



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias
Licán y Yaruquíes, periodo 2000 – 2020”.

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Almeida Huilcapi Stephany Camila
Naranjo Enríquez Maximiliano

Tutor:

Benito Guillermo Mendoza Trujillo, PhD.


Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, Stephany Camila Almeida Huilcapi y Maximiliano Naranjo Enríquez, con cédula de ciudadanía 0605172485 y 0550005193, autores del trabajo de investigación titulado: “Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes, periodo 2000 – 2020”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a la fecha de su presentación.



Stephany Camila Almeida Huilcapi

C.I: 0605172485




Maximiliano Naranjo Enríquez

C.I: 0550005193

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: “Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes, periodo 2000 – 2020”, bajo la autoría de Stephany Camila Almeida Huilcapi y Maximiliano Naranjo Enríquez; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los días del mes de nombre mes de 2024.



Benito Mendoza T., PhD.
C.I: 0603013863

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes, periodo 2000 – 2020”, presentado por Stephany Camila Almeida Huilcapi y Maximiliano Naranjo Enríquez, con cédula de identidad número 0605172485 y 0550005193, bajo la tutoría de PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a la fecha de su presentación.

Anita Ríos, PhD.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



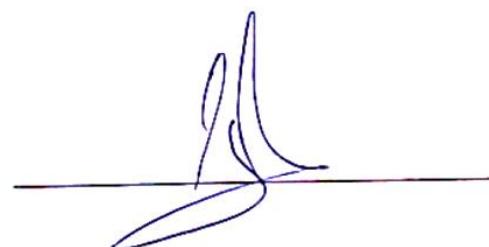
Marcel Paredes, Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Patricio Santillán, Mgs.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **Almeida Huilcapí Stephany Camila** con CC: **0605172485**, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes, periodo 2000 – 2020**", cumple con el **8%**, de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio TURNITIN, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 29 de mayo de 2024



Firmado electrónicamente por:
BENITO GUILLERMO
MENDOZA TRUJILLO

Benito Mendoza T., PhD.

TUTOR



CERTIFICACIÓN

Que, **Naranjo Enríquez Maximiliano**, con CC: **0550005193**, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes, periodo 2000 – 2020**", cumple con el **8%**, de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio TURNITIN, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 29 de mayo de 2024



Benito Mendoza T., PhD.

TUTOR

DEDICATORIA

A mis amados padres, quienes con su amor incondicional y esfuerzo invaluable me han ayudado a cumplir una meta más. Este logro es tan suyo como mío.
A mi preciado hermano, por ser mi cómplice y mi mayor ejemplo de todo lo que es correcto.

A mi adorado novio, quién llegó a mi vida inesperadamente y cambió mi mundo, para siempre.

Sé lo que es el amor gracias a ustedes.
Y a mí misma, por convertirme en quien anhelaba cuando era niña.

- Stephany Camila Almeida Huilcapi.

DEDICATORIA

A mis maestros, quienes con su sabiduría y dedicación han guiado mis pasos y me han inspirado a alcanzar la excelencia académica. Su mentoría ha sido invaluable y ha dejado una huella imborrable en mi formación.

A mi familia por estar ahí cuando lo necesito.

Y a mí mismo, por creer en mis capacidades y perseverar incluso en los momentos más desafiantes.

-Maximiliano Naranjo Enríquez-

AGRADECIMIENTO

Con profundo agradecimiento para:

PhD. Benito Mendoza tutor de este proyecto de investigación, por ser inspiración de profesionalismo, su compromiso durante nuestro desarrollo académico ha sido invaluable.

Ing. Carlos Maldonado, por su predisposición, paciencia y sobre todo amistad, valoramos profundamente su disposición para brindarnos una guía durante el desarrollo de la investigación.

PhD. César Cisneros, por su orientación durante esta investigación.

Siempre los llevaremos presentes en nuestro camino profesional.

A todos aquellos que nos brindaron su orientación y su apoyo incondicional a lo largo de esta travesía, en especial a nuestras familias.

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
SIGLAS	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Planteamiento del Problema	17
1.3 Justificación	18
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo General	19
1.4.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	20
2.1 Los SIG y el análisis multitemporal.	20
2.2 Cambios en la cobertura y uso de la tierra.	20
2.3 Herramientas para el estudio de la cobertura de la tierra.....	21
2.4 Google Earth Engine	22
2.5 Detección de cambios.....	22
2.5.1 Árboles de decisión y Random Forest.....	23
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	25
3.1 Áreas de estudio.	25
3.2 Fase 1. Cuantificación de los cambios.....	25
3.2.1 Puntos de muestreo.	26
3.2.2 Diseño de la muestra (Sampling design).	26
3.2.3 Clasificación supervisada en Google Earth Engine.	27
3.2.4 Preprocesamiento de datos en Google Earth Engine.....	27

3.2.5	Clasificación de la cobertura.....	30
3.2.6	Detección de cambios.....	31
3.2.7	Random Forest.....	32
3.2.8	Árboles de decisión.....	32
3.3	Fase 2. Validar la precisión de datos obtenidos.....	33
3.3.1	Evaluación de la fiabilidad.....	33
3.4	Fase 3. Determinar la velocidad de los cambios.....	35
	Evaluación de la velocidad de cambios de uso de la tierra.....	35
3.5	Fase 4. Examinar los patrones de cambios de la cobertura y uso de la tierra.....	36
3.5.1	Obtención de datos para la Matriz de Pontius en ArcGIS	36
3.5.2	Matriz de Pontius	37
	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1	Cuantificación de cambios.....	39
4.1.1	Puntos de muestreo.....	39
4.1.2	Sampling design.....	39
4.1.3	Mapas de Clasificación Supervisada con Random Forest.....	41
4.1.4	Detección de cambios.....	54
4.1.5	Velocidad de cambios	57
4.1.6	Patrones de cambio.	65
4.2	Discusión	69
	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	ANEXOS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance.....	28
Tabla 2 Catálogo de datos de "H2 Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A".....	29
Tabla 3 Clases seleccionadas de cobertura terrestre (World Land Cover).....	31
Tabla 4 Clase extra seleccionada para Yaruquíes.....	31
Tabla 5 Matriz de confusión para multiclasses.....	35
Tabla 6 Valoración del índice Kappa.....	35
Tabla 7 Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.....	36
Tabla 8 Matriz de tabulación cruzada para comparar cambios de uso y cobertura de la tierra en función de pérdidas y ganancias ocurridas en los periodos decenales.....	37
Tabla 9 Resultados de puntos de muestreo para Licán.....	39
Tabla 10 Resultados de puntos de muestreo para Yaruquíes.....	39
Tabla 11 Resultados de los puntos de validación para Licán.....	40
Tabla 12 Resultados de los puntos de validación para Yaruquíes.....	40
Tabla 13 Matriz de confusión Licán periodo 2000.....	42
Tabla 14 Índice Kappa periodo 2000 Licán.....	43
Tabla 15 Matriz de confusión periodo 2010 Licán.....	44
Tabla 16 Índice kappa periodo 2010 Licán.....	45
Tabla 17 Matriz de confusión periodo 2020 Licán.....	46
Tabla 18 Índice Kappa periodo 2020 Licán.....	47
Tabla 19 Matriz de confusión periodo 2000 Yaruquíes.....	48
Tabla 20 Índice Kappa periodo 2000 Yaruquíes.....	49
Tabla 21 Matriz de confusión periodo 2010 Yaruquíes.....	51
Tabla 22 Índice kappa periodo 2010 Yaruquíes.....	52
Tabla 23 Matriz de confusión periodo 2020 Yaruquíes.....	53
Tabla 24 Índice kappa periodo 2020 Yaruquíes.....	54
Tabla 25 Conteo de píxeles Licán periodo 2000.....	58
Tabla 26 Conteo de píxeles Licán periodo 2010.....	59
Tabla 27 Conteo de píxeles Licán periodo 2020.....	60
Tabla 28 Velocidad del ID de clases del uso y cobertura del suelo en Licán.....	61
Tabla 29 Conteo de píxeles Yaruquíes periodo 2000.....	61
Tabla 30 Conteo de Píxeles Yaruquíes periodo 2010.....	62
Tabla 31 Conteo de píxeles Yaruquíes 2020.....	63
Tabla 32 Velocidad del ID de clases del uso y cobertura del suelo en Yaruquíes.....	64

Tabla 33 Matriz de Pontius periodo 2000-2010 para Licán	66
Tabla 34 Matriz de Pontius periodo 2010-2020 para Licán.	66
Tabla 35 Matriz de Pontius periodo 2000-2010 para Yaruquíes.	68
Tabla 36 Matriz de Pontius periodo 2010-2020 para Yaruquíes	68

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Delimitación de las parroquias rurales Licán y Yaruquíes.	25
Figura 2 Flujo metodológico de la clasificación supervisada.	27
Figura 3 Flujo metodológico de detección de cambios en GEE.	32
Figura 4 Flujo metodológico para la aplicación de Random Forest.	33
Figura 5 Mapa de Licán periodo 2000.	42
Figura 6 Mapa de Licán periodo 2010.	44
Figura 7 Mapa de Licán periodo 2020.....	46
Figura 8 Mapa de Yaruquíes periodo 2000.	48
Figura 9 Mapa de Yaruquíes periodo 2010.	50
Figura 10 Mapa de Yaruquíes periodo 2020.	53
Figura 11 Mapa de detección de cambios Licán.....	55
Figura 12 Gráfica comparativa de ganancias, pérdidas y persistencias de Licán.	55
Figura 13 Mapa de Detección de cambios Yaruquíes.....	56
Figura 14 Gráfica comparativa de ganancias, pérdidas y persistencias de Yaruquíes.	57
Figura 15 Gráfica de píxeles Licán periodo 2000.....	58
Figura 16 Gráfica de píxeles Licán periodo 2010.....	59
Figura 17 Gráfica de píxeles Licán periodo 2020.....	60
Figura 18 Gráfica de píxeles de Yaruquíes periodo 2000.	62
Figura 19 Gráfica de píxeles de Yaruquíes periodo 2010.	63
Figura 20 Gráfica del periodo 2020 Yaruquíes	64

RESUMEN.

Los cambios de uso y cobertura de la tierra se ven alterados por muchos factores, mayormente antrópicos, que llevan a grandes perjuicios para los que habitan un territorio como son pérdida de la biodiversidad, cambios en los ciclos hidrológicos, procesos de erosión, entre otros problemas que se vuelven imperantes en solventar. Una de las características más importantes de la teledetección es que es una herramienta que permite analizar este tipo de modificaciones en el suelo a lo largo del tiempo, con la que se pueden tomar decisiones respecto al orden del territorio y, con ello, disminuir el deterioro del ecosistema. El presente trabajo realiza un análisis multitemporal de los cambios en la cobertura y uso de la tierra para las parroquias Licán y Yaruquíes entre los periodos 2000 al 2020. Para este, se utilizó principalmente el programa Google Earth Engine con la implementación del algoritmo Random Forest y el método de detección de cambios, apoyado por el software ArcGIS 10.8.

Los resultados muestran una alta ganancia en tierras de cultivo, en especial en la parroquia de Licán. Yaruquíes por otro lado, presentó cambios significativos en varias de sus clases. La velocidad de cambios en ambas se considera moderada en cuanto a degradación y mejoramiento, con prioridad en las clases Construido, Tierras de cultivo y Cobertura arbórea, a pesar de que, en Yaruquíes, la zona más amplia, la cubre la clase de Suelo desnudo o vegetación escasa. Estos resultados muestran la necesidad de un mejor ordenamiento del territorio y ejecución de proyectos basados en la búsqueda de información respecto al uso y cobertura de la tierra.

Palabras claves: análisis multitemporal, Google Earth Engine, Random Forest, detección de cambios, Licán, Yaruquíes.

ABSTRACT.

Changes in land use and cover are altered by many factors, primarily anthropic, which lead to significant damage to those who inhabit a territory. These damages include loss of biodiversity, changes in hydrological cycles, erosion processes, and other problems such as soil degradation, habitat loss, and increased greenhouse gas emissions. These issues become imperative to solve. One of the essential characteristics of remote sensing is that it's a tool that allows analyzing this type of modification in the soil over time, with which decisions can be made regarding the order of the territory and, thus, reduce the deterioration of the ecosystem. This work performs a multitemporal analysis of changes in land cover and land use for the Licán and Yaruquíes parishes between 2000 and 2020. In this regard, we mainly used the Google Earth Engine program to implement the Random Forest algorithm and the change detection method, supported by ArcGIS 10.8 software. Our analysis revealed a significant increase in cropland, particularly in the Licán parish. Yaruquíes, on the other hand, has experienced substantial changes across several classes. The rate of change in both areas, in terms of degradation and improvement, is considered moderate.

The Built, Cropland, and Tree Cover classes are given priority, although the largest area in Yaruquíes is covered by the Bare Soil or Sparse Vegetation class. These findings underscore the pressing need for improved land management and the implementation of projects that are informed by data on land use and land cover. The situation is urgent, and action is needed now.

Keywords: multitemporal analysis, Google Earth Engine, Random Forest, change detection, Licán, Yaruquíes.



Reviewed by:

Mgs. Kerly Cabezas

ENGLISH PROFESSOR

C.C 0604042382

SIGLAS.

C: Clase “Construido”.

CA: Clase “Cobertura arbórea”.

ESA: European Space Agency.

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

G: Ganancia.

GEE: Google Earth Engine.

Ha: Hectáreas.

IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos.

K: Coeficiente Kappa de Cohen.

LDCM: Landsat Data Continuity Mission.

MAATE: Ministerio de Agua y Transición Ecológica.

MAE: Ministerio del Ambiente del Ecuador.

OA: Precisión general (Overall Accuracy).

OT: Clase “Otras tierras”.

P: Pérdida.

PA: Precisión del operador (Producer’s Accuracy).

RF: Random Forest.

S/a: Sin alteraciones.

SD/VE: Clase “Suelo desnudo o Vegetación escasa”.

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

SNAP: Software Sentinel Application Platform.

TC: Clase “Tierras de cultivo”.

UA: User’s Accuracy.

USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes.

Badii et al. (2015) indican que la degradación ambiental se refiere al deterioro del ambiente mediante la disminución de recursos como el aire, agua y suelo. Este fenómeno está vinculado con la forma en la que una nación realiza sus actividades económicas y los métodos que utiliza para aprovechar sus recursos naturales.

Desde la década de 1970, los estudios sobre cobertura y uso del suelo han aprovechado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Anderson, 1976). Sin embargo, fue en la década de 1990 cuando comenzaron a surgir investigaciones en Latinoamérica, como es la de Fallas y Savitsky (1996), que hablan de la necesidad de actualizar los mapas de uso y cobertura de la tierra con la aplicación de imágenes satelitales. Y no fue hasta el año 2005 que Ecuador comenzó a desarrollar investigaciones en esta misma línea, focalizándose en la deforestación, conservación de ecosistemas frágiles, la expansión agrícola y sus impactos en la biodiversidad como es el estudio de Encalada y Martínez (2005).

En la actualidad, los progresos tecnológicos en teledetección y las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) han generado modelos con la capacidad de simular y anticipar cambios en la cobertura y uso del suelo. Asimismo, se han introducido diversos enfoques que permiten configurar y prever la dinámica de la variación en el uso de la tierra (Mishra et al., 2014).

En los últimos años, Ecuador ha experimentado cambios drásticos en su cobertura y uso del suelo. Adicional a ello, el rápido y caótico incremento de áreas urbanas y el avance de la frontera agrícola han ocasionado una serie de alteraciones por las malas prácticas agrarias que llevan a la pérdida de suelos con buen potencial productivo, la conversión de suelos rurales a urbanos y la reubicación de áreas de cultivo y ganadería, como es el caso de las parroquias rurales Licán y Yaruquíes (Nancy y Arévalo, 2016).

1.2 Planteamiento del Problema

En países en vía de desarrollo como Ecuador, el constante esfuerzo por avanzar y competir en los mercados internacionales resulta en un aumento del consumo y degradación de los recursos naturales. Por lo general, dicha explotación se lleva a cabo en búsqueda de beneficios económicos, lo que impacta principalmente el suelo y las fuentes de agua (Uzcátegui et al., 2016).

La cubierta vegetal natural incide directamente en la capacidad de los ecosistemas para conservar y proveer alimentos, mantener recursos forestales, suministrar el recurso hídrico, regular el clima y garantizar la calidad del aire (Carpio y Taype, 2021). Uno de los problemas del suelo es el aumento de la degradación ambiental y la consiguiente disminución de la biodiversidad por las modificaciones y actividades humanas que impactan en el paisaje y los ecosistemas (Burbano, 2016). De igual manera, la expansión urbana, la deforestación, la transformación de áreas naturales para la agricultura, ganadería y minería afectan al ambiente, debilita el clima, los ciclos del agua, así como los niveles de carbono y nitrógeno en la biosfera. Estos cambios resultan en la degradación del suelo lo que representa una amenaza para la sostenibilidad del entorno y el equilibrio ecológico (Burbano, 2016).

La escasa información respecto a la cobertura y uso de la tierra que poseen las parroquias de Licán y Yaruquíes, al igual que la carencia de información base de los entes gubernamentales representan un problema significativo en varios niveles. En primer lugar, la falta de datos dificulta la capacidad de los investigadores para comprender completamente la dinámica del uso de la tierra en estas áreas, lo que limita la capacidad de generar soluciones efectivas para los desafíos ambientales y sociales que se presenten. También, esta escasez de información obstaculiza la capacidad de los entes gubernamentales para realizar una gestión efectiva del territorio. En última instancia, la falta de información contribuye a la desorganización territorial y puede exacerbar los problemas ambientales y sociales existentes, lo que dificulta aún más el progreso y el bienestar de las comunidades locales.

1.3 Justificación

En la actualidad, investigaciones sobre los fenómenos dinámicos relacionados con los cambios en la cobertura de la tierra se consideran fundamentales e imprescindibles, debido a que ofrecen una base para la comprensión de las tendencias vinculadas con la degradación del entorno, desertificación y disminución de la diversidad biológica en una región específica (Magrin, 2015).

Además, la determinación del estado de la cobertura y uso de la tierra a lo largo de los años es muy importante para visualizar los impactos ambientales que se producen en el territorio, priorizar la salud del ecosistema y evitar consecuencias en los pobladores. También, los trabajos investigativos en este campo son esenciales para desarrollar estrategias de conservación y desarrollo sostenible que protejan los recursos naturales y promuevan un equilibrio armonioso entre el ser humano y la naturaleza. Adicional a esto, los recursos

naturales como bosques, humedales, suelos agrícolas, páramo y fuentes de agua son muy valiosos para todo ser vivo que habite en estas zonas. En las zonas rurales, el uso del suelo para la producción agraria es indispensable, Consecuentemente, estas áreas se vuelven más susceptibles a la degradación del suelo, lo que requiere de mantenimiento de los sistemas productivos; asimismo, el uso de la tierra con propósitos productivos se convierte en una estrategia clave para mejorar los ingresos y el nivel de vida de las familias de esos sectores, siendo esenciales para su supervivencia (Calvano y Fontalvo, 2014).

La importancia de contar con información adecuada sobre la cobertura y uso de la tierra en las parroquias de Licán y Yaruquíes se fundamenta en la necesidad imperativa de conocer acerca de los usos y cobertura de la tierra que se ven alteradas por la desorganización territorial que este desconocimiento provoca. En primer lugar, la disponibilidad de datos precisos es esencial para comprender plenamente los patrones de uso de la tierra y los recursos naturales en estas comunidades. Finalmente, esta comprensión es fundamental para identificar los puntos críticos, las oportunidades de mejora y las necesidades prioritarias en términos de conservación ambiental y bienestar social. Por ello, esta investigación aporta en la evaluación de la situación actual de las zonas de estudio y provee de una guía a las autoridades competentes con herramientas que permiten la toma de decisiones para que así se planifique de manera más eficiente el territorio.

1.4 Objetivo.

1.4.1 Objetivo General

- Analizar los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes provincia de Chimborazo en el periodo 2000 – 2020.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar los cambios de cobertura y uso de la tierra en subperiodos decenales en las parroquias Licán y Yaruquíes.
- Validar la precisión de los mapas de cambios de cobertura y uso de la tierra obtenidos por medio de la clasificación de imágenes.
- Determinar la velocidad de los cambios decenales de la cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes.
- Examinar los patrones de cambios de cobertura y uso de la tierra detectados en los periodos decenales.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Los SIG y el análisis multitemporal.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se emplean como una herramienta complementaria para realizar análisis del entorno a través del almacenamiento, procesamiento y modelado de datos, con un enfoque particular en la detección de impactos ambientales asociados con cuestiones como el uso del suelo y la deforestación, entre otros. Asimismo, estos revelan información crucial para identificar alteraciones que ha experimentado la cobertura vegetal a lo largo del tiempo, a lo que se le denomina análisis multitemporal. Este permite comparar las interpretaciones de coberturas entre dos o más imágenes satelitales o mapas de un mismo lugar en distintos períodos y facilita la evaluación de los cambios en la condición de las coberturas previamente clasificadas (Flórez et al., 2017).

Según comentan Soria y Matar (2016) la teledetección espacial engloba diversas operaciones que posibilitan la adquisición de datos sobre las características físicas de objetos, fenómenos geológicos, recursos naturales y actividades humanas mediante mediciones y observaciones realizadas a una distancia determinada, es decir, sin interactuar directamente con los elementos mencionados.

Por consiguiente, la contribución de la teledetección a las investigaciones ambientales reside en su capacidad para monitorear procesos dinámicos. A nivel global, la teledetección ha sido empleada para la captura y el monitoreo de datos, que se ha beneficiado de los progresos sostenidos en términos de resolución espectral, espacial y temporal, y la integración de éstos con información contextual lo cual detecta alteraciones en la cobertura y uso del suelo, y con ello analiza diversos eventos, que pueden ser eventos esporádicos o continuos, además de aquellos derivados de las actividades humanas (Zinck, 2014).

2.2 Cambios en la cobertura y uso de la tierra.

Se destaca la importancia de la relación entre la cobertura y uso de la tierra como una manifestación integral de la interacción entre factores bióticos y abióticos en un área específica. Esta interacción se presenta como una asociación espaciotemporal de elementos vegetales y su utilización por parte de la actividad humana incidente en el suelo. Es crucial comprender esta asociación para identificar posibles conflictos de uso y determinar los

problemas ambientales que podrían surgir como consecuencia (Rodríguez et al., 2013). Los cambios en la cobertura y uso de la tierra suelen presentarse de manera focalizada, pero pueden afectar a procesos atmosféricos y climáticos a nivel global, por lo que se los toma como referencia, tanto en estudios ambientales como en el diseño de políticas públicas, para el manejo sostenible de los recursos naturales (Magrin, 2015).

La descripción de diversos cambios en un área determinada se refleja por diferentes instantes temporales de la cobertura del suelo, observables y mensurables, que permanecen en el tiempo y algunos se tornan permanentes, lo que resulta esencial para cualquier labor de gestión territorial, debido a que prescindir de él significa perder el contexto histórico y actual de la zona de estudio, lo cual incrementa la incertidumbre al tomar decisiones y la probabilidad de causar efectos adversos en el territorio (Cardozo et al., 2020).

Muchas de estas modificaciones son provocadas por el aumento poblacional y, consecuentemente, incremento de la demanda alimenticia y expansión territorial, a lo que se adhieren complicaciones ambientales como el cambio climático. Sin embargo, estas alteraciones no siempre se controlan, lo que provoca complicaciones en los ecosistemas, lo que evidencia la importancia de supervisar los cambios de uso y cobertura de la tierra.

2.3 Herramientas para el estudio de la cobertura de la tierra.

Las imágenes satelitales son representaciones visuales de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información valiosa, dentro de rangos específicos de longitud de onda del espectro electromagnético, que es registrada en distintas bandas espectrales, de las características de la superficie terrestre. Así, el empleo de imágenes satelitales brinda información inmediata y precisa que es aprovechada en diversos ámbitos, que incluye el análisis de la evolución de la cobertura y uso de la tierra en un área geográfica determinada (Buzai et al., 2020).

Antes de 1972, la utilización de datos satelitales para vigilancia terrestre, cartografía y exploración era inimaginable. Sin embargo, con el programa Landsat, que es una serie de misiones de observación de la Tierra por satélite gestionadas en conjunto con la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), lo hicieron posible. El impacto de este programa transformó la manera en que se observa y estudia el planeta Tierra. Landsat ha sido el único sistema de satélites diseñado y operado para observar repetidamente la cobertura

terrestre con resolución moderada. En la actualidad, el programa se encuentra en su octava versión, denominada "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM) (Ariza, 2013).

Otro satélite muy utilizado es SENTINEL 2, que posee una cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación. Este programa de vigilancia ambiental sufre un cambio drástico en la forma en que se gestiona el entorno, entiende y abordan los efectos del cambio climático, debido a la combinación de la alta resolución y nuevas capacidades espectrales, así como un campo de visión que abarca 290 kilómetros de anchura y sobrevuelos frecuentes (The European Space Agency, 2015).

2.4 Google Earth Engine

En 2010, la compañía tecnológica multinacional estadounidense Google lanzó "Google Earth Engine" (GEE) como una evolución de Google Earth. Esta plataforma pertenece a una nueva generación de herramientas con procesamiento en la nube que ofrece un amplio catálogo de imágenes satelitales y permite realizar análisis globales de manera eficiente, esto se debe a que utiliza varios conjuntos de datos de tipo geofísico, climático, demográfico, entre muchos otros más (Long et al., 2019).

En la actualidad, Google Earth Engine se presenta como un servicio gratuito para proyectos de investigación y sin ánimo de lucro que excluye aquellos de naturaleza comercial. Esta plataforma incluye un entorno de programación web integrado conocido como Editor de Código de Earth Engine (Code Editor EE), diseñado para simplificar el uso de la interfaz de programación de aplicaciones (API), aplicaciones de terceros o bibliotecas de cliente (Sudmanns et al., 2020). Las solicitudes se originan en el Editor de Código y se envían a los servidores mediante la API. Por lo que, en el Editor de Código, los usuarios pueden redactar y ejecutar scripts para formular sus peticiones (Morales, 2020).

El editor de código proporciona acceso a todo el potencial de la plataforma y sin necesidad de tener formación técnica en JavaScript o Python, ya que permite usar las librerías de cliente, que evitan configurar manualmente las solicitudes HTTP y analizar las respuestas (Zhang et al., 2020).

2.5 Detección de cambios.

Singh (1989) definió la detección de cambios como "el proceso de reconocer diferencias en el estado de un objeto o fenómeno observándolo en diferentes momentos". La detección de cambios a través de datos de teledetección abarca diversas técnicas que analizan

discrepancias en varios niveles, como píxel, objeto o extracción de patrones. (Hussain et al., 2013).

Asimismo, se requiere de un algoritmo que permita una clasificación más verás de los datos. Un algoritmo se refiere a pasos lógicos, secuenciales y metódicamente aplicados para solucionar cierto problema. Existen herramientas predictivas que clasifican datos basados en algoritmos que describen patrones. Estos algoritmos de clasificación supervisada tienen aplicaciones medioambientales, sociales, políticas, entre otras (Tobar et al., 2023).

2.5.1 Árboles de decisión y Random Forest.

Random Forest propuesto por Breiman (2001) es un algoritmo de clasificación no lineal que identifica patrones en los datos que se incorporan mediante la entrada de información. Este algoritmo emplea un sistema de “votos” entre el conjunto de árboles para decidir la clase. Cada árbol es un voto, y se asigna la clase según cuántos votos recibe cada unidad que se clasificará.

Un árbol de decisión representa gráficamente las posibles consecuencias de una serie de elecciones relacionadas, que permite la comparación de diversas acciones en función de probabilidades. Se utiliza para facilitar discusiones informales o para desarrollar algoritmos que calculen de manera matemática la opción adecuada (Berlanga et al., 2013).

En general, un árbol de decisión comienza con un nodo único para luego ramificarse en posibles resultados potenciales que generen nuevos nodos, así se desplieguen otras alternativas que estructuran el árbol. Sin embargo, a pesar de su capacidad para ser comprensibles e interpretables, estos árboles pueden subir un sobreajuste, tener problemas con clases desequilibradas, generalización de datos y sensibilidad a la variación de estos (Berlanga et al., 2013). Esto puede ser solucionado al momento de aplicar un algoritmo más complejo que engloba varios árboles de decisión lo que permite reducir el sobreajuste y fortalecerse ante la variabilidad de información, lo que permite incrementar su rendimiento y confiabilidad, este es el caso de Random Forest o Bosque Aleatorio (Merino y Chacón, 2017).

Como se mencionó anteriormente, es un conjunto de múltiples árboles de decisión, donde cada árbol se entrena con una porción aleatoria de los datos y produce su propia predicción. Luego, las predicciones de todos los árboles se combinan para obtener una predicción final más precisa y robusta. Este algoritmo es uno de los más conocidos y

utilizados por su precisión, simplicidad y flexibilidad, además de ser especialmente útil para tareas de clasificación y regresión en las que se busca reducir el sobreajuste y mejorar la generalización del modelo (Merino y Chacón, 2017).

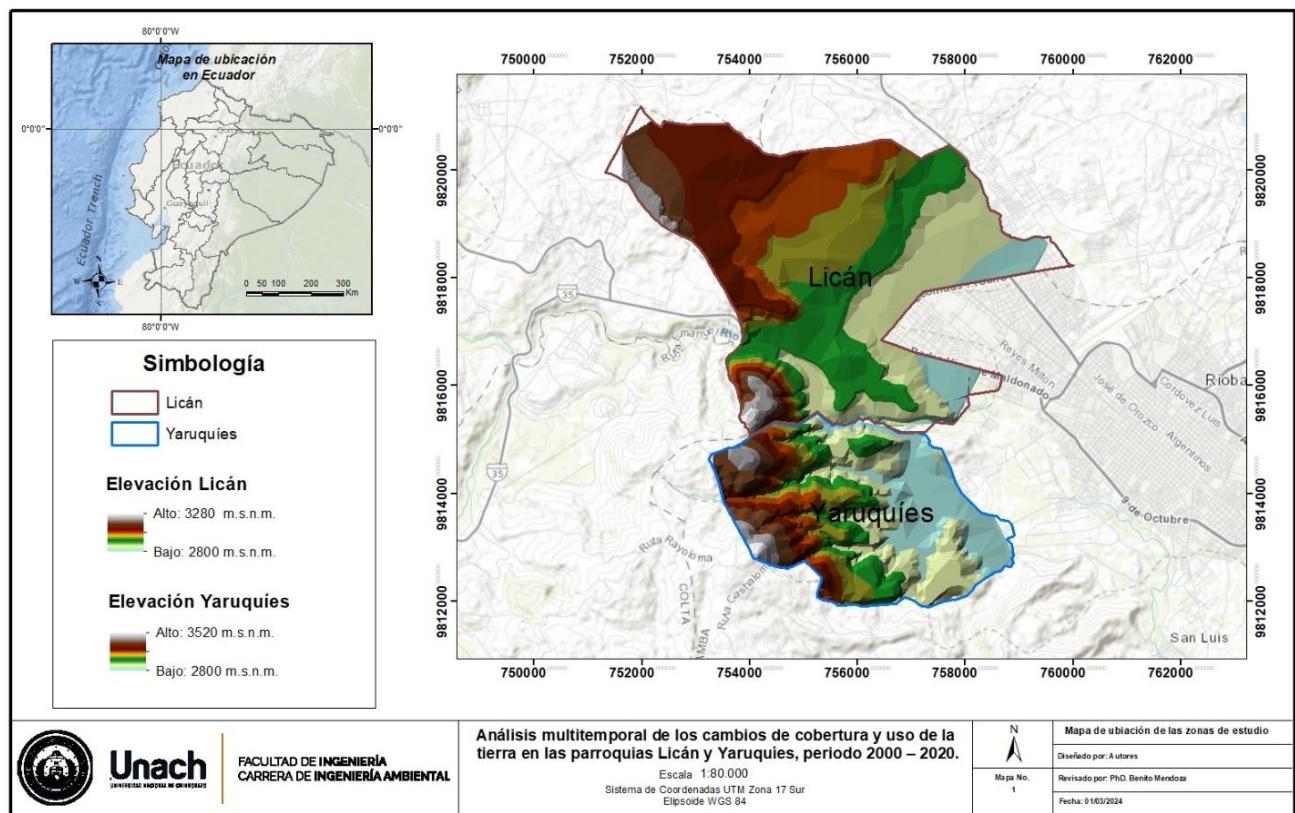
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

3.1 Áreas de estudio.

En la presente investigación la zona de estudio comprende las parroquias Licán y Yaruquíes del cantón Riobamba provincia de Chimborazo las cuales se aprecian en la Figura 1. La parroquia Licán se encuentra a una distancia de 6 km de Riobamba a una altitud que oscila los 2800 m.s.n.m. y 3280 m.s.n.m. Limita al norte con la parroquia Apóstol Santiago de Calpi, al sur con la parroquia Nuestra Señora de Guadalupe, al este con las parroquias San Miguel de Tapi y San Andrés; y al oeste con las parroquias Yaruquíes y Cacha. Por otro lado, la parroquia Yaruquíes se localiza en las faldas de los cerros Yaruquíes y Cacha, con una altitud que ronda los 2800 m.s.n.m. y 3520 m.s.n.m. Limita al norte con Licán, al sur con Punín y San Luis, al este con el río Chibunga, y al oeste con la parroquia rural de Cacha.

Figura 1

Delimitación de las parroquias rurales Licán y Yaruquíes.



Fuente: Autores.

3.2 Fase 1. Cuantificación de los cambios.

Para el análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en las parroquias Licán y Yaruquíes se aplicó el método de detección de cambios (Singh, 1989) que

resulta efectivo para evaluar la evolución de la cobertura de la tierra, debido a su capacidad para proporcionar datos objetivos, cuantitativos, con amplia cobertura temporal y espacial, esenciales para la monitorización y comprensión de los procesos de degradación ambiental y pérdida de biodiversidad (Jaramillo y Antunes, 2018).

3.2.1 Puntos de muestreo.

Para ambas zonas de estudio, se obtuvo el conteo de píxeles y aplicó la fórmula del tamaño de la muestra (Orozco y Ordoñez, 2023) en la que se empleó un nivel de confianza del 94% y un error de estimación máximo tolerable del 6%, para determinar los puntos de control necesarios para iniciar la clasificación como se muestra a continuación en la Ecuación 1:

$$n = \frac{NZ^2\alpha/2pq}{e^2(N-1) + pqZ^2\alpha/2}$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

$Z^2\alpha/2$ = valor de la distribución normal estándar para un determinado nivel de confianza

N = tamaño de la población

e = error de estimación máximo tolerable

p = proporción de elementos que poseen la característica de interés.

$q = 1 - p$

3.2.2 Diseño de la muestra (Sampling design).

Stephen Stehman (2009) en “Sampling designs for accuracy assessment of land cover” presenta los diseños básicos de muestreo aplicados históricamente para evaluar la precisión de una clasificación de la cubierta terrestre. La planificación del diseño del muestreo depende de tres características fundamentales:

1. Los objetivos de precisión
2. Los criterios de diseño de muestreo deseables
3. Los puntos fuertes y débiles de los diseños de muestreo básicos y complejos en relación con los objetivos de precisión.

Se empleó una hoja de cálculo en Microsoft Excel en la que se aplicó la metodología propuesta por Stephen Stehman (2009), donde el único dato introducido, fue el área de Licán y Yaruquíes que se determinó con el conteo de píxeles antes mencionado. Cabe destacar que,

a pesar del cambio temporal, el valor de sus áreas no presenta alteración, por lo que se aplicó el mismo valor para las parroquias Licán y Yaruquíes.

El valor del error estándar objetivo para la precisión global es de 0,05, sugerido por Olofsson et al. (2014), el cual se utilizó para la precisión global y la precisión del proyecto. El número total de muestras basado en la superficie total, y se distribuye por estrato de forma equitativa, proporcional y con tres opciones de equilibrio entre estas asignaciones (Nations Food and Agriculture Organization of the United, 2016).

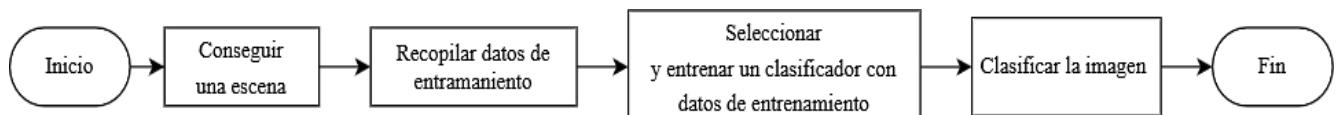
3.2.2.1 Puntos de validación

Para el establecimiento de los puntos de validación se realizaron varias salidas de observación a Licán y Yaruquíes, donde se seleccionaron las zonas que han prevalecido a lo largo del tiempo sin alteraciones en su cobertura y uso de la tierra y con un GPS se adquirieron las coordenadas de cada punto establecido con el método de Sampling design (Stehman, 2009). Del mismo modo, se emplearon imágenes satelitales para comparar lo visto en campo, como las zonas con menos variaciones en el tiempo.

3.2.3 Clasificación supervisada en Google Earth Engine.

La clasificación supervisada se realizó por medio de un conjunto de datos de entrenamiento que exponen las características espectrales de cada clase de cobertura terrestre de interés para "supervisar" la clasificación. El enfoque general de una clasificación supervisada en GEE se resume a continuación en la Figura 2.

Figura 2
Flujo metodológico de la clasificación supervisada.



Fuente: Nicolau Puzzi et al., (2011).

3.2.4 Preprocesamiento de datos en Google Earth Engine.

En esta etapa se obtuvieron los datos geoespaciales necesarios para el proyecto, como imágenes satelitales y bases de datos de programación. Luego, se llevaron a cabo diversas operaciones para preparar y convertir estos datos en información aplicable para el análisis (Ruiz, 2017).

Dentro de GEE existe un catálogo de colecciones de imágenes satelitales el cual cuenta con correcciones radiométricas y atmosféricas, en los que se seleccionó la colección

ASTER L1T Radiance para el periodo del 2000 y la colección Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A para los periodos del 2010 y 2020, debido a su resolución y previa corrección atmosférica.

Se definen bandas de predicción que dependen del tipo de imagen satelital utilizada y selecciona los puntos de entrenamiento de la muestra en el que se verifiquen dichos puntos por medio de la colección NICFI basemaps de Planet Labs, empresa que, a partir del año 2015, opera una flota de pequeños satélites que capturan imágenes de la Tierra en alta resolución.

Colección de ASTER L1T Radiance.

El radiómetro espacial avanzado de emisión térmica y reflexión (ASTER) es un generador de imágenes multiespectrales lanzado a bordo de la nave Terra de la NASA en diciembre de 1999. ASTER puede recoger datos en 14 bandas espectrales, desde el visible hasta el infrarrojo térmico. Cada escena cubre un área de 60 x 60 km. Estas escenas, producidas por el USGS, contienen radiancia calibrada en el sensor, orto-rectificada y corregida en función del terreno con una resolución de 15 metros como se muestra en la Tabla 1 dicha colección se utilizó para el periodo decenal del 2000.

Tabla 1
Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance.

Nombre	Descripción	Mínimo	Máximo	Resolución	Longitud de onda
B01	VNIR_Banda1 (verde/Amarillo visible)	1	255	15 metros	0.520- 0.600 μm
B02	VNIR_Banda 2 (rojo visible)	1	255	15 metros	0.630- 0.690 μm
B3N	VNIR_Band3N (Infrarrojo cercano, que apunta al nadir)	1	255	15 metros	0.780- 0.860 μm
B04	SWIR_Band4 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	1.600- 1.700 μm
B05	SWIR_Band5 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,145- 2,185 μm

B06	SWIR_Band6 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,185- 2,225 μ m
B07	SWIR_Band7 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,235- 2,285 μ m
B08	SWIR_Band8 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,295- 2,365 μ m
B09	SWIR_Band9 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,360- 2,430 μ m
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros	-

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.2.4.1 Colección de Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.

La colección Harmonized desplaza los datos en las escenas más recientes para que estén en el mismo rango que en las escenas más antiguas. Sentinel-2 es una misión de imágenes multiespectrales de alta resolución y gran amplitud que apoya los estudios de Vigilancia Terrestre de Copernicus que incluye el seguimiento de la vegetación, el suelo y la cubierta de agua, así como la observación de las vías navegables interiores y las zonas costeras, a diferencia de ASTER, esta presenta resoluciones desde 10 metros como se muestra en la Tabla 2. Dicha colección se utilizó tanto para los períodos decenales 2010 y 2020.

Tabla 2

Catálogo de datos de "H2 Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A".

Nombre	Escala	Tamaño de Píxel	Longitud de onda	Descripción
B2	0.0001	10 metros	496.6nm (S2A) / 492.1nm (S2B)	Azul
B3	0.0001	10 metros	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Verde
B4	0.0001	10 metros	664.5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Roja
B5	0.0001	20 metros	703.9nm (S2A) / 703.8nm (S2B)	Visible e infrarojo cercano (VNIR)

B6	0.0001	20 metros	740.2nm (S2A) / 739.1nm (S2B)	Visible e infrarojo cercano (VNIR)
B7	0.0001	20 metros	782.5nm (S2A) / 779.7nm (S2B)	Visible e infrarojo cercano (VNIR)
B8	0.0001	10 metros	835.1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B11	0.0001	20 metros	1613.7nm (S2A) / 1610.4nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	0.0001	20 metros	2202.4nm (S2A) / 2185.7nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.2.5 Clasificación de la cobertura.

Los tipos de cobertura establecidos para la detección de cambios se basaron en la cobertura de World Land Cover establecida por la Agencia Espacial Europea (ESA). Esta es una cobertura terrestre global de libre acceso que ofrece datos con una resolución de 10 metros, que maneja información de Sentinel-1 y Sentinel-2 e incluye once categorías de cobertura terrestre validadas independientemente con un análisis global por la ESA, en el que se demuestra una precisión de 75% aproximadamente.

En las zonas de estudio se determinó que las clases más representativas, con la aplicación de la colección de ESAWorldCover en GEE, fueron las mostradas en la Tabla 3. Sin embargo, para Yaruquíes se consideró una cobertura extra debido a la presencia de otras tierras como zonas rocosas, que, de no ser clasificadas, resultan en error de clasificación por confusión de píxeles. Esta clase está basada en la propuesta por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) como muestra la Tabla 4.

Tabla 3

Clases seleccionadas de cobertura terrestre (World Land Cover).

Valor	Color	Descripción
10	#006400	Cobertura Arbórea
40	#f096ff	Tierras de Cultivo
50	#fa0000	Construido
60	#b4b4b4	Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa

Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA).

Tabla 4

Clase extra seleccionada para Yaruquies.

Color	Descripción
#12d0d6	Otras Tierras

Fuente: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2023).

3.2.6 Detección de cambios.

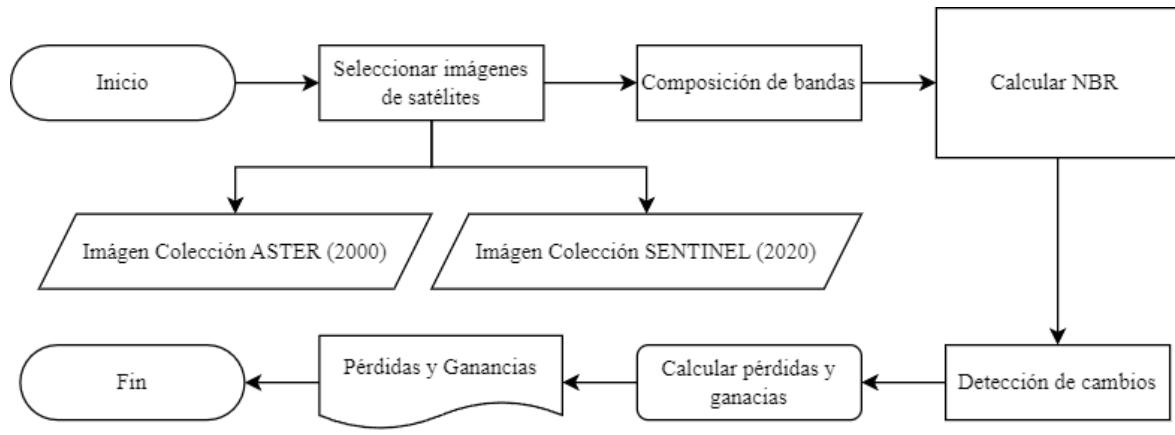
3.2.6.1 Método de clasificación directa.

Este método consistió en combinar dos imágenes de períodos distintos dentro de Google Earth Engine y aplicar una clasificación de los cambios donde se utilizan todas las bandas multiespectrales. Las clases en este caso representan directamente los cambios en los usos del suelo, es decir, la clasificación de la cobertura definida (Ruiz, 2017).

Para realizar la detección de cambios se utilizó una imagen satelital del año 2000 de la Colección ASTER L1T Radiance así como una imagen satelital del año 2020 de la Colección Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A, con el fin de identificar las pérdidas y ganancias de los tipos de cobertura a lo largo de dos décadas, y se aplicó la programación dentro de Google Earth Engine que se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Flujo metodológico de detección de cambios en GEE.



Fuente: Autores.

3.2.7 Random Forest.

Random Forest o bosque aleatorio consiste en la combinación de clasificadores de árbol donde cada clasificador se genera mediante un vector aleatorio muestreado independientemente del vector de entrada, y cada árbol emite un voto unitario para la clase más popular para clasificar un vector de entrada (Breiman 1999).

Este algoritmo es un clasificador de conjunto que produce múltiples árboles de decisión, conformado por un subconjunto de muestras al azar y variables de entrenamiento (Sánchez-Pellicer et al., 2017); una de sus ventajas es su alta precisión en la clasificación (Belgiu y Drágut, 2016). Distintos árboles analizan distintas porciones de los datos; de esta manera hace que cada árbol se entrene de distintas muestras de datos para un mismo problema. Así, al combinar los resultados, unos errores serán compensados con otros, y se obtendrá un mejor resultado (Paredes-Inilupu, 2020).

3.2.8 Árboles de decisión.

Mediante la biblioteca “ee.Classifier” que contiene árboles de decisión en JavaScript. Se creó un clasificador basado en árboles de decisión aplicado a las imágenes satelitales de las zonas de estudio.

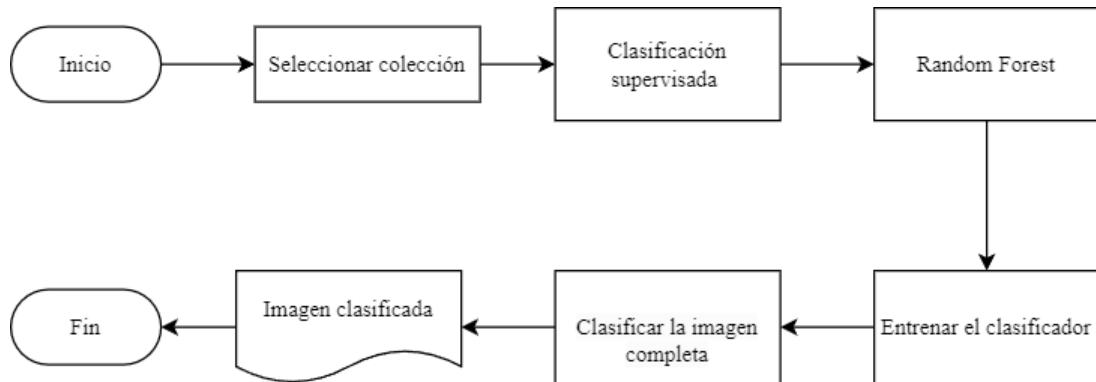
Se generó un clasificador de árboles de decisión para clasificar la imagen en cuatro clases para Licán y Yaruquíes (0: Construido, 1: Tierras de Cultivo, 2: Cobertura Arbórea, 3: Vegetación Desnuda/Escasa) y a Yaruquíes una clase más (4: Otras Tierras).

Para el clasificador del árbol de decisión se efectuaron 50 divisiones debido a que se vuelve más preciso al capturar patrones detallados en los datos de entrenamiento. A

continuación, en la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo para los árboles de decisión en Google Earth Engine.

Figura 4

Flujo metodológico para la aplicación de Random Forest.



Fuente: Autores.

3.3 Fase 2. Validar la precisión de datos obtenidos.

3.3.1 Evaluación de la fiabilidad.

Es fundamental evaluar la fiabilidad de los resultados obtenidos, para lo que es necesario utilizar una fuente de validación veraz e independiente para asegurar la precisión de los cambios encontrados. En este caso se evaluaron los usos del suelo en diferentes fechas, por lo que el cambio de la fiabilidad entre ambas se obtuvo mediante la multiplicación de las fiabilidades de cada evaluación individual (Ruiz, 2017).

3.3.1.1 Índice Kappa.

El coeficiente de concordancia kappa expresa la precisión de la clasificación de imágenes utilizada para producir un mapa temático. Los motivos fundamentales para elegir el coeficiente kappa como indicador de precisión en la clasificación se centran en su capacidad para corregir el acuerdo aleatorio, debido a las escalas para interpretación, lo que permitió estimaciones específicas por clase y generales (Congalton et al., 1983; Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986).

Se aplicó una notación similar a la de Cohen (1960), donde el coeficiente kappa (κ), se estima a partir de la Ecuación 2:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (2)$$

Para la determinación del coeficiente kappa existe la estimación del nivel de concordancia que ocurre al azar. Para la matriz de confusión, la proporción de concordancia (P_o) se estima a partir de la Ecuación 3:

$$P_o = \frac{a+d}{n} \quad (3)$$

El coeficiente kappa de Cohen se basa en el análisis simple de los valores marginales de fila y columna (Byrtet al., 1993; Lantz y Nebenzahl, 1996; Hoehler, 2000; Sim y Wright, 2005). Con eso se puede obtener la proporción de concordancia esperada debido al azar P_e en la Ecuación 4:

$$P_e = \left(\left(\frac{a+c}{n} \right) \left(\frac{a+b}{n} \right) \right) + \left(\left(\frac{b+d}{n} \right) \left(\frac{c+d}{n} \right) \right) \quad (4)$$

Para representar la precisión por clase, se estima el coeficiente kappa condicional (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986; Czaplewski, 1994; Congalton y Green, 2009). Para la clase i , que con la etiqueta + o -, puede estimarse a partir de la Ecuación 5:

$$\kappa_i = \frac{nn_{ii} - n_i \times n_i}{nn_i - n_i \times n_i} \quad (5)$$

La varianza de kappa (Congalton et al., 1983; Congalton y Green, 2009) puede expresarse en términos del error estándar, σ_k , que es la raíz cuadrada de la varianza (Ecuación 8), en las que se aplican también las Ecuaciones 6 y 7 con la Tabla 5.

$$P_o = \sum_{i=1}^m P_{ii} \quad (6)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^m P_i \times P_{\cdot i} \quad (7)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{(1 - P_e)\sqrt{n}} \sqrt{P_e + P_e^2 - \sum_{i=1}^m P_i \times P_{\cdot i} (P_i + P_{\cdot i})} \quad (8)$$

3.3.1.2 Matriz de Confusión.

La matriz de confusión presente en la Tabla 5 se utiliza ampliamente en la evaluación de la precisión de la clasificación. En todo momento la muestra de los casos utilizados para formar la matriz de confusión se adquirió por medio del muestreo aleatorio (Stehman, 1996).

Tabla 5*Matriz de confusión para multiclasas.*

Clase	1	2	m	Σ
1	p_{11}	p_{12}	p_{1m}	p_1
2	p_{21}	p_{22}	p_{2m}	p_2
:	:	:	:	:
Σ	p_{m1}	p_{m2}	p_{mm}	p_m
	$p_{\cdot 1}$	$p_{\cdot 2}$	$p_{\cdot m}$	1

Fuente: Cohen (1960).

El valor del coeficiente puede variar de 0 a 1, es decir, entre más cercano este a 1, la concordancia de los dos métodos es alta. Este índice categoriza en seis clases como se muestra en la Tabla 6 y de acuerdo con esta clasificación se puede rechazar o aceptar la nueva clasificación a evaluar (Cerda y Villarroel 2008).

Tabla 6*Valoración del índice Kappa.*

Coeficiente Kappa	Fuerza de concordancia
0. 00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21- 0.40	Aceptable
0.41- 0.60	Moderada
0.61- 0.80	Considerable
0.81- 1.00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Kotch (1977).

3.4 Fase 3. Determinar la velocidad de los cambios.

Evaluación de la velocidad de cambios de uso de la tierra.

Para la evaluación de la velocidad de degradación de los cambios de uso de la tierra, se utilizó la fórmula adaptada de FAO (1984) y Ortiz-Solorio et al. (1994) por medio de las Ecuaciones 9 y 10; e indicadores para cada clase mostrados en la Tabla 7 (Ramos et al., 2004).

$$ID = \frac{(\% \text{ de US del último año} - \% \text{ del US del año anterior})}{\% \text{ de US del último año}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{ID en \% por año} = \frac{ID}{\text{Número de años del periodo evaluado}}$$

(10)

Donde: ID = incremento de la degradación y US = uso del suelo.

Tabla 7

Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.

Intervalo	Clase
< 0.01	Recuperación (R)
0.0	Nula (N)
0.0 - 2.49	Ligera (L)
2.5 - 4.99	Moderada (M)
5.0 - 7.49	Severa (S)
> 7.5	Muy Severa (MS)

Fuente: FAO (1984).

1. Recuperación: Hay un aumento en la extensión de la superficie de uso del suelo.
2. Nula: La superficie de uso del suelo permanece sin cambios.
3. Ligero: Existe un pequeño efecto perjudicial.
4. Moderado: Los cambios representan un efecto perjudicial notable.
5. Severo: Los cambios tendrán un impacto significativo en la disminución de la superficie de uso del suelo.
6. Muy severo: El uso de la superficie de la tierra se vuelve impracticable o antieconómico (FAO, 1984).

3.5 Fase 4. Examinar los patrones de cambios de la cobertura y uso de la tierra.

3.5.1 Obtención de datos para la Matriz de Pontius en el software ArcGIS 10.8

Primero, se procede a convertir los raster de los tres períodos a polígonos. Luego, en cada polígono se crea un nuevo campo. Para el primer año, este campo reflejará valores correspondientes al número de clases, específicamente, 4 para Licán y 5 para Yaruquíes. Para el año final, el nuevo campo representará valores correspondientes al número de clases multiplicado por 10 y como resultado se obtiene 40 para Licán y 50 para Yaruquíes. Posteriormente, se emplea la función “Intersección” en el software ArcGIS 10.8 para entrelazar los campos previamente creados y obtener una única tabla de atributos. Finalmente, se utiliza la función “Selección por Atributos” para obtener los valores de transición de cada clase para ambos intervalos (2000-2010) y (2010-2020), así establecer la matriz de Pontius.

3.5.2 Matriz de Pontius

Pontius, et al. (2004) examina la matriz de tabulación cruzada como herramienta para evaluar el cambio total de categorías de tierra según dos componentes: cambio neto y canje, así como ganancias y pérdidas brutas. El análisis de estos componentes resulta de gran ayuda al distinguir entre una transición paisajística claramente sistemática y una transición paisajística aparentemente aleatoria.

Alo y Pontius (2008), establecen una técnica para comparar regiones que tienen una distribución diferente de la proporción de categorías de tierra en la cual, después de crear una matriz de tabulación cruzada para cada intervalo de tiempo, se analizó el cambio en términos de tamaño y transiciones de los tres períodos decenales. Para ello, se calculó pérdidas y ganancias, así como la variación del tamaño de cada clase en hectáreas, a través de los intervalos de tiempo. Este análisis pudo identificar las categorías que se evitan intensamente, se alteran, y persisten.

Con ello, la comparativa de los períodos se realizó mediante la matriz adaptada de transiciones de Pontius et al. (2004) en función de las pérdidas y ganancias de cobertura. La matriz es una tabulación cruzada que compara las categorías ocurridas en el período inicial (i) y el período final (j). Los valores dados por P_{ij} denotan una transición y los valores P_{jj} de la diagonal representan las persistencias, como se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8

Matriz de tabulación cruzada para comparar cambios de uso y cobertura de la tierra en función de pérdidas y ganancias ocurridas en los períodos decenales.

		Período final			Total Inicial	Pérdidas
		Clase 1	Clase 2	Clase n		
Período inicial	Clase 1	$P_{jj(11)}$	P_{i1j2}	P_{i1jn}	P_{i+1}	$P_{i+1}-P_{jj(11)}$
	Clase 2	P_{i2j1}	$P_{jj(22)}$	P_{i2jn}	P_{i+2}	$P_{i+2}-P_{jj(22)}$
	Clase n	P_{inj1}	P_{inj2}	P_{injn}	P_{i+n}	$P_{i+n}-P_{jj(nn)}$
	Total Final	P_{+j1}	P_{+j2}	P_{+jn}	Σ	
	Ganancias	$P_{+j1}-P_{jj(11)}$	$P_{+j2}-P_{jj(22)}$	$P_{+j1}-P_{jj(nn)}$		

Fuente: Adaptada de Pontius et al. 2004.

Las ganancias son la diferencia entre el total y la persistencia de la categoría descrita en cada columna en la Ecuación 11; donde G_{ij} indica la proporción que experimenta ganancia bruta de la categoría j entre el tiempo uno y tiempo dos.

$$G_{ij} = P + j - P_{jj} \quad (11)$$

Las pérdidas son la diferencia entre el total y la persistencia que se encuentra en cada categoría descrita en cada fila en la Ecuación 12; donde L_{ij} indica la proporción que experimenta la pérdida bruta de la categoría i entre el tiempo uno y tiempo dos.

$$L_{ij} = P_i - P_{jj} \quad (12).$$

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todos los mapas y gráficos que se presentan en este apartado fueron elaborados con el software ArcGIS 10.8, mientras que las tablas se elaboraron con Microsoft Excel.

4.1 Cuantificación de cambios.

4.1.1 Puntos de muestreo.

Al aplicar la fórmula del tamaño de la muestra se obtuvo como resultado 246 puntos para ambas zonas. En las Tablas 9 y 10 se visualiza la precisión esperada por el usuario (U_i) y el total de puntos muestrales.

Tabla 9

Resultados de puntos de muestreo para Licán.

	Construido	Tierras de Cultivo	Cobertura Arbórea	Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa
U_i (Precisión esperada del usuario)	0,80	0,90	0,85	0,80
Total de puntos de muestreo	62	92	61	31

Fuente: Autores.

Tabla 10

Resultados de puntos de muestreo para Yaruquíes.

	Construido	Tierras de Cultivo	Cobertura Arbórea	Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa	Otras Tierras
U_i (Precisión esperada del usuario)	0,80	0,90	0,85	0,80	0,70
Total de puntos de muestreo	45	69	49	45	38

Fuente: Autores.

4.1.2 Sampling design.

En ambas zonas de estudio se asignaron porcentajes respecto a la predominancia que presenta cada clase en base a su área total, al igual que el número de puntos de validación como muestran las Tablas 11 y 12. Las entradas necesarias son las áreas del mapa y la precisión esperada del usuario para la muestra, que se introducen en las celdas resaltadas con

negrita. Las celdas sobrantes se calculan con la aplicación de las fórmulas de Olofsson et al. (2014).

Tabla 11
Resultados de los puntos de validación para Licán.

	Construido	Tierras de Cultivo	Cobertura Arbórea	Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa	Total
Área en píxeles	45509	166144	22241	35488	269382
Wi (Proporción cartografiada)	0,169	0,62	0,08	0,13	1,00
Ui (Precisión esperada del usuario)	0,80	0,90	0,85	0,80	
Si (Desviación estándar)	0,40	0,30	0,36	0,40	
Wi*Si	0,068	0,19	0,03	0,05	0,33
Puntos de validación	10	14	11	10	
Porcentaje equivalente	22,22%	31,11%	24,44%	22,22%	
			SE precisión general		0,05
			Número total de muestras		45

Fuente: Autores.

Tabla 12
Resultados de los puntos de validación para Yaruquíes.

	Construido	Tierras de Cultivo	Cobertura Arbórea	Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa	Otras Tierras	Total
Área en píxeles	6169	34632	31596	64075	850	137322
Wi (Proporción cartografiada)	0,045	0,25	0,23	0,47	0,01	1,00
Ui (Precisión esperada del usuario)	0,80	0,90	0,85	0,80	0,70	
Si (Desviación estándar)	0,40	0,30	0,36	0,40	0,46	
Wi*Si	0,018	0,08	0,08	0,19	0,003	0,37

Puntos de validación	12	18	13	12	10
Porcentaje equivalente	18,4 6%	27,69%	20%	18,46%	15,38%
				SE precisión general	0,05
				Número total de muestras	65

Fuente: Autores

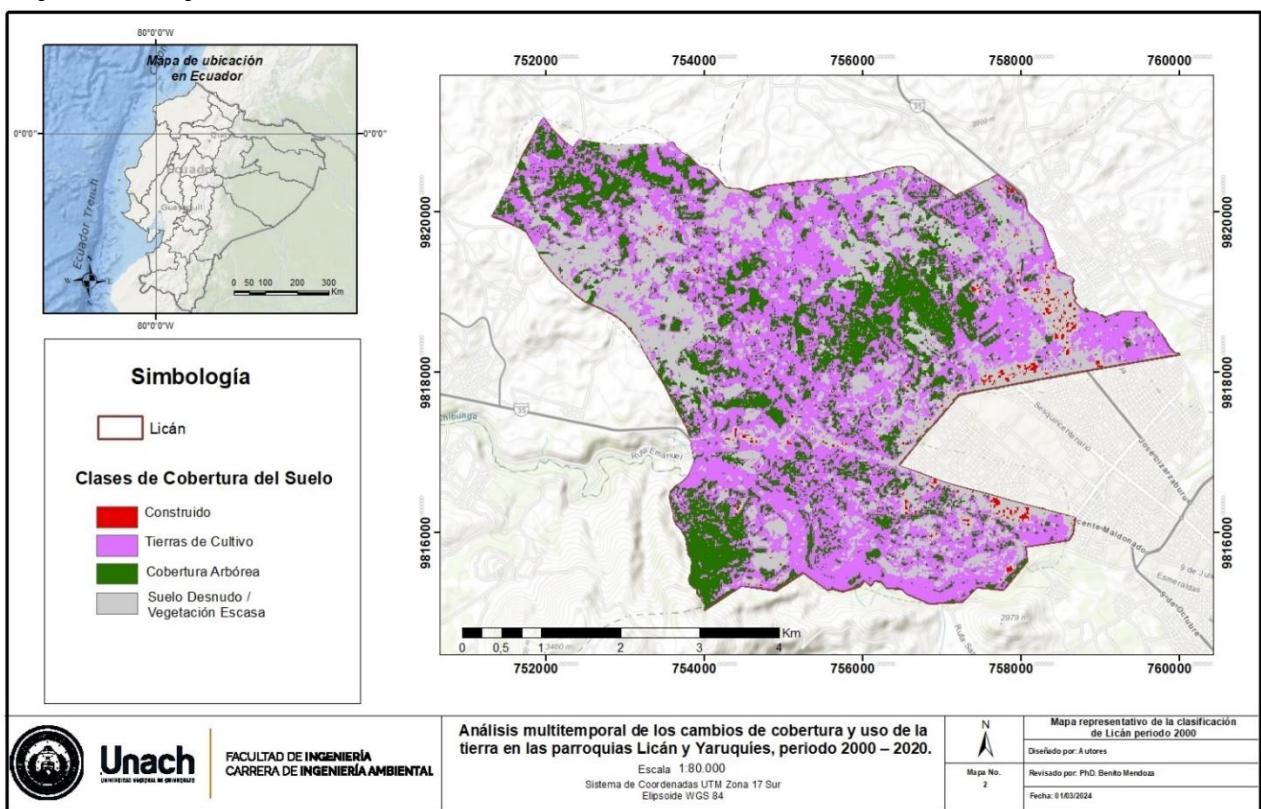
4.1.3 Mapas de Clasificación Supervisada con Random Forest.

4.1.3.1 Validación de la precisión de datos obtenidos Lican periodo 2000.

La Figura 5 presenta un panorama de la situación de la parroquia Licán en el año 2000. A simple vista, resalta la presencia predominante de la clase TC en las áreas bajas y centrales. Esta distribución se explica por el potencial agrícola que caracterizaba la región, con una variedad de cultivos que incluían maíz, tomate, papas, trigo, cebolla y col, tanto al aire libre como en invernaderos.

Asimismo, se observa la presencia significativa de la clase CA, dado que la zona aún no había experimentado un proceso de urbanización y se encontraba en las afueras de la ciudad de Riobamba. La clase SD/VE también se destaca, casi en igual medida que la clase CA, muestra una combinación de suelo desnudo y cobertura arbórea en la zona. Por último, la presencia de la clase C es mínima lo que evidencia la poca influencia de actividades antrópicas.

Figura 5
Mapa de Licán periodo 2000.



Fuente: Autores.

En la Tabla 13 se presentan los errores o confusiones que generó el programa o el operador en cada clase donde se observan 2 errores totales de comisión; 1 punto de la clase CA y SD/VE se encuentran en la clase TC.

Tabla 13
Matriz de confusión Licán periodo 2000.

Clases	Suelo					Error de Comisión
	Construido	Tierra de Cultivo	Cobertura Arbórea	Desnudo/ Vegetación Escasa	Total	
Construido	10	0	0	0	10	0
Tierra de Cultivo	0	14	0	0	14	0
Cobertura Arbórea	0	1	10	0	11	1
Suelo Desnudo/Ve	0	1	0	9	10	1

getación	10	16	10	9	45	
Escasa						
Total	10	16	10	9	45	
Error de	0	2	0	0		
Omisión						2

Fuente: Autores.

Según se evidencia en la Tabla 14, la clasificación de Licán del periodo decenal 2000 exhibió una precisión global del 95% y un índice Kappa del 94%, lo que indica una concordancia prácticamente perfecta. En detalle, la clase C no presentó errores de comisión ni omisión; las clases SD/VE y CA presentaron un error de comisión del 2,22% y sin error de omisión; y la clase TC tuvo un error de omisión de 4,44% y no presentó error de comisión.

Tabla 14
Índice Kappa periodo 2000 Licán.

Clases	Error de Comisión (%)	Error de Omisión (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	Índice k	Índice k (%)
Construido	0	0				
Tierra de Cultivo	0	4,44				
Cobertura Arbórea	2,22	0				
Suelo			0,95	95	0,94	94
Desnudo/Vegetación	2,22	0				
Escasa						

Fuente: Autores.

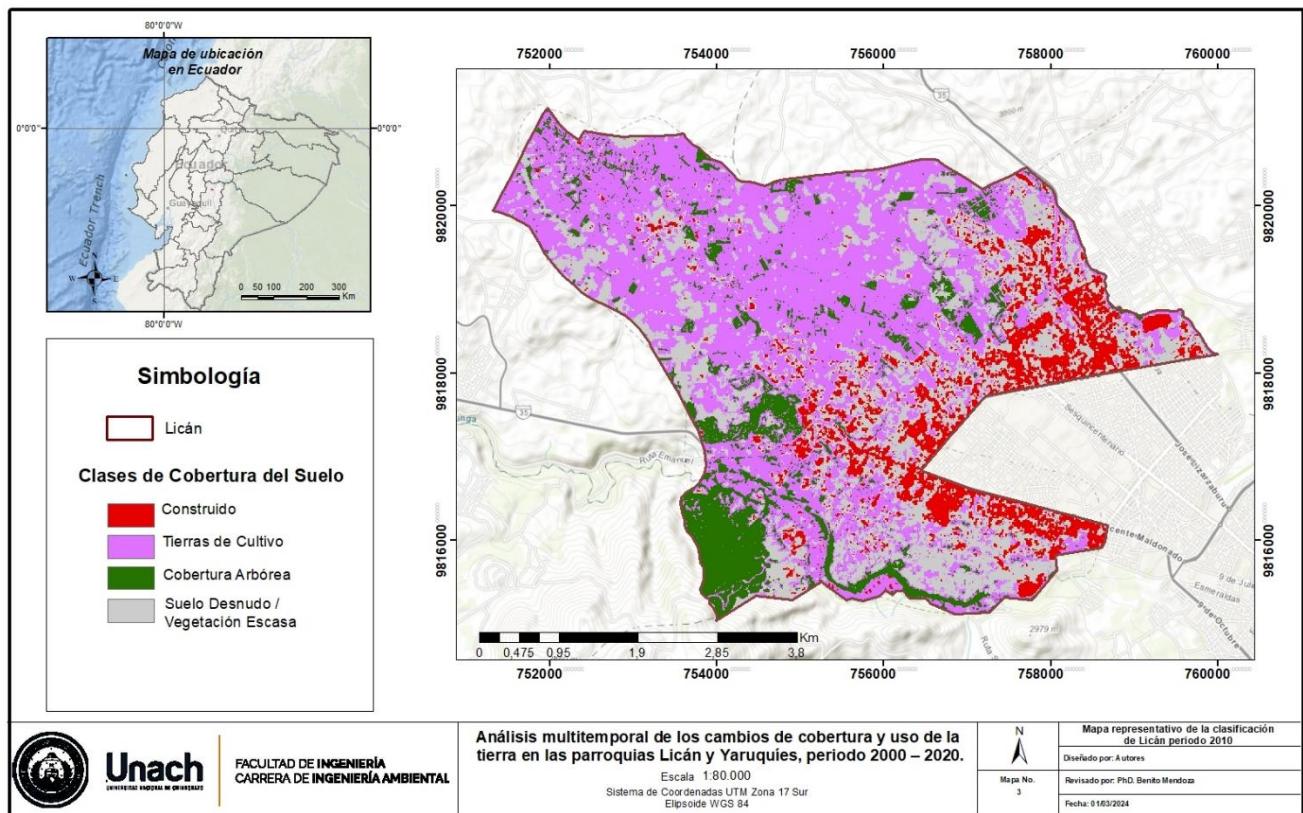
4.1.3.2 Validación de la precisión de datos obtenidos Lican periodo 2010.

La Figura 6 representa la realidad de la parroquia Licán en el periodo 2010 donde se observa un desplazamiento de la clase TC, esto debido al crecimiento urbano de la ciudad de Riobamba y, con ello, se evidenció el avance de la población en la zona de estudio, tanto en el sector agropecuario como en territorio urbano. Además, a diferencia del periodo anterior, en este periodo la clase SD/VE presenta una disminución considerable ya que se vio reemplazada por la clase C y TC, esto es prueba del crecimiento poblacional y del desplazamiento que sufrieron las zonas del cultivo. Cabe destacar la drástica disminución de la clase CA, lo que muestra el cambio drástico del uso del suelo.

En este mapa, el cambio de resolución de imagen es notoria debido al uso de imágenes satelitales SENTINEL-2. Consecuentemente, el algoritmo Random Forest

identifica de mejor manera cada clase, al incrementar la precisión del operador y disminuir la probabilidad de errar al momento de la clasificación supervisada.

Figura 6
Mapa de Licán periodo 2010.



Fuente: Autores.

En la Tabla 15 se presentan los errores o confusiones que generó el programa o el operador en cada clase donde se observan 2 errores totales de comisión; 1 punto de la clase TC se encuentra en CA, y 1 punto de SD/VE se encuentra en TC.

Tabla 15
Matriz de confusión periodo 2010 Licán.

Clases	Suelo						Error de Comisión
	Const ruido	Tierra de Cultivo	Cobertura Arbórea	Desnudo/ Vegetació n Escasa	Total		
Construido	10	0	0	0	10		0
Tierra de Cultivo	0	13	1	0	14		1

Cobertura	0	0	11	0	11	0
Arbórea						
Suelo						
Desnudo/Vegetación	0	1	0	9	10	1
n Escasa						
Total	10	14	12	9	45	
Error de Omisión	0	1	1	0		2

Fuente: Autores.

Según se observa en la Tabla 16 la clasificación del periodo decenal 2010 de Licán, muestra una precisión global del 95% y un índice Kappa del 94%, lo que refleja una concordancia casi perfecta. Se observa que la clase C no presenta errores de comisión ni omisión; la clase TC muestra un error de comisión y omisión de 2,22%; la clase SD/VE presenta un error de comisión de 2,22% y no tiene error de omisión. Por otro lado, la clase CA presenta 2,22% de error de omisión y no presenta error de comisión.

Tabla 16
Índice kappa periodo 2010 Licán.

Clases	Error de Comisión (%)	Error de Omisión (%)	Precisión global (po)	Precisión global (%)	Índice k	Índice k (%)
Construido	0	0				
Tierra de Cultivo	2,22	2,22				
Cobertura Arbórea	0	2,22	0,95	95	0,94	94
Suelo						
Desnudo/Vegetación Escasa	2,22	0				

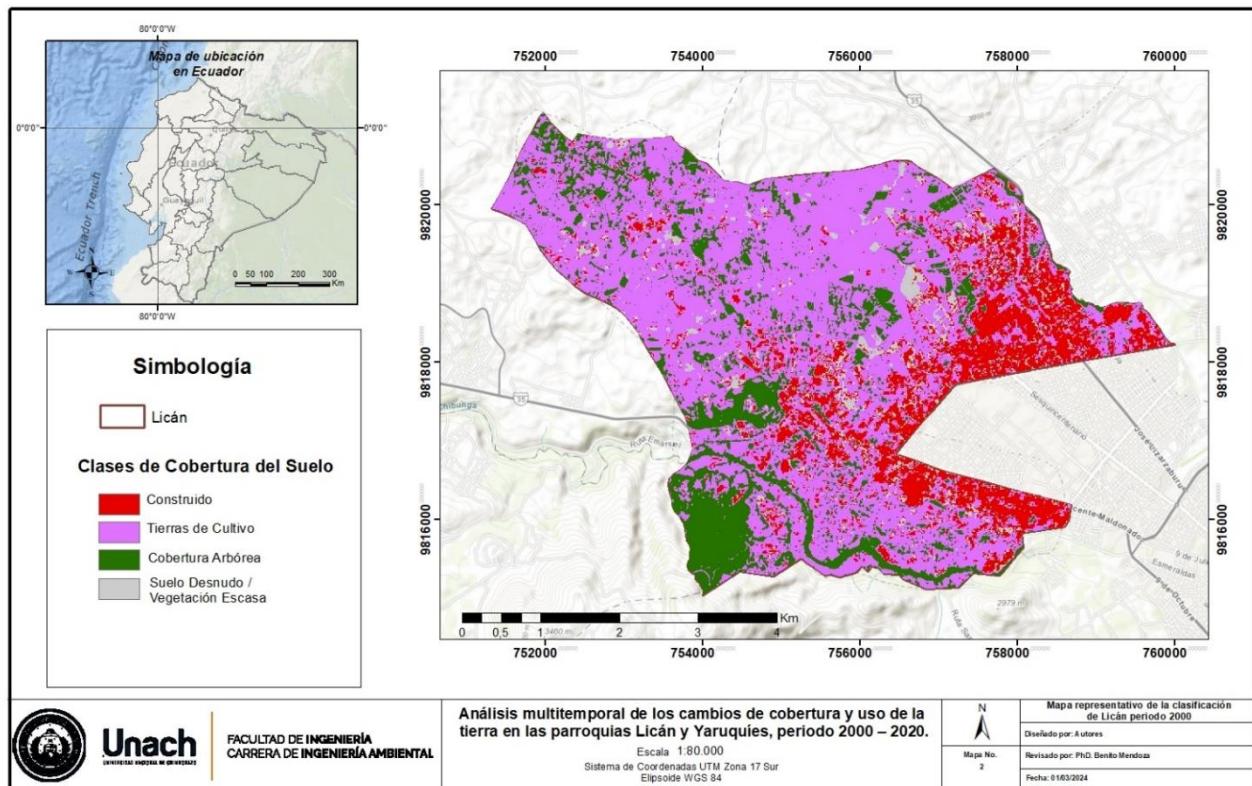
Fuente: Autores.

4.1.3.3 Validación de la precisión de datos obtenidos Lican periodo 2020.

La Figura 7 representa las clases presentes en la parroquia Licán en el año 2020, se evidencia un aumento desmedido en las clases Tierras de Cultivo y Construido, una disminución en la clase Cobertura Arbórea y baja predominancia de la clase Suelo Desnudo o Vegetación Escasa. La Figura 7 representa las clases presentes en la parroquia Licán en el año 2021, en la que la clasificación supervisada y el algoritmo Random Forest evidencian un aumento desmedido en las clases Tierras de Cultivo y Construido, una disminución en la

clase Cobertura Arbórea y baja predominancia de la clase Suelo Desnudo o Vegetación Escasa. Estas alteraciones, se deben al crecimiento urbano y al expansionismo agrícola lo que muestra un inadecuado control territorial.

Figura 7
Mapa de Licán periodo 2020



Fuente: Autores.

En la Tabla 17 se presentan los errores o confusiones que generó el programa o el operador en cada clase donde se observan 2 errores totales de comisión; Los errores encontrados son de la clase SD/VE de los cuales 1 punto pasa por la clase C y 1 punto de a la clase TC.

Tabla 17
Matriz de confusión periodo 2020 Licán.

Clases	Suelo						Error de Comisión
	Construido	Tierra de Cultivo	Cobertura Arbórea	Desnudo/ Vegetación Escasa	Total		
Construido	10	0	0	0	10	0	
Tierra de Cultivo	0	14	0	0	14	0	

Cobertura Arbórea	0	0	11	0	11	0
Suelo						
Desnudo/Vegetación	1	1	0	8	10	2
Escasa						
Total	11	15	11	8	45	
Error de Omisión	1	1	0	0		2

Fuente: Autores.

Según se aprecia en la Tabla 18, la clasificación del periodo decenal 2020 en Licán refleja una precisión global del 95% y un índice Kappa del 94%, con una concordancia casi perfecta. Mientras tanto en la clase C y la clase TC se tiene un error de omisión del 2,22%, en la clase CA no presenta errores de comisión ni de omisión, y la clase SD/VE no tiene error de omisión preo presenta 4,44% de error de comisión.

Tabla 18
Índice Kappa periodo 2020 Licán.

Clases	Error de Comisión (%)	Error de Omisión (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	Índice k	Índice k (%)
Construido	0	2,22				
Tierra de Cultivo	0	2,22				
Cobertura Arbórea	0	0	0,955	95	0,94	94
Suelo						
Desnudo/Vegetación Escasa	4,44	0				

Fuente: Autores.

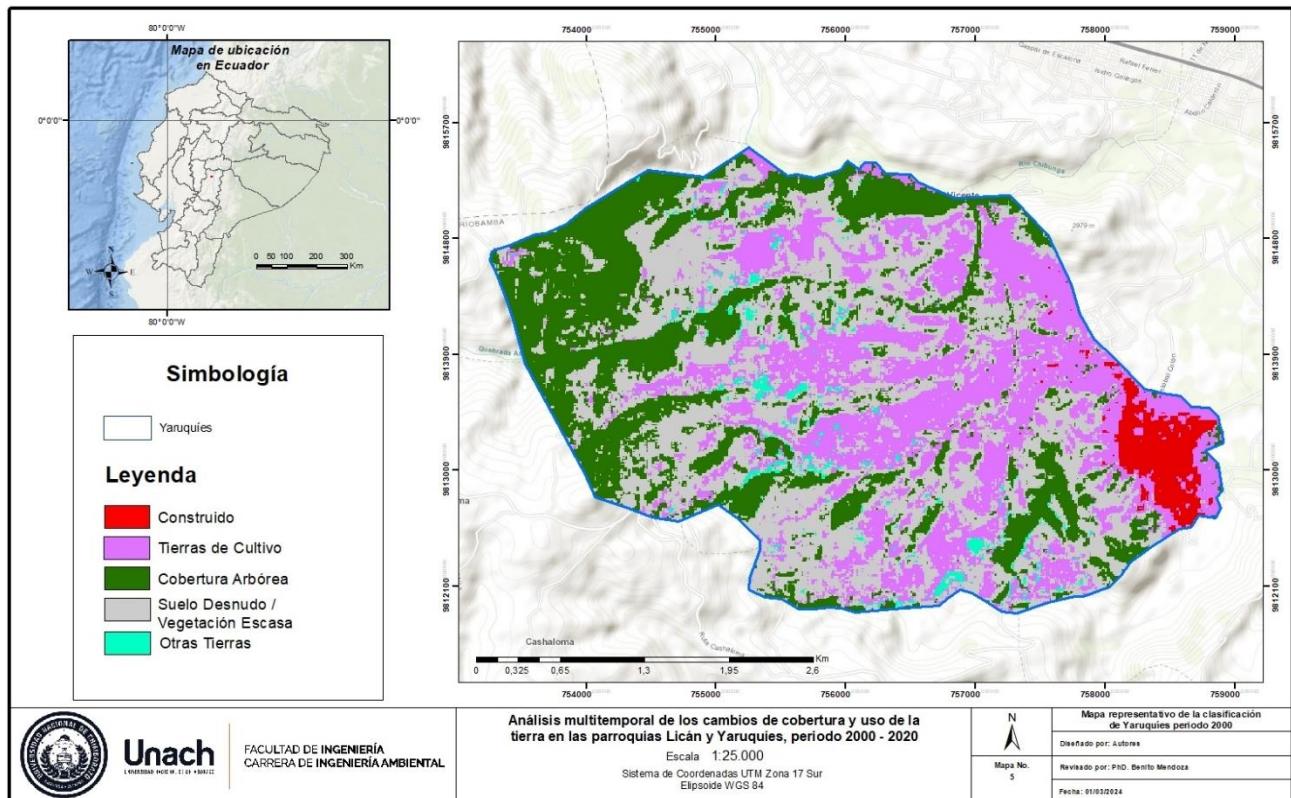
4.1.3.4 Validación de la precisión de datos obtenidos de Yaruquíes periodo 2000.

La Figura 8 representa las clases presentes en la parroquia Yaruquíes en el año 2000. Las clases que predominan son CA, TC y SD/VE. Por otro lado, la clase C abarca una mínima extensión de la parroquia y la clase OT no presenta significancia. Sin embargo, se evidencia una incidencia moderada del sector agrícola en el territorio debido a que presenta mayor amplitud con relación a las otras. Por otro lado, en cuanto a la determinación de las clases, se presentaron dificultades debido a que la imagen satelital que se empleó para este análisis

corresponde a una imagen ASTER la cual posee una resolución de 15 metros, a diferencia de las imágenes SENTINEL-2 que se utilizaron para los otros periodos las cuales poseen 10 metros de resolución.

Figura 8

Mapa de Yaruquíes periodo 2000.



Fuente: Autores.

En la Tabla 19 se presentan los errores o confusiones que generó el programa o el operador en cada clase donde se observan 5 errores totales de comisión; 1 punto de la clase C se encuentran en TC, 1 punto de TC se encuentra en SD/VE, 1 punto de SD/VE ocupa zona de OT, 1 punto de OT forma parte de TC y 1 en SD/VE, mientras que la clase CA no presenta errores.

Tabla 19

Matriz de confusión periodo 2000 Yaruquíes.

Clases	Construido	Tierra de Cultivo	Cobertura Arbórea	Desnudo/ Vegetación Escasa	Suelo	Otra	Error de Comisión
					Desnudo/ Vegetación Escasa	Tieras	
Construido	11	1	0	0	0	0	12

Tierra de Cultivo	0	17	0	1	0	18	1
Cobertura Arbórea	0	0	13	0	0	13	0
Suelo Desnudo/ Vegetación							
Escasa	0	0	0	11	1	12	1
Otras							
Tierras	0	1	0	1	8	10	2
Total	11	19	13	13	9	65	
Error de Omisión	0	2	0	2	1		5

Fuente: Autores.

Como muestra la Tabla 20, la clasificación del año 2000 de Yaruquíes presentó una precisión global del 92% y un índice Kappa de 92% la cual representa una muy buena concordancia. La clase C presenta un error de comisión de 1,53% y no muestra error de omisión; las clases TC y SD/VE presentan un error de comisión de 1,53% y error de omisión de 3,07%, la clase CA no presenta errores de comisión ni omisión; y la clase de OT muestra un error de comisión de 3,07% y error de omisión de 1,53%. Cabe destacar, que debido a la resolución de las imágenes satelitales ASTER, disminuye la precisión y percepción de píxel por parte del operador. Validación de la precisión de datos obtenidos de Yaruquíes periodo 2010.

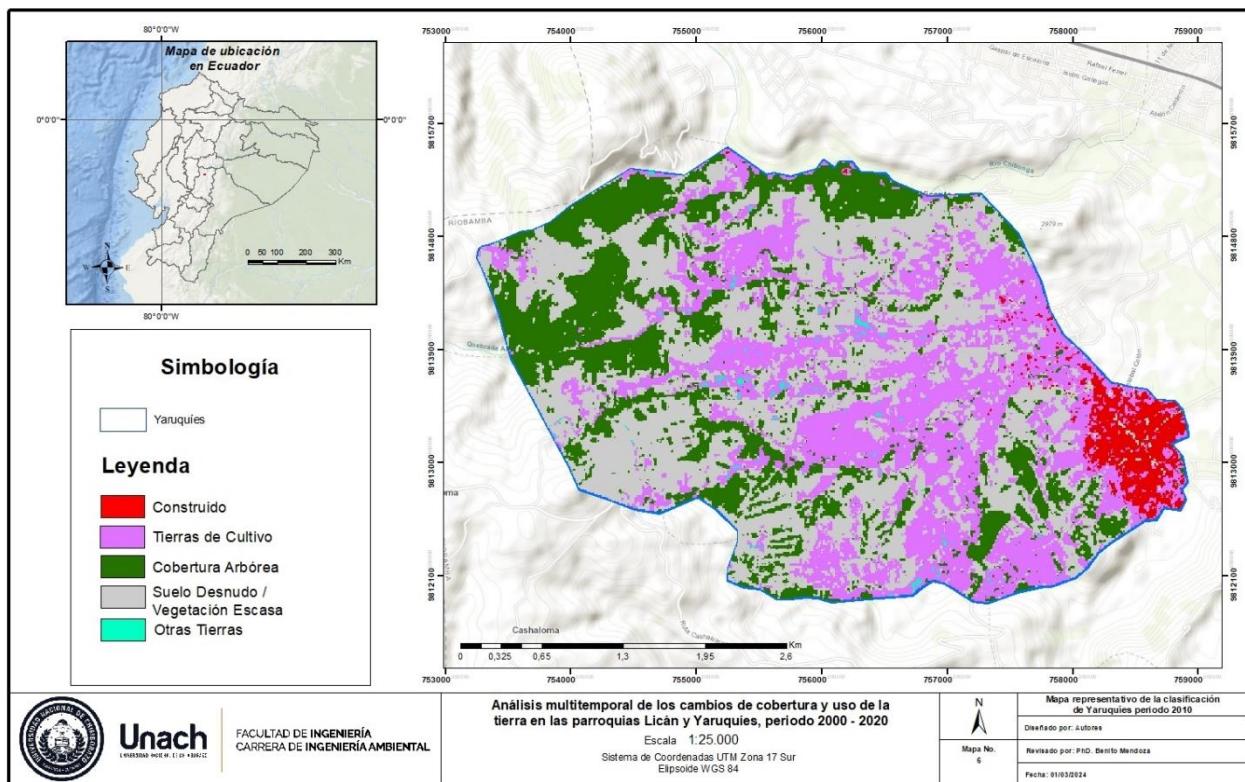
Tabla 20
Índice Kappa periodo 2000 Yaruquíes.

Clases	Error de Comisión (%)	Error de Omisión (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	Índice k	Índice k (%)
Construido	1,53	0				
Tierra de Cultivo	1,53	3,07			0	
Cobertura Arbórea	0	0	0,92	92	9	90
Suelo					0	
Desnudo/Vegetación Escasa	1,53	3,07				
Otras Tierras	3,07	1,53				

Fuente: Autores.

Como se observa en la Figura 9, el cual representa la realidad de la parroquia Yaruquíes para el año 2010, evidencia un incremento de la clase TC lo que muestra mayor predominancia respecto a CA, C y OT. Se nota también un aumento de zonas edificadas correspondientes a la clase C, y un decrecimiento de las otras clases, especialmente en la clase OT, la cual disminuyó significativamente. De igual manera, la clase SD/VE perdió territorio por la expansión de las clases C y TC, pero ganó con la disminución de la clase CA. Cabe destacar, que en este mapa se observa un cambio considerable en la calidad de imagen, esto debido a la resolución que presentan las imágenes SENTINEL-2 (10 metros), como se mencionó anteriormente, lo que da lugar a una mejor percepción de los píxeles.

Figura 9
Mapa de Yaruquíes periodo 2010.



Fuente: Autores.

En la Tabla 21, se muestra la matriz de confusión con los errores que generó el programa u operador en cada clase donde se observan 4 errores totales de comisión; 1 punto de la clase C se encuentran en TC, 1 punto de TC forma parte de SD/VE, 1 punto de SD/VE de muestra como TC, 1 punto de OT pasa como TC, mientras que la clase CA no presenta errores.

Tabla 21*Matriz de confusión periodo 2010 Yaruquíes.*

Clases	Construido	Tierra de Cultivo	Cobertura Arbórea	Suelo		Otra	Tot al	Error de Comisión
				Desnudo/ Vegetación Escasa	s Tier ras			
Construido	11	1	0	0	0	12	1	
Tierra de Cultivo	0	17	0	1	0	18	1	
Cobertura Arbórea	0	0	13	0	0	13	0	
Suelo								
Desnudo/ Vegetación								
Escasa	0	1	0	11	0	12	1	
Otras								
Tierras	0	0	0	1	9	10	1	
Total	11	19	13	13	9	65		
Error de Omisión	0	2	0	2	0		4	

Fuente: Autores.

Como se presenta en la Tabla 22, que representa la clasificación de Yaruquíes en el año 2010, se obtuvo una precisión global del 93,8% y un índice Kappa de 92%, de igual forma, sugiere una muy buena concordancia y una mejora en la precisión de clasificación. La clase C presenta un error de comisión de 1,53% y no muestra error de omisión; la clase TC presenta errores de comisión y omisión de 1,53% y 3,07% respectivamente; la clase CA no presenta errores de comisión y omisión; la clase SD/VE muestra errores de comisión de 1,53% y omisión de 3,07%; y la clase de OT muestra un error de comisión de 1,53% y no presenta error de omisión.

Tabla 22*Índice kappa periodo 2010 Yaruquíes.*

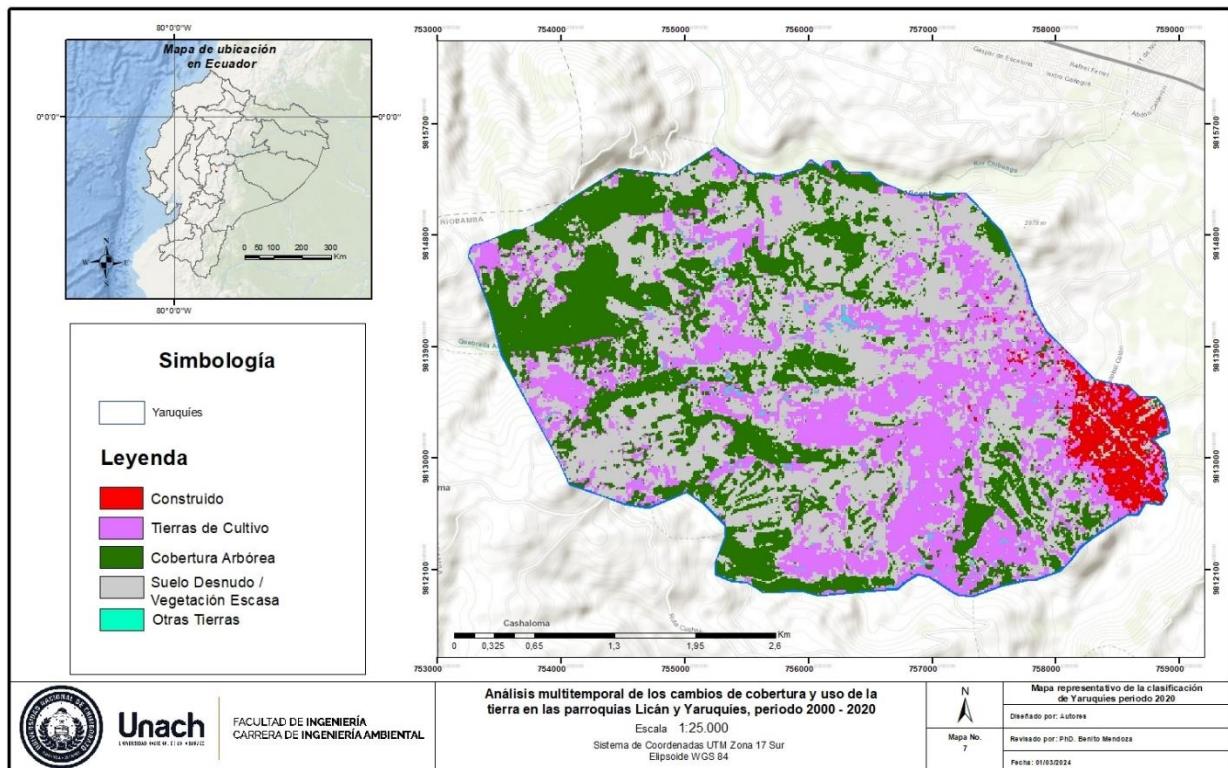
Clases	Error de Comisión (%)	Error de Omisión (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	Índice k	Índice k (%)
Construido	1,53	0				
Tierra de Cultivo	1,53	3,07				
Cobertura Arbórea	0	0	0,938	93,8	0,92	92
Suelo						
Desnudo/Vegetación Escasa	1,53	3,07				
Otras Tierras	1,53	0				

Fuente: Autores.

4.1.3.5 Validación de la precisión de datos obtenidos de Yaruquíes periodo 2020.

En la Figura 10 se observa que en el año 2020 la clase CA creció en relación con el 2010, mientras que la clase TC redujo considerablemente. Esto puede deberse a la reflectancia que presenta la imagen satelital de esos años, vista también en la clase OT, que denota decrecimiento. Del mismo modo, las clases construido y Suelo desnudo o vegetación escaza aumentaron en proporción en cantidad de píxeles, sin embargo, se evidencian errores por parte del programa en la detección de vías y caminos los cuales se perciben como suelo desnudo o vegetación escaza. Del mismo modo, las clases C y SD/VE aumentaron en proporción a la cantidad de píxeles, sin embargo, se evidencian errores por parte del programa en la detección de vías y caminos los cuales se perciben como SD/VE.

Figura 10
Mapa de Yaruqués periodo 2020.



Fuente: Autores.

En la Tabla 23, se muestra la matriz de confusión con los errores que generó el programa u operador en cada clase donde se observan 4 errores totales de comisión; 2 puntos de TC ocupan zona de SD/VE, y 2 puntos de SD/VE ocupan zonas de TC.

Tabla 23
Matriz de confusión periodo 2020 Yaruqués.

Clases	Construido	Tierra de Cultivo	Cobertura Arbórea	Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa	Otras Tierras	Total	Error de Comisión
Construido	12	0	0	0	0	12	0
Tierra de Cultivo	0	16	0	2	0	18	2
Cobertura Arbórea	0	0	13	0	0	13	0
Suelo Desnudo/	0	2	0	10	0	12	2

Vegetación							
Escasa							
Otras							
Tierras	0	0	0	0	10	10	0
Total	12	18	13	12	10	65	
Error de							
Omisión	0	2	0	2	0		4

Fuente: Autores.

La Tabla 24 muestra la precisión global de la clasificación en Yaruquíes en el periodo 2020, con un valor de 93,8% y un índice Kappa de 92% que representa una muy buena concordancia. Las clases C, CA y OT no muestran errores de comisión y omisión, mientras que las clases TC y SD/VE muestran errores de comisión y omisión de 3,07%.

Tabla 24

Índice kappa periodo 2020 Yaruquíes.

Clases	Error de Comisión (%)	Error de Omisión (%)	Precisión global (po)	Precisión global (po %)	Índice k	Índice k (%)
Construido	0	0				
Tierra de Cultivo	3,07	3,07				
Cobertura						
Arbórea	0	0				
Suelo			0,938	93,8	0,92	92
Desnudo/Vegetación Escasa	3,07	3,07				
Otras Tierras	0	0				

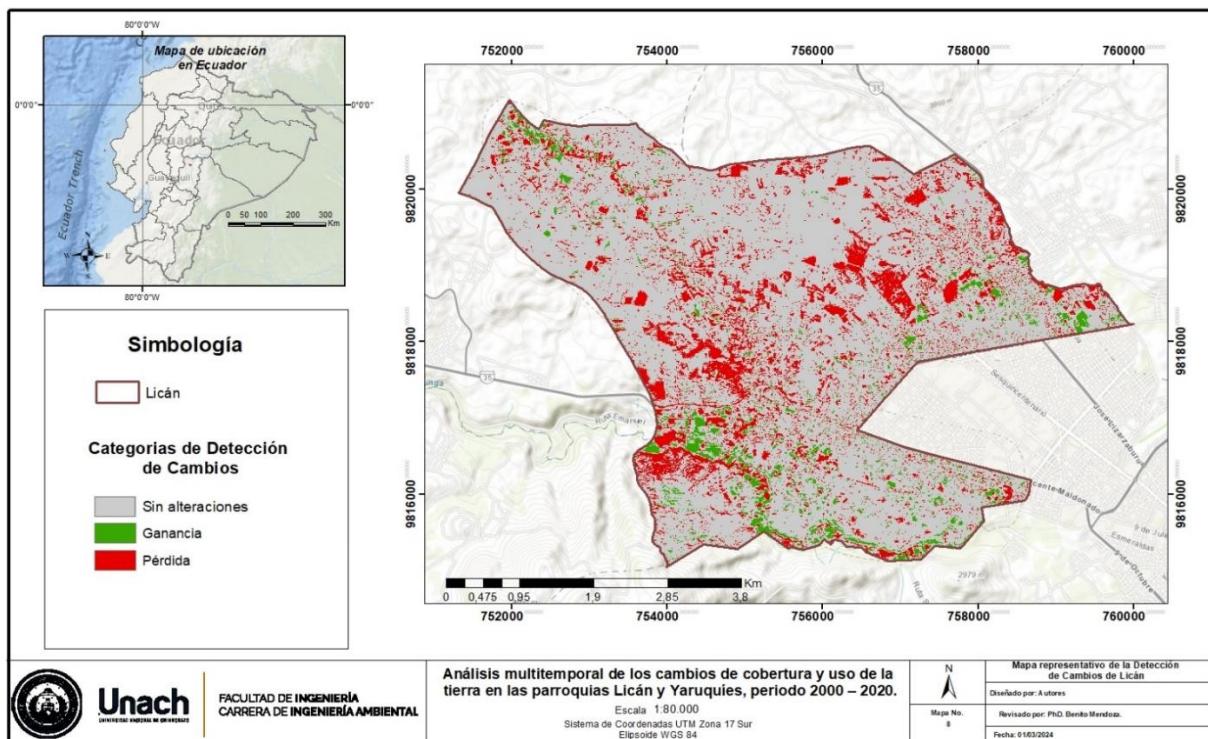
Fuente: Autores

4.1.4 Detección de cambios.

4.1.4.1 Detección de cambios Licán.

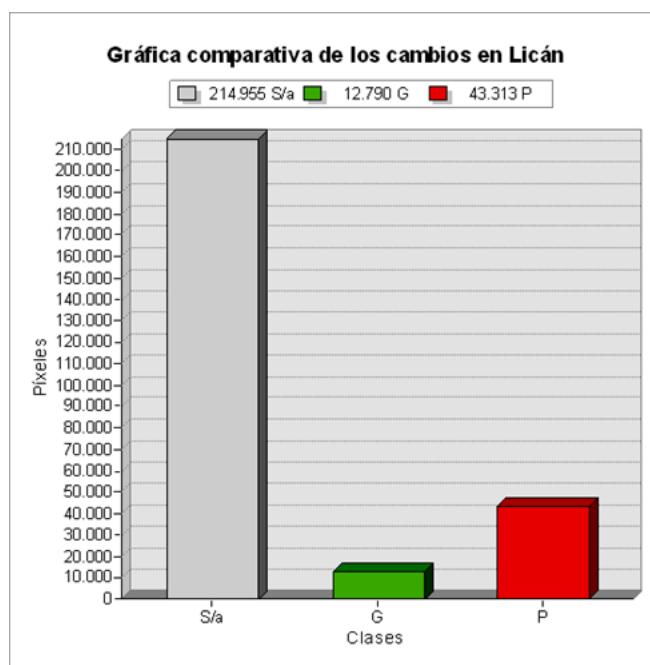
En la Figura 11 se visualizan tres categorías las cuales representan la clasificación de detección de cambios, las cuales son: Sin alteraciones (S/a), Pérdida (P) y Ganancia (G). Para la obtención de este mapa se realizó el análisis de dos distintos periodos decenales (2000 y 2020), en los que se puede observar que hasta el año 2020 presenta mayor terreno perdido con respecto al ganado esto respecto a las áreas verdes que existan en la zona, es por ello por lo que el terreno perdido se centra en las clases de CA y TC. La clase G se presenta en ambas categorías, pero mínimamente. La clase S/a es la que más predomina, seguida de la clase P. Se evidencia en la Figura 12 el conteo de píxeles de dichas clases.

Figura 11
Mapa de detección de cambios Licán.



Fuente: Autores.

Figura 12
Gráfica comparativa de ganancias, pérdidas y persistencias de Licán.

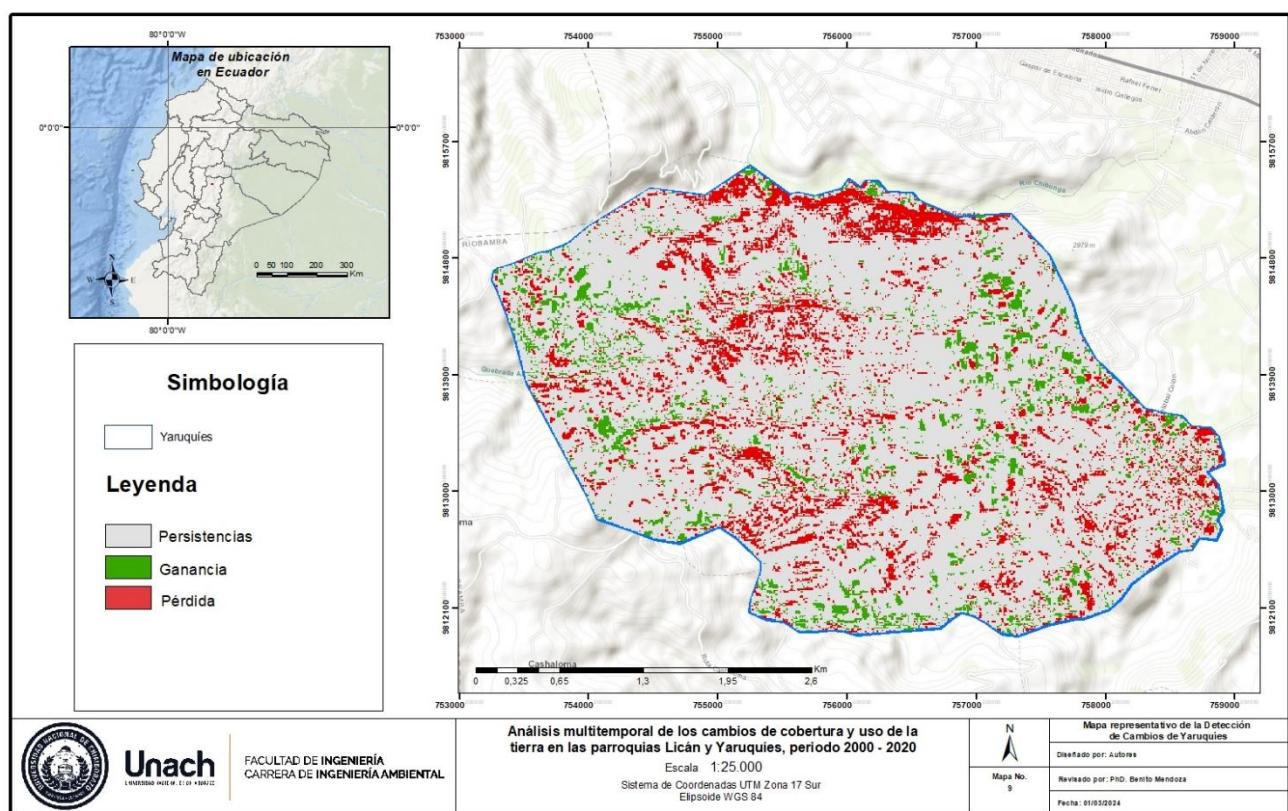


Fuente: Autores.

4.1.4.2 Detección de cambios Yaruquíes.

Para la obtención de la Figura 13 se realizó el análisis entre distintos períodos decenales (2000 al 2020), en los que se muestra la representación de la detección de cambios en función a 3 clases: Sin alteraciones o persistencias (S/a), Ganancias (G) y Pérdidas (P). Con esta se denota la predominancia de la persistencia al cambio, es decir, la clase S/a, al igual que zonas que ganaron (G) y perdieron (P) territorio. Esto se evidencia también con la Figura 14, en la que se compara la cantidad de píxeles correspondientes a cada una de las clases. Cabe destacar, que el análisis de detección de cambios se basa en la determinación de alteraciones en zonas verdes, es decir, las clases TC y CA.

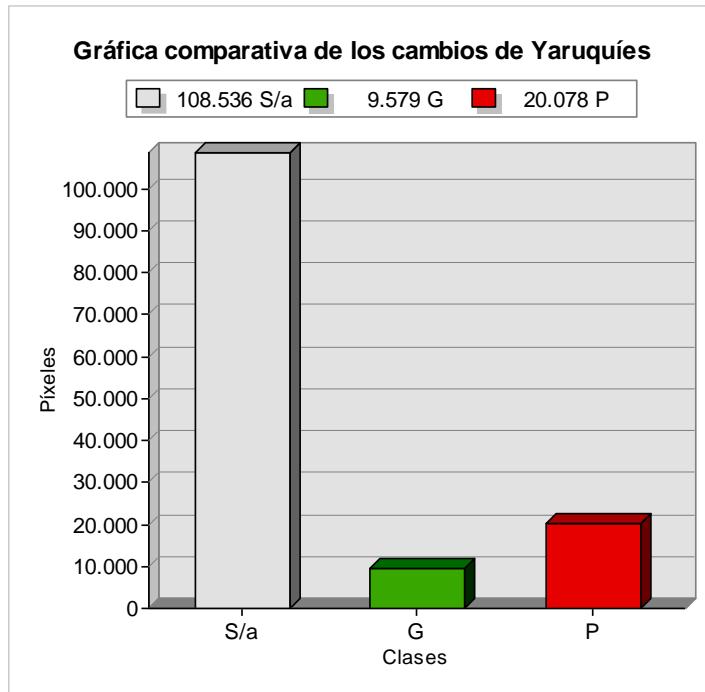
Figura 13
Mapa de Detección de cambios Yaruquíes.



Fuente: Autores.

Figura 14

Gráfica comparativa de ganancias, pérdidas y persistencias de Yaruquíes.



Fuente: Autores.

4.1.5 Velocidad de cambios

Al aplicar la fórmula adaptada de FAO (1984) y Ortiz-Solorio et al. (1994), se obtuvo el porcentaje de uso de cada clase mediante el conteo de píxeles de estas para el último año y el año anterior, es decir, para los años 2020 y 2000 respectivamente de ambas parroquias en base a zonas productivas, debido a que es la prioridad de este estudio.

4.1.5.1 Velocidad de cambios Licán.

En la Tabla 25 al analizar los datos de píxeles obtenidos durante el periodo decenal de 2000 (se observa que la categoría TC es la más predominante, con un total de 127068 píxeles, lo que equivale al 47.17% del área total de la parroquia. Le sigue la categoría SD/VE, con 779546 píxeles, con el 28.78%. Por otro lado, la categoría CA cuenta con 62682 píxeles, que constituye el 23.27% del territorio y la categoría C, que comprende la clase con menor presencia solo 2064 píxeles, que representa apenas el 0.76% del territorio de Licán durante este período. Asimismo, se presenta una gráfica comparativa en la Figura 15.

Tabla 25

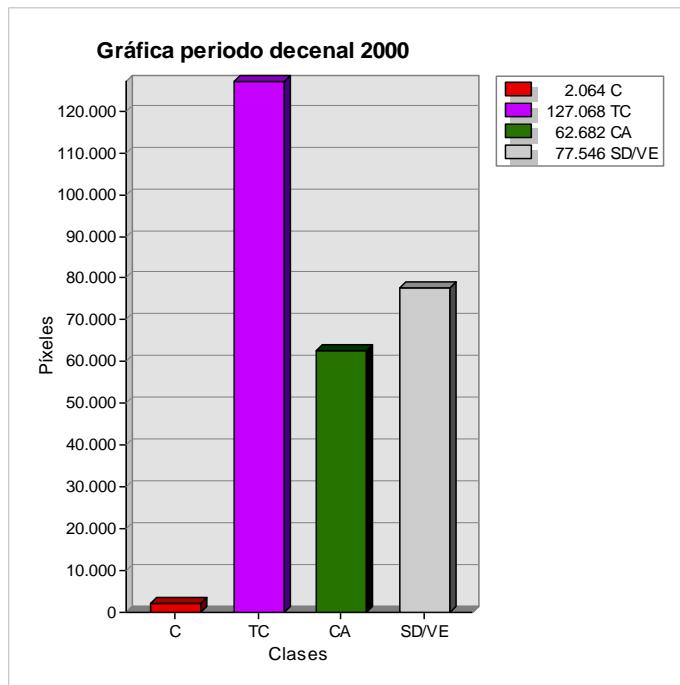
Conteo de píxeles Licán periodo 2000.

Periodo 2000	Conteo de píxeles	Porcentaje
Construido	2064	0,76%
Tierra de Cultivo	127068	47,17%
Cobertura Arbórea	62682	23,27%
Suelo Desnudo/Vegetación Escasa	77546	28,78%
Total	269360	100%

Fuente: Autores.

Figura 15

Gráfica de píxeles Licán periodo 2000.

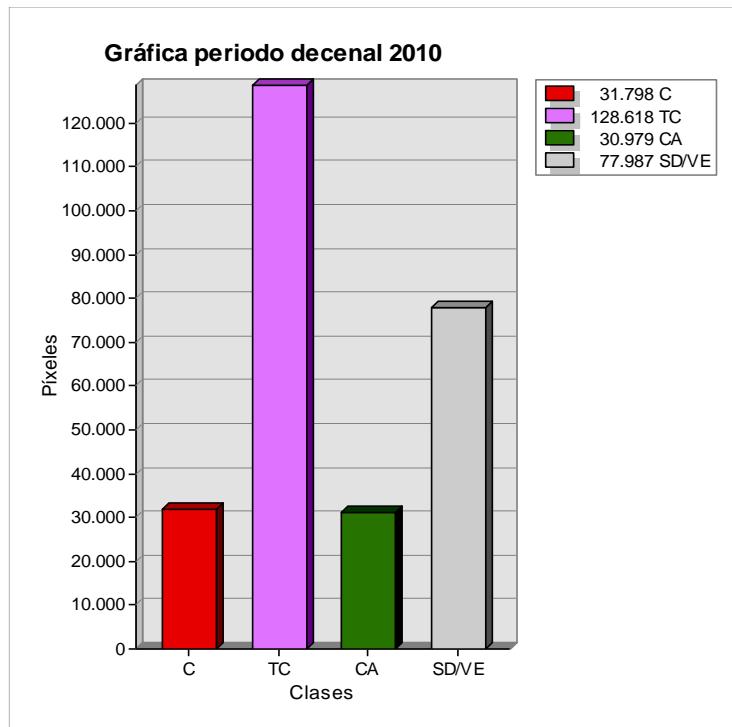


Fuente: Autores.

Según los datos de la Tabla 26, se observa que la clase TC es la más prevalente, con un total de 128618 píxeles, lo que representa el 47.74% del área total. Asimismo, la clase SD/VE muestra una presencia significativa con 77987 píxeles, equivalente al 28.95%, le sigue la clase C con 31,798 píxeles equivalente a 11.80%, y la clase CA con 30,979 píxeles, lo que constituye el 11.50% del territorio. Dichos valores se aprecian en la comparativa de la Figura 16.

Tabla 26*Conteo de píxeles Licán periodo 2010.*

Periodo 2010	Conteo de píxeles	Porcentaje
Construido	31798	11,80%
Tierra de Cultivo	128618	47,74%
Cobertura Arbórea	30979	11,50%
Suelo Desnudo/Vegetación Escasa	77987	28,95%
Total	269360	100%

Fuente: Autores.**Figura 16***Gráfica de píxeles Licán periodo 2010.**Fuente:* Autores.

En base a la Tabla 27, se observa que la clase TC es la más predominante, con un total de 128618 píxeles, lo que representa el 58.91% del área total. Además, la clase SD/VE se destaca como la segunda más importante en este período, con un total de 77987 píxeles. Por otra parte, las clases C y CA muestran niveles no muy distantes, con 31798 y 30979 píxeles respectivamente. Dichos valores se aprecian en la Figura 17.

Tabla 27

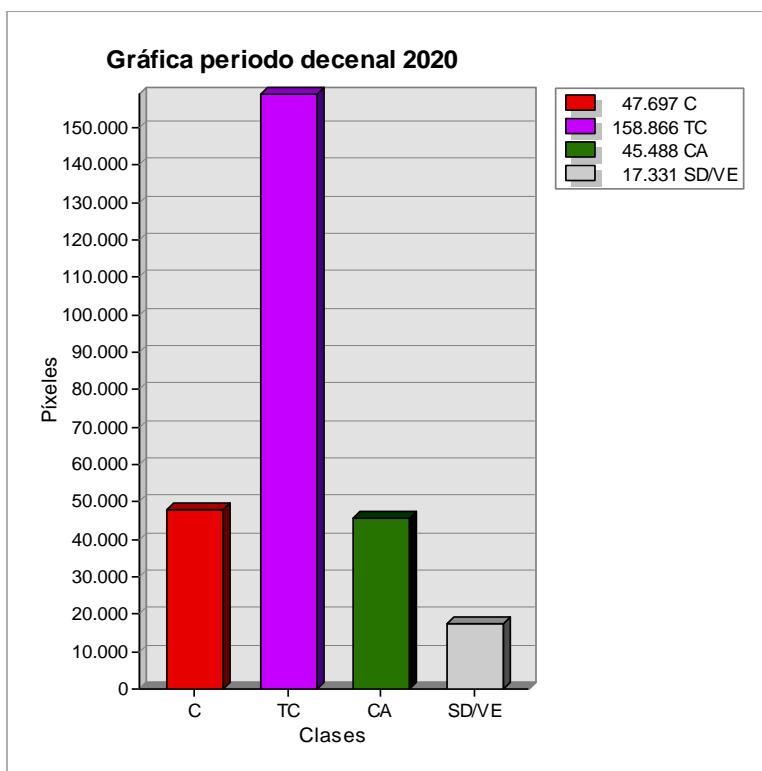
Conteo de píxeles Licán periodo 2020.

Periodo 2020	Conteo de píxeles	Porcentaje
Construido	47967	17,78%
Tierra de Cultivo	158866	58,91%
Cobertura Arbórea	45488	16,86%
Suelo Desnudo/Vegetación Escasa	17331	6,42%
Total	269652	100%

Fuente: Autores.

Figura 17

Gráfica de píxeles Licán periodo 2020.



Fuente: Autores.

Como se muestra en la Tabla 28 la rápida transformación en Licán resulta en una degradación del 4,67% para la clase C, con un aumento notable en áreas urbanizadas durante el período. En la clase TC, se observa un incremento leve del 0,06%, lo que indica una expansión y para la clase SD/VE, la degradación es mínima, solo un 0,03%. Sin embargo, en la clase CA se registra una degradación ligera del 1,12%. Además, no existe un cambio

considerable en áreas de cultivo durante las últimas dos décadas, sin embargo, ha sido un factor clave para la evolución de la parroquia Licán en su zona productiva.

Tabla 28

Velocidad del ID de clases del uso y cobertura del suelo en Licán.

Construido		Tierra de Cultivo		Cobertura Árborea		Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa	
ID	ID en %	ID	ID en %	ID	ID en %	ID	ID en %
93,50	4,67	1,19	0,06	22,34	1,12	0,56	0,03

Fuente: Autores.

4.1.5.2 Velocidad de cambios Yaruquíes.

Como se observa en la Tabla 29, la clase predominante en el periodo 2000 de la clasificación de Yaruquíes es SD/VE con 52365 píxeles, le siguen las clases TC y CA con 40077 y 37819 píxeles respectivamente, y las clases que no presentan alta significancia dentro de la zona de estudio son las clases C con 4417 píxeles y la clase OT con 2652 píxeles. Sin embargo, la resolución de la imagen satelital ASTER hace que la clase OT presente mayor extensión que la que realmente tiene. Además, dicha comparación se muestra en la Figura 18.

Tabla 29

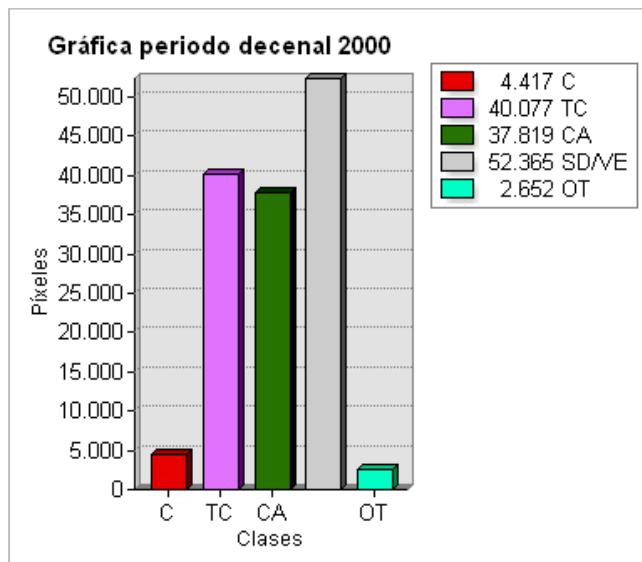
Conteo de píxeles Yaruquíes periodo 2000.

Periodo 2000	Conteo de píxeles	Porcentaje
Construido	4417	3,21 %
Tierra de Cultivo	40077	29,18 %
Cobertura Arbórea	37819	27,54 %
Suelo Desnudo/Vegetación Escasa	52365	38,13 %
Otras Tierras	2652	1,93%
Total	137330	100%

Fuente: Autores.

Figura 18

Gráfica de píxeles de Yaruquíes periodo 2000.



Fuente: Autores.

En la Tabla 30, se nota un incremento en las clases C, TC y SD/VE con 5089, 42855 y 56829 píxeles respectivamente, y una disminución en las clases CA que presenta 31979 y OT con 590 píxeles. Esto evidencia que en la clase OT expuesta en la Figura 16 presentaba confusiones en la clase SD/VE, lo que explica la disminución dramática de esta clase en el periodo 2010. Por otro lado, el decaimiento de la clase CA puede deberse al aumento de la clase C y TC. Se aprecia la comparación en la Figura 19.

Tabla 30

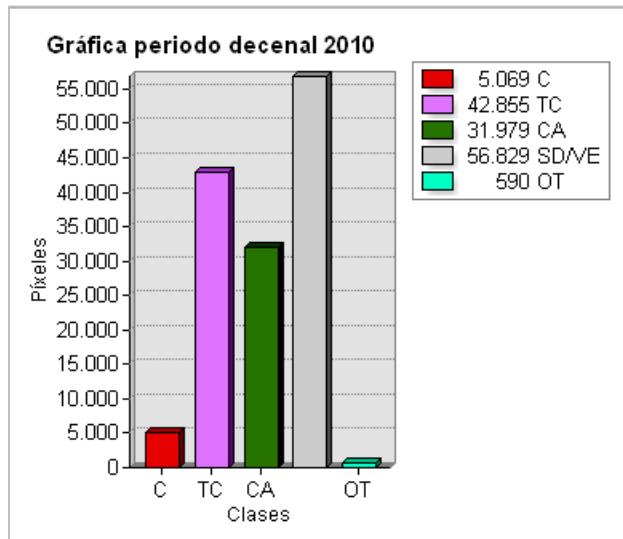
Conteo de Píxeles Yaruquíes periodo 2010.

Periodo 2000	Conteo de píxeles	Porcentaje
Construido	5069	3,69 %
Tierra de Cultivo	42855	31,20 %
Cobertura Arbórea	31979	23,28 %
Suelo Desnudo/Vegetación Escasa	56829	41,38 %
Otras Tierras	590	0,42 %
Total	137330	100%

Fuente: Autores.

Figura 19

Gráfica de píxeles de Yaruquíes periodo 2010.



Fuente: Autores.

Con respecto a la Tabla 31, se observa un aumento mínimo de la clase C y OT con 5079 y 600 píxeles respectivamente, mientras que la clase CA creció de 31979 píxeles en el periodo 2010 a 38751 píxeles para el periodo 2020. Por otro lado, las clases TC y SD/VE presentan un decrecimiento notorio con 38286 píxeles en la clase TC y 54606 píxeles en SD/VE. Su gráfica comparativa se aprecia en la Figura 20.

Tabla 31

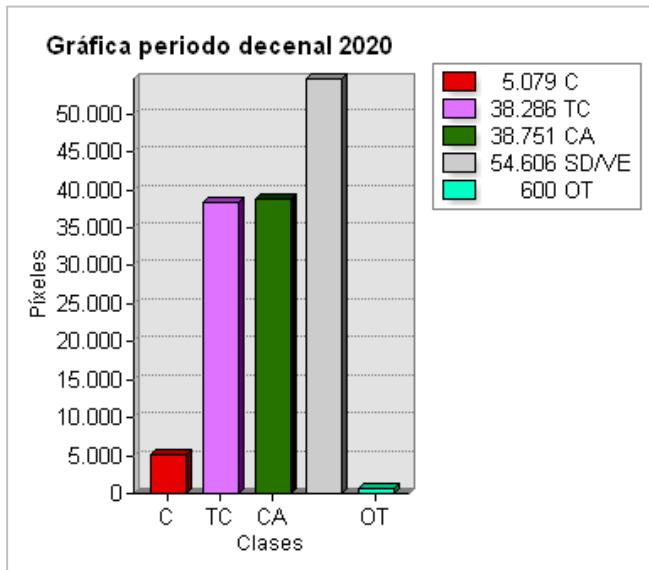
Conteo de píxeles Yaruquíes 2020.

Periodo 2020	Conteo de píxeles	Porcentaje
Construido	5079	3,69%
Tierra de Cultivo	38286	27,88%
Cobertura Arbórea	38751	28,20%
Suelo Desnudo/Vegetación Escasa	54606	39,80%
Otras Tierras	600	0,43%
Total	137322	100,00%

Fuente: Autores.

Figura 20

Gráfica del periodo 2020 Yaruquíes



Fuente: Autores.

La Tabla 32 representa la velocidad de cambios de Yaruquíes, en el que el índice de degradación para la clase C, TC y SD/VE es de 13,03, 4,66 y 4,10 respectivamente. Estos corresponden a una degradación ligera (L) debido a que su ID porcentual (0,65%, 0,23% y 0,20%) entran en el rango propuesto por FAO (1984). Por otra parte, para las clases CA y OT se evidencian valores menores a 0,01 categorizándolas como Recuperación (R). Sin embargo, para la clase OT, la valoración es errónea debido al cambio drástico de resoluciones en las imágenes satelitales empleadas, vistas en las Figuras 9, 10 y 11, lo que conlleva también a la confusión de píxeles. Asimismo, puede deberse a que en ese momento se haya presentado una época seca, lo que incrementa las zonas descubiertas y el programa las haya clasificado como OT.

Tabla 32

Velocidad del ID de clases del uso y cobertura del suelo en Yaruquíes.

Construido		Tierra de Cultivo		Cobertura Árborea		Suelo Desnudo/ Vegetación Escasa		Otras Tierras	
ID	ID %	ID	ID %	ID	ID %	ID	ID %	ID	ID %
13,03	0,65	4,66	0,23	-2,40	-0,12	4,10	0,20	-342	-17,1

Fuente: Autores

4.1.6 Patrones de cambio.

A continuación, se presentan las tablas representativas de las ganancias y pérdidas de territorio en hectáreas de cobertura y uso del suelo para las clases de las parroquias Licán y Yaruquíes.

4.1.6.1 Patrones de cambio de Licán

En la Tabla 33, se presentan las extensiones de tierra ganadas y perdidas en hectáreas en la parroquia Licán de los periodos decenales 2000 y 2010 para diferentes clases de cobertura y uso de la tierra. Esta, muestra que la clase C tuvo un aumento de 304,65 hectáreas, la clase TC ganó 609,89 hectáreas, la clase CA registraron un aumento de 152,47 hectáreas, la clase SD/VE tuvo un incremento de 457,89 hectáreas. Sin embargo, se tienen pérdidas de 8,13 hectáreas en la clase C, de 596,44 hectáreas en la clase TC, de 467,16 en la clase CA y de 453,17 hectáreas en la clase SD/VE.

Para los siguientes periodos decenales 2010 y 2020 en la Tabla 34, se observa una ganancia de 226,3 hectáreas para la clase C, 549,57 hectáreas para la clase TC, 200,14 hectáreas para la clase CA, y 78,06 hectáreas para la clase SD/VE; y se perdieron 63,55 hectáreas, 238,65 hectáreas, 60,05 hectáreas y 691,82 hectáreas, respectivamente. Es decir, se aprecian similitudes en las ganancias y pérdidas en la clase TC, pero existe una diferencia radical en las clases SD/VE y C.

Los valores resaltados con negrita representan las persistencias, es decir, aquella área en hectáreas que se mantuvieron a lo largo del periodo. Para el caso 2000-2010, la clase C permanecieron con 10,67 ha, sin embargo, esta clase no puede cambiar a otras y se considera un error de clasificación, marcados con color rojo. Por otro lado, la clase TC permaneció con 680,41 ha, 126,08 ha pasan a C, la clase CA adquiere 132,8 ha, y la clase SD/VE se lleva 337,56 ha. Además, la clase CA persiste con 151,92 ha, 34,82 ha cambian a C, 317,98 ha pasan a TC, y 114,36 ha a SD/VE. Por último, la clase SD/VE persiste con 322,03 ha, la clase C gana 143,75 ha, la clase TC agrega 290,08 ha y la clase CA aumenta 19,34 ha.

Las alteraciones del periodo 2010-2020 se ven modificadas por el transcurso del tiempo, donde persisten 251,82 ha de la clase C, 1052,23 ha en TC, 244,7 ha en CA y 87,59 ha en SD/VE. No obstante, la clase C presenta el error antes mencionado. En la clase TC cambian 41,87 ha a C, 171,61 ha a CA y 25,17 ha a SD/VE. Para la clase CA se lleva un 2,29

ha a C, 51,69 a TC y 6,07 ha a SD/VE. Finalmente, para la clase SD/VE cambian 1182,14 ha a C, 481,24 ha a TC y 28,44 a CA. Dichas alteraciones evidencian el crecimiento de la clase CA, como resultado del incremento desmedido de edificaciones y la necesidad de usar zonas para diversas actividades humanas, este es un patrón que se evidencia en ambas tablas.

Tabla 33

Matriz de Pontius periodo 2000-2010 para Licán

		Periodo 2000				Total Inicial	Pérdida
Periodo 2010		C	TC	CA	SD/VE		
	C	10,67	1,83	0,33	5,97	18,8	8,13
	TC	126,08	680,41	132,8	337,56	1276,85	596,44
	CA	34,82	317,98	151,92	114,36	619,08	467,16
	SD/VE	143,75	290,08	19,34	322,03	775,2	453,17
	Total Final	315,32	1290,3	304,39	779,92	2689,93	
	Ganancia	304,65	609,89	152,47	457,89		

Fuente: Autores.

Tabla 34

Matriz de Pontius periodo 2010-2020 para Licán.

		Periodo 2010				Total Inicial	Pérdidas
Periodo 2020		C	TC	CA	SD/VE		
	C	251,82	16,64	0,09	46,82	315,37	63,55
	TC	41,87	1052,23	171,61	25,17	1290,88	238,65
	CA	2,29	51,69	244,7	6,07	304,75	60,05
	SD/VE	182,14	481,24	28,44	87,59	779,41	691,82
	Total Final	478,12	1601,8	444,84	165,65	2690,41	
	Ganancias	226,3	549,57	200,14	78,06		

Fuente: Autores.

4.1.6.2 Patrones de cambio de Yaruquíes.

En la Tabla 35 se detallan las extensiones de tierra ganadas y perdidas en la parroquia de Yaruquíes para diferentes clases de uso en el periodo 2000-2010, mostrando que las clases C experimentaron un aumento de 17,09 hectáreas, las clases TC incrementaron en 196,97

hectáreas, las clases CA registraron un aumento de 113,2 hectáreas, las clases SD/VE vieron un incremento de 268,40 hectáreas, mientras que las clases OT experimentaron un aumento de 4,36 hectáreas. Sin embargo, se observaron pérdidas de 10,39 hectáreas, 167,78 hectáreas, 172,69 hectáreas, 224,98 hectáreas y 24,18 hectáreas, respectivamente, para las mismas categorías.

Por otro lado, en la Tabla 36 se presentan los cambios en la extensión de tierra para las clases mencionadas en la parroquia de Yaruquíes para el periodo 2010-2020, donde se observa un aumento de 10,86 hectáreas para la clase C, 140,76 hectáreas para la clase TC, 154,66 hectáreas para la clase CA, 200,06 hectáreas para la clase SD/VE y 4 hectáreas para la clase OT. Sin embargo, también se registran pérdidas de 10,56 hectáreas, 188,30 hectáreas, 86,20 hectáreas, 221,20 hectáreas y 4,07 hectáreas, respectivamente, para las mismas categorías.

Además, los valores resaltados representan las persistencias, es decir, aquella área en hectáreas que se mantuvo a lo largo del periodo. Para el caso 2000-2010, la clase C permaneció con 33,71 ha, sin embargo, las hectáreas restantes cambian a TC, CA, SD/VE y OT, pero estas son consideradas errores de clasificación al igual que ocurre con la clase OT, que persiste con 0,73 ha, pero no puede cambiar a otras, por ello se marcan de color rojo y denotan valores no significativos. Por el contrario, la clase TC persiste con 232,91 ha, 15,38 ha pasan a formar parte de la clase C, 19,68 ha pasan a CA, y 130,90 ha a SD/VE. En cuanto a la clase CA, muestra una persistencia de 203,94 ha y alteraciones a las clases C con 1,03 ha, TC con 42,49 ha, y SD/VE con 128,29 ha; para SD/VE, se mantienen 300,11 hectáreas de terreno y cambian 0,68 ha a C, 132,93 ha a TC, y 89,73 a CA.

Para el periodo 2010-2020, estas alteraciones se ven modificadas por el transcurso del tiempo pasando las persistencias de las clases C, TC, CA, SD/VE y OT a 40,25 ha, 241,67 ha, 231,06 ha, 347,29 ha y 1,03 ha respectivamente. De la clase TC cambian 9,35 ha a la clase C, 48,75 ha a CA y 127,05 ha a SD/VE; en la clase CA pasan 0,08 ha a C, 19,05 a TC y 67 ha a SD/VE; y para SD/VE cambian 1,40 ha a C, 113,46 ha a TC y 105,57 a CA. Dichas alteraciones evidencian el crecimiento de la clase CA, vista en la Figura 18, a consecuencia de la pérdida o alteración de las clases TC y SD/VE que denotan decrecimiento. También, muestran el mantenimiento de las clases C y OT entre el periodo 2010-2020 al no presentar cambios significativos en dichas clases.

Tabla 35*Matriz de Pontius periodo 2000-2010 para Yaruqués.*

Periodo 2000								
Periodo 2010	C	TC	CA	SD/VE	OT	Total Inicial	Pérdidas	
	C	33,71	8,37	0,04	1,95	0,02	44,09	10,39
	TC	15,38	232,91	19,68	130,90	1,82	400,69	167,78
	CA	1,03	42,49	203,94	128,29	0,89	376,63	172,69
	SD/VE	0,68	132,93	89,73	300,11	1,63	525,09	224,98
	OT	0,00	13,17	3,74	7,27	0,73	24,91	24,18
	Total Final	50,80	429,87	317,14	568,51	5,09	1371,41	
Ganancias	17,09	196,97	113,20	268,40	4,36			

Fuente: Autores.**Tabla 36***Matriz de Pontius periodo 2010-2020 para Yaruqués*

Periodo 2010								
Periodo 2020	C	TC	CA	SD/VE	OT	Total Inicial	Pérdidas	
	C	40,25	5,84	0,17	4,55	0,01	50,81	10,56
	TC	9,35	241,67	48,75	127,05	3,15	429,97	188,30
	CA	0,08	19,05	231,06	67,00	0,07	317,26	86,20
	SD/VE	1,40	113,46	105,57	347,29	0,77	568,49	221,20
	OT	0,03	2,41	0,16	1,47	1,03	5,10	4,07
	Total Final	51,11	382,42	385,72	547,35	5,03	1371,63	
Ganancias	10,86	140,76	154,66	200,06	4,00			

Fuente: Autores.

4.2 Discusión

Con el análisis y cuantificación de los cambios se obtuvo la realidad de las parroquias Licán y Yaruquíes en cuanto a la cobertura y uso de la tierra. En el último periodo, de acuerdo con la matriz de Pontius, Licán presentan un crecimiento urbano de 8,41% y un aumento de tierras de cultivo de 58,91% debido a que dichas zonas estaban concentradas en Riobamba y con la expansión urbana, se han visto desplazadas a las parroquias rurales. La cobertura arbórea creció en 16,53% y se debe a que hay zonas que dejaron de ser intervenidas. Por otro lado, respecto a las pérdidas de cobertura, la clase Construido perdió 2,36% de territorio, tierras de cultivo perdió un 52,58%, cobertura arbórea se tiene una pérdida de 12,73%, y se evidencia una pérdida de suelo desnudo en 25,14% al ser reemplazadas por edificaciones y zonas agrícolas.

Sin embargo, en el caso de Yaruquíes, las zonas de cultivo ganan 10,26% y se evidencia un incremento de cobertura arbórea de 11,27%, suelo desnudo en 14,58% y zonas urbanas con 0,79%; en cuanto a pérdidas de cobertura, la clase tierras de cultivo perdió 31,34% debido al aumento de la clase cobertura arbórea. También, la clase cobertura arbórea presenta pérdidas de 23,13% y suelo desnudo de 41,44%. La clase SD/VE presenta esa pérdida debido al avance de las clases cobertura arbórea, tierras de cultivo, y mínimamente en zonas construidas.

Es importante destacar que en ambas zonas de estudio se evidencian cambios en la cobertura del suelo por ello es fundamental entender la importancia de la correcta planificación territorial, ya que en estas zonas su potencial, en un principio, recaía en las zonas de cultivo e invernaderos para el abastecimiento del centro de la provincia de Chimborazo y esto se ha visto alterado de manera radical, en el caso de Licán, trasladando las zonas de cultivo a esta parroquia, y en Yaruquíes, perdiendo estas zonas pero en menor proporción, además de que pese a estas alteraciones, se evidencia una recuperación leve de la cobertura arbórea.

Cabe destacar que Yaruquíes ha sido un reto, debido a la dificultad en el acceso para observación In Situ y la escasa información de la zona por parte de las autoridades, incluso con respecto a los propios límites de la parroquia. Por otro lado, la utilización de imágenes satelitales para la clasificación y detección de cambios no llegan a ser suficientes. Se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) como parte de las bandas de detección en la programación en Google Earth Engine para que perciba de mejor manera zonas altas y evite confusiones, en especial con las imágenes satelitales de ASTER L1 Radiance. Asimismo, al

añadir otra clase para el sector de Yaruquíes (OT) e implementar el DEM, la confusión de píxeles que existía entre las clases OT y C se redujo prácticamente en su totalidad. Sin embargo, el análisis del año 2000 si fue un reto, sobre todo por la resolución y colores de cada píxel, que hizo difícil al programa y operador determinar las zonas correspondientes a la clase OT.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

Con la implementación del software Google Earth Engine, imágenes satelitales, y el algoritmo Random Forest se determinó que en las últimas dos décadas existen cambios marcados en cada una de las clases empleadas (Construido, Tierras de cultivo, Cobertura arbórea, Suelo desnudo o Vegetación escaza, y en el caso de Yaruquíes, la clase extra Otras tierras). Además, la aplicación de un modelo de elevación digital facilitó la detección de píxeles en zonas altas debido a que sin utilizarlo eran confundidos por el software otorgándoles clases equívocas. También, con la función de gráficas del software ArcGIS 10.8, se cuantificaron los cambios en función a los píxeles y hectáreas de cada clase para ambas zonas de estudio, lo que permitió conocer el nivel de degradación de estas en los últimos 20 años. Asimismo, el análisis de velocidad de cambios trajo consigo una mejor comprensión de las alteraciones al suelo debido a que se vuelve indispensable conocer que tan rápido puede perjudicarse un determinado territorio en base a la influencia de varios factores, en especial la incidencia del ser humano.

Licán, según los datos obtenidos del año 2000, no presentaba significancia en las zonas actualmente urbanas, la mayoría correspondía a SD/VE y CA. No obstante, en la actualidad, gracias a las imágenes SENTINEL-2 se comprobó que las áreas urbanas se expandieron ampliamente en toda la parroquia, y con ello, las zonas de cultivo. Por otro lado, Yaruquíes no cambió significativamente en sus zonas habitadas, sin embargo, sus alteraciones predominan en la disminución de las clases SD/VE y TC, y aumento de la clase CA. También, gracias a la nueva clase OT, disminuyó los errores por confusión en la clasificación por parte del programa GEE al volver sus resultados más precisos.

Finalmente, se determinaron los patrones de cambio con la matriz adaptada de Pontius, que fue crucial para entender el desplazamiento de las alteraciones de cada clase y los errores que presentó la clasificación.

5.2 Recomendaciones

Para el análisis multitemporal con imágenes satelitales, es recomendable que dichas imágenes tengan la misma resolución para cada periodo de tiempo, de lo contrario, esto hará que la clasificación presente confusiones y más porcentaje de error. Sin embargo, en el caso de esta investigación, debido a que en el año 2000 no se contaba con imágenes satelitales de mejor resolución como SENTINEL, fue necesario emplear la imagen del satélite ASTER L1 Radiance.

También, hay que tener en cuenta al ser un trabajo mayoritariamente computarizado, es decir, por medio de herramientas como Google Earth Engine, ArcGIS 10.8, entre otros, siempre existirá la necesidad de complementarlo con salidas de campo, revisión bibliográfica y con validación de los resultados, lo que mejora la calidad del proyecto y la precisión de sus resultados. Asimismo, es prioritario realizar varias salidas de campo para observar el área de estudio y conocer la realidad de la zona, de esta manera, inspeccionar problemas o fortalezas que pueda presentarse. Adicional a ello, socializar con las personas el objetivo del trabajo para evitar conflictos o malentendidos con los moradores, incluso hacerlos partícipes de este.

Por último, fue necesario comprender el contexto histórico y las causas subyacentes de los cambios identificados, por ello se consideraron factores como la urbanización, la deforestación, las prácticas agrícolas, alteraciones en el uso y cobertura de la tierra, ya que entendiendo que están zonas se han destinado para diferentes usos en el tiempo para interpretar correctamente tus resultados.

BIBLIOGRAFÍA.

- Aldwaik, SZ y Pontius Jr, RG (2012). Análisis de intensidad para unificar medidas de tamaño y estacionariedad de cambios de suelo por intervalo, categoría y transición. *Paisaje y urbanismo*, 106 (1), 103-114.
- Alo, C. A., y Pontius, R. G. (2008). Identifying systematic land-cover transitions using remote sensing and GIS: The fate of forests inside and outside protected areas of Southwestern Ghana. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(2), 280–295. <https://doi.org/10.1068/b32091>
- Anderson, JR (1976). *Un sistema de clasificación de uso y cobertura del suelo para uso con datos de sensores remotos* (Vol. 964). Imprenta del gobierno de EE. UU.
- Ariza, A. (2013). Descripción y corrección de productos landsat 8 LDCM. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21308.44167>
- Badii, M., Guillen, A., Lugo Serrato, O., y Aguilar Garnica, J. (2015). Factores Causantes de Degradación Ambiental (Factors Causing Environmental Degradation). *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1–9.
- Berlanga, V., Rubio, M., y Vilá, R. (2019). Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS. <https://deposit.ub.edu/dspace/handle/2445/43762>
- Breiman, L. (2001). Bosques aleatorios. *Aprendizaje automático*, 45, 5-32.
- Burbano-Orjuela Hernán. (2016). View of The soil and its relationship with ecosystem services and food security. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Buzai, G. D., Montes Galbán, E., Buzai, G. D., y Montes Galbán, E. (2020). Megaciudad Buenos Aires: Cartografía de su última expansión y conurbación mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales nocturnas. *Revista Cartográfica*, 100, 215–238. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i100.667>
- Byrt, T., Bishop, J. y Carlin, JB (1993). Sesgo, prevalencia y kappa. *Revista de epidemiología clínica*, 46 (5), 423-429.
- Calvano, F. R., & Fontalvo, H. M. R. (2014). El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas?. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 5(2), 213-231.

Cardozo, O. D., Vera R G Godoy, C. A., Daniel Cardozo Adjunto, O., Andrés Vera, C., y Gabriela Godoy, R. (2020). CHANGE DETECTION OF LAND COVER IN THE GREAT RESISTENCIA BETWEEN 1990 AND 2020.

CERDA, J., y VILLAROEL, L. (2008). Coeficiente de Kappa. Revista Chilena Pediatría, (79).

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46.

Congalton, R. G., and K. Green, 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2d ed. CRC/Taylor y Francis, Boca Raton, FL. 178 p.

Congalton, RG, Oderwald, RG y Mead, RA (1983). Evaluación de la precisión de la clasificación Landsat mediante técnicas estadísticas de análisis multivariado discreto. *Ingeniería fotogramétrica y teledetección*, 49 (12), 1671-1678.

Czaplewski, R. L. (1994). Variance approximations for assessments of classification accuracy (Vol. 316). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.

Encalada, A., y Martínez, C. (2005). Evaluación ecológica de paisaje de la provincia de Cotopaxi. EcoCiencia. Quito—Ecuador.

Fallas, J. y Savitsky, BS (1996). Uso y cobertura de la tierra en Costa Rica para 1992: Una aplicación de teledetección espacial y sistemas de información geográfica. *Revista Geográfica de América Central*, 1 (32-33), 131-142.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1984. Metodología provisional para la evaluación y la representación cartográfica de la desertización. Roma, Italia.

Fátima Medina Merino, R., y Ismelda Ñique Chacón, C. (n.d.). INTERFASES Pág. 165. <https://www.kaggle.com/primaryobjects/voicegender>

Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., y Alzate-Alvarez, A. M. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA (Colombia)*, 84(201), 95–101. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>

Hoehler, F. K. (2000). Bias and prevalence effects on kappa viewed in terms of sensitivity and specificity. *Journal of clinical epidemiology*, 53(5), 499-503.

Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., y Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 80, pp. 91–106). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>

INEGI. (2015). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/usosuelo/metadatos/guia_interusosuelo.pdf

Jaramillo, L. V., y Antunes, A. F. (2018). Detección de cambios en la cobertura vegetal mediante interpretación de imágenes Landsat por redes neuronales artificiales (RNA). Caso de estudio: Región Amazónica Ecuatoriana. *Revista de Teledetección*, 33–46.

Lantz, CA y Nebenzahl, E. (1996). Comportamiento e interpretación del estadístico κ : Resolución de las dos paradojas. *Revista de epidemiología clínica*, 49 (4), 431-434.

Long, T., Zhang, Z., He, G., Jiao, W., Tang, C., Wu, B., Zhang, X., Wang, G., y Yin, R. (2019). 30m resolution global annual burned area mapping based on landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/rs11050489>

Loza-Del-Carpio, A., y Taype-Huamán, I. (2021). Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú. *Uniciencia*, 35(2), 1–19. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3>

Magrin, G. (2015). Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe.

Merino, F., y Chacón, I. (2017). INTERFASES Pág. 165. <https://www.kaggle.com/primaryobjects/voicegender>

Mishra, V., Rai, P., y Mohan, K. (2014). Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: A case study of Muzaffarpur (Bihar), India. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA*, 64(1), 111–127. <https://doi.org/10.2298/ijgi1401111m>

Morales, A. (2020). Google Earth Engine y cómo acceder a sus algoritmos desde QGIS.

Nancy, M. S., y Arévalo, J. P. (2016). Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca. *Estoa. Revista de La Facultad de Arquitectura y Urbanismo de La Universidad de Cuenca*, 5(9), 7–19. <https://doi.org/10.18537/EST.V005.N009.02>

Nations Food and Agriculture Organization of the United. (2016). Map Accuracy Assessment and Area Estimation Map Accuracy Assessment and Area Estimation: A Practical Guide. *National Forest Monitoring Assessment Working Paper*, No.46/E (46).

Nicolau Puzzi, A., Dyson, K., Saah, D., y Clinton, N. (2011). Capítulo F2. 1: Interpretación de una imagen: clasificación.

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., y Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.02.015>

Orozco Pilco, D. L., y Ordoñez Jacome, J. F. (2023). *Valoración del servicio ecosistémico mediante la captación de carbono orgánico en el ecosistema páramo de la microcuenca Columbe, cantón Colta* (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo).

Pontius Jr, RG, Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detectar importantes cambios categóricos del suelo teniendo en cuenta la persistencia. *Agricultura, ecosistemas y medio ambiente*, 101 (2-3), 251-268.

Ramos Reyes, R., Palma López, D. J., Ortiz Solorio, C. A., Ortiz García, C. F., y Díaz Padilla, G. (2004). Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 267–278.

Rodríguez, A., Rubiano, Y., Gutierrez, A., Bernal, J., Rodríguez, N., Arguello, O., y Pulido, S. (2013). COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO DE LA ALTILLANURA PLANA DE LOS MUNICIPIOS DE PUERTO LÓPEZ Y PUERTO GAITÁN, META Escala 1:25.000. www.corpoica.org.co

Rosenfield, G. H., y Fitzpatrick-Lins, K. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 52(2), 223-227.

- Ruiz Fernández, L. Á. (2017). Métodos de detección de cambios en teledetección.
- Singh, A. (1989). Review Article: Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- Soria, M. V., y Matar, M. A. (2016). Nociones Sobre Teledetección. 1–79.
- Stehman, S. (1996). Estimación del coeficiente kappa y su varianza bajo muestreo aleatorio estratificado. *Ingeniería fotogramétrica y teledetección*, 62 (4), 401-407.
- Stehman, S. V. (2009). Sampling designs for accuracy assessment of land cover. *International Journal of Remote Sensing*, 30(20), 5243-5272.
- Stehman, SV (2009). Diseños de muestreo para una evaluación precisa de la cobertura del suelo. *Revista Internacional de Percepción Remota*, 30 (20), 5243-5272.
- Sudmanns, M., Tiede, D., Lang, S., Bergstedt, H., Trost, G., Augustin, H., Baraldi, A., y Blaschke, T. (2020). Big Earth data: disruptive changes in Earth observation data management and analysis? In *International Journal of Digital Earth* (Vol. 13, Issue 7, pp. 832–850). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1585976>
- The European Space Agency. (2015, June 17). SENTINEL 2.
- Tobar-Díaz, R., Gao, Y., Mas, J. F., y Cambrón-Sandoval, V. H. (2023). Clasificación de uso y cobertura del suelo a través de algoritmos de aprendizaje automático: revisión bibliográfica. *Revista de Teledetección*, (62), 1-19.
- Uzcátegui, C., Solano, J., y Figueroa, P. (2016). Perspectiva sobre la sostenibilidad de los recursos naturales a largo plazo: caso industria camaronera ecuatoriana. *Revista Universidad y Sociedad*, 8 (3), 163-168.
- Zhang, L., Wu, J., Fan, Y., Gao, H., y Shao, Y. (2020). An efficient building extraction method from high spatial resolution remote sensing images based on improved mask R-CNN. *Sensors (Switzerland)*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/s20051465>
- Zinck, J. A. (2014). Suelos, Información y Sociedad. 44(2), 113–124.

ANEXOS.

Evidencia fotográfica de salidas a campo:

