lo que impacta la precisión de la información que se obtiene (Hu, 2019).

Uno de los efectos más significativos de la atmósfera en las imágenes satelitales es la dispersión de la luz, especialmente en las longitudes de onda del espectro visible y en el infrarrojo cercano. Este fenómeno puede hacer que las fotografías se vean uniformes o que tengan un nivel de contraste y nitidez que no mejora la imagen en sí. El aire corregido elimina esos efectos negativos y aumenta la posibilidad de discriminación de los objetos sobre la superficie terrestre. (Gaida, Breunig, Galvão, & Ponzoni, 2020).

Un punto importante es la absorción de la radiación por la atmósfera, especialmente causada por el vapor de agua, dióxido de carbono y ozono. Estos materiales pueden ocasionar cambios en la cantidad de radiación que alcanza el sensor, por lo tanto, influyendo en la exactitud de las medidas espectrales. El uso de modelos matemáticos mejora la corrección de estos efectos y la obtención de valores de reflectancia más confiables (Francisco, Ruiz, Almeida, Gruber, & Anjos, 2020).

Hay varios procedimientos para llevar a cabo la corrección atmosférica, que oscilan entre modelos empíricos hasta algoritmos físicos fundamentados en información climática. Algunos de los modelos más empleados son 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum) y FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), los cuales facilitan la estimación de los efectos atmosféricos y su adaptación dependiendo de la localización geográfica y las condiciones meteorológicas (2020)..

Es necesario aplicar correcciones atmosféricas en los diferentes análisis que requieren datos espectrales precisos, como estudios de vegetación, identificación de contaminación en cuerpos de agua y evaluación del cambio climático. Al eliminar los cambios introducidos por la atmósfera, la imagen de la reflectancia de la superficie terrestre se acerca mucho más a la realidad, mejorando la precisión de los estudios de teledetección (Escalona, Huertero, Granados, & Chavez, 2018).

1.5.5 Corrección topográfica

El proceso de corrección topográfica se la realiza con el fin de corregir las imágenes satelitales que han sido distorsionadas por el fenómeno conocido como “alteración del terreno”. En zonas montañosas o con pendientes marcadas, la irradiación puede alterar la reflectancia de los objetos, dificultando su identificación precisa en los datos (Silva, Abril, Hernando, Mauro, & Vega, 2018).

Un problema importante que surge de la topografía en imágenes satelitales es el efecto de sombreado, donde las áreas que tienen inclinaciones opuestas a la dirección del sol reciben menos luz y, por ende, tienen un menor nivel de reflejo que las áreas expuestas al sol. Este fenómeno puede provocar equivocaciones al categorizar la cobertura del suelo y al calcular la biomasa vegetal (Muñoz-Ordoñez, Muñoz-Ordóñez, Pencue-Fierro, & Figueroa, 2020).

Para rectificar estos impactos, se utilizan modelos digitales de elevación (DEM), los cuales posibilitan calcular la pendiente del suelo y modificar los valores de reflectancia según el ángulo de incidencia del sol. Usando técnicas matemáticas, se equilibran los cambios en la luz y se normalizan los valores espectrales para toda la imagen (2020).

La corrección topográfica resulta ser de gran importancia en trabajos de teledetección en áreas de montaña donde los cambios en la insolación pueden afectar considerablemente los datos. En estas imágenes, las plantas, los suelos y otras superficies de la tierra pueden presentar problemas en la clasificación sin esta corrección (Fandos, y otros, 2020).

En la actualidad, la precisión con la que se realizan los modelos de corrección topográficas ha logrado que la inclusión de datos provenientes de nuevos satélites de resolución alta y por el uso de técnicas avanzadas de modelación espacial. Estos avances han hecho posible la obtención de imágenes más coherentes y precisas, potenciando su

aplicación para estudios medioambientales, silviculturales o de ordenación del territorio (García & Jesús, 2018).

1.6 Preprocesamiento y clasificación de imágenes

1.6.1 Combinación de bandas para el procesamiento de imágenes

La combinación de bandas es importante en el procesamiento de imágenes satelitales, ya que mejorar la capacidad para entender y analizar los datos obtenidos a través de sensores remotos. Cada banda de un sensor obtiene información en una parte específica del espectro electromagnético, y al mezclar varias de estas bandas, podemos obtener una imagen más precisa y completa de la superficie terrestre (Hurtado & Mario, 2019).

Los sensores satelitales de hoy en día, como los satélites Landsat o Sentinel, cuentan con varias bandas que recopilan datos en distintas longitudes de onda, desde la visible hasta la infrarroja. Cada una de estas bandas reacciona a distintos tipos de superficie y circunstancias, por lo que la mezcla de estas bandas puede ofrecer una percepción más precisa y clara del ambiente (Leotta, y otros, 2019).

El uso frecuente de la combinación de bandas es la determinación de índices espectrales, tal como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que emplea la mezcla de bandas en el visible y el infrarrojo próximo para medir la vitalidad de la vegetación (Perpinyà, Urrego, Sandoval, Ruiz-Verdú, & Soria, 2020).

Otro uso relevante de la mezcla de bandas es la generación de imágenes de color falso, en las que las bandas del infrarrojo próximo o infrarrojo térmico se fusionan con bandas visibles para resaltar particularidades específicas del suelo (Rodríguez, y otros, 2021).

Además de la mezcla convencional de bandas en el espacio espectral, también se pueden efectuar mezclas de bandas en el dominio temporal. Se consigue esto a través del estudio de series de tiempo de imágenes para detectar variaciones a través del tiempo, tales como la deforestación, el crecimiento urbano o la modificación en los patrones de agricultura (Silva, Abril, Hernando, Mauro, & Vega, 2018).

La composición de imágenes es un complejo proceso combinación de bandas diseñado para mejorar la calidad de una imagen al integrar fotografías con resoluciones espaciales o espectrales diferentes. Un ejemplo es combinar una pancromática de alta resolución espacial con una multiespectral más alta en resolución espectral. Este proceso,

conocido como pansharpening, mejora la claridad de los detalles espaciales mientras se preserva la información espectral completa, produciendo imágenes más útiles para la teledetección. (Rodríguez, Parra, & Daza, 2021).

La mezcla de bandas también se aplica en la categorización de imágenes, un procedimiento a través del cual se distinguen y etiquetan las distintas clases de cobertura del suelo (bosques, cuerpos de agua, zonas urbanas, etc.) en la imagen. Mediante el uso de diversas combinaciones de bandas y técnicas de clasificación supervisada o no supervisada, los analistas tienen la capacidad de segmentar y categorizar zonas concretas, lo que simplifica la toma de decisiones en la administración de recursos naturales, la organización de la utilización del suelo y la preservación del medio ambiente (Ramírez, y otros, 2020).

A si mismo, la fusión de bandas no solo arregla la habilidad de observación, sino que también moderniza el uso de imágenes satelitales al permitir que los datos se adapten y analicen de una manera más segura según los requisitos del usuario. Con el avance en la tecnología satelital, junto con el aumento en la potencia de procesamiento, la fusión de bandas continúa siendo una de las herramientas más importantes en la teledetección moderna, proporcionando información esencial para la gestión ambiental y la investigación sobre el cambio climático (Ramakrishna & Agrawal, 2023).

1.6.1.1 Color natural

La combinación de color natural en imágenes satelitales, que utiliza bandas del espectro visible (rojo, verde, azul), no solo replica la percepción humana del paisaje, sino que sirve como base para aplicaciones que requieren alta correlación con observaciones terrestres. En Landsat, esta combinación (bandas 4, 3, 2) y en Sentinel-2 (bandas 4, 3, 2 en resolución de 10 m) permite identificar patrones geográficos intuitivos, como la delimitación de cuerpos de agua o la expansión urbana (Drusch, y otros, 2012). Sin embargo, la precisión del color sigue dependiendo de una calibración radiométrica. Yarahmadi et al. (2024) en su análisis comparativo entre Landsat y Terra ASTER notaron cómo diferencias sutiles en la calibración entre sensores pueden alterar el color de características como los sedimentos de ríos y, por lo tanto, subrayan la necesidad de desarrollar enfoques más universales orientados a la consistencia a lo largo de los datos de series temporales.

Desde el punto de vista hidrológico, el color natural es un parámetro importante cuando se quiere realizar el seguimiento de la transparencia del agua en lagos complejos.

Perpinyà et al. (2020) usaron esta combinación en las imágenes de Sentinel-2 para estudiar los cambios en la turbidez del lago Albufera de València (España), donde la asociación visual con los datos in situ obtenidos permitía estimar la concentración de sólidos suspendidos.

El color natural, además de su uso en aplicaciones acuáticas, también participa en estudios geomorfológicos. Saud et al. (2019) aplicaron esta metodología en el Grijalva (México) a la cuenca del Grijalva para mapear y estudiar la erosión de las terrazas fluviales a partir del fuerte contraste que se aprecia en los suelos desnudos (tonos más claros) y en la vegetación ribereña (tonos verdes). Esta capacidad para diferenciar texturas y formas del terreno también se aplica en agricultura: Morillo et al. (2018) combinaron imágenes Landsat en color natural con índices de clorofila para estimar productividad en el Lago de Maracaibo (Venezuela), demostrando que incluso en bandas visibles, es posible inferir parámetros bioquímicos cuando se integra con datos complementarios.

La evolución tecnológica ha extendido las aplicaciones del color natural más allá de los satélites. Wang et al. (2024) crearon algoritmos para el ajuste radiométrico de imágenes multispectrales adquiridas por drones, mejorando la coincidencia entre los tonos capturados y las condiciones de iluminación. Esto es transferible a misiones de Landsat o Sentinel donde, como mencionan Gaida et al. (2020) la corrección atmosférica es fundamental para preservar la fidelidad del color en escenas con niebla o cargadas de aerosoles.

En síntesis, el color natural va más allá de su aparente simplicidad cuando se combina con métodos cuantitativos y nuevas tecnologías. Desde la calibración entre sensores hasta la fusión de datos LiDAR, su accesibilidad como recurso para gerentes espaciales y científicos ayuda a equilibrar el análisis Visual-IV y técnico en medio de la era del big data espacial.

1.6.1.2 Infrarrojo

Una combinación infrarroja (falso color RGB) representa la reflectancia espectral en una información visual más veraz, donde la vegetación sana se muestra en rojo debido a su alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano (NIR). En Landsat, esta combinación utiliza la banda 5 (NIR), 4 (rojo) y 3 (verde), mientras que Sentinel-2 utiliza la banda 8 (NIR), 4 (rojo) y 3 (verde) (Drusch, y otros, 2012). Esto determina que el color rojo para la vegetación sana, sino que también diferencia otras clases de cobertura del suelo, tales como campos agrícolas, cuerpos de agua y suelos desnudos, usando una paleta de colores estándar. Por ejemplo, Arboit y Maglione (2018) demostraron en oasis irrigados

de Argentina que los tonos rojos intensos en imágenes Landsat correlacionan con alta densidad de clorofila, mientras que los rosados indican cultivos en etapas tempranas de crecimiento.

La interpretación de colores en esta combinación sigue una guía clave: el rojo representa vegetación sana con alta actividad fotosintética; el rosado identifica zonas agrícolas, donde la reflectancia del NIR se mezcla con la del rojo en cultivos de baja cobertura; el blanco corresponde a suelos desnudos o eriales, como los analizados por Saud et al. (2019) en terrazas fluviales de México, donde la ausencia de vegetación revela procesos erosivos. El azul oscuro denota cuerpos de agua, ya que estos absorben casi toda la radiación NIR, un principio aplicado por Morillo et al. (2018) para mapear el Lago de Maracaibo (Venezuela) mediante Landsat. Por su parte, los tonos marrón y dorado señalan vegetación arbustiva y transicional, respectivamente, como se observa en bosques secos tropicales, donde Chimborazo y Vuille (2021) vinculan estos patrones con estrés hídrico inducido por el cambio climático.

Esta combinación es significativa no solo por sus usos ecológicos, sino también por sus fines de gestión de riesgos. Perpinyà et al. (2020) utilizaron imágenes de Sentinel-2 en la banda infrarroja para monitorear florecimientos de algas tóxicas en el Lago Albufera en València (España), donde el profundo color azul del agua contrastaba con las algas rojas y podría representar riesgos para la salud pública. En agricultura de precisión, Fandos et al. (2020) aplicaron este enfoque en cultivos de caña de azúcar en Argentina, distinguiendo plantaciones jóvenes (rosa) y maduras (rojas) para maximizar los rendimientos.

No obstante, la precisión de esta combinación está condicionada por factores técnicos. Yarahmadi et al. (2024) explican cómo las diferencias en la calibración radiométrica entre sensores como Landsat y Sentinel-2, por ejemplo, cambian el grado de sombra y, por lo tanto, requieren algunos cambios para comparaciones multitemporales. Mientras tanto, Gaida et al. (2020) destacan que es crucial realizar correcciones atmosféricas para reducir el efecto de distorsión debido a partículas de aerosol, especialmente dentro de las bandas NIR donde la dispersión de la luz afecta la medición de la reflectancia.

En entornos de conservación, esta combinación ha sido útil. Kleemann et al. (2022) utilizaron imágenes de Landsat en el rango infrarrojo para cuantificar la pérdida de bosques en reservas ecuatorianas, donde el avance de la coloración marrón (vegetación degradada) sobre el rojo (bosque denso) mostró la frontera agrícola confín. De manera complementaria, Wang et al. (2024) desarrollaron algoritmos de fusión para drones que

replican esta combinación en alta resolución, facilitando el monitoreo hiperfocal de la reforestación mediante drones en zonas inaccesibles.

Lo que significa que la combinación infrarroja es una herramienta versátil que trasciende la mera visualización, integrándose en modelos predictivos y políticas ambientales. Su capacidad para traducir datos espectrales en información accionable la convierte en un pilar para la teledetección moderna, desde la escala local hasta la global.

1.6.2 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada consiste en una técnica de análisis de imágenes obtenidas mediante satélites para identificar y caracterizar diferentes tipos de cobertura del suelo, utilizando un conjunto de muestras previamente etiquetadas por el analista, con lo cual el método continúa sustentándose en la idea de que si se conocen determinadas características de una determinada área (el tipo de suelo, la vegetación o las construcciones urbanas), se pueden identificar otras áreas que poseen características similares a las de la fotografía. El procedimiento se llama “supervisado” porque el analista proporciona ejemplos conocidos para facilitar el proceso de clasificación (García & Jesús, 2018).

Al igual que con cualquier proceso de categorización basado en discernir patrones, el primer paso es elegir un grupo de “muestras de entrenamiento” representativas que delimiten un rango de clases o formas de uso y cobertura del suelo en la imagen; en otras palabras, las muestras deben ser distinguibles en función de ciertas características que son identificables en la imagen (por ejemplo, vegetación, tierras agrícolas, áreas urbanizadas, agua). Es esencial tanto la calidad como la cantidad de estas muestras para conseguir resultados exactos (Arellano, Castillo, & Ojeda, 2018).

Una vez que se han definido las muestras de entrenamiento, se recurren a algoritmos de clasificación con el fin de asociar a cada uno de los píxeles de imagen un valor que corresponde a una clase de utilización del terreno, utilizando por ejemplo el método de la máxima verosimilitud; el algoritmo compara los valores espectrales de cada uno de los píxeles con las muestras de entrenamiento y estima la probabilidad que el píxel esté en una determinada clase. Según el grado de confianza, el píxel se categoriza en la clase pertinente (Cuevas & Inaipil, 2020).

La clasificación supervisada es muy provechosa para utilizar con datos de alta calidad y con una buena selección de los registros de entrenamiento, aunque su rendimiento siempre

será más bajo debido al ruido en las imágenes o lo que se puede considerar como el fenómeno de variabilidad del terreno, la falta de muestras representativas y otros factores. En esta situación, es importante que el analista tenga experiencia y conocimiento en el tema para coleccionar muestras que realmente reflejen las clases de interés (Saud, Sánchez, Cruz, & Alcántara, 2019).

Una de las principales virtudes de la clasificación supervisada es que puede alcanzar resultados sumamente precisos, debido a que se apoya en un conjunto concreto de atributos conocidos para cada clase. Además, este tipo de categorización facilita la creación de mapas exhaustivos de la utilización del terreno, lo cual resulta muy beneficioso en usos como la planificación de ciudades, la administración de recursos naturales y la preservación del entorno natural (Arboit & Maglione, 2018).

Sin embargo, la clasificación supervisada presenta limitaciones, sobre todo cuando la extensión de la superficie abarcada es suficientemente grande y muestra una variabilidad espacial, en caso de que las muestras de capacitación sean poco representativas y los espectros de las diversas clases lleguen a aparecer solapados. Para incrementar la exactitud, frecuentemente se fusionan métodos de clasificación supervisada con técnicas de rectificación, como la fusión de imágenes o la incorporación de datos extra (García & Jesús, 2018).

La clasificación supervisada sigue siendo un recurso relevante en el procesamiento de imágenes satelitales, especialmente si hay un conjunto de muestras y datos de alta resolución disponible para el entrenamiento. Su importancia en la teledetección, y especialmente en el monitoreo del cambio de uso de suelo, control ambiental, y manejo de recursos naturales, radica en su excelente precisión para detectar tipos específicos de cobertura de suelo. Conforme las tecnologías y los algoritmos progresan, la clasificación supervisada seguirá siendo uno de los métodos más empleados en las investigaciones de teledetección (Fragoso-Campón, Rosado, & Gallego, 2020).

1.6.3 Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada es una técnica de procesamiento de imágenes utilizada en el análisis de datos de imágenes satelitales, en la que el sistema identifica grupos de píxeles con atributos espectrales similares sin que el analista colabore. A diferencia de la clasificación supervisada, en la cual se brindan previamente muestras de entrenamiento

etiquetadas, la clasificación no supervisada agrupa los píxeles bajo patrones propios de los datos, permitiendo realizar de esta manera una segmentación automática de las imágenes. Este método resulta especialmente beneficioso cuando no se cuenta con datos anteriores acerca de las clases de uso del suelo o cuando el campo de estudio es muy amplio y complicado (Pham, Lobos, & Vidal-Silva, 2019).

El procedimiento de clasificación sin supervisión se lleva a cabo mediante la formación de grupos de píxeles (clusters) de acuerdo a sus características espectrales. Dichos grupos de píxeles se forman mediante algoritmos de agrupación como el método K-means o el algoritmo ISODATA, que son los que os permiten agrupar píxeles en grupos de acuerdo a su similitud espectral. Con la formación de estos grupos, cada uno de los cuales representa una clase de cobertura del terreno, aunque no se sabe cuál de ellas. El analista tiene la tarea de analizar los resultados y otorgar etiquetas a los grupos basándose en su entendimiento del campo de estudio o en el estudio de las propiedades espectrales de cada grupo (Yuchechen, Lakkis, Caferri, Canziani, & Muszkats, 2020).

La clasificación, esto es, una de las grandes ventajas de la clasificación no supervisada es el descubrimiento de patrones encubiertos dentro de la información a partir de datos en los que no se cuenta con información previa. Tal ventaja la hace una técnica útil en aquellos casos en los cuales no se tiene un conocimiento exacto de las clases o bien se tiene una contrariedad a la hora de conseguir muestras representativas. Además, este método puede implementarse de forma más ágil y eficaz en zonas amplias y variadas, dado que no necesita la intervención manual en la elección de las muestras de entrenamiento (Sinaga & Yang, 2020).

Sin embargo, la clasificación no supervisada también enfrenta ciertos obstáculos. Dado que el algoritmo considera únicamente la semejanza espectral para agrupar píxeles, sin considerar el contexto, pueden presentarse resultados altamente problemáticos de interpretación, en especial para zonas de alta varianza en la cobertura del suelo. Los grupos que la clase sin estructuras contextuales producen probablemente no corresponden con la clase real del uso del suelo, lo que los conllevará a malas interpretaciones. Por ejemplo, un conglomerado podría abarcar tanto áreas de bosques como áreas acuáticas debido a coincidencias espectrales en algunas bandas, lo que complicaría el reconocimiento de clases concretas (Zhao & Zhou, 2021).

Adicionalmente, la segmentación sin seguimiento puede modificarse por la selección de los parámetros del algoritmo; a modo de ejemplo, el número de agrupaciones a generar.

De esta forma, la falta de una buena selección del número de agrupaciones, puede llevar a una segmentación equivocada imagen, en la forma de agrupar excesidad de números de grupos o épocas de agrupaciones muy escasas. Es crucial que el analista realice una evaluación meticulosa de los resultados y efectúe modificaciones según se requiera, lo que podría requerir diversas iteraciones para conseguir una clasificación apropiada (Pham, Lobos, & Vidal-Silva, 2019).

No obstante, a las limitaciones indicadas, la clasificación no supervisada continúa siendo un método habitual en teledetección, sobre todo en las investigaciones preliminares o en los contextos en los que el conocimiento sobre las clases es escaso. Su habilidad para detectar patrones en grandes cantidades de datos sin requerir muestras de entrenamiento la hace una herramienta valiosa para la exploración de nuevos campos de estudio, tales como el seguimiento de ecosistemas a distancia o la valoración de variaciones significativas en la cobertura del suelo (Zhao & Zhou, 2021).

El proceso de clasificación no supervisada es una técnica de procesamiento de imágenes satelitales de baja complejidad que, a pesar de sus limitaciones, nos ofrece un considerable grado de flexibilidad en el estudio de amplias áreas sin la participación directa de personas. La habilidad para identificar patrones inciertos en la información y su uso en situaciones donde la información acerca de las clases es limitada la hace una herramienta útil para la administración ambiental, la supervisión de recursos naturales y la investigación geoespacial (Aubert, Huber, Furst, Raicu, & Tchoua, 2023).

1.7 Post-procesamiento e indicadores de validación

1.7.1 Matriz de confusión

La matriz de confusión se presenta como un instrumento integral de análisis para determinar la precisión, entre otros aspectos, de la clasificación automática y no supervisada de imágenes derivadas de datos satelitales. Esta matriz permite comparar el resultado de una clasificación con un conjunto de datos de referencia o "verdad terrenal", facilitando por su claridad la evaluación de las predicciones y permitiendo a su vez establecer el nivel de mezcla o mezcla que se ha hecho en las diferentes clases (Ríos, Zurita, & Eduarte, 2018).

En términos de su forma, la matriz de confusión puede ser representada por una tabla de doble entrada donde las filas corresponden a las clases de referencia y las columnas son las predicciones del modelo clasificador. Cada celda corresponde a un número determinado

de píxeles pertenecientes a la respectiva clase que han sido erróneamente clasificados como de otra clase. Por ejemplo, se toman como referencia la clase de bosque y clase estimada como agua, la celda correspondiente en la matriz mostrara el número de bosque que se ha erróneamente clasificado como agua (Jaskowiak & Costa, 2023).

La principal ventaja que puede ofrecer la matriz de confusión es que, a partir de ella, es posible calcular numerosos índices pertenecientes a la exactitud de la clasificación, tales como la exactitud global, exactitud por clase, exactitud. La exactitud global se relaciona con la cantidad total de clasificaciones correctas en el modelo teórico respecto a la cantidad total de píxeles clasificados. En cambio, la precisión por clase alude a la cantidad de píxeles correctamente agrupados en una clase determinada, lo que contribuye a valorar el desempeño de la clasificación en clases específicas (Sofaer, Hoeting, & Jarnevich, 2019).

La precisión es otro indicador proveniente de la matriz de confusión, que evalúa la cantidad de píxeles correctamente categorizados en una clase en relación con todos los píxeles asignados a dicha clase. En resumen, la precisión establece la cantidad de píxeles que se consideran como pertenecientes a una clase determinada realmente pertenecen a dicha clase. Por otro lado, el recordar y evaluar la habilidad del modelo para reconocer adecuadamente todos los píxeles de una clase, es decir, la proporción de píxeles correctamente categorizados en una clase en comparación con todos los píxeles que verdaderamente forman parte de dicha clase (Tasche, 2018)

La matriz de confusión también se puede utilizar para identificar clases mal interpretadas, por lo que finalmente se debe para la precisión de la clasificación en estudio. Un ejemplo es que, si un modelo etiqueta de manera incorrecta largas extensiones de bosques como pastizales o áreas urbanas, se podría necesitar reorganizar los parámetros del modelo, añadir datos de entrenamiento más grandes o hacer ajustes en los límites que se utilizan para discriminación de clases con la finalidad de optimizar la discriminación de clases. Este tipo de estudio facilita a los analistas el perfeccionamiento del proceso de clasificación y la optimización de los resultados (Ríos, Zurita, & Eduarte, 2018).

La matriz de confusión también ha permitido a determinar diferentes datos de validación importantes, como la estadística Kappa, que determina la cantidad de acuerdo entre las clasificaciones proyectadas y la clase real en relación con la probabilidad de acuerdo que podría ocurrir por coincidencia. Es necesario saber que Kappa se utiliza para medir la fiabilidad entre evaluadores de datos categóricos dado un contexto que proporciona una mejor evaluación detallada la precisión ofrecida por el denominador de la precisión

total (Arzamendia, y otros, 2018). Tal procedimiento es esencial en la investigación de teledetección que requiere alta precisión, como el monitoreo de cambios en el uso de la tierra, la gestión de recursos naturales y la planificación espacial (Muñoz-Ordoñez, Muñoz-Ordoñez, Pencue-Fierro, & Figueroa, 2020).

1.7.2 Matriz de transición

La matriz de transición es un recurso básico en el estudio multitemporal de las imágenes obtenidas desde los satélites, que se utiliza para evaluar las transformaciones en la cubierta del suelo o la utilización de este a través del tiempo. Esta clase de estudios es de sumo interés para las investigaciones que intentan entender la dinámica temporal y espacial de los paisajes, como es el caso del crecimiento urbano, la deforestación, la modificación de la vegetación o la degradación de los ecosistemas. La matriz de transición ofrece una perspectiva numérica de cómo los usos del suelo han sufrido cambios entre dos o más periodos de tiempo (Cuevas & Inaipil, 2020).

Una matriz de transición se crea al realizar la intersección de las categorías de imágenes de diferentes períodos y capturar los cambios que se producen entre ellas. Cada celda de la matriz refleja la cantidad de píxeles que cambian de clase durante dos momentos en el tiempo. Las filas de la matriz capturan las clases del primer momento (por ejemplo: 2000) mientras que las columnas capturan las clases del segundo momento (2020). Esto permite no solo un examen de la estabilidad de las clases, sino también de las áreas que han sufrido cambios, como el cambio de áreas forestales a tierras agrícolas o el desarrollo adicional de áreas urbanas (2021).

El beneficio principal de la matriz de transición es que puede servir de nexo para medir y estudiar los cambios de cobertura del suelo a partir del tiempo. Esto es especialmente interesante en la gestión medioambiental y en la planificación del espacio, ya que permite detectar las áreas que están sufriendo más de lo que serían situaciones de transformación, como sería, entre otras el proceso de urbanización o la deforestación, e anticipar cómo van a ser esos cambios. Adicionalmente, la matriz simplifica el reconocimiento de los patrones de cambio y posibilita la elaboración de reportes exhaustivos acerca de las modificaciones del paisaje (Saud, Sánchez, Cruz, & Alcántara, 2019).

La matriz de transición, además de mostrar las transiciones entre clases, facilita el cálculo de diversas métricas valiosas para valorar la tasa y el tipo de cambio. Dentro de estos

indicadores se incluyen el índice de cambio neto, que determina la diferencia entre el área obtenida y el área perdida por cada clase; el índice de cambio bruto, que calcula la cantidad total de cambio, y el índice de estabilidad, que señala cuán estables han permanecido las clases a través del tiempo (Silva, Abril, Hernando, Mauro, & Vega, 2018).

La matriz de transición presenta también ciertas limitaciones. Uno de los desafíos más importantes es la interpretación de los resultados, sobre todo cuando las clases de uso del suelo no pueden ser identificadas claramente por los métodos de clasificación que se aplican o bien por la posible calidad y resolución de las imágenes multitemporales. Además, puede existir incertidumbre a causa de los fallos en la clasificación de las imágenes de referencia, lo que podría influir en la exactitud de los resultados de la matriz (Fandos, y otros, 2020).

Con el propósito de solventar dichas restricciones, es común fusionar la matriz de transición con otras técnicas de análisis, como por ejemplo la comparación visual de imágenes multitemporales, el uso de modelos de predicción de cambio o la complementación con datos de campo. La mezcla de diversas fuentes de información y técnicas puede ofrecer una valoración más exacta de las variaciones en la cobertura del terreno y optimizar la toma de decisiones en proyectos de preservación o crecimiento urbano (Rodríguez, y otros, 2021).

La matriz de transición representa un recurso fundamental en el análisis multitemporal de imágenes de satélite, ya que se convierte en un medio para poder calcular y medir, así como analizar las transformaciones relacionadas la cobertura del suelo en función del tiempo. Su capacidad para observar y calcular las transiciones entre diferentes formas de uso del suelo la convierte en una herramienta útil para la gestión del medioambiente, la vigilancia de la deforestación, el crecimiento de las áreas urbanas o el orden del uso del suelo. Al combinar la matriz de transición con otras técnicas de análisis, se puede adquirir un entendimiento más detallado de la dinámica paisajística y llevar a cabo un monitoreo eficaz de las modificaciones que impactan a los ecosistemas y a las comunidades (Saud, Sánchez, Cruz, & Alcántara, 2019).

Tabla 3. Ejemplo de matriz de transición.

| Cobertura/Código | | Fecha final | | | | Total | Perdida |
|------------------|--------------|-------------|----|----|----|-------|---------|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | | |
| Fecha inicial | C1 | 1 | 11 | 21 | 31 | 41 | |
| | C2 | 2 | 12 | 22 | 32 | 42 | |
| | C3 | 3 | 13 | 23 | 33 | 43 | |
| | C4 | 4 | 14 | 24 | 34 | 44 | |
| | C5 | 5 | 15 | 25 | 35 | 45 | |
| | C6 | 6 | 16 | 26 | 36 | 46 | |
| | C7 | 7 | 17 | 27 | 37 | 47 | |
| | C8 | 8 | 18 | 28 | 38 | 48 | |
| | C9 | 9 | 19 | 29 | 39 | 49 | |
| | Total | | | | | | 0,00 |
| Ganancia | | | | | | 0,00 | 0,00 |

La matriz de transición se presenta como una herramienta básica para poder medir y evaluar los cambios acaecidos en la cobertura del suelo, permitiendo así la identificación de patrones de permanencia, de ganancia y de pérdida para las categorías definidas a lo largo del tiempo. Así es como, en este sentido, la diagonal de la matriz representa las áreas que persisten en su estado original, mientras que las celdas que no corresponden a la diagonal ponen de manifiesto las transiciones que se producen, tales como, por ejemplo, el paso de bosques a tierras agrícolas. Kleemann et al. (2022) destacan que estos cambios en Ecuador reducen la capacidad de captura de carbono, agravando los impactos del cambio climático.

Para entender la dinámica que subyace a estos procesos, es conveniente tener en cuenta que, calculada como lo hemos hecho, la ganancia de una categoría se identifica como la diferencia entre el área total de esa categoría en el periodo final-participando en la consecuencia de una corriente que establece su ganancia-y su persistencia. Cuevas e Inaipil (2020) Aplicaron este enfoque para estudiar la cuenca del río Claro en Chile y mostraron que los bosques nativos fueron rápidamente convertidos en tierras agrícolas entre 1986 y 2016. Además, la matriz de transiciones sirve para evaluar políticas de conservación: Llerena et al. (2020) demuestran su utilidad en la priorización de áreas de bosques conservados en Ecuador, correlacionando transiciones con estrategias de manejo guiadas por la adaptación.

En áreas como la Reserva Ecológica Loma Alta, el análisis basado en la matriz gana importancia ante la presión de la actividad humana. Guarderas et al. (2022) señalan que la expansión de áreas agrícolas y urbanas en paisajes montañosos ecuatorianos altera la cobertura vegetal, una tendencia que podría buscarse en Loma Alta para observar la pérdida de bosques debido a la infraestructura turística. Además, Silva et al. (2018) muestran en México cómo la pérdida de vegetación vista a través de matrices de transición se relaciona con el cambio en la estructura del ecosistema, proporcionando razones para incluir tales análisis en la planificación territorial.

En definitiva, la integración de tecnologías como el sensoriamiento remoto también ha puesto patas arriba lo que representa la construcción de matrices. Drusch et al. (2012) argumentan que las misiones de satélite como Sentinel-2 proporcionan datos multitemporales de gran resolución (de los que obtendríamos nuestros escenarios) para la delimitación de categorías y la detección de fragmentaciones de hábitat. En conclusión, la matriz de transición constituye una base para la toma de decisiones en la gestión del territorio que permite equilibrar los objetivos ecológicos con los socioeconómicos y viceversa.

1.7.3 Índice de vegetación

El estado y el grado de cobertura de la vegetación puede ser evaluado a partir del procesamiento espectral de imágenes mediante satélites, utilizando índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Así mismo, el NDVI permite Diferenciar las áreas vegetadas vigorosas, los suelos expuestos y los cuerpos de agua; los valores NDVI oscilan entre -1 y 1, donde los valores próximos a 1 indican que se trata de vegetación densa y está en buen estado, pero donde los valores negativos o muy próximos a cero se asocian a superficies no vegetales. Arboit y Maglione (2018) destacan la utilidad de este índice en climas secos para monitorear cambios en la cobertura vegetal, mientras que Francisco et al. (2020) demuestran su aplicación en imágenes Landsat 8 para analizar variaciones en la salud de los ecosistemas. Esta métrica no solo facilita la clasificación de la cobertura terrestre, sino que también sirve para detectar procesos como la degradación de bosques, tal como se ha aplicado en estudios de teledetección en zonas tropicales (Fragoso-Campón, Rosado, & Gallego, 2020).

Tabla 4 Valores NDVI y clasificación de cobertura terrestre.

| Clase | Valores NDVI | Cobertura terrestre | Descripción |
|--------------|---------------------|----------------------------|---|
| 1 | < -0,01 | Clases no vegetales | Ríos, quebradas, lagunas, nubes. |
| 2 | -0,01 – 0,15 | Tierra desnuda | Suelos degradados, asentamientos humanos, vías, áreas sin vegetación. |
| 3 | 0,15 – 0,25 | Vegetación dispersa | Tierras cultivadas, herbazales, arbustos, pastizales, terrenos en descanso. |
| 4 | 0,25 – 0,40 | Vegetación abierta | Vegetación leñosa, plantaciones arbustivas, bosque seco tropical. |
| 5 | > 0,4 | Vegetación cerrada | Bosques densos, vegetación en crecimiento activo, bosque húmedo. |

Fuente: Elaboración propia basada en datos espectrales de sensores remotos.

La tabla proporciona una clasificación completa de los rangos de valores de NDVI en relación con ciertos tipos de cobertura del suelo. Por ejemplo, los valores entre 0.15 y 0.25 están relacionados con vegetación dispersa como pastizales o campos de cultivo. Fandos et al. (2020) aplicaron NDVI a los campos de caña de azúcar en Argentina para diferenciar las edades de las plantaciones, mostrando cómo la variación del índice indica cambios en la productividad agrícola. Por otro lado, un valor superior a 0.4 corresponde a vegetación cerrada, como los bosques húmedos, cuyas capacidades de almacenamiento de carbono son críticas para aliviar el cambio climático, lo que fue estudiado por Kleemann et al. (2022) en su análisis sobre la deforestación en Ecuador.

La identificación de las clases no vegetales (es decir, aquellas donde los valores son < -0,01), como los valores de los ríos o suelos degradados, terminan siendo relevantes en el contexto de la planificación territorial. En el caso de la Reserva Ecológica de Loma Alta, la detección de tierras desnudas mediante la técnica del NDVI podría estar vinculada a procesos de aceleración de la erosión, tal como lo evidencian Astudillo-Sánchez et al. (2019) en su análisis de la composición vegetal de esta área. Arboit y Maglione (2018) también subrayan que, en ecosistemas secos, la pérdida de cobertura vegetal detectada con NDVI se correlaciona con aumentos en la vulnerabilidad del suelo, reforzando la necesidad de integrar estas tecnologías en políticas de conservación adaptativas.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización del área

La Reserva Ecológica Comunal Loma Alta se encuentra en las montañas Chongón-Colonche al sur del Parque Nacional Machalilla (provincia de Santa Elena, Ecuador) y abarca un área de 100 a 800 msnm, que contiene un mosaico de ecosistemas como bosques secos tropicales, zonas de niebla y matorrales, así como especies endémicas.



Figura 1. Zona de estudio Reserva Ecológica de Loma Alta imagen descargada de la plataforma Earth Explorer con sistema de referencia geodésico WGS 84, zona 17 Sur.

El clima en la zona tiene una marcada estacionalidad con una temperatura media de 24 °C y una precipitación de 500 mm en las zonas más bajas y 1500 mm cerca de las elevaciones cubiertas de neblina. Según proyecciones modeladas por Campozano et al. (2020) en la zona se estima una disminución en las lluvias y un aumento de 1,5°C en la temperatura media para el 2050, proyectado para el año 2050 cambiaría los ciclos fenológicos de especies como el ceibo (*Ceiba trichistandra*), clave para el equilibrio de los bosques secos, agravando el proceso de desertificación social en áreas ya impactadas por la expansión agrícola como las laderas de La Unión o El Suspiro, donde la erosión del suelo se vuelve un fenómeno sumamente complejo. En la zona de reserva el suelo predominante es de tipo franco arenoso cuyo tipo distingue por su alta permeabilidad, poder de drenaje y otros esas que potencian la infiltración del agua y disminuyen la escorrentía superficial.

González et al. (2019) analizaron muestras de suelo de las mismas regiones de la provincia de Pastaza, mostrando cómo estas características minimizan la pérdida de nutrientes y apoyan los cultivos tradicionales como el maíz y los frijoles, que son críticos para la seguridad alimentaria de las comunidades locales.

/

2.2 Materiales y equipos

- Cámara fotográfica
- Cuaderno de campo y bolígrafo
- Imágenes multiespectrales Landsat TM, ETM+ y OLI,
- App GPS UTM MAP-Garmin x20
- Drone DJI Mini 3 Pro (modelo CHX162-30)
- Lapto marca Dell

Para llevar a cabo la investigación en la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta se aplicaron algunas herramientas tradicionales y, al mismo tiempo, tecnologías más avanzadas que la complementaban, garantizando así el nivel de precisión que se deseaba tanto en la recolección como en el análisis de los datos obtenidos. Utilizando incluso los materiales más básicos como el cuaderno y el bolígrafo, se utilizó el registro etnográfico para ir haciendo un seguimiento de dichas observaciones in situ, como, por ejemplo, las prácticas agrícolas, o los puntos de vista que la gente de la zona tenía con respecto a la conservación. Utilizando la cámara fotográfica del celular Redmi 9 se obtuvieron fotos del lugar de estudio, mientras que la laptop Dell fue empleada como herramienta para el almacenamiento y para el procesamiento preliminar de los datos en el trabajo de campo. Trujillo y Lomas-Tapia (2018) resaltan en estudios similares que estos instrumentos son clave para integrar metodologías cualitativas y cuantitativas en contextos comunitarios, donde la accesibilidad tecnológica es limitada.

En lo que respecta a equipos específicos, la necesidad de usar el dron, modelo DJI Mini 3 Pro (CHX162-30), fue importante para la obtención de ortofotos de resolución submétrica (2.5 cm/píxel) en zonas difíciles de alcanzar; las imágenes obtenidas con dicha resolución (escala 1:80,000) sirvieron para georreferenciar los puntos de muestreo, así como para comprobar aquellos cambios de cobertura que se hallaron en los tiempos de recorridos que se obtuvieron mediante teledetección. Por su parte, el GPS Garmin MAP 20X cumplió con una precisión igual a ± 3 m en la ubicación de los transectos para los inventarios florísticos, lo cual está en la serie de estándares que validaron Silva et al. (2018) en la aplicación de estudios prospectivos territoriales para los márgenes de México.

Software

- Earth Explorer
- QGis 3.34
- Google Earth
- ArcGIS Map 10.8

2.2.1 Metodología

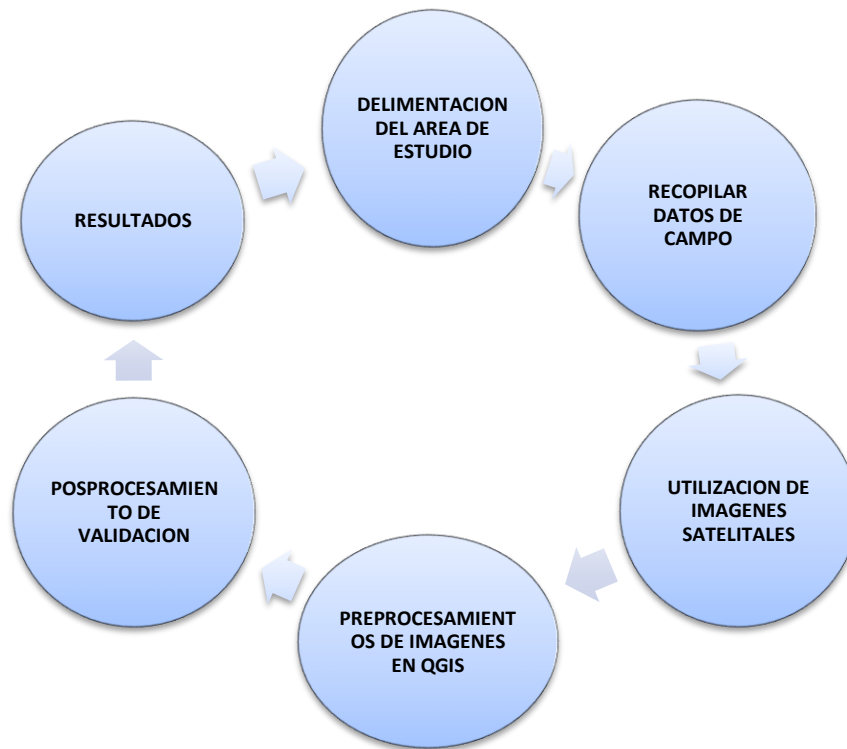


Figura 2. Esquema Metodológico para determinar la Evaluación de la Reserva Ecológica de Loma Alta.

2.2.2 Delimitación del área de estudio



Figura 3. Delimitaciones de la Reserva Ecológica de Loma Alta.

La definición del área de estudio se realizó como un procedimiento sistemático el cual se inició utilizando la herramienta de Google Earth mediante una superpuesta de imagen la cual se bajó en formato JPG para su visualización anterior. Después, esta imagen se procedió a digitalizar de forma manual mediante las herramientas de delineación de las que dispone el programa QGIS 3.34 donde se determinaron las áreas de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta, teniendo como atributo condiciones geográficas como pueden llegar a ser las áreas para vegetación. Una vez finalizada la digitalización, los polígonos generados se exportaron a formato KML a fin facilitar su compatibilidad con múltiples plataformas para el análisis geoespacial, lo que facilitó la implementación de los polígonos a sistemas de información geográfica más sofisticados.

2.2.3 Recopilar datos de campo

La recolección de datos en campo se realizó en el transcurso de la visita a la Reserva Ecológica que combinó la observación directa y el uso de la tecnología geoespacial con la finalidad de asegurar la correcta representatividad de las muestras seleccionadas para su posterior análisis. Con ese propósito se realizaron tres salidas de campo, entre septiembre y diciembre de 2024, que permitieron identificar y georreferenciar puntos estratégicos en la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta. La primera salida se llevó a cabo el 22 de septiembre y consistió en el contacto con las autoridades locales en la Casa Comunal de

Loma Alta, donde se acordaron los permisos necesarios y se lograron importantes orientaciones relativas a las áreas prioritarias de estudio, lo que facilitó la planificación de actividades. La segunda salida de campo se efectuó el 20 de octubre en compañía del guardabosque de la comuna Sr Antonio Yagual, de lo cual me brindo soluciones técnicas y conocimientos ancestrales sobre la dinámica del ecosistema, dando como resultado la demarcación de tres parcelas de muestreo de 20 × 50 metros cada una de ellas, ubicadas en zonas representativas de la reserva y que permiten capturar la variabilidad espacial de la cobertura vegetal, además de la georreferenciación de puntos alternos en otras.

La última salida se la ejecutó para la captura de imágenes con drone las que nos iba a permitir hacer la comparación de clasificación.

Tabla 5 Coordenadas de los puntos recolectados en campo.

| COORDENADAS | |
|--------------------|------------|
| X | y |
| 543593.6 | 9792378.48 |
| 543602.6 | 9792387.48 |
| 543237.6 | 9793138.47 |
| 543466.6 | 9792723.48 |
| 542036.6 | 9790913.49 |
| 543701.6 | 9792465.48 |
| 543686.6 | 9792454.48 |
| 543684.6 | 9792495.48 |
| 543668.6 | 9792483.48 |
| 543403.6 | 9792719.48 |
| 543393.6 | 9792708.48 |
| 543443.6 | 9792694.48 |
| 543417.6 | 9792664.48 |
| 543212.6 | 9793099.47 |
| 543230.6 | 9793103.47 |
| 543221.6 | 9793132.47 |
| 543306.6 | 9792675.48 |
| 543586.6 | 9792372.48 |
| 543213.6 | 9793090.47 |
| 543398.7 | 9793095.42 |
| 543782.7 | 9792764.43 |
| 543608.7 | 9794498.41 |
| 544274.7 | 9791963.43 |
| 543044.7 | 9793597.42 |
| 543258.7 | 9793076.42 |
| 540651.7 | 9794074.42 |
| 542652.7 | 9796763.40 |

| | |
|----------|------------|
| 545087.0 | 9792453.68 |
| 545096.8 | 9792517.31 |
| 544053.0 | 9792980.50 |
| 543526.5 | 9792938.85 |
| 545175.8 | 9792407.68 |
| 545117.9 | 9792393.22 |
| 544926.3 | 9792382.37 |
| 544850.3 | 9792400.45 |
| 544825.0 | 9792335.36 |
| 544788.9 | 9792393.22 |
| 544778.0 | 9792317.29 |
| 544781.6 | 9792263.05 |
| 544651.5 | 9792440.22 |
| 544665.9 | 9792378.75 |
| 544412.8 | 9792422.15 |
| 544839.5 | 9792512.54 |
| 544036.3 | 9792969.79 |

2.2.4 Selección de imágenes satelitales

La selección de las imágenes satelitales se realizó conforme a unos criterios técnicos y cronológicos con el objetivo de asegurar la homogeneidad en el análisis multitemporal. En una primera instancia, la elección fue para las misiones Landsat 7 y Landsat 8, dado su carácter muy conocido y utilizado anteriormente, su resolución espacial de 30 metros por píxel y su coincidencia espectral, factores imprescindibles para una evaluación de cambios en la cobertura forestal. Fueron priorizadas las imágenes en términos de fechas de adquisición del año 2000, año 2010 y el año 2024, centrándose en las fechas de adquisición para que fuesen lo más coincidentes posibles con los meses de septiembre – diciembre, época seca en esa región, para evitar interferencias con nubes y climatológicas, a excepción de la del año 2010, que la única imagen válida fue tomada en el 02 de octubre de ese mismo año, para intentar que todas las imágenes tengan unas características similares en cuanto a estacionalidad.

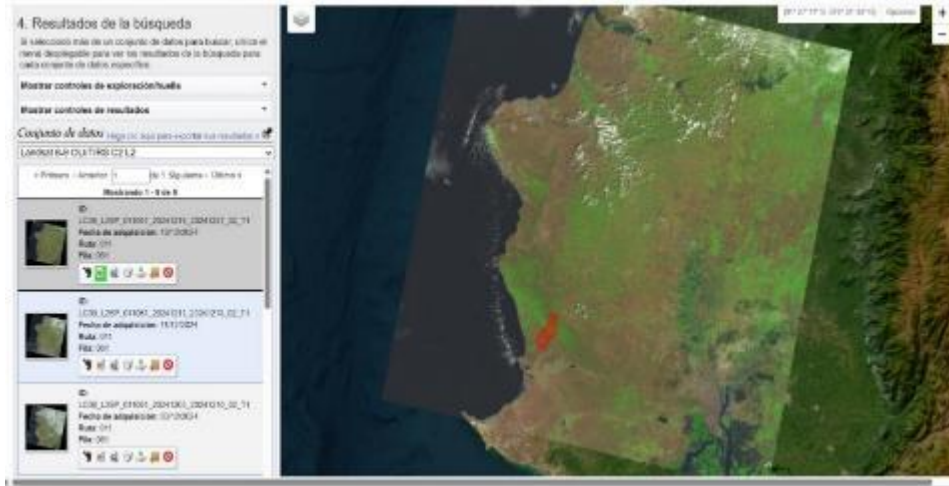


Figura 4. Imagen Satelital Plataforma Earth Explorer.

Se corroboró que cada una de las imágenes contó como mínimo con un nivel de procesamiento T1, lo que hace referencia al procesamiento correcto de las imágenes en relación a correcciones geométricas y radiométricas precisas (mediante la incorporación de puntos de control terrestre y modelos de elevación digital). Se registraron porcentajes de nubosidad variables (3% en el 2000, 19% en el 2010 y 7% en el 2024) pero éstas no incidieron en las imágenes de la zona de interés mediante inspección visual y aplicación de máscaras de nubes, especialmente en la Reserva Ecológica Comunal de Loma Alta donde la cobertura nubosa aparecía marginal o nula. Se tuvieron también en cuenta parámetros de adquisición como el azimut solar (95.38° a 132.67°) y la elevación solar (56.23° a 63.52°); las diferencias que se registraron entre las distintas fechas no llegaron a poner en cuestión la consistencia radiométrica gracias a la aplicación posterior de las correcciones atmosféricas.

Tabla 6 Características de imágenes satelitales Landsat, de los periodos de interés.

| Fecha | Landsat Product id | Fecha de adquisición | Path/Row | Azimut solar | Elevación solar | Nubosidad |
|-------|--|----------------------|----------|--------------|-----------------|-----------|
| 2000 | LE07_L1TP_011061_20001123_20200917_02_T1 | 23-nov-2000 | 011/061 | 128.48 | 58.11 | 3 |
| 2010 | LE07_L1TP_011061_20101002_20200910_02_T1 | 2-oct-2010 | 011/061 | 95.38 | 63.52 | 19 |
| 2024 | LC08_L2SP_011061_20241219_20241227_02_T1 | 19-dic-2024 | 011/061 | 132.67 | 56.23 | 7 |

2.3 Preprocesamientos de imágenes

2.3.1 Corrección atmosférica

Se realizó el ajuste de la atmósfera en las imágenes que se bajaron de Earth Explorer, usando imágenes de Landsat 7 para el 2000 y 2010, y Landsat 8 para el 2024. La razón para aplicar esta corrección es la mejora en la calidad de las imágenes al quitar los efectos atmosféricos que perjudican la información que la superficie terrestre da.

2.3.2 Corte de las imágenes satelitales

Como resultado de la extensa escena satelital, se realizaron cortes en QGIS para adaptar los conjuntos de datos al área de estudio correspondiente al período de 2000-2010 del año 2024. Posteriormente, estas imágenes fueron reproyectadas al sistema geodésico WGS 84, zona 17 Sur.

2.3.3 Combinación de bandas de imágenes satelitales

Se realizó una combinación de bandas con imágenes satelitales de 2000, 2010 y 2024. Luego se realizó una composición en falso color utilizando la banda infrarroja. Para las imágenes de 2000 y 2010, se utilizó la combinación 4-3-2 (infrarrojo cercano), mientras que en la imagen de Landsat 8 (2024) se utilizó la combinación 5-4-3.



Figura 5. Combinación en falso color método infrarrojo Reserva Ecológica Loma Alta, a escala 1:8000 UTM WGS84 17 S.

2.4 Clasificación supervisada

2.4.1 Selección de área de entrenamiento

Para la clasificación supervisada, se definieron manualmente áreas de entrenamiento los cuales fueron asignados a cuatro categorías: bosque, tierras agropecuarias, vegetación herbácea y arbustiva, y zonas antrópicas, a cada categoría se le determinaron puntos manualmente. Adicionalmente, se utilizaron coordenadas geográficas recolectadas en campo con un dispositivo GPS, con el fin de mejorar la exactitud y veracidad de los puntos de muestreo.





2.4.2 Clasificación de imágenes

Para mejorar la discriminación espectral entre las diversas clases, se procedió a la elaboración de las imágenes en composiciones en tonalidad infrarrojo, aprovechando la principal capacidad de dicha banda para poder resaltar la actividad fotosintética de la vegetación; para las imágenes Landsat 7, se optó por las bandas 4 (infrarrojo cercano), 3 (rojo) y 2 (verde), y para Landsat 8, por las bandas 5 (infrarrojo cercano), 4 (rojo) y 3 (verde), ajustado a la técnica de cada sensor. Esta selección se basa en la respuesta espectral singular de cada cobertura, ya que, para el caso del bosque denso, por ejemplo, se nota una alta reflectancia en la banda infrarroja cercano en comparación con los valores más bajos descritos en zonas urbanas. La clasificación se realizó mediante el algoritmo máxima verosimilitud (Maximum Likelihood classification), trabajando a una escala de 1: 80000. alcanzando así el equilibrio entre el detalle espacial que se requería y la capacidad de generalización que permitía abarcar la extensión superficie total del área de estudio.

2.4.3 Clases definidas de área de estudio

Para categorizar los tipos de cobertura terrestre en la región edafológica en consideración, se formaron cuatro clases de cobertura: Bosque, Tierras agropecuarias, Vegetación herbácea y arbustiva y Zonas antrópicas. Utilizando la plataforma Qgis 3.34.

Tabla 7 Clases de cobertura del área de estudio.

| Clases | Definición | Muestra |
|--|--|---|
| Bosque | Composición de 5-4-3 en infrarrojo, representa el color rojo oscuro. |  |
| Zona antrópica | composición de 4-3-2 en infrarrojo, representa el color celeste. |  |
| Tierra agropecuaria | Área agrícola en composición de 4 3-2 en infrarrojo, representa color rosa. |  |
| Vegetación Herbácea y arbustiva | Vegetación herbácea y arbustiva en composición de 4-3-2 en infrarrojo, representa el color café oscuro con tonos rosáceos. |  |

2.4.4 Método de clasificación

Para esta evaluación se utilizó el algoritmo Máxima Verosimilitud clasificación en QGIS, el cual asignó cada píxel a la clase con mayor probabilidad estadística de pertenencia, considerando las características espectrales predefinidas en las áreas de entrenamiento y para

tener una mejor clasificación se optó utilizando los puntos que fueron recolectados en campo.

2.4.5 Evaluación de Exactitud temática

Posteriormente, se realizó la evaluación de exactitud temática mediante una matriz de confusión, contrastando 45 puntos de verificación independientes, es decir se compararon las clases de usos identificadas en las coordenadas recolectadas en campo con las áreas de entrenamiento.

A su vez se realizó una matriz de transición para analizar los cambios de cobertura entre los años 2000 al 2024.

2.4.6 Matriz de confusión

Se generó la matriz de confusión del año 2024, utilizando la herramienta de precisión, mediante el plugin Scp. Esta herramienta relaciona los píxeles seleccionados para el área de entrenamiento con los píxeles de prueba, los cuales dan como resultado la clase de uso de suelo que fue asignada como referencia o muestra de entrenamiento del período 2024.

2.4.7 Cambio de cobertura y uso de suelo

Con el objetivo de analizar la dinámica en la cobertura y uso del suelo de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta entre los años 2000-2024, se ha implementado un enfoque metodológico que se basa en el procesamiento espacial de las imágenes satelitales clasificadas. En este sentido, se efectuó de manera inicial una operación de intersección entre las capas ráster del año 2000 y del año 2024, en la cual se utilizaron herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG) de la plataforma ARCMAP para establecer relaciones espacio-temporales entre las distintas categorías de cobertura. La operación de intersección de capas generó una capa resultante para dar cuenta de las áreas que presentaban la misma cobertura (persistencia) y aquellas que habían experimentado transformaciones por pérdida o ganancia de vegetación, expansión agrícola o bien por el desarrollo antrópico. Luego, se introdujo un campo numérico en la capa resultante para hacer con este una cuantificación de las variaciones en hectáreas y se implementaron valores aritméticos que

permitiesen dar cuenta de la magnitud de la transformación. Este proceso incluyó la suma de las áreas para cada combinación de categorías de uso entre los dos años, facilitando así la construcción de una matriz de las transiciones

Tabla 8 indica los campos que fueron agregados en la tabla de atributos en ARGMAP para determinar los cambios de cobertura durante el periodo 2000-2024

| uso de suelo 2000 | uso suelo 2024 | cod_2000 | Cod_2024 | área | suma |
|---------------------------------|---------------------------------|----------|----------|--------|------|
| BOSQUE | BOSQUE | 1 | 10 | 3675,8 | 11 |
| TIERRAS AGROPECUARIAS | BOSQUE | 2 | 10 | 1 | 12 |
| VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | BOSQUE | 3 | 10 | 5,4 | 13 |
| ZONA ANTRÓPICA | BOSQUE | 4 | 10 | 3,3 | 14 |
| BOSQUE | TIERRAS AGROPECUARIAS | 1 | 20 | 556,5 | 21 |
| BOSQUE | TIERRAS AGROPECUARIAS | 1 | 20 | 0,1 | 21 |
| TIERRAS AGROPECUARIAS | TIERRAS AGROPECUARIAS | 2 | 20 | 238,4 | 22 |
| VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | TIERRAS AGROPECUARIAS | 3 | 20 | 319,2 | 23 |
| ZONA ANTRÓPICA | TIERRAS AGROPECUARIAS | 4 | 20 | 22,3 | 24 |
| ZONA ANTRÓPICA | TIERRAS AGROPECUARIAS | 4 | 20 | 0,1 | 24 |
| BOSQUE | VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 1 | 30 | 927,7 | 31 |
| BOSQUE | VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 1 | 30 | 0,1 | 31 |
| TIERRAS AGROPECUARIAS | VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 2 | 30 | 37,7 | 32 |
| VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 3 | 30 | 1450,4 | 33 |
| ZONA ANTRÓPICA | VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 4 | 30 | 3,4 | 34 |
| ZONA ANTRÓPICA | VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 4 | 30 | 0,1 | 34 |
| BOSQUE | ZONA ANTRÓPICA | 1 | 40 | 13,9 | 41 |
| TIERRAS AGROPECUARIAS | ZONA ANTRÓPICA | 2 | 40 | 12,4 | 42 |
| VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | ZONA ANTRÓPICA | 3 | 40 | 10,6 | 43 |
| ZONA ANTRÓPICA | ZONA ANTRÓPICA | 4 | 40 | 22,3 | 44 |

2.4.8 Cálculo de la tasa de cambio

Para poder calcular la tasa de cambio anual de la cobertura forestal en la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta para el periodo 2000-2024 se utilizó la siguiente ecuación se denomina tasa de cambio de uso de suelo o también tasa de deforestación, debido a que se

usa para calcular las diferentes transiciones de usos desuelo y no solamente para el cambio forestal.

$$q = (A2/A1)^{1/(T2-T1)} - 1$$

q : Tasa de deforestación (%)

$A1$: Área inicial de bosque (ha)

$A2$: Área final de bosque (ha)

$t1$: Año de inicio

$t2$: Año final permite calcular la variación porcentual promedio por año

2.4.9 Cálculo De Índice De Vegetación

Para el cómputo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por su abreviatura en inglés) fue necesaria la utilización de la fórmula $NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red)$, resultado que permitió evaluar la cobertura vegetal para los años 2000, 2010 y 2024. Como primer paso, se complotó una combinación de bandas espectrales del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo, las cuales fueron obtenidas a partir del análisis de imágenes satelitales, generando mapas de NDVI para cada periodo y por otro lado, se utilizaron las imágenes tomadas con dron de las tres parcelas para determinar el nivel de Índice de Vegetación de dichas parcelas, realizando a su vez una comparación de las mediciones tomadas mediante imágenes satelitales y las obtenidas con el dron de las parcelas y a su vez hacer una comparación.

2.4.10 Creación de mapas de cobertura

Una vez realizados todos los pasos anteriores, se crearon los mapas de cambio de cobertura y uso de suelo, representados a la escala de 1:80000, en correspondencia con la resolución de las imágenes procesadas.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de la evaluación (2000-2024), la Reserva Loma Alta ha atravesado importantes transformaciones en lo que respecta a la cobertura y uso de suelo, que se debe ante todo a la presión ocasionada por las actividades agropecuarias, las cuales han originado una intensa transformación del paisaje natural ocasionando así fuertes cambios sobre la biodiversidad y sobre los servicios ecosistémicos. El análisis de las coberturas muestra que la transformación de tierras naturales a usos agropecuarios ha sido el principal motor de transformación del paisaje en la Reserva Loma Alta, lo que sirve de parámetro a la búsqueda de medidas de manejo sostenible que se puedan poner en práctica en pro de encontrar el balance de la conversión de tierras para usos agropecuarios y la conservación de los recursos naturales y de la biodiversidad de la reserva.

3.1 Uso de suelo año 2000

A continuación, en la figura 6 muestra los datos obtenidos las clases de cobertura y uso de suelo del año 2000

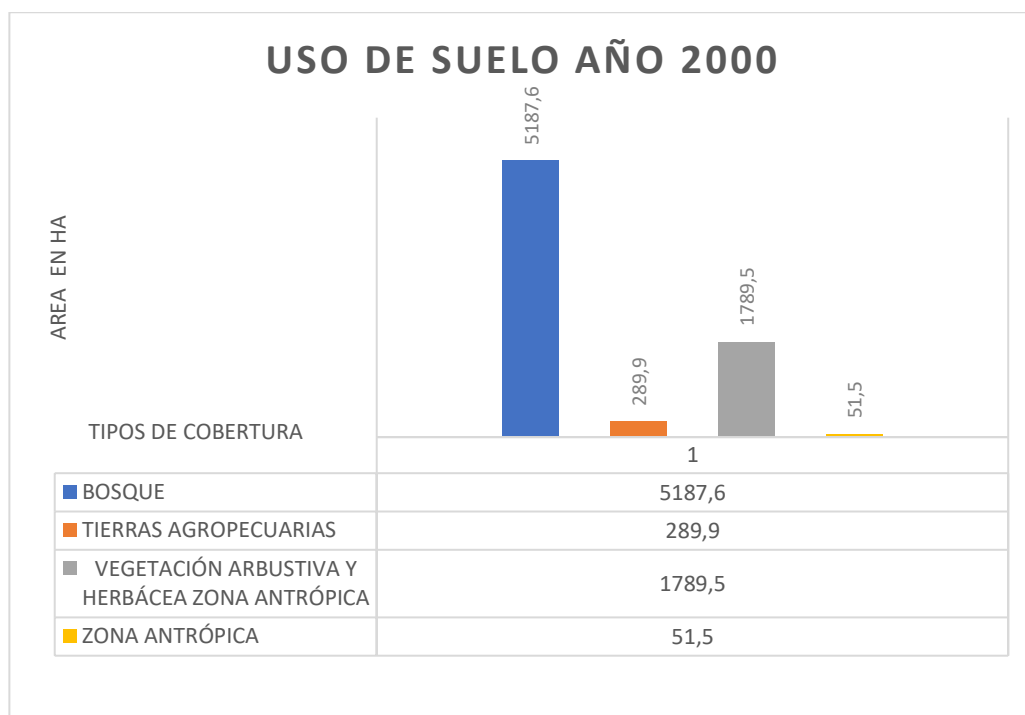


Figura 6. Cobertura y uso de suelo del año 2000 resultado obtenido mediante el procedimiento de clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud.

Los datos disponibles tras la recolección efectuada en el año 2000, muestran que la cobertura principal del territorio es el bosque, con un área de 5.187,6 hectáreas que representa en torno a un 70,9% del total del área analizada (7.318,5 ha). Este dato es el reflejo de la clara dominancia de los ecosistemas naturales forestales del paisaje en ese año. En cambio, la vegetación arbustiva y herbácea ocupa 1.789,5 hectáreas, correspondiente a un 24,5% del total, lo que pone de manifiesto que hay una cantidad considerable de áreas que probablemente están en sucesión secundaria o que se manifiestan como ecosistemas abiertos y seminaturales. Esta cobertura puede asociarse a procesos naturales o a disturbios antropogénicos pasados ejemplo, áreas agrarias abandonadas, incendios. Por otro lado, las tierras agropecuarias se corresponden a un área de 289,9 hectáreas, un 4% del área total. Esta categoría se corresponde con zonas transformadas para actividades productivas agrícolas y ganaderas; la baja proporción de esta categoría sugiere que la actividad agropecuaria es escasa o está localizada. Por último, la zona antrópica, que se corresponde con los asentamientos humanos y los elementos infraestructurales, es la más poco representada (51,5 hectáreas, menos del 1% del territorio) que prueba que existe una baja densidad de urbanización o infraestructuras en la zona de estudio.

MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO DEL AÑO 2000

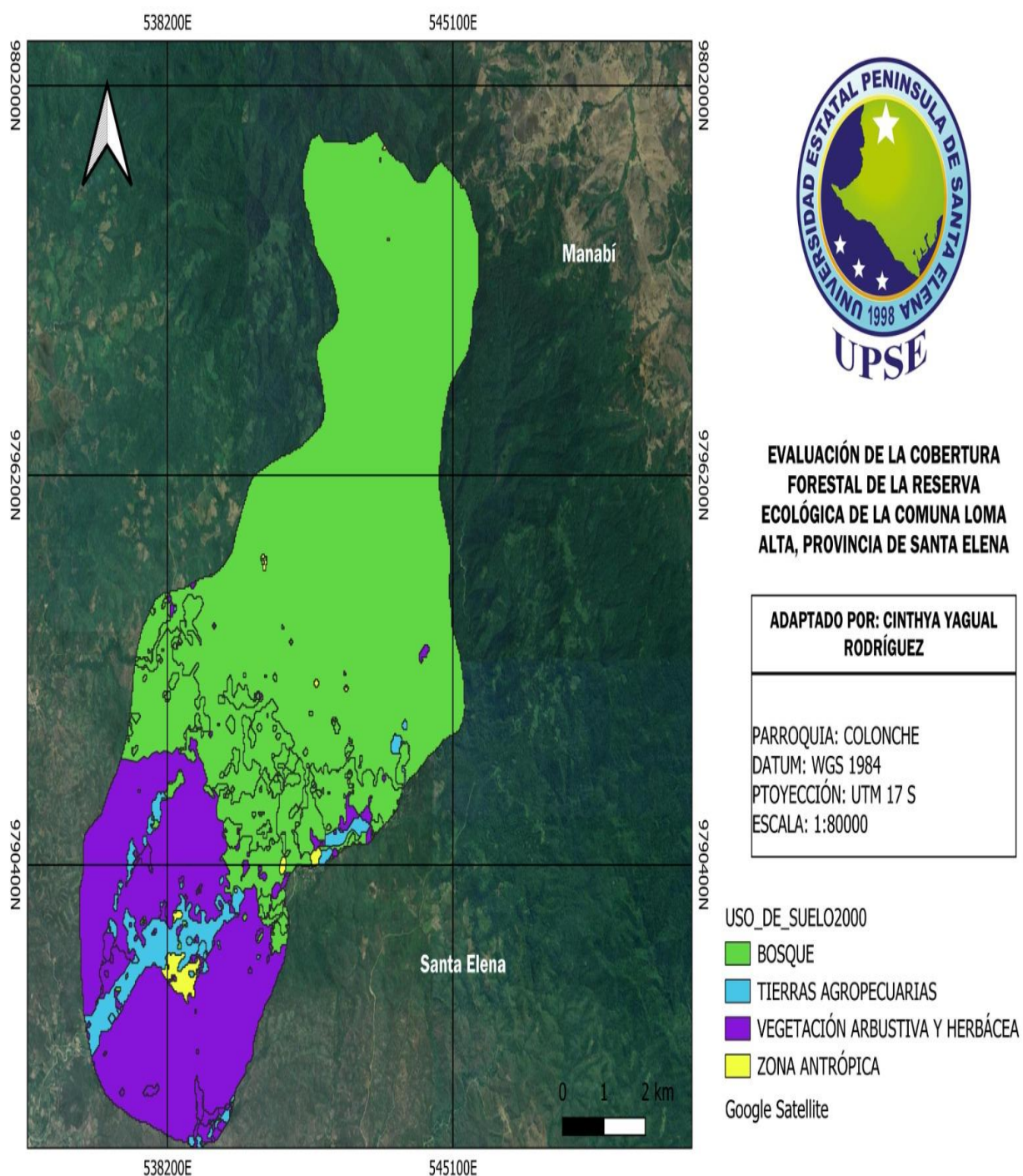


Figura 7. Representación de Cobertura de la Reserva Ecológica de Loma Alta año 2000.

3.2 Uso de suelo año 2010

En la figura 8 muestra las superficies correspondientes al uso de suelo y coberturas del año 2010.

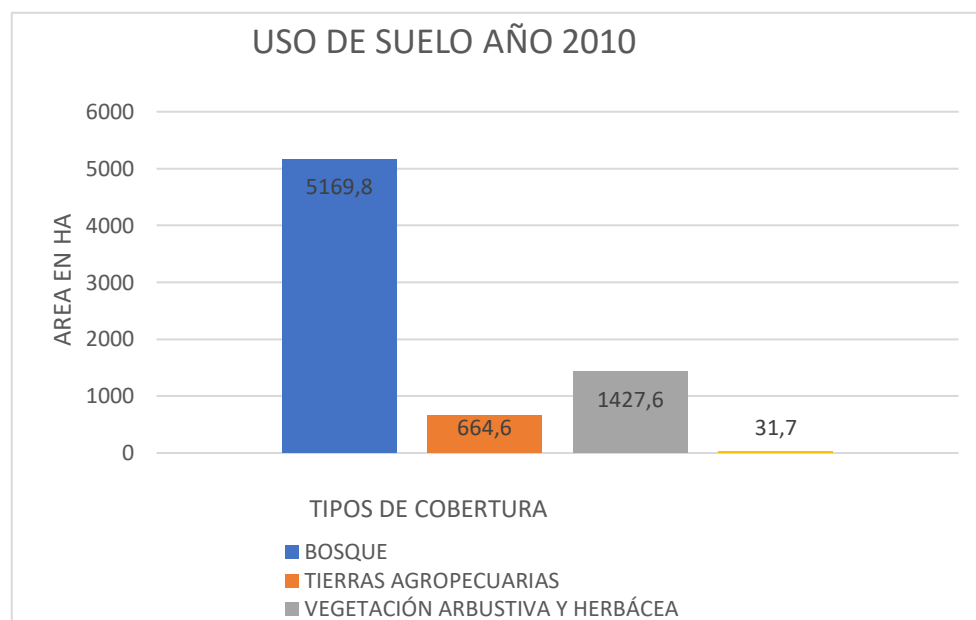


Figura 8. Cobertura y uso de suelo del año 2010 resultados obtenidos mediante el procedimiento de clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima verosimilitud.

El análisis de uso del suelo de los datos históricos correspondientes al año 2010 evidencia que la cobertura de bosque continúa siendo el dominante, con un área de 5.169,8 hectáreas, o lo que es lo mismo, representa aproximadamente el 70,6% del total del área analizada. Y si bien el correspondiente bosque sigue siendo el dominante, se observa una ligera disminución en relación al correspondiente año 2000, lo que se podría atribuir a que al momento de la clasificación se eliminó polígonos demasiado pequeños (ya que eran muy escasos en relación al total analizado) y que sin embargo está bien documentada para no encontrarse ningún tipo de pérdida de cobertura forestal dentro de la década que se relaciona (-17,8 ha), probablemente como consecuencia de actividades agropecuarias o de procesos de degradación. De la misma manera, la cobertura de vegetación herbácea y arbustiva ocupa

1.427,6 hectáreas, en términos del correspondiente 19,5% del territorio. Esta cobertura también describe una disminución respecto al año 2000, 1.789,5 ha, algo que podría dar cuenta de procesos de conversión hacia otros usos del suelo, tales como tierras agropecuarias, o bien el proceso de conversión hacia bosque maduro mediante un proceso de sucesión ecológica. Como lo destaca (Astudillo E. K., 2010), los propietarios, tanto comunales como particulares, han aprovechado los terrenos forestales para extender sus actividades agropecuarias o explotan diferentes productos para el autoconsumo y/o venta; los más destacados son: madera en trozas o en tablas; leña y carbón; tagua (*Phytelephas macrocarpa*), para marfil vegetal; paja toquilla (*Cardulovica palmata*), para fibras y sombreros; caña guadua (*Bambusa sp.*), para paredes de casa, postes y muebles; lana de ceibo (*Ceiba pentandra*), para la fabricación de almohadas y colchones; forraje; miel de abeja; venado y; frutos de barbasco (*Jacquinia pubescens*), para la fabricación de insecticidas y control biológico en camarónicas. Y por esta razón las actividades agropecuarias, en el año 2010 aumento a 664,6 hectáreas, 289,9 ha, comparándolo no sólo con el correspondiente año 2000 sino también por la incorporación de actividades agrícolas y ganaderas de la década en cuestión a costa de coberturas naturales. Finalmente, la correspondiente zona antrópica mantuvo una ligera disminución de la correspondiente área del mismo borde con el tiempo, de 51,5 ha en el año 2000 a 31,7 ha en el 2010, o lo que es lo mismo, casi un 40% de la correspondiente área disminuida.

MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO AÑO 2010

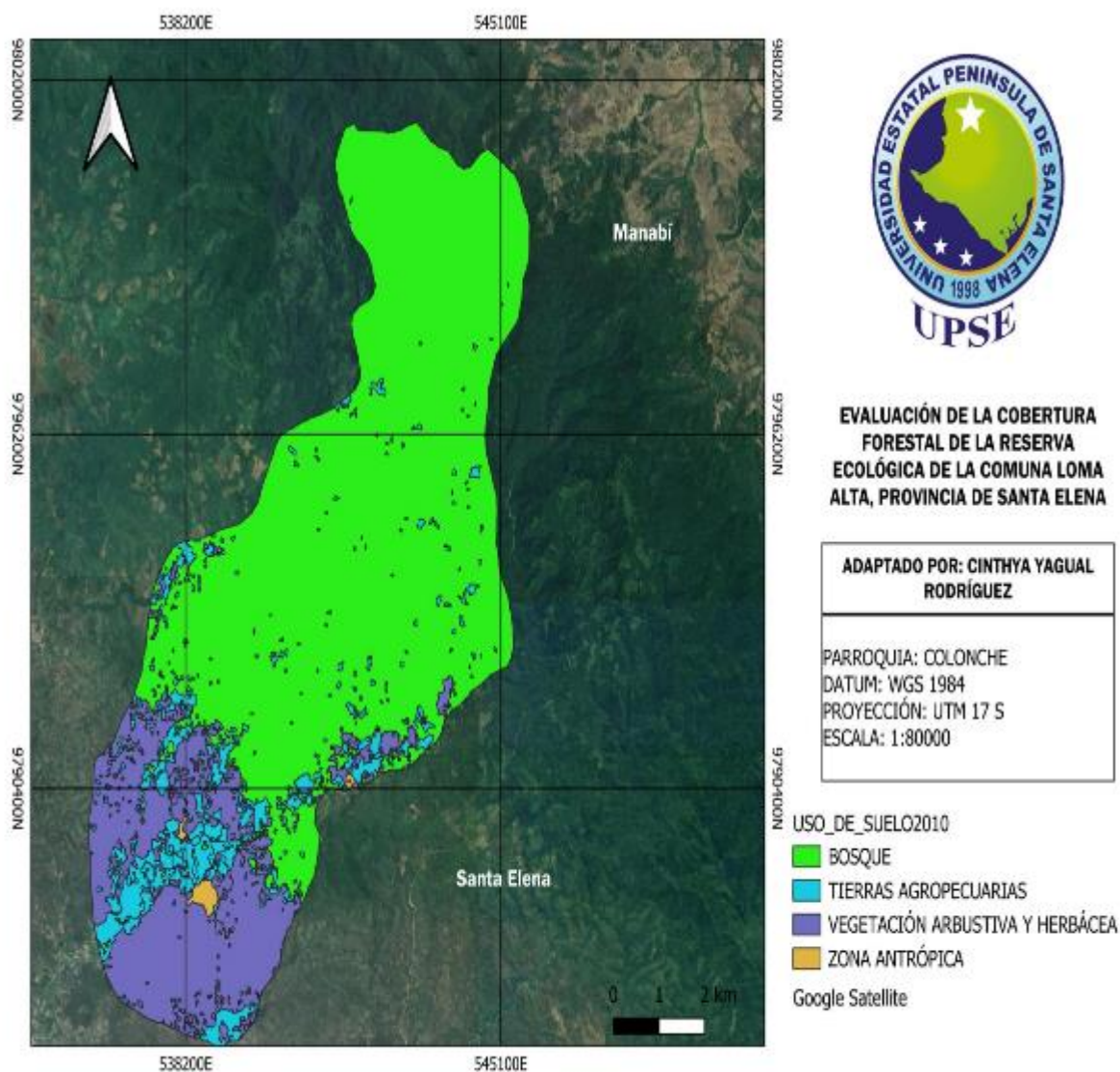


Figura 9. Representación de Cobertura y uso de suelo de la Reserva Ecológica de Loma Alta año 2010.

3.3 Uso de suelo año 2024

En la figura 10 muestra las superficies correspondientes al uso de suelo y cobertura del año 2024.



Figura 10. Cobertura y Uso de suelo del año 2024 presentación de datos obtenidos mediante la clasificación supervisada por el método de Máxima Verosimilitud.

Para 2024, el territorio cubierto por bosque alcanza los 3.691,2 ha, lo que evidencia una pérdida considerable (28,9%). Una disminución que es muestra de vivir procesos de deforestación o de cambio de uso del suelo hacia coberturas más intervenidas como tierras agropecuarias y vegetación secundaria y con respecto a tierras agropecuarias muestra un crecimiento sostenido pues ahora su superficie ocupa 1138,3 ha, dejando ver una fuerte presión sobre el territorio relacionada a expansión agropecuaria y/o ganadera. En 2024 la vegetación cubre 2.426,6 ha, lo que significa un incremento con respecto a 2010 (1.427,6 ha) y también al año 2000 (1.789,5 ha). Este comportamiento puede explicarse por procesos de sucesión ecológica en las zonas abandonadas, así como a la degradación del bosque o la fragmentación de hábitats cumpliendo una función de estado transitorio del paisaje como lo indica que las amenazas por la cual hay bajo nivel de biodiversidad es el crecimiento de problemas ambientales como el cambio climático, pérdida de cobertura vegetal natural, degradación de la cuenca hidrográfica, fragmentación de hábitat y contaminación de los recursos naturales (Astudillo E. , febrero 2020). La zona antrópica, correspondiente a áreas

urbanizadas o con infraestructura, ha aumentado ligeramente en superficie a lo largo de los 24 años. Ay 2000 eran 51,5 ha pasó a 31,7 ha en 2010, y finalmente a 59,5 ha en 2024. Si bien la superficie continúa siendo baja, esta reciente expansión podría reflejar un inicio de expansión urbana o de infraestructura que debe monitorearse debido al posible impacto sobre la conectividad ecológica.

MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO AÑO 2024

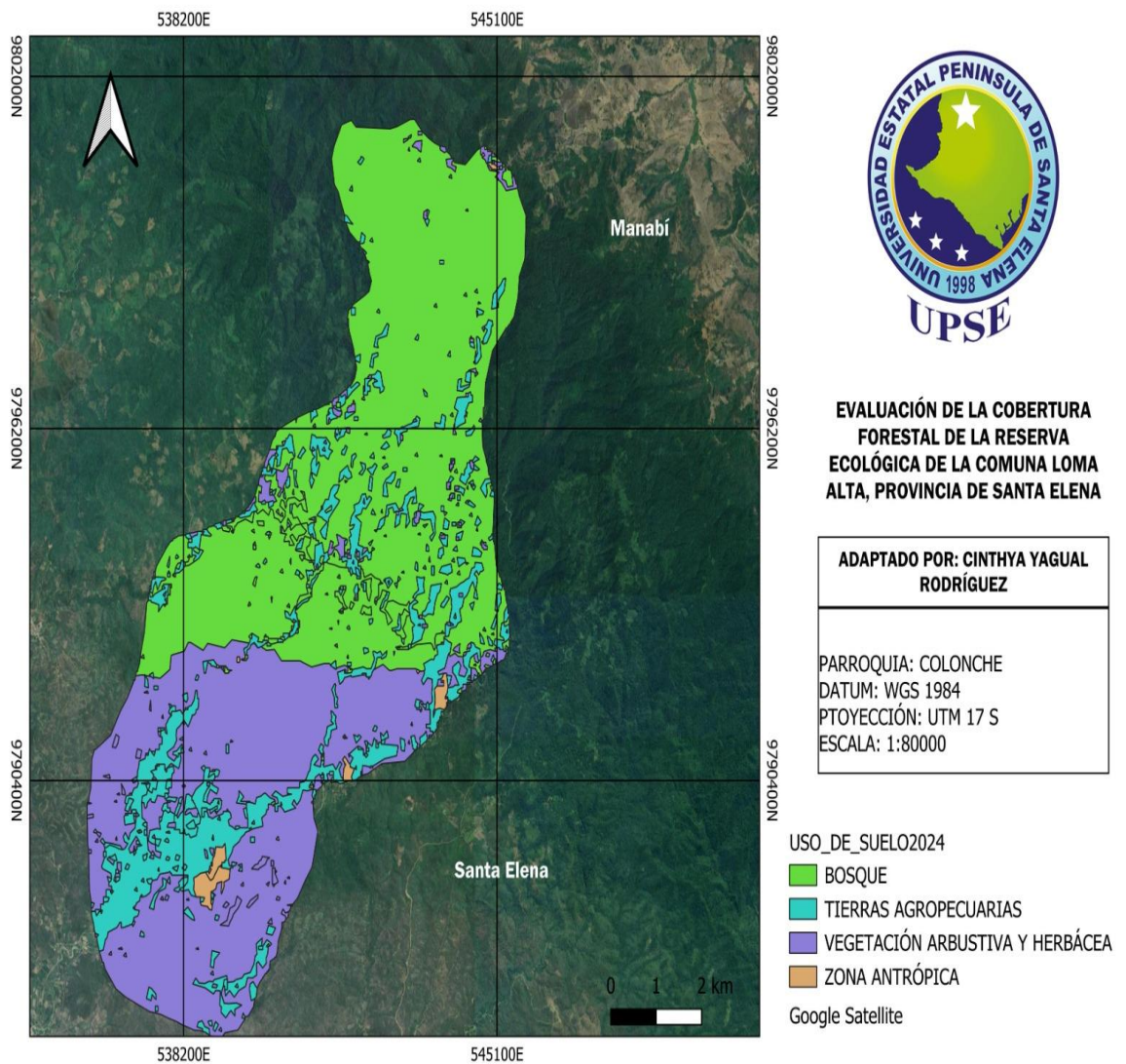


Figura 11. Representación de Cobertura y uso de suelo de la Reserva Ecológica de Loma Alta año 2024.

3.4 Matriz de Confusión año 2024

Para evaluar la precisión del mapa de cobertura, se elaboró una matriz de confusión como parte fundamental del análisis de exactitud. Este proceso se desarrolló tras la clasificación supervisada de imágenes satelitales, utilizando software SIG especializado QGIS y aplicando un algoritmo de clasificación de Máxima Verosimilitud. Este procedimiento permitió cuantificar el grado de coincidencia entre las clases asignadas por el modelo y las reales, obteniendo indicadores como la exactitud global, el índice kappa y las exactitudes del productor y del usuario. Estos valores fueron claves para evaluar la fiabilidad de la clasificación y determinar los posibles errores de omisión o comisión en cada clase de cobertura.

La eficiencia del proceso de clasificación alcanzó valores de un 57.78%, lo que implica que se presentó un porcentaje muy escaso de áreas clasificadas con acierto. El Bosque presenta un error de omisión elevado (75%) y ello se interpreta como un alto porcentaje de áreas reales de bosque que no se detectaron como tales en este tipo de clasificación. El Bosque presenta además un error de comisión elevado (50%) que indica que la mitad de las áreas de bosque clasificadas como tales no eran de esta categoría. La Tierra agropecuaria también tiene errores de consideración, pues registra un 50% de error de omisión y un 50% de error de comisión. La Vegetación arbustiva y herbácea es la categoría mejor clasificada, con un error de omisión relativamente pequeño (11.76%) y un error de comisión también asumible (34.78).

El coeficiente Kappa de 0.35 indica un acuerdo justo.


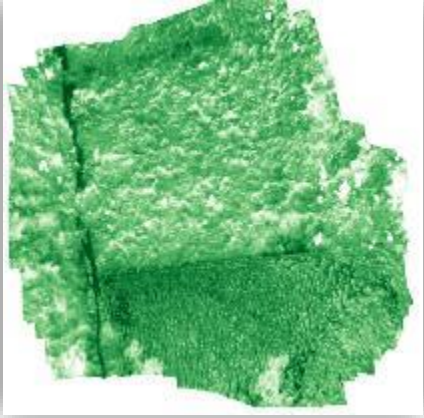

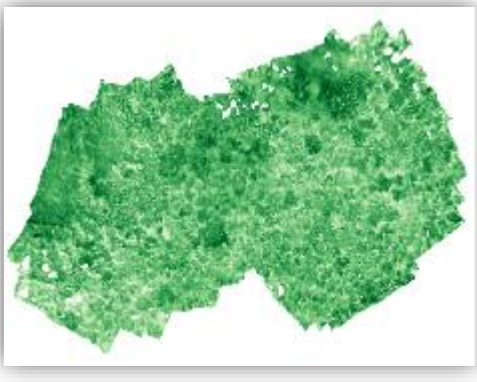
Tabla 9 Matriz de confusión (No. de pixeles)

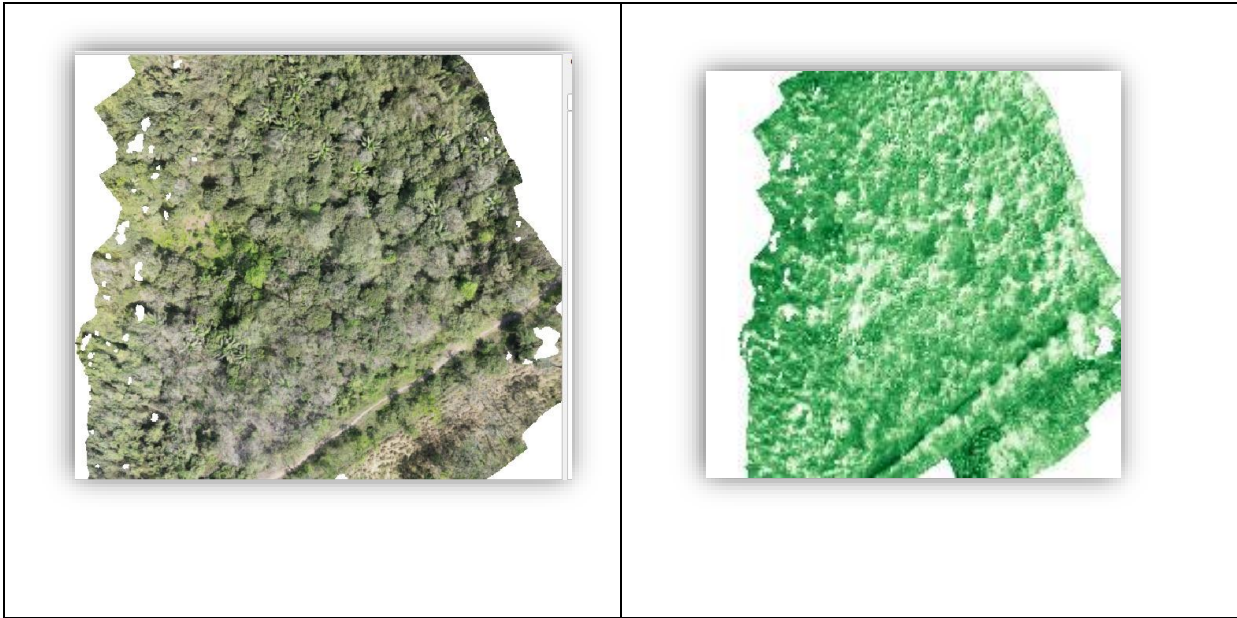
| | Bosque | Tierras agropecuarias | V. arbustiva y herbácea | Total | Comisión | Error de comisión |
|-------------------------|--------|-----------------------|-------------------------|-------|----------|-------------------|
| Bosque | 3 px | 6 px | 3 px | 12 px | 9 px | 75% |
| Tierra agropecuaria | 3 px | 8 px | 5 px | 16 px | 8 px | 50% |
| V. arbustiva y herbácea | 0 px | 2 px | 15 px | 17 px | 2 px | 11,76% |
| Total | 6 px | 16 px | 23 px | 45 px | | |
| Omisión | 3 px | 8 px | 8 px | | | |
| Error de Omisión | 50,00% | 50,00% | 34,78% | | | |
| Exactitud general | 57,78% | | | | | |
| | 1170 | | | | | |
| | 719 | | | | | |
| Kappa | 0,35 | | | | | |
| | | | | | | |

3.5 Ortofotos de la Reserva Ecológica de Loma Alta y sus respectivos Nivel de índice de Vegetación

Se capturaron tres ortofotos mediante el uso de un dron, las cuales se utilizaron como referencia para la clasificación de coberturas del terreno. Además, sobre estas ortofotos se calcularon los índices de vegetación, permitiendo así identificar y evaluar el nivel de cobertura vegetal presente en el área de estudio.

Tabla 10 Ilustra las ortofotos obtenidas con el drone y a su vez muestra el índice de vegetación.

| <p>Ortofotos 2024</p> | <p><i>NIVEL DE INDICE DE VEGETACION NDVI</i></p> |
|---|--|
|  |  |
|  |  |



3.6 Cobertura y uso de suelo del año 2000-2024

El análisis comparativo 2000-2024 ilustra un claro paradigma ecológico, que contrasta la homogeneidad de los bosques con la agricultura y la vegetación secundaria. El cambio de los bosques a cultivos está surgiendo como el principal agente transformador, mientras que el aumento de arbustos indica un paisaje más fragmentado y con menor capacidad de resistencia, incrementando aún más. Con un área total de 7,318.45 ha y 7,315.60 ha las diferencias destacando los cambios producidos por la eliminación de polígonos muy pequeños nos llevan a considerar la necesidad de estrategias que el mantenimiento de la producción en el tiempo con la conservación priorizando la restauración de corredores biológicos y el manejo sostenible de suelos, mitigando a largo plazo las poblaciones de la agricultura.

MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO AÑO 2000-2024

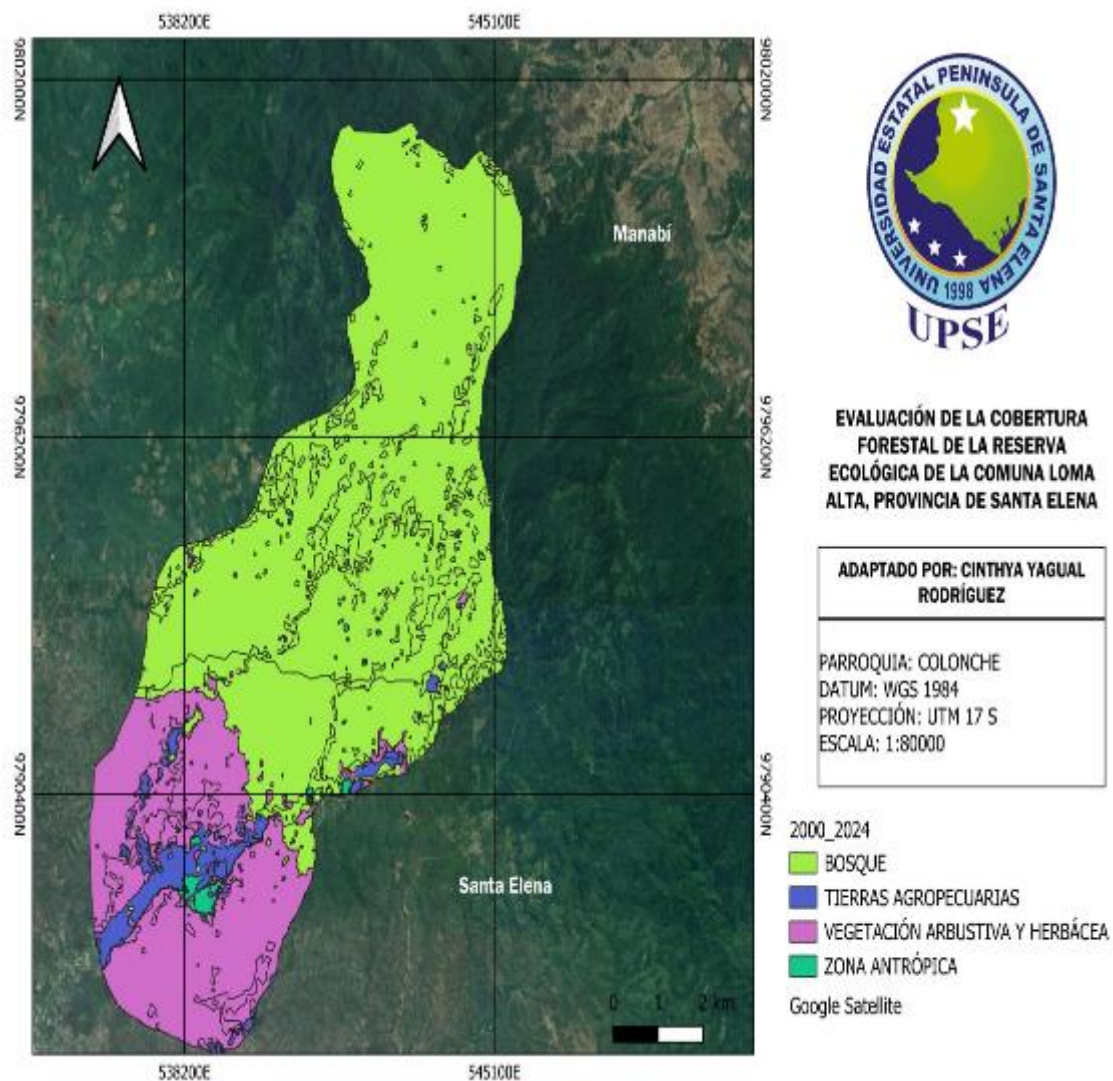


Figura 12. Representación de la Intersección de cobertura y uso de suelo del año 2000 al 2024.

3.7 Matriz de transición de Cobertura y uso de suelo del año 2000.

Tabla 11 Matriz de transición del uso de suelo del año 2000-2024

| | | Matriz de Transición | | | | | TOTAL, HA | PERDIDA HA |
|------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------|-----------|------------|
| | | COBERTURAS 2024 | | | | | | |
| Cobertura/código | | BOSQUE HA | TIERRAS AGROPECUARIAS HA | VEGETACION HAERBACEA Y ARBUSTIVA HA | ZONA ANTROPICAS HA | | | |
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | | | |
| COBERTURAS 2000 | BOSQUE | 1 | 3675,8 | 556,6 | 927,8 | 13,9 | 5174,10 | 1498,30 |
| | TIERRAS AGROPECUARIAS | 2 | 1 | 238,4 | 37,7 | 12,4 | 289,50 | 288,50 |
| | VEGETACION HERBÁCEA Y ARBUSTIVA | 3 | 5,4 | 319,2 | 1450,4 | 10,6 | 1785,60 | 1780,20 |
| | ZONA ANTRÓPICA | 4 | 3,3 | 22,4 | 3,5 | 22,3 | 51,50 | 48,20 |
| | Total | | 3685,50 | 1136,60 | 2419,40 | 59,20 | 7300,7 | 3615,20 |
| | Ganancia | | 1488,60 | 847,10 | 633,80 | 7,70 | 2977,20 | 6592,40 |

| | |
|----------------------------------|---|
| TOTAL DE PERDIDA Y GANANCIA 2000 | ■ |
| CAMBIOS DE COBERTURA | ■ |
| CODIGOS DE INTERSECCION | ■ |
| AREAS QUE MANTIENEN SU COBERTURA | ■ |
| TOTAL DE AREA Y GANANCIA 2024 | ■ |

Como resultado, se tiene que, para el año 2000, el bosque ocupaba aproximadamente 5174,1 ha. Al año 2024, sólo quedan en el estado de bosque 3675,8 ha, lo que representa aproximadamente una pérdida neta de 1498,3 ha. Y por este motivo se tiene que gran parte de esta pérdida corresponde a la transformación del bosque hacia uso agropecuario (556,6 ha), vegetación herbácea y arbustiva (927,8 ha) y zonas antrópicas (13,9 ha). Las tierras de uso agropecuario pasan de 289,5 ha en el 2000 hasta 1136,6 ha para el 2024, lo que representaría una ganancia neta de 847,10 ha. Esta expansión en el uso agropecuario se produce fundamentalmente a costa del bosque (556,6 ha) y en menor medida de vegetación herbácea/arbustiva (319,2 ha), lo que podría estar relacionado con el aumento de la actividad agropecuaria en la región. La cobertura de pecuarias de vegetación herbácea y arbustiva muestra una ganancia neta de 7,70 ha, esto es, pasando de 1785,6 ha presentes en el 2000 a 1450,4 ha de vegetación herbácea y arbustiva en 2024, lo que viene a reforzar lo expuesto previamente, es decir, que la ganancia de vegetación herbácea y arbustiva también refleja la

pérdida de presencia boscosa, lo que podría indicar un proceso de degradación del bosque o una fragmentación del mismo. Las zonas antrópicas aumentan muy ligeramente, pasando de 51,5 ha en el año 2000 a 59,2 ha en 2024, lo que equivaldría a una ganancia neta de 7,7 ha.

3.8 Tasa de cambios del período 2000-2024

Tabla 12 Matriz tasa de cambio del período 2000-2024

| Tipos Coberturas | período de años | | | | variación | Tasa de cambio |
|--|-----------------|--------|---------|--------|-----------|----------------|
| | 2000 | % | 2024 | % | | |
| BOSQUE | 5187,6 | 70,88% | 3691,2 | 50,61% | 1496,36 | -1,20% |
| TIERRAS AGROPECUARIAS | 289,9 | 3,96% | 1138,3 | 15,61% | -848,43 | 12,20% |
| VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y HERBÁCEA | 1789,5 | 24,45% | 2426,6 | 33,27% | -637,11 | 1,48% |
| ZONAS ANTRÓPICA | 51,5 | 0,70% | 59,5 | 0,82% | -7,97 | 0,64% |
| Total | 7318,45 | 100% | 7315,60 | 100% | | |

En un primer momento, se recogieron los valores de área para cada categoría de cobertura, mediante las clasificaciones supervisadas de las imágenes Landsat. Por ejemplo, para el bosque, se utilizó como AI el valor de hectáreas 5187,6 que se presentaba determinado en el año 2000 y, como AF, las 3691,2 hectáreas que correspondían a las remanentes en el año 2024. Al sustituir estos valores en la ecuación planteada, se obtuvo un valor positivo en la tasa de pérdida forestal, con el cual se determinó que $T = 1496.36$, lo que indica que, en promedio, dicha categoría se redujo a un ritmo de -1.20% anual. Este procedimiento se aplicó también al resto de las clases de cobertura de la superficie, como son tierras agropecuarias y vegetación arbustiva, lo que nos condujo a identificar patrones de transición entre los usos del suelo. Mediante una investigación dada por el Ministerio de Ambiente destaca que Los bosques de la Costa han sido drásticamente afectados por las actividades humanas. En la actualidad persisten pequeños remanentes aislados, pero altamente vulnerables. La explotación maderera, la extracción de leña, la penetración de colonos y el sobre pastoreo han afectado drásticamente a los bosques secos, la provincia de Santa Elena es la que menor cantidad de madera extrae con 47.00 m³ que representa el 0.05% este resultado se dio a conocer en el 2012 (Galarza, 2013).

Al final, se procedió a interpretar los resultados, lógicamente en el contexto de los procesos estructurales y socioambientales en los cuales se encuentran insertos los ecosistemas (políticas de conservación ambiental o prácticas económicas, entre otros), por lo que se elaboró una perspectiva amplia y general de los factores que gatillan el cambio, y también del efecto que genera el cambio sobre la sostenibilidad a largo plazo del ecosistema.

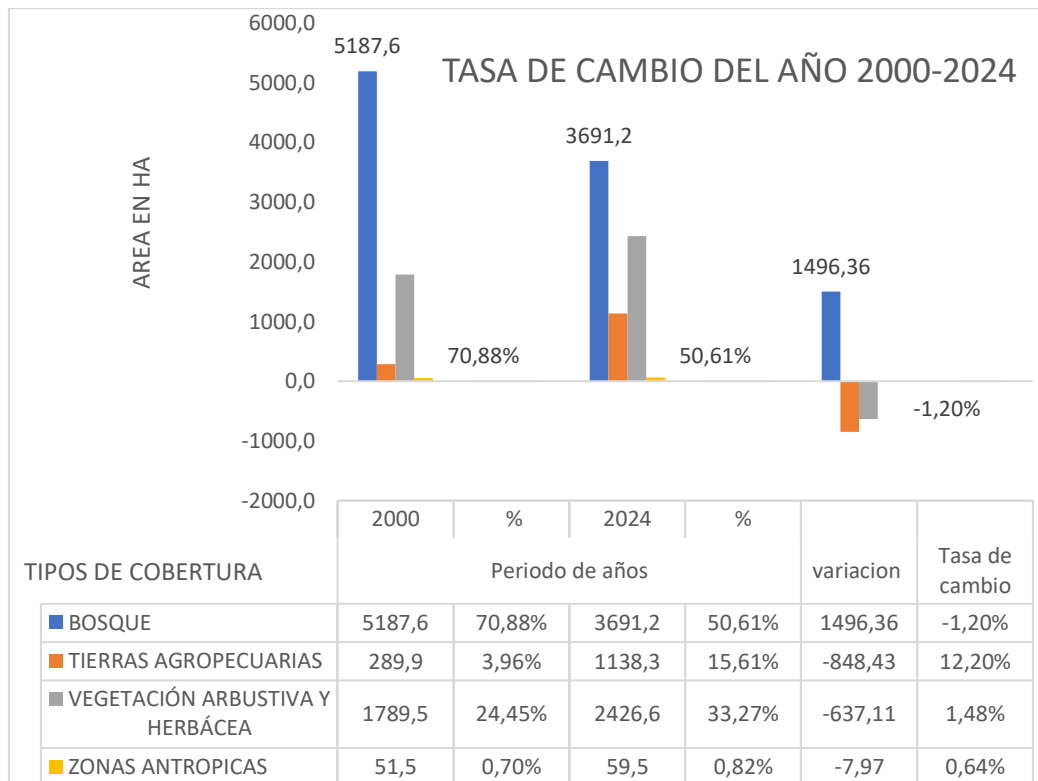


Figura 13. Muestra los resultados de la tasa de cambio que se produjo durante el 2000-2024.

Las variaciones en los totales de la tasa de cambio entre los distintos años se explican dando el criterio metodológico que consistente en la eliminación de áreas pequeñas en cada uno de los mapas analizados.

3.9 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es un indicador que permite estimar la densidad y vigor de la vegetación mediante el análisis de imágenes satelitales. Se calcula a partir de la reflectancia en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (RED), y sus valores oscilan entre -1 y +1.

- Valores cercanos a +1 (0.6 a 1) indican vegetación densa, sana y activa, como bosques maduros.
- Valores entre 0.3 y 0.6 reflejan vegetación moderada o en proceso de recuperación, como vegetación secundaria o cultivos.
- Valores entre 0.1 y 0.3 corresponden a zonas con escasa cobertura vegetal, como pastizales degradados o áreas en transición.
- Valores cercanos a 0 o negativos (0 a -1) indican superficies sin vegetación, como cuerpos de agua, suelo desnudo o zonas urbanizadas.

En este estudio, el NDVI permitió detectar áreas con alta degradación ecológica al identificar zonas donde el índice disminuyó significativamente entre los años analizados, especialmente en sectores con pérdida de bosque y aumento de actividades agropecuarias.

3.9.1 Índice de vegetación del año 2000

El 2000, alcanzó un máximo de 0.6614, que demuestra haber tenido campos de densa vegetación cobertura. De manera concurrente, el 2000 presenta un mínimo promedio de 0.0724 que muestra el predominio de áreas de muy baja cobertura vegetal, usualmente asociadas a suelos degradados o desnudos. Se obtuvo dentro del misma área de estudio un promedio de 0.3831; que sugiere la cobertura vegetal es intermedia. Esto indica que hay en el área de estudio, vegetación dispersa o en etapas iniciales de desarrollo, lo que se apoya con el valor de la desviación estándar 0.1374 que evidencia la variabilidad en la distribución espacial.

MAPA DE INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA AÑO 2000

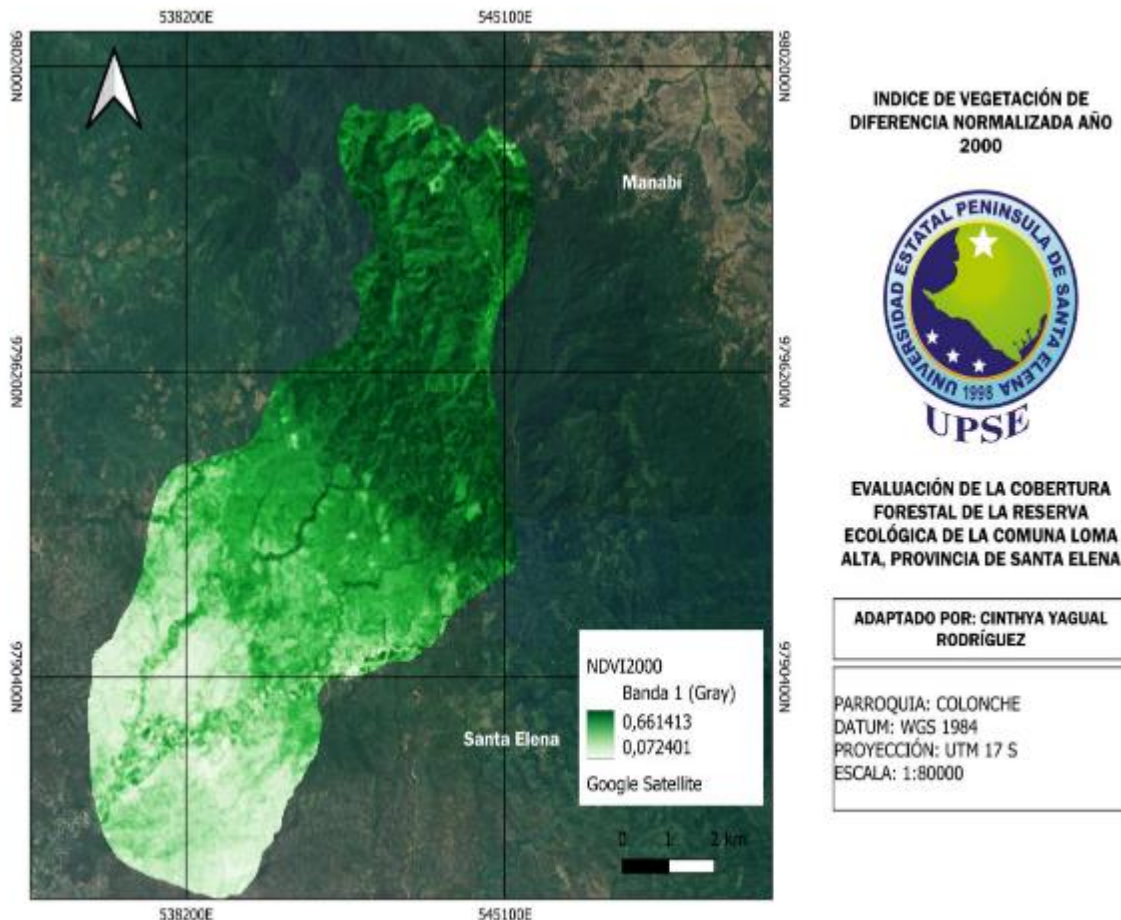


Figura 14. Representación del nivel de índice de vegetación año 2000 de la Reserva Ecológica de Loma Alta.

3.9.2 Índice de vegetación año 2010

Para 2010, el NDVI máximo aumentó a 0.9048, indicando una mejora en la salud de áreas de vegetación específicas, mientras que el mínimo subió a 0.1646, lo que sugiere un aumento en las zonas que están desprovistas de vegetación. El valor medio para 2010 aumentó a 0.7273, indicando que también hubo un aumento en la cobertura vegetal general; sin embargo, la desviación estándar de 0.1258 mostró que aún existía una variabilidad moderada.

MAPA DE INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA AÑO 2010

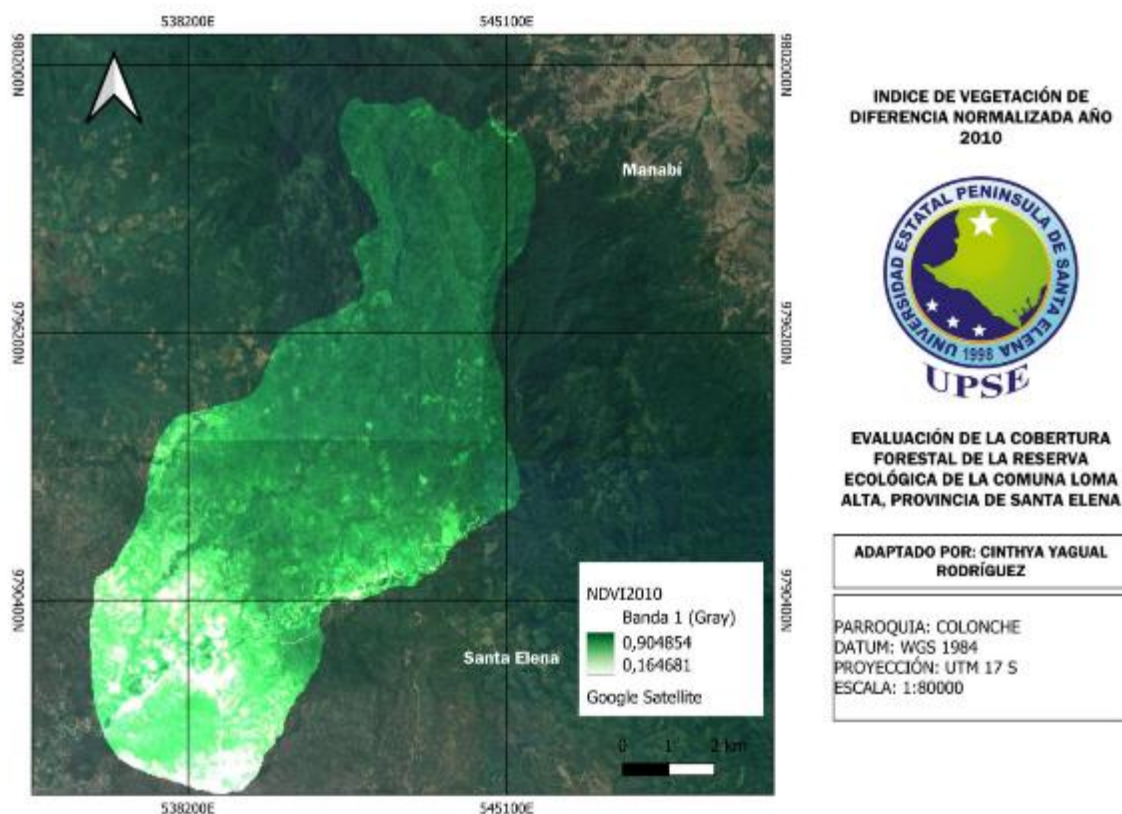


Figura 15. Representación del nivel de índice de vegetación año 2010 de la Reserva Ecológica de Loma Alta.

3.9.3 Índice de vegetación año 2024

Finalmente, en 2024 se observó un notable descenso, con un NDVI máximo de 0.4676, indicando que la vegetación más densa también se redujo. El mínimo de 0.0543 puso al descubierto el incremento de zonas con suelo desnudo o escasa vegetación. La media cayó a 0.2746, lo que sugiere que la tendencia era desplazarse hacia una mayor homogeneidad y menor cobertura vegetal, sustentada por una desviación estándar de 0.0745. Asimismo, Camacho et al. (2018) reportaron pérdida progresiva de cobertura vegetal en la Reserva Chimborazo mediante análisis multitemporal de NDVI, asociada al avance agropecuario. Este estudio refuerza el uso del NDVI como herramienta válida para detectar degradación ecológica y pérdida de cobertura forestal. El estudio de Aldás Andrade (2019) en Cotacachi Cayapas, evidenciaron una reducción significativa del NDVI en zonas de bosque montano por presión humana y cambio climático, lo cual se relaciona con lo observado en la Reserva de Loma Alta. En el presente estudio, se confirma esa

tendencia en Loma Alta, donde las zonas con NDVI > 0.6 (bosque denso) han disminuido, mientras aumentan áreas de NDVI < 0.3, asociadas a tierras agropecuarias y vegetación secundaria.

MAPA DE INDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA AÑO 2024

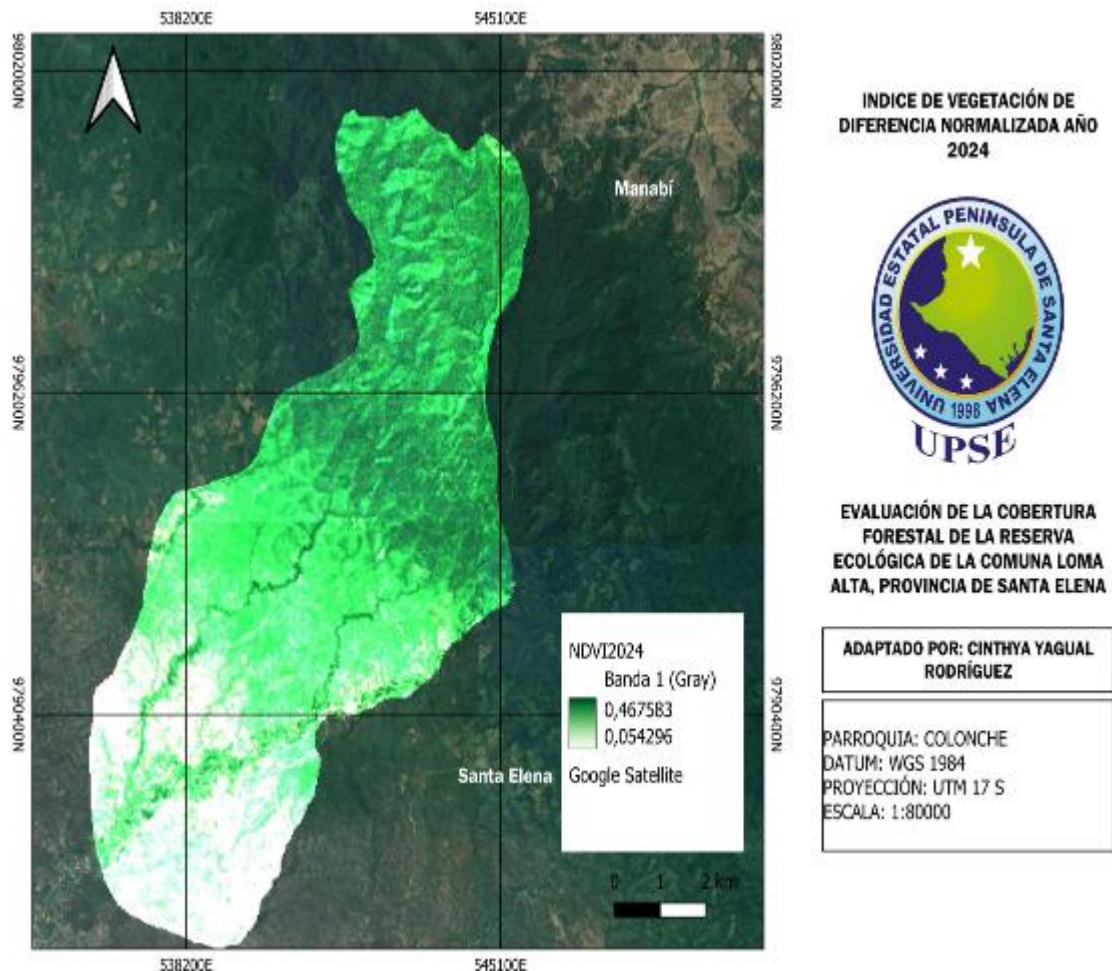


Figura 15 Representación del nivel del índice de vegetación del año 2024 para la Reserva Ecológica Loma Alta.

Estos resultados facilitaron el reconocimiento de cambios temporales en la dinámica del sistema vegetal en relación con la expansión antrópica, cambios climáticos, o actividades de manejo, brindando una base cuantitativa para evaluar la degradación y conservación dentro de la reserva.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La actualización cartográfica permitió identificar con precisión los cambios en el uso y cobertura del suelo entre los años 2000, 2010 y 2024, evidenciando una notable reducción de áreas boscosas y un aumento progresivo de zonas agropecuarias
- Se evidenció una pérdida progresiva de cobertura forestal entre 2000 y 2024, atribuida principalmente a la expansión de tierras agropecuarias en las zonas más accesibles de la Reserva Ecológica Comuna Loma Alta.
- El análisis del NDVI mostró que la zona más alta de la reserva, que originalmente era bosque, presenta actualmente bajos valores de índice de vegetación. Esto evidencia una pérdida importante de cobertura forestal, causada por la expansión de tierras agropecuarias. Estos cambios confirman que las actividades humanas han alcanzado áreas antes conservadas, lo que exige una intervención inmediata para reestablecer la áreas intervenidas.

Recomendaciones

- Se recomienda que se implementen con programa de reforestación en coordinación con el ministerio del ambiente reforestando áreas degradadas en el área de protección de la comuna.
- Organizar compañías de concienciación y reforestación con estudiantes de las unidades educativas de la localidad incentivando la protección de los bosques en la comunidad.
- Implementar cercas vivas o barreras físicas para evitar el ingreso de ganado y personas, además de promover la participación comunitaria en el cuidado de los sitios reforestados

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M., Solano, J., García, A., López, D., Carrión, P., Segarra, C., & Yamunaqué, L. (2018). Evaluación del impacto ambiental en la Arquitectura Patrimonial a través de la aplicación de la Matriz de Leopold como un posible sistema de monitoreo interdisciplinar. *ASRI: Arte y Sociedad. Revista de investigación*, (14), 17-34. Obtenido de <https://oa.upm.es/id/eprint/57027>
- Alcivar, J., & Gil, H. (2021). Estimación de zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo mediante análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista Bases de la Ciencia. e-ISSN 2588-0764*. doi:10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v6i1.2648
- Antón, D. (2019). Modelado de información y alteraciones geométricas para respaldar el análisis preciso de activos patrimoniales. Obtenido de <https://portalinvestigacion.udc.gal/documentos/6380170ef5d3952b93567f21>
- Arboit, M., & Maglione, D. (2018). Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas seco. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/87643>
- Arellano, P., Castillo, E., & Ojeda, C. (2018). PRESIÓN HÍDRICA EN AMBIENTES LACUSTRES DE ALTA MONTAÑA: ENTRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL DESARROLLO ENERGÉTICO. LAGUNA DEL LAJA, CHILE. doi:10.4067/S0719-26812018000100143
- Arzamendia, A., Silva, J., Ovelar, R., Calabrese, M., Rodas, J., & Delgado, M. (2018). Estimación de la temperatura superficial del área metropolitana de la ciudad de Asunción, Paraguay. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7192775>
- Astudillo, E. (febrero 2020). *Gestión de los bosques tropicales estacionalmente secos de la provincia de Santa Elena, Ecuador: una perspectiva desde la conservación*. Universidad de Especialidades Espíritu Santo.
- Astudillo, E. K. (2010). *EL DESARROLLO SOSTENIBLE COMUNITARIO EN UN ENP DE ALTO INTERÉS*.
- Astudillo-Sánchez, E., Pérez, J., Troccoli, L., & Aponte, H. (2019). Composición, estructura y diversidad vegetal de la Reserva Ecológica Comunal Loma Alta, Santa Elena, Ecuador. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90. doi:10.22201/ib.20078706e.2019.90.2871
- Aubert, K., Huber, C., Furst, J., Raicu, D., & Tchoua, R. (2023). Iterative K-means clustering for disease subtype discovery. doi:10.1117/12.2653973
- Boccardo, P., Borgogno, E., Giulio, F., & Lingua, A. (2017). Orthorectification of high resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 38(1), 1-15. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228972702_Orthorectification_of_high_resolution_satellite_images
- Brancalion, P., García, L., Loyola, R., Rodrigues, R., Pillar, V., & Lewinsohn, T. (2016). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): Updates and ongoing initiatives. *Natureza & Conservação*, 14(1), 1-15. doi:10.1016/j.ncon.2016.03.003
- Burgos Jiménez, C. J. (2018). Un análisis ambiental desde la perspectiva educativa en Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(2), 168-177. Obtenido de <https://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado/article/view/669>
- Buzai, G., Lanzelotti, S., Viola, L., & Principi, N. (2018). Cartografía analógica y digital para la delimitación regional y el análisis temático: aplicación a la cuenca del río Luján (Argentina). *Norte Grande Geography Journal*, 99-119. doi:10.4067/S0718-34022018000100099
- Cabrera, A., & Sandoval, C. (2022). Acción pública de inconstitucionalidad de la declaratoria de bosque protector y vegetación "Triangulo de Cuembi" en Ecuador. *Actualidad Jurídica Ambiental*. doi:10.56398/ajacieda.00007

- Campozano, L., Ballari, D., Montenegro, M., & Avilés, A. (2020). Future Meteorological Droughts in Ecuador: Decreasing Trends and Associated Spatio-Temporal Features Derived From CMIP5 Models. doi:10.3389/feart.2020.00017
- Camacho, J. et al. (2018). Análisis multitemporal de los cambios de la vegetación en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Revista de Ciencias Ambientales (Redalyc)*, 52(1), 55–67. <https://www.redalyc.org/journal/5722/572262061012/html/>
- Chang, S., & Li, Z. (2019). Calibration algorithm for cooled mid-infrared systems considering the influences of ambient temperature and integration time.. *Applied optics*, 58 29, 8118-8125. doi:10.1364/ao.58.008118
- Chimborazo, O., & Vuille, M. (2021). Present-day climate and projected future temperature and precipitation changes in Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 143, 1581-1597. doi:10.1007/s00704-020-03483-y
- Cuevas, F., & Inaipil, W. (2020). CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO CLARO, REGIÓN DEL BIOBÍO, EN LOS AÑOS 1986, 2001 Y 2016. *Revista Geográfica del Sur*. doi:10.29393/g9-5fccu20005
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. doi:10.1016/j.rse.2011.11.026
- Duffau, M., & Guachimboza, P. (2020). Gobernanza ambiental, Buen Vivir y la evolución de la deforestación en Ecuador en las provincias de Tungurahua y Pastaza. doi:10.32719/26312484.2020.34.8
- Escalona, J., Huertero, A., Granados, H., & Chavez, O. (2018). Comparación del flujo de emisión de SO₂ derivadas de COSPEC y MODIS y su complementariedad en el monitoreo volcánico: caso de estudio en el Volcán Popocatepetl (México). doi:10.18268/BSGM2018V70N3A7
- Fandos, C., Soria, F., Scandaliaris, P., Baldrés, J., Romero, E., & Scandaliaris, J. (2020). Uso de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica para la diferenciación de edades en cañaverales. Tucumán, R. Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 96, 37-45. Obtenido de <https://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2020/03/06-uso-de-teledeteccion-y-sistemas-37-45.pdf>
- Fragoso-Campón, L., Rosado, E., & Gallego, J. (2020). Clasificación supervisada de imágenes PNOA-NIR y fusión con datos LiDAR-PNOA como apoyo en el inventario forestal. Caso de estudio: Dehesas. doi:10.31167/csefv0i45.19882
- Francisco, C., Ruiz, P., Almeida, C., Gruber, N., & Anjos, C. (2020). ANÁLISE DO IMPACTO DA CORREÇÃO ATMOSFÉRICA NO CÁLCULO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA A PARTIR DE IMAGEM LANDSAT 8/OLI. doi:10.26848/rbgf.v13.1.p076-086
- Gaida, W., Breunig, F., Galvão, L., & Ponzoni, F. (2020). Correção Atmosférica em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. doi:10.26848/rbgf.v13.1.p229-248
- Galarza, S. A. (2013). *SISTEMA NACIONAL DE CONTROL FORESTAL*. Quito-Ecuador.
- García, S., & Jesús, A. (2018). Planificación forestal y gestión territorial, mediante herramientas open source e imágenes de satélites. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=150857>
- González, V., Bravo, C., Romero, M., Yucailla, S., Andino, M., Valle, A., . . . Yucailla, V. (2019). Evaluación de la calidad de los suelos en cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en la parroquia Fátima provincia de Pastaza. *Ciencia y Tecnología*, 12, 15-22. doi:10.18779/cyt.v12i2.322
- González-Guerrero, O., & Pons, X. (2020). Uso de Sentinel-2 y datos auxiliares para la generación, mediante clasificación de imágenes, del Mapa de Usos y Cubiertas del Suelo de Cataluña 2017. doi:10.4995/raet.2020.13112

- Guarderas, P., Smith, F., & Dufrene, M. (2022). Land use and land cover change in a tropical mountain landscape of northern Ecuador: Altitudinal patterns and driving forces. *PLoS ONE*, 17(7), e0260191–e0260191. doi:10.1371/journal.pone.0260191
- Hu, Z. (2019). Atmospheric artifacts correction for InSAR using empirical model and numerical weather prediction models. doi:10.5821/dissertation-2117-175266
- Hurtado, H., & Mario, J. (2019). Nuevas técnicas para el procesamiento masivo de datos de observación remota de la Tierra. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=247437>
- Jaramillo, F., Vivanco, N., & Pereira, J. (2019). La productividad del sector camaronero en la Provincia de el Oro y su impacto al medio ambiente. *Revista científica agroecosistemas*, 7(1), 39-44. Obtenido de <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/240>
- Jaskowiak, P., & Costa, I. (2023). Clustering Validation with The Area Under Precision-Recall Curves. *ArXiv, abs/2304.01450*. Obtenido de <https://arxiv.org/abs/2304.01450>
- Kleemann, J., Zamora, C., Villacis-Chiluisa, A., Cuenca, P., & Koo, H. (2022). Deforestation in Continental Ecuador with a Focus on Protected Areas. *Land*. doi:10.3390/land11020268
- Leotta, M., Torres, J., Cisneros, H., Caliri, M., Ordóñez, M., & Gorla, N. (2019). Aportes de la teledetección para la caracterización de amenazas para la conservación del sitio Ramsar Humedal Llancañelo, Malargüe, Argentina. Obtenido de <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/beg/article/view/3393>
- Llerena, S., Arias, P., Cueva, J., Almeida, G., & Salazar, C. (2020). Identifying priority management of Ecuadorian forests based on the environmental integrated assessment. *E3S Web of Conferences*. doi:10.1051/e3sconf/202016902015
- López, G., & Jesús, M. (2018). Prototipo electrónico de control y monitoreo de parámetros ambientales implementando Internet de las Cosas. *Revista Tecnológica; no. 11*. Obtenido de <http://redicces.org.sv/jspui/handle/10972/3617>
- Martínez-Moscoso, A. (2019). El nuevo marco jurídico en materia ambiental en Ecuador: estudio sobre el Código Orgánico del Ambiente. *Actualidad jurídica ambiental*, 89, 3-32. Obtenido de https://www.actualidadjuridicaambiental.com/wp-content/uploads/2019/04/2019_04_08_Martinez_Nuevo-marco-juridico-ambiental-Ecuador.pdf
- Mendoza, I., Rivera, M., & Vera, J. (2021). El uso de indicadores multidimensionales de sostenibilidad turística. Una aplicación para la gestión de espacios naturales protegidos en la provincia de manabí (Ecuador). *Revista interamericana de ambiente y turismo*. doi:10.4067/s0718-235x2021000100047
- Mollo, S., & Pizarro, D. (2018). Sistema de monitoreo remoto de acuicultura en estanques para la crianza de camarones. doi:10.4067/S0718-33052018000500055
- Morillo, G., Villasmil, G., Pineda, A., & Orozco, G. (2018). Estimación de clorofila a en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8. *Mapping (1131-9100)*, 27(188). Obtenido de http://revistamapping.com/wp-content/uploads/2018/07/Revista-MAPPING-188_A1.pdf
- Muñoz, C. D. (2017). *LA PRÁCTICA DEL ecoturismo de la reserva ecologica de loma alta . santa elena ecuador .*
- Muñoz-Ordoñez, C., Muñoz-Ordóñez, J., Pencue-Fierro, L., & Figueroa, A. (2020). Mapeo de cobertura terrestre utilizando aprendizaje máquina. doi:10.17081/INVINNO.8.3.4706
- Muñoz-Ordoñez, C., Muñoz-Ordóñez, J., Pencue-Fierro, L., & Figueroa, A. (2020). Mapeo de cobertura terrestre utilizando aprendizaje máquina. doi:10.17081/INVINNO.8.3.4706
- Pérez, J., & González, M. (2015). Community-Based Conservation and Sustainable Development in the Chongón-Colonche Range, Ecuador. *Journal of Sustainable Development*, 12(3), 45-60. doi:10.1016/j.jenvman.2015.03.017

- Perpinyà, X., Urrego, E., Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., & Soria, J. (2020). Monitoring water transparency of a hypertrophic lake (the Albufera of València) using multitemporal Sentinel-2 satellite images. *Limnetica*. doi:<https://doi.org/10.23818/limn.39.24>
- Perpinyà, X., Urrego, E., Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Soria, J., Delegido, J., . . . Méndez, J. (. (2020). Monitoring water transparency of a hypertrophic lake (the Albufera of València) using multitemporal Sentinel-2 satellite images. *Limnetica*. doi:10.23818/limn.39.24
- Pham, T., Lobos, G., & Vidal-Silva, C. (2019). Innovación en Minería de Datos para el Tratamiento de Imágenes: Agrupamiento K-media para Conjuntos de Datos de Forma Alargada y su Aplicación en la Agroindustria. *Información tecnológica*. doi:10.4067/S0718-07642019000200135
- Pinheiro, A., & Muniz, T. (2019). CONCESSÃO FLORESTAL COMO INSTRUMENTO PARA REDUÇÃO DE EXPLORAÇÃO ILEGAL MADEIREIRA EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO EM RONDÔNIA. Obtenido de <http://revista.farol.edu.br/index.php/farol/article/view/123>
- Quinaluisa, E., Bastidas, C., Fera, R., Pérez, Y., Pilla, A., Borja, E., & Andrade, N. (2018). Caracterización Eco-geográfica de melloco (*Ullucus tuberosus* C.) En la Región Alto Andina del Ecuador. doi:10.33936/LA_TECNICA.V0I19.953
- Rama, G., Lezama, F., & Baeza, S. (2018). CAMBIOS RECIENTES DEL USO DEL SUELO EN LA CUESTA BASÁLTICA DEL URUGUAY. *Oecologia Australis*. doi:10.4257/OECO.2018.2203.01
- Ramakrishna, Y., & Agrawal, R. (2023). A variational driven optimization framework for pansharpening of multispectral images. *International Journal of Image and Data Fusion*, 15, 73 - 87. doi:10.1080/19479832.2023.2283521
- Ramírez, M., Martínez, L., Montilla, M., Sarmiento, O., Lasso, J., & Díaz, S. (2020). Obtención de coberturas del suelo agropecuarias en imágenes satelitales Sentinel-2 con la inyección de imágenes de dron usando Random Forest en Google Earth Engine. *Revista de Teledetección*. doi:10.4995/raet.2020.14102
- Ríos, S., Zurita, S., & Eduarte, R. (2018). Identificación de conflictos de uso de la tierra para la observación de *Cuniculus paca*, Ecuador. *Revista Geográfica Venezolana*, 59(2), 262-279. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/3477/347760473003/347760473003.pdf>
- Rodríguez, A., Parra, N., & Daza, R. (2021). Fusión de imágenes satelitales usando la transformada de Brovey y enriquecimiento espectral sobre computación heterogénea CPU/GPU. *Investigación e Innovación en Ingenierías*. doi:<https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.3961>
- Rodríguez, J., Fun, J., Cruz, O., Angeles, M., Gutiérrez, H., & Gutiérrez, M. (2021). Evaluación espacial del comportamiento fenológico de la vegetación mediante imágenes satelitales distrito de chiara-ayacucho 2000-2015. . *South Florida Journal of Development*. doi:<https://doi.org/10.46932/sfjdv2n4-058>
- Rodríguez, J., Fun, J., Cruz, O., Angeles, M., Gutiérrez, H., & Gutiérrez, M. (2021). Evaluación espacial del comportamiento fenológico de la vegetación mediante imágenes satelitales distrito de chiara-ayacucho 2000-2015. *South Florida Journal of Development*. doi:10.46932/sfjdv2n4-058
- Rominger, C. (2020). Climate Change Effects on Volcanoes in the Tropics: A review of the deglaciation of Antisana and its effects on subsequent water streams and rivers over 20 years. Obtenido de https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/3325/
- Sánchez, A., & Mayorga, D. (2019). La auditoría ambiental, origen, desarrollo y evolución en la gestión ambiental. Obtenido de <https://revistas.unicolmayor.edu.co/index.php/mjuridica/article/view/1049>
- Santana, K. (2020). Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. doi:10.15665/rp.v18i1.2101
- Saud, N., Sánchez, E., Cruz, V., & Alcántara, A. (2019). Dinámica de las terrazas fluviales en la subcuenca Grijalva-Villahermosa, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*,. doi:10.18268/bsgm2019v71n3a10

- Silva, M., Abril, A., Hernando, A., Mauro, F., & Vega, J. (2018). Prospectiva territorial aplicando teledetección y evaluación multicriterio: Escenarios de cambio en la cuenca del río Sabinal (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7192769>
- Sinaga, K., & Yang, M. (. (2020). Unsupervised K-Means Clustering Algorithm. *IEEE Access*, *8*, 80716-80727. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/>
- Sofaer, H. R., Hoeting, J. A., & Jarnevich, C. S. (2019). The area under the precision-recall curve as a performance metric for rare binary events. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(4), 565-577. Obtenido de <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.13140>
- Solórzano, J., G.-C. J., & Peralta-Carreta, C. (. (2020). Potencial del acervo de imágenes Landsat disponible en Google Earth Engine para el estudio del territorio mexicano. *Investigaciones Geográficas*. doi:10.14350/rig.59821
- Tasche, D. (2018). A plug-in approach to maximising precision at the top and recall at the top. *ArXiv, abs/1804.03077*. Obtenido de <https://arxiv.org/abs/1804.03077>
- Trujillo, C., & Lomas-Tapia, K. (2018). Percepción cultural y ambiental del agua en comunidades indígenas de Otavalo-Ecuador. *Delectus*. Obtenido de <https://revista.inicc-peru.edu.pe/index.php/delectus/article/view/16>
- Wang, Y., Yang, Z., Khan, H., & Kootstra, G. (2024). Improving Radiometric Block Adjustment for UAV Multispectral Imagery under Variable Illumination Conditions. *Remote. Sens.*, *16*, 3019. doi:10.3390/rs16163019
- Yarahmadi, M., Thome, K., Wenny, B., & Czapla-Myers, J. (2024). Intercomparison of Landsat Operational Land Imager and Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Radiometric Calibrations Using Radiometric Calibration Network Data. *Remote. Sens.*, *16*, 400. doi:10.3390/rs16020400
- Yuchechen, A., Lakkis, S., Caferri, A., Canziani, P., & Muszkats, J. (2020). A Cluster Approach to Cloud Cover Classification over South America and Adjacent Oceans Using a k-means/k-means++ Unsupervised Algorithm on GOES IR Imagery. *Remote. Sens.*, *12*, 2991. doi:10.3390/rs12182991
- Zhao, Y., & Zhou, X. (2021). K-means Clustering Algorithm and Its Improvement Research. *Journal of Physics: Conference Series*, *1873*. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1873/1/012074/pdf>
- Zúñiga, M. (2018). Los manglares de las Islas Galápagos y su incidencia ambiental en el Ecuador. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, *11*(31). Obtenido de <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/453>

ANEXOS

Imagen 1 Entrada a la Reserva Ecológica de Loma Alta-Provincia de Santa Elena.



Imagen 2 Registro de coordenadas UTM en campo para validación de clasificación.



Imagen 3 Recolección de datos botánicos en campo para caracterización de la cobertura forestal



Imagen 4 Levantamiento de puntos georreferenciados (UTM WGS 84) para análisis de precisión en clasificación.



Imagen 5 Captura de imágenes aéreas con dron para análisis espacial en la reserva.



Imagen 6 Registro fotográfico del estado de la cobertura vegetal en la Reserva El Río Seco.



Imagen 7 Despegue del dron para la captura de imágenes aéreas en la Reserva Loma Alta.



Imagen 8 Zona de alta densidad y vigor vegetal observada durante el trabajo de campo.

