



Dinámica espacio-temporal de las coberturas de la tierra en Girardota: un análisis comparativo 2017 – 2025

Edison Esteban Gallego Quintero

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Gallego Quintero, 2025)
Referencia	Gallego Quintero, E. E. (2025). <i>Dinámica espacio-temporal de las coberturas de la tierra en Girardota: un análisis comparativo 2017 – 2025</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2.020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Línea de Investigación Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT y Turnitin, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A quienes conectan datos, espacios y personas.

Agradecimientos

A mis padres... por estar siempre.

A PlanetScope...por suministrar las imágenes satelitales.

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción	13
1. Planteamiento del problema	15
1.2. Antecedentes	18
1.2.1. Estudios globales de teledetección.....	18
1.2.2. Estudios de teledetección en América Latina	19
1.2.3. Estudios de teledetección y SIG en Colombia.....	21
1.2.4. Teledetección y SIG en Antioquia y el Valle de Aburrá.	22
2. Justificación.....	25
3. Objetivos.....	27
3.1. Objetivo general.....	27
3.2. Objetivos específicos	27
4. Hipótesis	28
4.1 Hipótesis de trabajo.....	28
5. Marco teórico.....	29
5.1. Estudios de coberturas y uso actual del suelo	29
5.2. Sistemas de información geográfica – SIG.....	30
5.3. La teledetección	32
5.4. Metodología CORINE Land Cover	32
5.5. Estudios multitemporales.....	34
5.6. Matrices de transición.....	35
6. Metodología.....	37
6.1. Enfoque metodológico	37

6.2.	Tipo de estudio.....	37
6.3.	Procedimiento técnico implementado.....	38
6.3.1.	Formulación	38
6.3.2.	Procedimiento para la búsqueda y selección de imágenes satelitales.....	39
6.3.3.	Procedimiento para el tratamiento digital de las imágenes satelitales	39
6.3.3.1.	Preprocesamiento digital.....	40
6.3.3.2.	Procesamiento digital de las imágenes satelitales.....	45
6.3.4.	Procedimiento para la interpretación y análisis	51
6.3.4.1.	Adaptación de la metodología CORINE Land Cover.....	52
6.3.4.2.	Cálculo de la tasa de cambio.....	57
6.3.4.3.	Matriz de transición de Pontius.....	58
6.3.4.4.	Matriz de Marcov.....	59
7.	Resultados.....	60
7.1.	Búsqueda y selección de imágenes satelitales	60
7.2.	Clasificación de coberturas de la tierra	62
7.3.	Cambios en las coberturas de la tierra	66
7.3.1.	Ganancias y pérdidas de áreas	66
7.3.2.	Tasa de cambio de las coberturas de la tierra	69
7.3.3.	Transición de las coberturas de la tierra	71
7.4.	Tendencias de uso del suelo.....	74
7.4.1.	Ganancias y pérdidas de coberturas proyectadas para el año 2033	77
7.4.2.	Tasa de cambio de coberturas proyectadas para el año 2033	78
8.	Discusión	81
8.1.	Interpretación de las coberturas de la tierra	82
8.1.1.	Precisión de la clasificación supervisada	82

8.1.2.	Adaptación de la metodología CORINE Land Cover.....	83
8.2.	Determinación de los cambios en las coberturas de la tierra	84
8.2.1.	Principales cambios en las coberturas de la tierra	84
8.2.2.	Transición de las coberturas de la tierra	86
8.3.	Proyección de las tendencias de uso del suelo.....	90
9.	Conclusiones.....	94
10.	Recomendaciones	95
	Referencias.....	96

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de coberturas de la tierra en Colombia	29
Tabla 2. Criterios de selección de las imágenes satelitales.....	39
Tabla 3. Cantidad de muestras tomadas para realizar clasificación supervisada.....	46
Tabla 4. Cantidad de polígonos resultantes en cada año.....	48
Tabla 5. Resultados del control de calidad	50
Tabla 6. Interpretación del índice de Kappa	51
Tabla 7. Coberturas de la tierra adaptadas de la metodología CORINE Land Cover.....	52
Tabla 8. Matriz de transición con códigos de tabulación.....	58
Tabla 9. Resultados de la búsqueda de imágenes satelitales en PlanetScope	60
Tabla 10. Cantidad de escenas descargadas.....	61
Tabla 11. Coberturas de la tierra 2017 - 2025.....	63
Tabla 12. Ganancias y pérdidas de área por periodo	66
Tabla 13. Tasa de cambio anual por periodo	69
Tabla 14. Tasa de cambio anual en el periodo 2017 – 2025.....	70
Tabla 15. Matriz de transición de Pontius.....	72
Tabla 16. Matriz de Markov 2025 - 2033	74
Tabla 17. Tasa de cambio para el periodo comprendido entre 2025 y 2033 según proyecciones	78
Tabla 18. Transición de las coberturas de la tierra 2017 - 2025	86
Tabla 19. Coberturas de la tierra estimadas para el año 2033.....	90

Lista de figuras

Figura 1. Mapa general del municipio de Girardota, Antioquia.....	15
Figura 2. Elementos que conforman un Sistema de Información Geográfica	31
Figura 3. Fases del procedimiento para realizar el análisis multitemporal.....	38
Figura 4. Preprocesamiento digital de las imágenes satelitales	40
Figura 5. Comparación de los valores de píxel antes y después de la corrección (derecha)	42
Figura 6. Reproyección de coordenadas UTM (izquierda) a CTM12 (derecha)	43
Figura 7. Ortomosaico compuesto por varias escenas	43
Figura 8. Ortomosaicos del área de interés	44
Figura 9. Procesamiento digital de las imágenes satelitales	45
Figura 10. Muestras de entrenamiento tomadas para realizar la clasificación supervisada	47
Figura 11. Filtro de mayorías (a la izquierda sin aplicar y a la derecha después de aplicarlo) ..	48
Figura 12. Puntos de control para completar matriz de confusión	49
Figura 13. Procedimiento de interpretación y análisis.....	51
Figura 14. Zonas urbanizadas	53
Figura 15. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales.....	54
Figura 16. Bosque fragmentado.....	55
Figura 17. Vegetación secundaria o en transición	56
Figura 18. Aguas continentales.....	56
Figura 19. Clasificación de coberturas de la tierra en Girardota, Antioquia	62
Figura 20. Usos del suelo 2017 - 2025	64
Figura 21. Ganancias y pérdidas de área por periodo.....	67
Figura 22. Tendencias de uso del suelo 2025 - 2033.....	75
Figura 23. Ganancias y pérdidas de área por cobertura entre los años 2025 y 2023	77

Figura 24. Resultados del índice de Kappa.....	82
Figura 25. Transición de las coberturas de la tierra.....	88
Figura 26. Territorios que no presentan cambios en las coberturas de la tierra entre 2017 y 2025	89
Figura 27. Proyección de áreas para el año 2033	92

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CTM12	Origen único Nacional para Colombia
DN	Niveles digitales
Esp.	Especialista
HA	Hectárea
Km²	Kilómetros cuadrados
MLC	Maximum Likelihood Classification
SAR	Radar de apertura sintética
UManizales	Universidad de Manizales
SIG	Sistemas de Información Geográfica

Resumen

El municipio de Girardota, Antioquia, ha presentado en los últimos años una acelerada transformación territorial producto del crecimiento urbano y de las actividades agropecuarias, lo que genera presión sobre los ecosistemas naturales y plantea la necesidad de conocer sus dinámicas espacio - temporales. Con este propósito, se realizó un análisis multitemporal de las coberturas de la tierra entre 2017 y 2025 a partir de imágenes satelitales de PlanetScope con una resolución espacial de tres metros. Se adaptó la metodología CORINE Land Cover y se aplicó clasificación supervisada en ArcGIS Pro, se realizaron matrices de transición y modelos de Markov para estimar proyecciones hacia 2033. Los resultados muestran un incremento sostenido de las zonas urbanizadas y del mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mientras que los bosques fragmentados y la vegetación secundaria o en transición retrocedieron de manera gradual perdiendo áreas estadísticamente significativas. En particular, el bosque fragmentado pasó de 1.045 hectáreas en 2017 a 208 hectáreas en 2025, lo que corresponde a una pérdida del 80%, con tendencia a reducirse a 93 hectáreas en 2033 si se mantiene el ritmo actual de cambio. Se concluye que en Girardota predomina un proceso de conversión de ecosistemas naturales hacia territorios urbanos y agropecuarios, lo cual representa un riesgo para la sostenibilidad ambiental y la conservación de la biodiversidad. Estos hallazgos constituyen un insumo técnico relevante para la gestión del territorio y la formulación de políticas públicas orientadas a mitigar la pérdida de bosques y garantizar un desarrollo más equilibrado.

Palabras clave: Girardota, CORINE Land Cover, análisis multitemporal.

Abstract

The municipality of Girardota, Antioquia, has presented in recent years an accelerated territorial transformation because of urban growth and agricultural activities, which generates pressure on natural ecosystems and raises the need to know its spatial-temporal dynamics. For this purpose, a multitemporal analysis of land cover was carried out between 2017 and 2025 from PlanetScope satellite images with a spatial resolution of three meters. The CORINE Land Cover methodology was adapted and supervised classification was applied in ArcGIS Pro, transition matrices and Markov models were made to estimate projections towards 2033. The results show a sustained increase in urbanized areas and the mosaic of crops, pastures and natural spaces, while fragmented forests and secondary or transitional vegetation gradually receded, losing statistically significant areas. Fragmented forest went from 1,045 hectares in 2017 to 208 hectares in 2025, corresponding to a loss of 80%, with a tendency to reduce to 93 hectares in 2033 if the current rate of change continues. It is concluded that in Girardota a process of conversion of natural ecosystems towards urban and agricultural territories predominates, which represents a risk for environmental sustainability and the conservation of biodiversity. These findings constitute relevant technical input for land management and the formulation of public policies aimed at mitigating forest loss and ensuring a more balanced development.

Keywords: Girardota, CORINE Land Cover, multitemporal analysis.

Introducción

Los cambios en la cobertura y el uso del suelo son uno de los principales motores de transformación ambiental a escala global, asociados a la expansión urbana, las actividades agropecuarias y la presión sobre los ecosistemas naturales (Ellis, 2021). En América Latina, estos procesos se manifiestan con especial intensidad en territorios montañosos y densamente poblados, donde la conversión de bosques y áreas rurales hacia usos urbanos y agropecuarios genera pérdida de biodiversidad, fragmentación de hábitats y aumento de la vulnerabilidad frente al cambio climático (Aide et al., 2019).

En Colombia, la subregión del Valle de Aburrá ha experimentado durante las últimas décadas un crecimiento acelerado de las áreas urbanizadas, acompañado por la reducción de coberturas boscosas y la transformación de suelos rurales (Castañeda et al., 2023). En particular, el municipio de Girardota, ubicado en el norte del Valle de Aburrá, presenta una fuerte presión antrópica derivada del desarrollo urbano, la expansión industrial y las actividades agropecuarias, lo cual ha intensificado la fragmentación de ecosistemas y la pérdida de servicios ambientales estratégicos (Cardona-Mesa et al., 2025a). Sin embargo, los estudios técnicos a escala municipal son escasos y en su mayoría carecen de un análisis comparativo multitemporal que permita identificar tendencias y proyecciones.

La teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen herramientas fundamentales para monitorear los cambios en la superficie terrestre, ya que permiten analizar series temporales de imágenes satelitales, clasificar coberturas y estimar transiciones en el uso del suelo con alta precisión (Poveda-Sotelo et al., 2022). Su aplicación en Girardota es relevante porque posibilita generar información actualizada y proyectada que aporte a la toma de decisiones en materia de planificación territorial y conservación ambiental, teniendo en cuenta que el plan de desarrollo municipal 2024 - 2027, hace referencia a problemáticas ambientales, deforestación, acelerado crecimiento urbano y presión antrópica sobre los recursos naturales (Municipio de Girardota, 2024).

Un análisis multitemporal con imágenes satelitales, además de describir la dinámica de las coberturas, aporta información clave para identificar procesos de degradación, regeneración y transición en los usos del suelo. Estas herramientas no solo permiten cuantificar pérdidas y ganancias de área, sino también proyectar tendencias que anticipan escenarios futuros. En este sentido, el estudio de Girardota se constituye en un referente metodológico para otros municipios del Valle de Aburrá y de Colombia que enfrentan retos similares en materia de urbanización acelerada y transformación de ecosistemas.

En este contexto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo ha evolucionado la dinámica espacio-temporal de las coberturas de la tierra en el municipio de Girardota, Antioquia, entre 2017 y 2025, y cuáles son las principales tendencias hacia el año 2033? El estudio busca responder este interrogante a través de un análisis multitemporal con imágenes de PlanetScope, la adaptación de la metodología CORINE Land Cover y el uso de modelos de transición, generando evidencia científica que contribuya al ordenamiento sostenible del territorio.

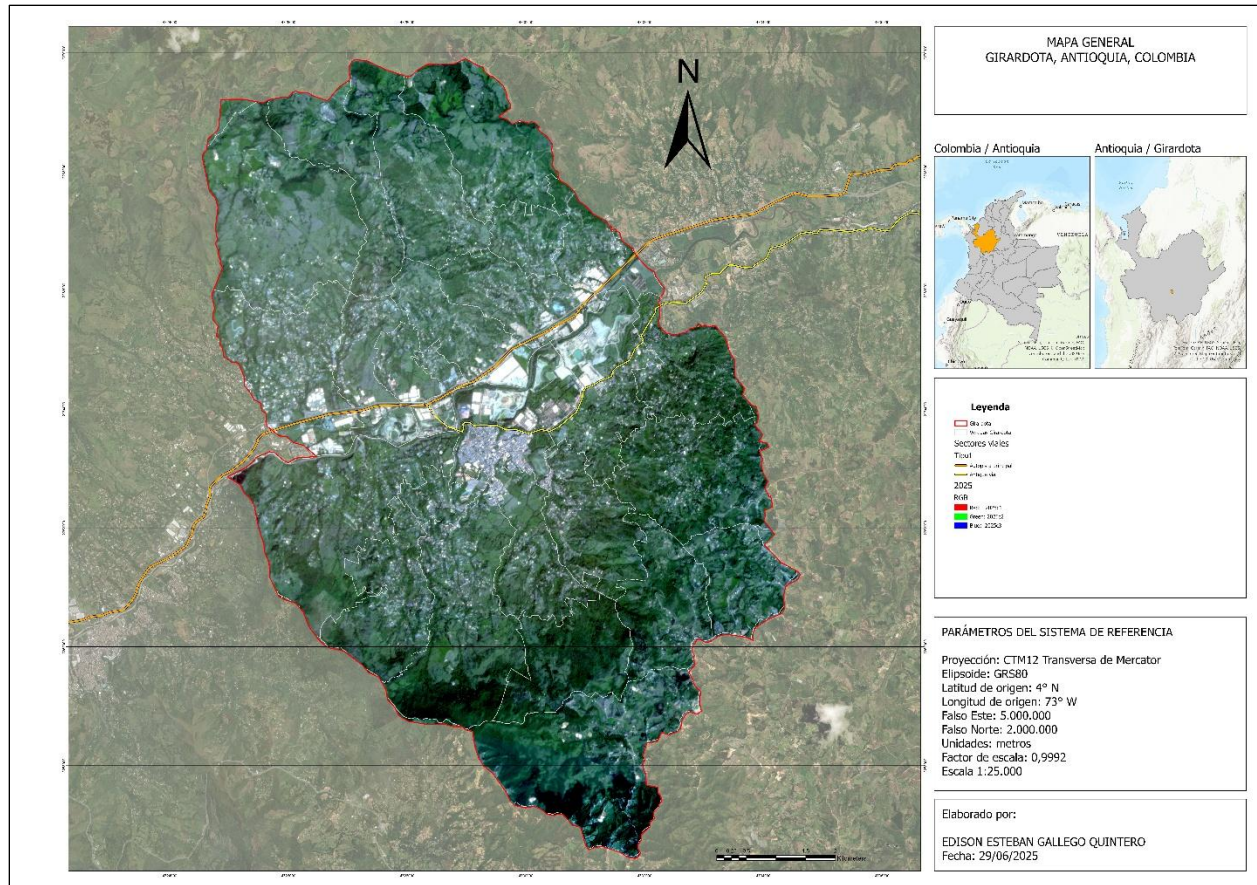
1. Planteamiento del problema

El municipio de Girardota, ubicado en el norte del Valle de Aburrá, se caracteriza por un relieve montañoso y una ubicación estratégica en el área metropolitana de Medellín. Con una extensión aproximada de 82 km², de los cuales la mayor parte corresponden a zonas rurales, su territorio combina dinámicas urbanas, agropecuarias y ecosistemas naturales de relevancia ambiental. Sin embargo, en las últimas décadas ha enfrentado un acelerado proceso de transformación territorial derivado de la presión antrópica, que ha resultado en la pérdida progresiva de bosques y vegetación secundaria, así como en el crecimiento sostenido de las áreas urbanizadas y productivas. (Municipio de Girardota, 2024).

La *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..*, ilustra un mapa general del municipio, donde se puede apreciar que es un área dividida por el paso del río Aburrá y la autopista norte (vía nacional). Limita al norte con el municipio de Barbosa, al oriente con Guarne y San Vicente, al occidente con San Pedro de los Milagros y Don Matías y finalmente, por el sur con el municipio de Copacabana.

Figura 1.

Mapa general del municipio de Girardota, Antioquia



Entre las principales problemáticas se encuentran la expansión urbana, el desarrollo de proyectos de infraestructura, el establecimiento de fincas recreativas, la intensificación de actividades agropecuarias y la fragmentación de ecosistemas. Estos procesos, sumados al crecimiento poblacional y a la localización estratégica de Girardota dentro del corredor del Aburrá Norte, han funcionado como aceleradores del cambio en las coberturas y uso del suelo, comprometiendo la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y la estabilidad de los suelos (Castañeda Ruiz et al., 2023).

A pesar de la relevancia de estas transformaciones, los estudios técnicos disponibles para Girardota son limitados. El Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburrá (Corantioquia, 2015), y el Plan de Ordenamiento Territorial (Municipio de Girardota, 2024) reconocen problemáticas ambientales y de ocupación del suelo, pero no cuantifican de manera sistemática los cambios en las coberturas vegetales a lo largo del tiempo. Esto evidencia la

necesidad de contar con información precisa y actualizada que permita orientar decisiones en materia de planificación ambiental y ordenamiento territorial.

La pérdida de cobertura boscosa y de vegetación secundaria en territorios andinos como Girardota tiene consecuencias directas sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Estudios recientes demuestran que la fragmentación de los bosques en la región andina de Colombia incrementa el riesgo de extinción local de especies y disminuye la conectividad ecológica, lo cual compromete procesos ecológicos esenciales (Armenteras et al., 2017a) y este fenómeno no solo afecta a la fauna y flora, sino que también reduce la capacidad del territorio para garantizar servicios de regulación hídrica, un aspecto crítico en cuencas abastecedoras de agua como la del río Aburrá.

Así mismo, la urbanización acelerada en ciudades intermedias y municipios periurbanos de América Latina se ha convertido en uno de los principales factores de cambio en el uso del suelo, desplazando coberturas naturales y agrícolas hacia territorios marginales. En el Valle de Aburrá, investigaciones han demostrado que la expansión urbana se concentra en zonas de alta pendiente y en suelos con vocación de conservación, lo que genera conflictos ambientales y riesgos asociados a la estabilidad del terreno (Tamayo & Estrada, 2022) y Girardota, al formar parte de este corredor metropolitano, refleja estas dinámicas de presión sobre los ecosistemas locales.

Otro acelerador de los cambios en Girardota es la expansión de la frontera agropecuaria. Investigaciones en la región andina de Colombia han identificado que la ganadería extensiva y la transformación de coberturas naturales en mosaicos de cultivos y pastos son procesos dominantes que generan pérdida de biomasa y degradación de suelo (Etter et al., 2006a). En Girardota, estas actividades se combinan con la demanda de suelo urbano y recreativo, intensificando la presión sobre los ecosistemas de montaña.

Finalmente, la falta de información multitemporal a escala municipal limita la capacidad de anticipar escenarios de cambio. Estudios de modelamiento espacial aplicados en la región muestran que, en ausencia de políticas de control, las tendencias de urbanización y deforestación tienden a acelerarse en la próxima década (Cardona-Mesa et al., 2025a). Por lo tanto, disponer de

un análisis robusto de las coberturas de Girardota no solo permitirá identificar las dinámicas actuales, sino también construir escenarios de futuro que sirvan como base para la gestión territorial sostenible.

En consecuencia, el problema central que aborda esta investigación consiste en la ausencia de un diagnóstico multitemporal y técnico sobre los cambios en las coberturas de la tierra en el municipio de Girardota. Esta limitación restringe la capacidad institucional y comunitaria de diseñar estrategias de conservación y mitigación frente a la pérdida de ecosistemas naturales, en un territorio que enfrenta una rápida conversión hacia usos urbanos y agropecuarios.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Estudios globales de teledetección

Los estudios sobre el cambio de uso y cobertura de la tierra a nivel global comenzaron a consolidarse a mediados del siglo XX, con un enfoque en la expansión agrícola y la pérdida de bosques como principales motores de transformación ambiental. A través de observaciones in situ y los primeros mapas temáticos, se evidenció que la presión antrópica estaba alterando de manera acelerada los paisajes, generando impactos sobre la biodiversidad y la regulación climática (Meyer & Turner, 1992).

Con el desarrollo de la teledetección, los estudios globales adquirieron un nuevo alcance, plantearon la consolidación de la “ciencia del cambio de la tierra”, destacaron el análisis multitemporal de imágenes satelitales y su integración en SIG para comprender las dinámicas espaciales a diferentes escalas. La disponibilidad de datos Landsat, junto con el perfeccionamiento de algoritmos de clasificación supervisada, marcó un hito en la identificación de tendencias globales de deforestación, desertificación y expansión urbana (Turner et al., 2007).

Posteriormente, se conocen datos de aplicación de imágenes satelitales para proyectar la expansión urbana mundial y así lograron demostrar que la urbanización constituye uno de los principales motores de pérdida de cobertura vegetal y fragmentación ecológica, resaltando la importancia de integrar teledetección y SIG en la planificación territorial global (Seto et al., 2012).

Recientemente, Ellis (2021) desarrolló un análisis histórico que documenta cómo el uso del suelo ha transformado la ecología terrestre argumentando que las actuales dinámicas de urbanización, agricultura intensiva y deforestación constituyen fuerzas dominantes. La investigación, apoyada en bases de datos espaciales y reconstrucciones históricas de cobertura, enfatiza en el rol de la teledetección y de los modelos espaciales como herramientas fundamentales para comprender y anticipar los cambios ambientales a escala global.

1.2.2. Estudios de teledetección en América Latina

En América Latina, los estudios sobre cambio de cobertura terrestre se intensificaron desde finales del siglo XX, principalmente asociados a la expansión de la frontera agropecuaria. Se conocen datos desde 1940 que muestran cómo se usaron imágenes satelitales y se aplicaron técnicas de modelamiento espacial para mostrar la deforestación y la expansión ganadera como motores dominantes de las transformaciones del territorio (Etter et al., 2006b) y este trabajo se considera pionero resaltando la importancia de los SIG para modelar patrones espaciales y tasas de cambio.

Entre 2001 y 2010 se encuentra un análisis multitemporal de la cobertura vegetal en América Latina y el Caribe, donde utilizaron imágenes de los sensores MODIS y Landsat para evaluar la deforestación. Los autores encontraron que este fenómeno fue persistente en los países amazónicos, mientras que en otras regiones evidenciaron procesos positivos de ganancia de cobertura vegetal, especialmente en áreas montañosas donde los procesos de expansión agrícola se habían detenido. De este modo, el estudio resaltó el valor de la teledetección para identificar, a escala continental, tanto las pérdidas como la recuperación de la cobertura terrestre (Aide et al., 2013).

Por otra parte, Entre 2001 y 2014 Schwartz et al. (2020) elaboraron mapas anuales de cobertura del suelo para América Latina y el Caribe mediante clasificación de imágenes MODIS (resolución de 250 m) usando modelos de Random Forest por bioma. Estos resultados revelaron una precisión notable en la distinción entre vegetación leñosa y otros usos del suelo (desde un 87% a nivel general hasta un 93% en selvas húmedas tropicales) y mostraron una sólida correlación con los

mapas de cambio forestal del programa PRODES de Brasil. Este enfoque demostró su eficacia para monitorizar dinámicas regionales de pérdida y recuperación de cobertura vegetal a escala continental.

Posteriormente, se conoce un estudio de Armenteras et al. (2017b) donde revisaron tres décadas de investigaciones sobre deforestación en diferentes tipos de bosque en América Latina, evidenciando que los SIG y la teledetección han permitido no solo cuantificar la pérdida de cobertura, sino también vincularla con factores socioeconómicos y de gobernanza. Este estudio resaltó que, a pesar de los avances tecnológicos, la región continúa siendo un punto crítico en términos de fragmentación de hábitats y pérdida de biodiversidad.

Entre 2015 y 2021, se conoce un estudio desarrollado por Wagner et al. (2023), donde a través de un mapeo detallado de la cobertura arbórea y deforestación en el estado brasileño de Mato Grosso, empleando imágenes satelitales Planet de alta resolución (5 m) y modelos de entrenamiento, donde encontraron que la cobertura arbórea disminuyó drásticamente suponiendo un riesgo para la biodiversidad y la conservación de los ecosistemas continentales. Además, compararon sus resultados con los mapas oficiales de Brasil, revelando que las imágenes de mayor resolución permiten estimaciones más precisas que los datos globales establecidos, como el Global Forest Change (GFC), lo que indica la necesidad de integrar fuentes satelitales de distinta resolución en los sistemas nacionales de monitoreo forestal. Esta comparación también resalta que los datos locales y de alta resolución pueden capturar procesos de degradación y deforestación a pequeña escala que suelen ser invisibles en bases globales, aportando insumos críticos para la toma de decisiones en políticas ambientales y la gestión sostenible del territorio.

En otro estudio reciente, se encontró un análisis de los cambios en biomasa aérea y superficie forestal en la Amazonía brasileña entre 2010 y 2019, empleando datos satelitales para estimar pérdidas anuales y hallaron que la degradación forestal fue responsable del 73 % de la pérdida bruta de biomasa, en contraste con apenas el 27% atribuible a la deforestación directa destacando que las estrategias de conservación deben centrarse también en la degradación y no solo en deforestación pura (Qin et al., 2022).

Es así como los sistemas de información geográfica y la teledetección en América Latina se han consolidado como herramientas fundamentales para la planificación territorial, ya que permiten integrar datos multiescalares y multitemporales en el análisis de dinámicas socioambientales. Actualmente, se publican de manera constante estudios a escala continental que emplean estas tecnologías para monitorear cambios en la cobertura terrestre, evaluar riesgos ambientales y orientar políticas de conservación y uso sostenible del suelo (Ríos-Mesa et al., 2024).

1.2.3. Estudios de teledetección y SIG en Colombia

El surgimiento de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Colombia a finales del siglo XX, constituye una respuesta tecnológica a la necesidad de integrar información espacial en procesos de planificación territorial y manejo ambiental. Éstos fueron adaptados para codificar y monitorear la estructura geográfica del país, superar carencias de información geográfica disponible y fortalecer los instrumentos de ordenamiento territorial mediante herramientas de visualización y análisis espacial (Gutiérrez & Urrego, 2011).

Con el cambio de siglo, los SIG se consolidaron como herramientas fundamentales en la gestión ambiental del país. Etter & Van Wyngaarden (2000) realizaron uno de los primeros estudios de gran escala en Colombia aplicando SIG y teledetección para analizar los patrones de deforestación y fragmentación en la región andina. Este trabajo demostró que la conversión de bosques en áreas agrícolas y ganaderas seguía una lógica espacial asociada a las dinámicas socioeconómicas locales, abriendo el camino a estudios multiescala en el territorio nacional.

En años posteriores, la incorporación de la metodología CORINE Land Cover en Colombia representó un avance significativo. El IDEAM (2010a), generó el primer mapa nacional de coberturas de la tierra mediante interpretación de imágenes satelitales y procesamiento en SIG, lo que permitió disponer de una línea base homogénea para el país. Esta cartografía se convirtió en referencia obligada para la planificación ambiental, así como para el diseño de políticas relacionadas con el uso sostenible del suelo y la conservación de ecosistemas estratégicos.

El fortalecimiento del monitoreo ambiental mediante SIG también se reflejó en estudios enfocados en la deforestación amazónica y en el año 2013, se realizó un estudio para evaluar la pérdida de bosques en la Amazonía colombiana, demostrando la utilidad de los SIG para la identificación de focos de deforestación y su relación con la expansión de la frontera agrícola y los corredores de colonización. Estos resultados evidenciaron la importancia de integrar tecnologías de percepción remota en las políticas nacionales de control y conservación (Armenteras et al., 2013).

En la última década, el acceso a plataformas globales y de código abierto ha impulsado la masificación del uso de los SIG en Colombia. Un estudio realizado por Pande et al. (2024) evidencia la utilización de imágenes satelitales para realizar estudios multitemporales con imágenes satelitales de Landsat-8 y algoritmos avanzados de Random Forest implementados en Google Earth Engine para caracterizar dinámicas de cambio en la cobertura del suelo. Este enfoque, demostró que la integración de SIG, teledetección y aprendizaje automático facilita la identificación precisa de transformaciones territoriales, incluso bajo condiciones de nubosidad o datos de referencia escasos. El uso de estas tecnologías promueve una gestión territorial más informada, accesible y basada en la evidencia.

Actualmente en Colombia, se conocen múltiples estudios que utilizan la teledetección y los sistemas de información geográfica como herramientas principales para conocer las dinámicas en el territorio y planificar las políticas agrarias y de administración del territorio (Fagua, Rodríguez-Buriticá, et al., 2023).

1.2.4. Teledetección y SIG en Antioquia y el Valle de Aburrá.

Desde mediados de la década de 2000, varios municipios del Valle de Aburrá y del Oriente Antioqueño comenzaron a institucionalizar los SIG para ordenamiento territorial y gestión cotidiana, documentando condiciones de adopción, barreras y usos en planeación municipal. En un balance temprano, se concluía que toda la información espacial y cartográfica debería tener un tratamiento como un bien público debido a su importancia para la toma de decisiones colectivas, la transparencia en la gestión del territorio y el fortalecimiento de la participación ciudadana. Así mismo, se resaltaba que la accesibilidad y estandarización de estos datos permitirían mejorar la

coordinación interinstitucional, optimizar recursos y garantizar que los procesos de planificación respondieran a criterios técnicos y de equidad territorial (Molina et al., 2006).

Una década más tarde, la teledetección térmica de alta resolución comenzó a aplicarse directamente en Medellín. Un estudio sobre islas de calor urbana utilizó un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y análisis SIG para cartografiar patrones térmicos intraurbanos y discutir implicaciones para confort y riesgo en barrios con morfologías densas y como resultado de este trabajo de investigación encontraron importantes resultados para orientar las políticas de planificación urbana, quedando demostrado que la distribución de los árboles es crucial en la mitigación del cambio climático (Maia et al., 2017).

En paralelo, trabajos comparativos con Landsat evaluaron el enverdecimiento de ciudades neotropicales e incluyeron el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, mostrando cómo las métricas espectrales y de cobertura derivadas de teledetección, capturan cambios en infraestructura verde y cerramiento de la cobertura de la tierra, útiles para el seguimiento de políticas urbanas (Reynolds et al., 2017).

Más recientemente, un análisis espacial del ambiente se integró con resultados de salud pública en Medellín, donde a través de un estudio ecológico relacionaron morfología urbana, accesibilidad y verdor de la ciudad con mortalidad por enfermedad cerebrovascular y diabetes, utilizando indicadores SIG y modelos espaciales (Patino et al., 2021).

Por otra parte, en relación con la gestión del riesgo de desastres, un análisis multitemporal cuantificó la exposición y vulnerabilidad a deslizamientos en Medellín, combinando inventarios, cartografía y teledetección para revelar cómo la expansión urbana modifica el riesgo a lo largo del tiempo y en distintos estratos socio-espaciales (Kühnl et al., 2023), lo que demuestra una evolución paulatina en el uso de SIG y teledetección para abordar diferentes disciplinas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

En el año 2020 en la ciudad de Medellín, Tello & Díaz (2021), realizaron un estudio para analizar la contaminación ambiental utilizando técnicas de teledetección satelital mediante imágenes

Landsat 7 y 8, con el objetivo de analizar variables relacionadas con la calidad del aire y lograron realizar mapas temáticos de calidad ambiental que determinaron focos de alta contaminación en sectores con poca cobertura vegetal, lo cual consideran un insumo importante para la toma de decisiones relacionadas con la planificación urbana y la administración del territorio. Además, recomiendan aplicar la metodología propuesta en diversas zonas del territorio e incorporar otras variables dentro del estudio.

El Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Girardota, en la última actualización registrada en el año 2020 incorpora cartografía temática con la clasificación de las coberturas vegetales (Municipio de Girardota, 2020), lo que demuestra cómo en la planificación territorial reciente se utilizan los SIG. Esta incorporación no solo facilita la identificación y delimitación de áreas estratégicas para la conservación, la producción agrícola y el desarrollo urbano, sino que también permite integrar capas de información relacionadas con riesgos ambientales, infraestructura y dinámicas socioeconómicas.

Finalmente, se han incorporado series temporales SAR Sentinel-1 para monitorear crecimiento urbano y cambios de cobertura en el Valle de Aburrá, mejorando la detección en zonas nubosas y aportando productos consistentes para gestión metropolitana y actualización catastral, siendo en los últimos años muy común el uso de herramientas SIG en los procesos de gestión territorial (Cardona-Mesa et al., 2025b).

2. Justificación

El análisis de las coberturas vegetales en el municipio de Girardota, Antioquia durante los últimos años utilizando imágenes satelitales, es un aspecto importante para conocer la dinámica y tendencias de las coberturas de la tierra, teniendo en cuenta que el territorio de la subregión del Valle de Aburrá es una depresión profunda y alargada atravesada por el río que contiene atributos de importancia ambiental y que, en el pasado, el centro y norte del Valle de Aburrá eran destinados a actividades ganaderas, mientras que hacia el sur predominaban las actividades agrícolas (Alcaldía de Medellín, 2017), quedando demostrado que la presión antrópica ha generado grandes transformaciones y se ha cambiado el uso del suelo de manera acelerada a través del tiempo.

La iniciativa de realizar este trabajo aplicado y de investigación para conocer los cambios en las coberturas vegetales, surge por la necesidad de entender las dinámicas y tendencias teniendo en cuenta que la teledetección y los sistemas de información geográfica son herramientas que se pueden utilizar para obtener información de la superficie terrestre y por medio de diversos geoprocursos con software especializados se puede realizar estudios técnicos, como por ejemplo, la utilización de las propiedades de radiación electromagnética para medir la interacción con los elementos de la superficie terrestre (Hernández & Pavón, 2024).

La utilización de imágenes satelitales, técnicas de teledetección, procesamiento digital y clasificación de coberturas, buscan resolver de carácter práctico y aplicado, los enigmas que existen en cuanto al estado actual y las tendencias en los últimos años en la transformación de las coberturas de la tierra en Girardota, Antioquia y, es de importancia para analizar las dinámicas relacionadas con los usos del suelo, la conservación de la biodiversidad, el cambio climático y la orientación de políticas y programas enfocados en la conservación de hábitats estratégicos, y que proveen bienes y servicios ecosistémicos para la comunidad.

Conocer el patrón de comportamiento en los usos del suelo durante los últimos años en el municipio, aportan conocimiento y datos con rigor técnico para que se ajusten sus políticas de gestión agraria y ambiental, así como también para conocer una radiografía actualizada del comportamiento de las coberturas de la tierra teniendo en cuenta que estudios similares utilizando

técnicas de teledetección muestran la utilidad para el análisis de información geolocalizada y especialmente en territorios extensos y con relieve montañoso logrando constatar la validez y fiabilidad de estos métodos de evaluación y seguimiento (Sastre et al., 2016).

Este análisis en los cambios de las coberturas vegetales procura demostrar que es posible la cuantificación de las dinámicas y tendencias de las coberturas de la tierra, así como lo demostró Rojas Gamba et al. (2022) en su estudio realizado mediante el cual logra modelar el crecimiento urbano de la ciudad de Tunja entre el año 2017 y el año 2035 utilizando algoritmos de clasificación de imágenes satelitales.

Así mismo, se conocen datos recientes que utilizan imágenes satelitales para evaluar los cambios en el uso del suelo como el estudio publicado en la revista *Earth Sciences Research Journal*, donde Dursun et al. (2022), analizó imágenes satelitales del periodo comprendido entre los años 1975 a 2019 para conocer y cuantificar las transformaciones de la cobertura terrestre a través del tiempo, quedando en evidencia que al integrar herramientas de teledetección con sistemas de información geográfica, si se puede realizar este tipo de estudios que generan conocimiento del territorio y aportan información de interés para la planificación y el seguimiento de las tendencias espacio temporales.

Reconocer los cambios de cobertura y uso del suelo en el municipio de Girardota durante los últimos años, permite comprender las dinámicas territoriales que han transformado su territorio, especialmente en un contexto de creciente urbanización y presión sobre los ecosistemas locales. Este análisis no solo aporta evidencia para explicar los patrones de cambio en una zona estratégica del Valle de Aburrá, sino que también constituye un insumo clave para orientar la planificación territorial, la protección de fuentes hídricas y la conservación de áreas verdes. De esta manera, los resultados obtenidos podrán alimentar recomendaciones concretas que fortalezcan la gestión municipal y metropolitana, facilitando la toma de decisiones en torno al ordenamiento del suelo, la sostenibilidad ambiental y el equilibrio entre desarrollo urbano y conservación

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Analizar los cambios en las coberturas de la tierra en el municipio de Girardota, Antioquia, Colombia, mediante un estudio multitemporal de imágenes satelitales entre los años 2017 y 2025, con el propósito de comprender las dinámicas y tendencias de uso del suelo hacia el año 2033.

3.2. Objetivos específicos

Interpretar las coberturas de la tierra en el municipio de Girardota mediante clasificación supervisada basada en la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.

Identificar los cambios en las coberturas de la tierra mediante matrices de transición, con el fin de comprender la evolución territorial en el municipio de Girardota y aportar insumos para su gestión.

Estimar las tendencias de uso del suelo en el municipio de Girardota hacia el año 2033 con base en un modelo de Markov para conocer las posibilidades de transición entre las diferentes coberturas.

4. Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

La expansión de la frontera urbana y las actividades agropecuarias son los principales determinantes de la pérdida de cobertura de bosque natural en el municipio de Girardota entre 2017 y 2025.

4.1.1 Hipótesis nula

No existe una relación estadísticamente significativa entre la expansión de la frontera urbana, actividades agropecuarias y la pérdida de coberturas de bosque natural en Girardota, entre 2017 y 2025. Por lo tanto, cualquier cambio observado es producto del azar.

4.1.1.1 Hipótesis alterna.

Existe una relación estadísticamente significativa entre la expansión de la frontera urbana, actividades agropecuarias y la pérdida de coberturas de bosque natural en Girardota entre 2017 y 2025. Por lo tanto, los cambios en las coberturas de bosque, no se deben al azar.

4.1.1.1.1 Variables.

Las variables dependientes corresponden a los tipos de cobertura de la tierra que se miden en hectáreas (zonas urbanizadas; mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales; bosque fragmentado; vegetación secundaria o en transición y aguas continentales) y la variable independiente es el tiempo (años).

5. Marco teórico

Para el desarrollo de este proyecto aplicado mediante el cual se identifican las coberturas de la superficie terrestre utilizando imágenes satelitales, es importante tener en cuenta los siguientes conceptos fundamentales:

5.1. Estudios de coberturas y uso actual del suelo

La cobertura de la tierra se refiere a todo aquello que se observa en la superficie y que recubre el suelo. Describe áreas artificiales, construcciones civiles, urbanas, la vegetación, afloramientos rocosos y cuerpos de agua. Se refiere al revestimiento físico del suelo y que es observable sobre la superficie (Das, 2014), mientras que el uso actual del suelo se relaciona con la ocupación que le da el hombre al suelo en el desarrollo de sus actividades antrópicas como la ganadería, la agricultura y el uso urbano y recreativo. Estos conceptos están ampliamente relacionados y existen diversos sistemas y metodologías para la clasificación de las coberturas y usos de la superficie terrestre en las que se establecen categorías y subdivisiones para describir la realidad del territorio (Calvano & Rico, 2014).

En Colombia, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, es la entidad encargada del catastro nacional y de producir cartografía temática básica del país. La **Tabla 1.**, muestra las coberturas de la tierra en Colombia identificadas en el año 2015 a una escala 1:100.000 y elaborado de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover y aunque no es un estudio reciente, ofrece una ilustración de cómo se clasifican los suelos en el país.

Tabla 1.

Clasificación de coberturas de la tierra en Colombia

Categoría	Área (ha)	% área
Zonas urbanas y suburbanas	416.847	0,37%
Territorios agrícolas	5.315.705	4,66%
Territorios ganaderos	34.898.456	30,57%
Bosques	60.703.476	53,17%

Categoría	Área (ha)	% área
Bosques y áreas semi - naturales	5.064.191	4,44%
Áreas húmedas	1.376.513	1,21%
Superficies de agua	1.820.574	1,59%
Otras coberturas (afloramientos rocosos, glaciares y otros)	1.135.045	0,99%
Nubes	3.443.993	3,02%
TOTAL	114.174.800	100%

Fuente. FAO & MADS (2018).

El estudio de las coberturas de la tierra y su transformación en el tiempo constituye un campo fundamental dentro de la geografía ambiental y la planificación territorial. Las coberturas, entendidas como la expresión biofísica observable de la superficie terrestre, permiten identificar dinámicas espaciales relacionadas con procesos de urbanización, expansión agrícola, deforestación y restauración. Reconocer y analizar estas variaciones es indispensable para comprender los impactos ecológicos, económicos y sociales asociados a la transformación del territorio (FAO, 2018).

Los cambios de cobertura y uso del suelo han sido considerados uno de los principales motores de pérdida de biodiversidad y degradación ambiental a nivel global. En contextos urbanos y periurbanos, dichos cambios responden a la presión ejercida por el crecimiento poblacional y la demanda de suelo para vivienda, infraestructura y servicios. En consecuencia, la medición y el análisis de estos procesos se convierten en una herramienta clave para anticipar escenarios y proponer estrategias de gestión sostenible (Ellis, 2025).

5.2.Sistemas de información geográfica – SIG

Dentro de las herramientas más relevantes para este propósito se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG permiten integrar, procesar y analizar datos espaciales y temporales, facilitando la construcción de indicadores, mapas y modelos que hacen visible la transformación del territorio (Goodchild, 2010). Su uso ha trascendido la cartografía básica,

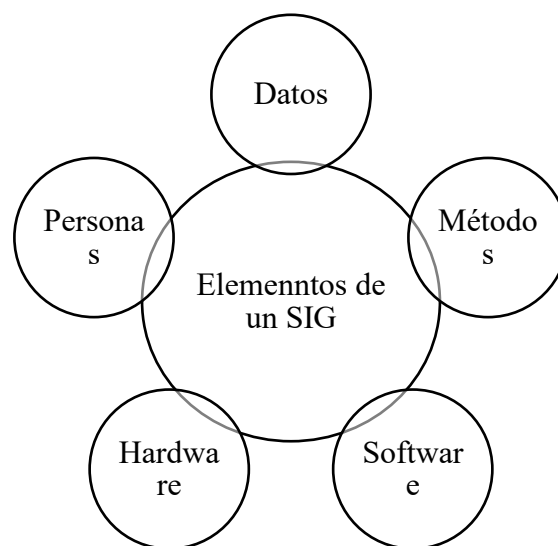
consolidándose como soporte para la planificación urbana, la gestión ambiental y la evaluación de riesgos.

Un sistema de información geográfico está integrado e interconectado con tecnología que incluye personas, equipos, dispositivos, software y otros elementos organizados con el objetivo de recopilar, procesar, transmitir, distribuir datos y procesar información geográfica y se entiende también como la unión entre las herramientas informáticas y la información espacial (Rodríguez & Olivella, s. f.) .

Las operaciones que pueden ser desarrolladas por un SIG son: lectura, almacenamiento y gestión de datos espaciales, consultas y análisis, entrega de resultados como mapas, tablas, informes y gráficos, entre otros. Además, es importante tener en cuenta que se trata de un sistema integrado que correlaciona la ubicación en el espacio con los datos descriptivos, y de manera fusionada ordena y procesa la información descriptiva y espacial. En consecuencia, un Sistema de información geográfica está estructurado por un conjunto de subsistemas o elementos como lo muestra la **Figura 2** y que interactúan cumpliendo diferentes funciones particulares para lograr un objetivo en común (Olaya, 2014).

Figura 2.

Elementos que conforman un Sistema de Información Geográfica



Fuente. Olaya (2014)

5.3.La teledetección

En paralelo al desarrollo de los SIG, la teledetección se ha posicionado como un insumo estratégico para el monitoreo multitemporal. El desarrollo de sensores satelitales y plataformas de libre acceso, como Landsat y Sentinel, ha permitido obtener series temporales consistentes que apoyan la caracterización de coberturas en distintas escalas. La integración de imágenes satelitales posibilita identificar transiciones en el territorio, generando una comprensión más profunda de los procesos espaciales en curso (Fagua, Rodríguez, et al., 2023)

La teledetección o percepción remota es un conjunto de técnicas estructuradas con el objetivo de obtener información desde la distancia de un objeto situado en la superficie terrestre. Es importante tener en cuenta que la información derivada en algunos casos supera el alcance del ojo humano y es obtenida debido a la interacción entre el sensor, el objeto de estudio y el flujo energético o espectro electromagnético. En consecuencia, se pueden utilizar las firmas espectrales de los elementos estudiados para su identificación y clasificación debido a que todos los materiales presentan diferentes niveles de reflectancia y esto permite una correcta caracterización (Veneros et al., 2020).

Actualmente, la teledetección es una herramienta muy utilizada en las investigaciones ecológicas y de conservación de la biodiversidad debido a que permite monitorear el estado de conservación o deterioro de los ecosistemas y es aplicable para grandes extensiones de terreno. También, es útil porque las imágenes satelitales poseen una resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal de diferentes valores según el nivel detalle que requiera el usuario y esto, permite hacer diversos análisis y cálculo de índices asociados a la biodiversidad y el conocimiento de los ecosistemas (Sánchez, 2018).

5.4.Metodología CORINE Land Cover

Es una metodología desarrollada en Francia y fue adaptada para Colombia por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales (IDEAM). Se trata de una técnica de clasificación de coberturas de la superficie terrestre utilizada para inventariar o nombrar los usos del suelo de manera ordenada y sistemática (Suárez et al., 2016). Es utilizada para realizar mapas de uso actual del suelo, determinar cambios en las coberturas, conocer las dinámicas de transformación del territorio y tomar decisiones políticas en materia de gestión territorial, manteniendo un lenguaje estandarizado y comprensible entre instituciones, productores de cartografía y los grupos de interés (Valencia & Anaya, 2009).

En Colombia, el estudio de coberturas y cambios de uso del suelo ha estado estrechamente ligado a esta metodología y a los lineamientos del IDEAM, que ha estandarizado la clasificación temática y la actualización de cartografía ambiental (Salazar et al., 2018). Estos insumos han sido fundamentales para la toma de decisiones en los ámbitos nacional y regional, consolidando un marco de referencia que orienta los estudios a escala local.

En estudios que han explorado los desafíos de aplicar la metodología CORINE Land Cover en contextos con alta heterogeneidad biológica, como ecosistemas tropicales, se ha constatado que su simplicidad inherente puede sacrificar información relevante. En este escenario, Arellano-P et al. (2016) destacan que la clasificación de cobertura en categorías generales como “bosque” y “no bosque” lleva a la pérdida de detalles florísticos y estructurales críticos, como manglares densos o bosques específicos, particularmente en regiones donde la diversidad vegetal es alta y la pérdida de heterogeneidad es significativa. Este tipo de limitaciones resalta la necesidad de adaptar la metodología al territorio para capturar la complejidad ecológica local y asegurar un análisis más útil y representativo.

Por otro lado, investigaciones realizadas en Colombia muestran la eficacia de la metodología CORINE Land Cover adaptada en la generación de información espacial y temporal confiable para apoyar decisiones de conservación y ordenamiento ambiental. Suárez-Parra et al. (2016) en un estudio sobre la microcuenca de la quebrada Mecha (Boyacá), encontraron que al utilizar imágenes Landsat 8 y ajustar la leyenda a escala 1:100 000 conforme a las directrices del IDEAM, se obtenían mejores resultados en la clasificación. Este caso demuestra que la adaptación local de la metodología potencia su utilidad como herramienta territorial para la gestión ambiental y la formulación de políticas de conservación.

5.5. Estudios multitemporales

El análisis multitemporal es una de las metodologías más utilizadas para el estudio de cambios en coberturas. Este enfoque permite comparar diferentes momentos en el tiempo y establecer matrices de cambio que detallan las transiciones entre categorías de cobertura (por ejemplo, de bosque fragmentado a mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales o a zonas urbanizadas). Según Lambin & Geist (2006) estas matrices ofrecen una visión clara sobre los patrones y tendencias de transformación, aportando información crítica para la formulación de políticas públicas.

Los estudios multitemporales combinan imágenes satelitales de distintos años para observar la evolución de la cobertura del suelo, haciendo posible cuantificar transformaciones y patrones espaciales dinámicos. En el contexto colombiano, un ejemplo reciente analizó cambios entre 2014 y 2034 en el Paisaje Cultural Cafetero, empleando datos Landsat y Sentinel-1, clasificaciones supervisadas y modelos predictivos, logrando alta precisión (índice Kappa 0,84). Este enfoque evidenció una expansión urbana marcada y una fuerte pérdida de cobertura forestal, revelando procesos de fragmentación de las coberturas de la tierra (Rojas Celis et al., 2025).

A nivel regional en Colombia, se ha aplicado el análisis multitemporal para cuantificar la expansión urbana y medir la pérdida de áreas verdes o bosques naturales. Un caso en el municipio de Madrid (Cundinamarca) evaluó el periodo 1977-2020 empleando la metodología CORINE Land Cover adaptada, junto con índices como NDVI y NDBI para detectar cambios en las coberturas de la tierra y evolución de las zonas construidas, mostrando una caída de bosques y áreas semi naturales del 86 % como consecuencia del acelerado proceso de urbanización en la región (Culma-Tamara & García-Ubaque, 2022).

El municipio de Girardota representa un caso de especial interés, al ser un espacio periurbano del Valle de Aburrá que combina dinámicas rurales y urbanas. Su territorio enfrenta presiones derivadas de la expansión de la frontera urbana y de actividades agropecuarias, lo que genera pérdida de coberturas boscosas y modificaciones en la disponibilidad de servicios

ecosistémicos (Cardona-Mesa et al., 2025a). En este contexto, el uso de SIG y análisis multitemporal constituye una estrategia adecuada para comprender los patrones de cambio y pronosticar los fenómenos futuros asociados a cambios en las coberturas de la tierra.

5.6. Matrices de transición

Metodológicamente, la construcción de matrices de transición se convierte en un componente clave, dado que permite no solo identificar las áreas transformadas, sino también analizar los procesos que subyacen a dichas transformaciones. Estudios previos han demostrado que estas matrices son esenciales para evaluar la sostenibilidad territorial y proyectar escenarios de cambio (Turner et al., 2007). Así, la elección metodológica del presente estudio responde a un sustento teórico consolidado y a prácticas ampliamente validadas en la literatura científica.

Roger Pontius introdujo una perspectiva crítica sobre la evaluación del cambio utilizando matrices de transición multitemporales; su enfoque diferencia entre frecuencia de cambio de categoría y número de categorías por píxel, lo cual ayuda a identificar cambios reales frente a artefactos de clasificación y mejora la validación de mapas de cobertura (Paegelow et al., 2022).

El modelo de cadena de Markov calcula la probabilidad de que una unidad territorial cambie de una categoría a otra en el futuro, basándose únicamente en la distribución actual y la frecuencia observada de cambio. Esta matriz de probabilidades (una expresión del comportamiento histórico del sistema) es ampliamente usada en infraestructuras SIG para generar mapas de transición esperada entre categorías, permitiendo obtener valores futuros y predecir los cambios en las coberturas de la tierra (Hamad et al., 2018).

Cuando se utiliza el modelo híbrido CA-Markov combinado con metodologías SIG, no solo se estima las probabilidades de cambio, sino que también incorpora la influencia espacial de los vecinos contiguos, lo que permite simular la expansión geográfica de coberturas con mayor realismo. Este enfoque ha sido aplicado exitosamente en estudios de expansión urbana, cobertura forestal y manejo de cuencas hidrográficas (Tahir et al., 2025a).

En resumen, las matrices de transición de Pontius enriquecen el análisis al distinguir cambios reales de errores clasificatorios, mientras que los modelos de Markov permiten proyectar dinámicas futuras a partir de patrones históricos. La fusión de estos enfoques permite un estudio robusto de la transformación territorial y fundamenta metodologías aplicadas en contextos como Girardota, especialmente cuando se integran con plataformas de procesamiento espacial en SIG.

6. Metodología

6.1. Enfoque metodológico

El proyecto de investigación aplicado tuvo un enfoque metodológico cuantitativo porque se orienta en la medición numérica de variables asociadas y todos los objetivos concentraron su propósito en cuantificar las coberturas de la tierra (áreas, porcentajes) y en proyectar transiciones entre las clases basándose en un modelo predictivo de Markov.

Por otra parte, se incorporan geo procesos analíticos y estadísticos en la clasificación supervisada, los métodos de control de calidad y la estimación de tendencias. Así mismo, la inferencia e interpretación de los resultados se realizó a partir de resultados métricos (matrices de transición, probabilidad, mapas temáticos con valores de área por cobertura) y finalmente, el estudio se concentró en el análisis a escala espacial y temporal comparando los cambios entre las coberturas y proyectando las tendencias.

La metodología descrita busca responder ¿Cómo ha evolucionado la dinámica espacio-temporal de las coberturas de la tierra en el municipio de Girardota, Antioquia, entre 2017 y 2025, y cuáles son las principales tendencias hacia el año 2033? partiendo de la hipótesis de que la expansión de la frontera urbana y las actividades agropecuarias son los principales determinantes de la pérdida de cobertura de bosque natural en el municipio de Girardota entre 2017 y 2025.

6.2. Tipo de estudio

El análisis multitemporal de las coberturas en el municipio de Girardota corresponde a un estudio cuantitativo correlacional porque se enfoca en medir la congruencia que existe entre dos variables (espacio y tiempo) para detectar patrones y tendencias en el cambio de las coberturas de la tierra, las transformaciones en el tiempo y la proyección de tendencias mediante el uso de Sistemas de información geográfica.

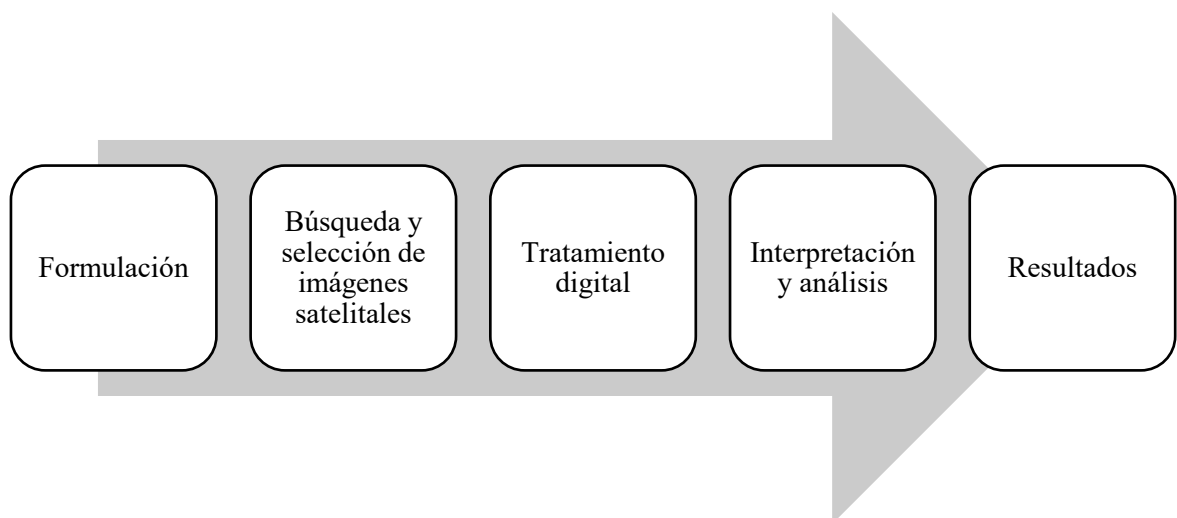
6.3. Procedimiento técnico implementado

Para la realización del presente proyecto aplicado se sigue parcialmente el esquema metodológico de actualización de estudios de cobertura de las tierras a diferentes escalas publicado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (2024) y se clasifican las coberturas de la tierra con base en la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.

Además, el análisis se realiza en varias fases como lo muestra la **Figura 3.**, con el objetivo de seguir una ruta lógica y sistemática que incorpora criterios de selección de los datos, métodos rigurosos de geoprocesamiento, control de calidad y análisis técnico para conocer la transición de las coberturas en el tiempo.

Figura 3.

Fases del procedimiento para realizar el análisis multitemporal



6.3.1. Formulación

Esta fase consiste en la revisión de antecedentes, definición del problema, formulación de objetivos e identificación de la pregunta de investigación que plantea la inquietud sobre cómo han

cambiado las coberturas de la tierra en el municipio de Girardota, Antioquia durante los últimos años.

6.3.2. Procedimiento para la búsqueda y selección de imágenes satelitales

La búsqueda de imágenes satelitales se realiza en PlanetScope teniendo en cuenta los criterios de selección definidos en la **Tabla 2**, con el objetivo de recopilar datos de alta calidad para garantizar resultados coherentes con la realidad y facilitar un análisis preciso de las dinámicas espaciales y temporales del uso del suelo.

Tabla 2.

Criterios de selección de las imágenes satelitales

Parámetro	Criterio de selección
Fecha	Cualquier fecha dentro del año de interés
Resolución espacial	3 metros
Resolución espectral	RGB + NIR
Resolución radiométrica	8 bits
Cobertura del área de estudio	100%
Cobertura de nubes	0 - 2%
Tipo de imagen	Escena de PlanetScope
Etapas de publicación	Finalizado
Distancia de la muestra terrestre	0,1 - 30 m
Ángulo fuera del nadir	- 60° a 60°
Azimut del sol	0 - 360°
Elevación del sol	-90 - 90°

Fuente. PlanetScope (2025)

6.3.3. Procedimiento para el tratamiento digital de las imágenes satelitales

El tratamiento digital explicado en este capítulo se repite para cada una de las imágenes satelitales y ortomosaicos generados de modo que se realiza exactamente el mismo procedimiento

para todos con el objetivo de normalizar y estandarizar los datos para facilitar la comparación de resultados.

6.3.3.1.Preprocesamiento digital

En esta fase se revisan las imágenes satelitales descargadas y se implementa el siguiente procedimiento (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) para llevar los datos crudos (raw) de los sensores remotos a datos normalizados en estado homogéneo de modo que puedan ser comparables y aptos para realizar cualquier tipo de análisis.

Figura 4.

Preprocesamiento digital de las imágenes satelitales



- **Corrección radiométrica**

Se realiza con el propósito de convertir los niveles digitales de cada píxel (DN) a valores de reflectancia (TOA) y para realizarlo se utiliza la **Ecuación 1** en la calculadora ráster de ArcGis Pro:

Ecuación 1.

Cálculo de valores de reflectancia en la calculadora ráster de ArcGis Pro

$$ExtractBand = DN * \beta$$

Dónde,

ExtractBand: Función de ArcGis Pro que selecciona y extrae una banda de un ráster multibanda.

DN: niveles digitales de cada píxel

β : coeficiente de reflectancia (este valor se extrae de los metadatos de cada imagen satelital y es un valor diferente para cada banda).

Este procedimiento se realiza para todas las imágenes satelitales y para cada banda.

Corrección de offset radiométrico

Se realiza con el objetivo de eliminar y minimizar la influencia del sensor y del offset del sensor en la imagen satelital. Se basa en restar a cada píxel el valor constante (offset) y llevar al valor de cero (0) los números negativos. Para realizarlo se utilizó la calculadora ráster de ArcGis Pro (**Ecuación 2**).

Ecuación 2.

Corrección de offset radiométrico en ArcGis Pro

$$Con = ((Banda - \alpha) < 0, 0, (Banda - \alpha))$$

Dónde,

Con: función de ArcGis Pro que evalúa una condición por píxel y elige entre dos valores dependiendo si es verdadera o falsa.

Banda: corresponde al nombre de la banda con la que se está trabajando

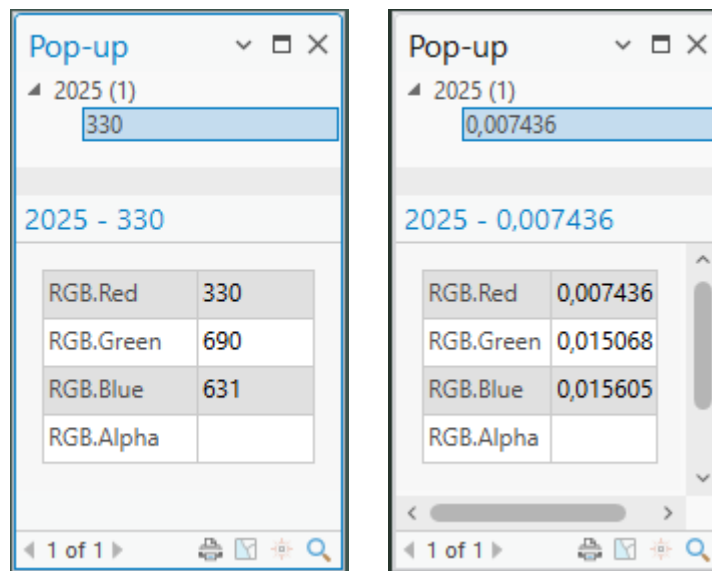
α : valor de offset radiométrico o valor mínimo

Este procedimiento se realiza para todas las imágenes satelitales y para cada banda. Una vez terminado este proceso se vuelve a realizar composición de bandas utilizando la función *Composite Bands* de ArcGis Pro.

En este proceso de conversión de niveles digitales (DN) a valores de reflectancia se obtienen las imágenes corregidas y se puede apreciar los cambios en los valores de cada píxel como lo muestra la **Figura 5**, donde se hace un *Pop-up* en ArcGis Pro sobre el mismo punto para apreciar la diferencia en valores antes y después de la corrección.

Figura 5.

Comparación de los valores de píxel antes y después de la corrección (derecha)



▪ Reproyección

Se realiza con el objetivo de normalizar los datos para que queden en un único sistema de referencia espacial y se realiza en ArcGis Pro para todas las capas utilizando la función **Project ráster** convirtiendo el sistema de coordenadas de todas las imágenes al Origen único nacional (MAGNA - SIRGAS CMT12).

Se normalizan las coordenadas de todos los ortomosaicos como lo muestra la **Figura 6** donde se observa el antes y después, quedando todos en coordenadas proyectadas CTM12.

Figura 6.

Reproyección de coordenadas UTM (izquierda) a CTM12 (derecha)

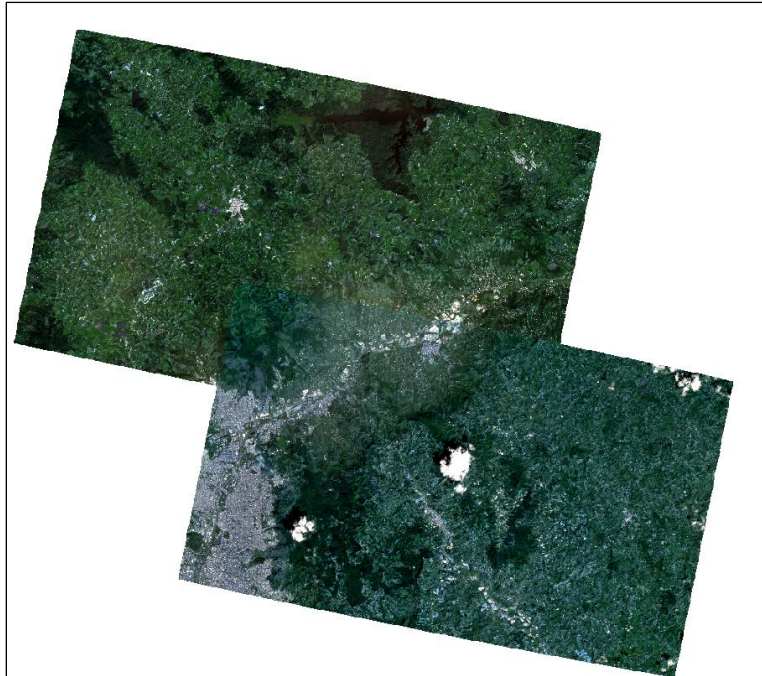
Projected Coordinate System	WGS 1984 UTM Zone 18N	Projected Coordinate System	MAGNA_Transverse_Mercator
Projection	Transverse Mercator	Projection	Transverse Mercator
WKID	32618	Authority	Custom
Authority	EPSG	Linear Unit	Meters (1,0)
Linear Unit	Meters (1,0)	False Easting	500000,0
False Easting	500000,0	False Northing	2000000,0
False Northing	0,0	Central Meridian	-73,0
Central Meridian	-75,0	Scale Factor	0,9992
Scale Factor	0,9996	Latitude Of Origin	4,0
Latitude Of Origin	0,0		

▪ Composición de mosaico

Se realiza para unir en solo *dataset* varias escenas ráster que componen el área de estudio y de esta manera queda una sola superficie (**Figura 7**) que facilita los posteriores análisis y geoprosesos. Para este caso específico se realiza utilizando la función *Mosaic To New Ráster*

Figura 7.

Ortomosaico compuesto por varias escenas



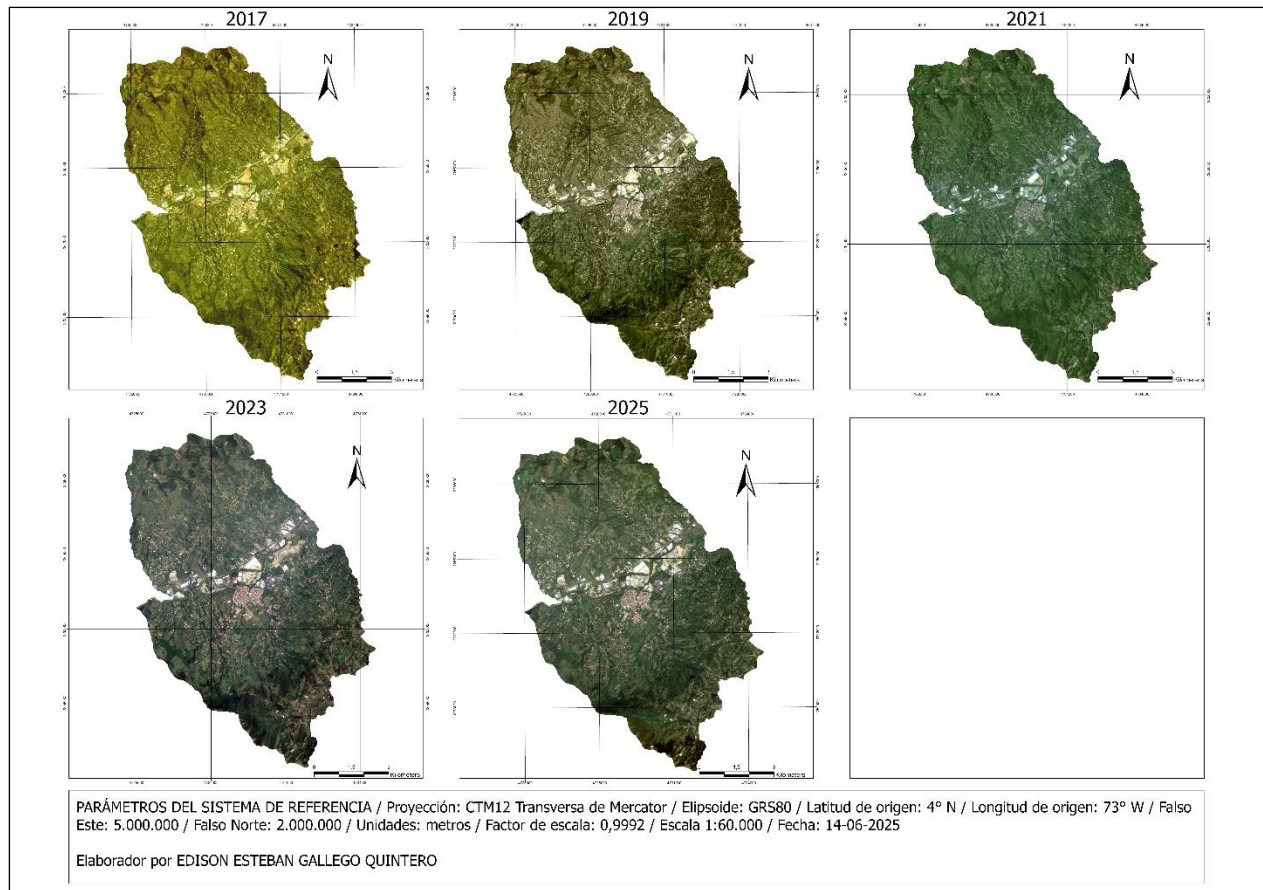
- **Recorte del área de estudio**

Se realiza con el objetivo de recortar el mosaico y dejar exclusivamente el área de estudio o de interés. En este caso, se utiliza la función *Clip Ráster* de ArcGis Pro para recortar el mosaico con base en un *Shapefile* del municipio de Girardota.

Se obtienen cinco ortomosaicos correspondientes a cada año para el área de estudio (*Figura 8*) y estos se encuentran debidamente georreferenciados, con corrección radiométrica y compuestos por cuatro bandas (RGB+NIR) y los cuales son los insumos principales para la clasificación supervisada y el análisis multitemporal.

Figura 8.

Ortomosaicos del área de interés

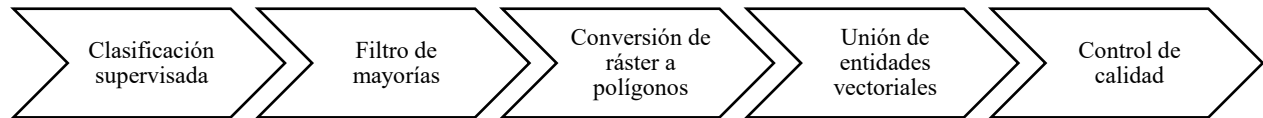


6.3.3.2. Procesamiento digital de las imágenes satelitales

En esta fase se toman los mosaicos resultantes del preprocesamiento digital (uno por cada año) y se implementa el siguiente procedimiento (*Figura 9*) para realizar la clasificación supervisada y los demás geoprocursos que permiten establecer una comparación entre los resultados y conocer los cambios en las coberturas de la tierra.

Figura 9.

Procesamiento digital de las imágenes satelitales



▪ Clasificación supervisada

Se realiza con el objetivo de agrupar los píxeles en categorías previamente definidas en muestras de entrenamiento tomadas en cada cobertura. En este caso de estudio se definieron cinco categorías y se tomaron en total 200 muestras por cada mosaico (*Tabla 3*).

Tabla 3.

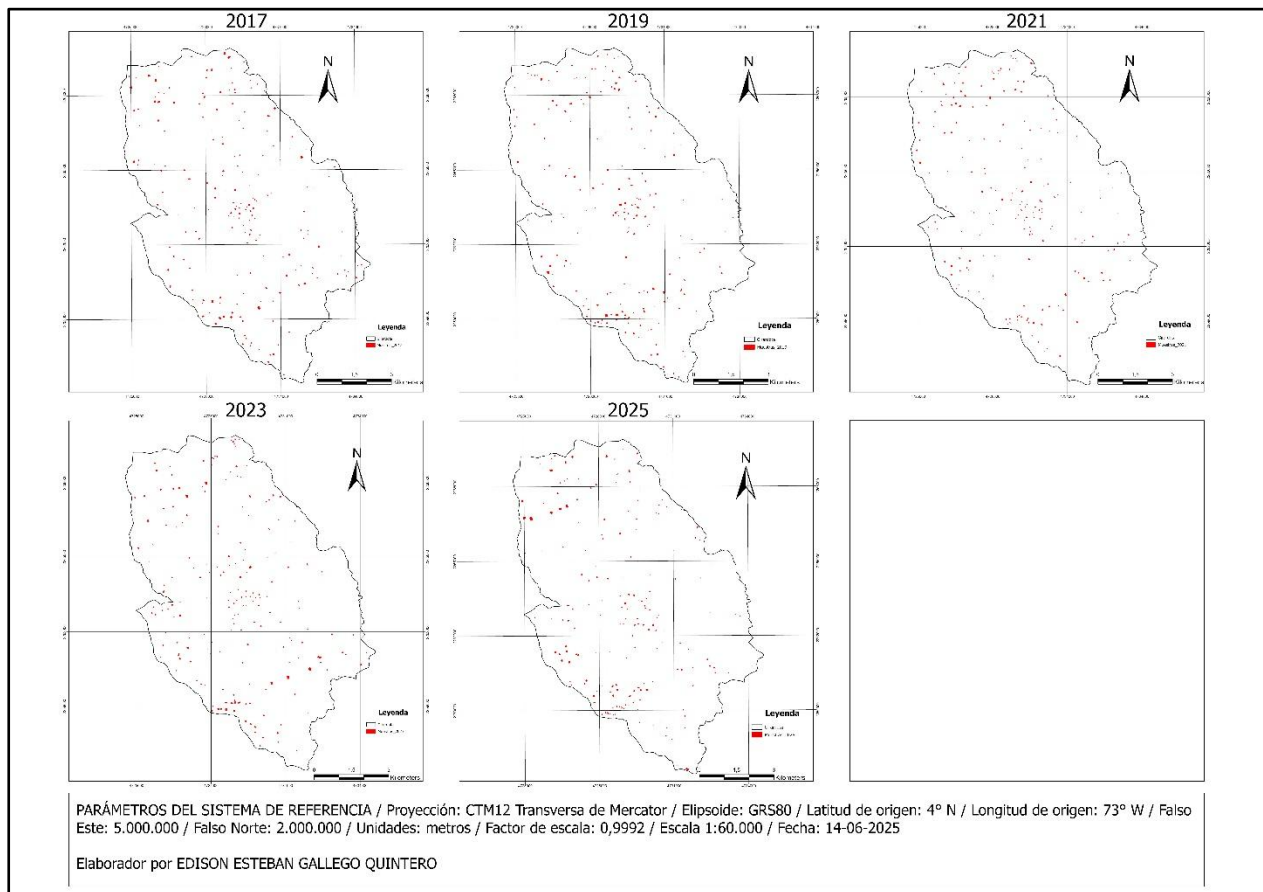
Cantidad de muestras tomadas para realizar clasificación supervisada

Cobertura	Gridcode	Cantidad de muestras
Zonas urbanizadas	1	30
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2	80
Bosque fragmentado	3	30
Vegetación secundaria o en transición	4	50
Aguas continentales	5	10
Total		200

Las muestras se toman creando un archivo Shapefile y formando polígonos en forma de rectángulos sobre cada categoría observada procurando hacer una distribución en toda el área de estudio (*Figura 10*).

Figura 10.

Muestras de entrenamiento tomadas para realizar la clasificación supervisada



Una vez tomadas las muestras, se extrae la firma espectral utilizando la función *Create Signatures* de ArcGis Pro y se guardan como en formato GSG. Finalmente se utiliza la función *Maximum Likelihood Classification* de ArcGis Pro para agrupar los píxeles según sus categorías y para completarlo, se selecciona el mosaico correspondiente y la respectiva firma espectral de las muestras de entrenamiento.

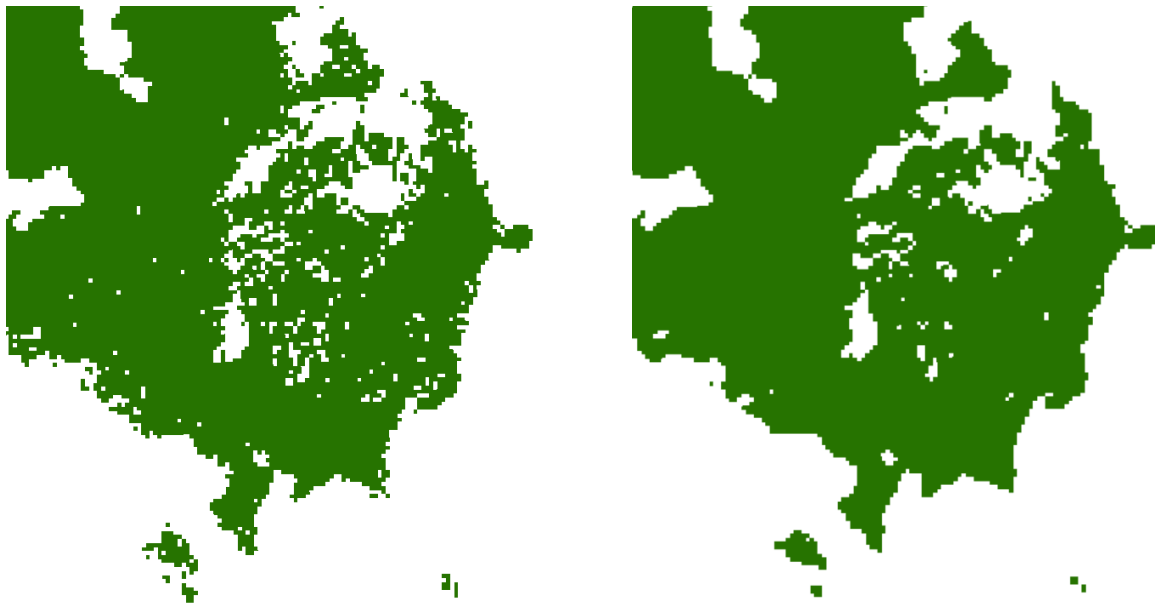
- **Filtro de mayorías**

Corresponde al post procesamiento y esta función toma el ráster resultante de la clasificación supervisada, analiza cada píxel clasificado y sus vecinos. Finalmente reemplaza la clase del píxel central por la clase más frecuente (mayoría) y permite eliminar ruidos o píxeles

únicos aislados convirtiéndolos a la clase más dominante a su alrededor (**Figura 11**). En este caso se realiza en ArcGis Pro utilizando la función *Majority Filter*.

Figura 11.

Filtro de mayorías (a la izquierda sin aplicar y a la derecha después de aplicarlo)



- **Conversión de ráster a polígonos**

Este proceso transforma el dataset rasterizado (de píxeles) a un dataset vectorial (de polígonos) donde cada grupo de píxeles que comparte el mismo valor (gridcode) se convierte en un polígono independiente. Se realiza en ArcGis Pro utilizando la función *Ráster to Polygon* y la **Tabla 4**, muestra la cantidad de polígonos que se formaron al realizar el geoproceso con cada imagen.

Tabla 4.

Cantidad de polígonos resultantes en cada año

Año	Cantidad de polígonos
2017	45.593
2019	37.941
2021	31.373
2023	59.209
2025	32.242
Total	206.358

- **Unión de entidades vectoriales**

Como se puede observar en la **Tabla 4**, resulta bastante complejo administrar los datos con tantos polígonos y se utiliza la función *Dissolve* de ArcGis Pro, que fusiona entidades adyacentes que comparten un valor en común (gridcode) y por lo tanto se obtienen solamente cinco categorías que fueron exactamente las mismas que se definieron al inicio de la clasificación supervisada.

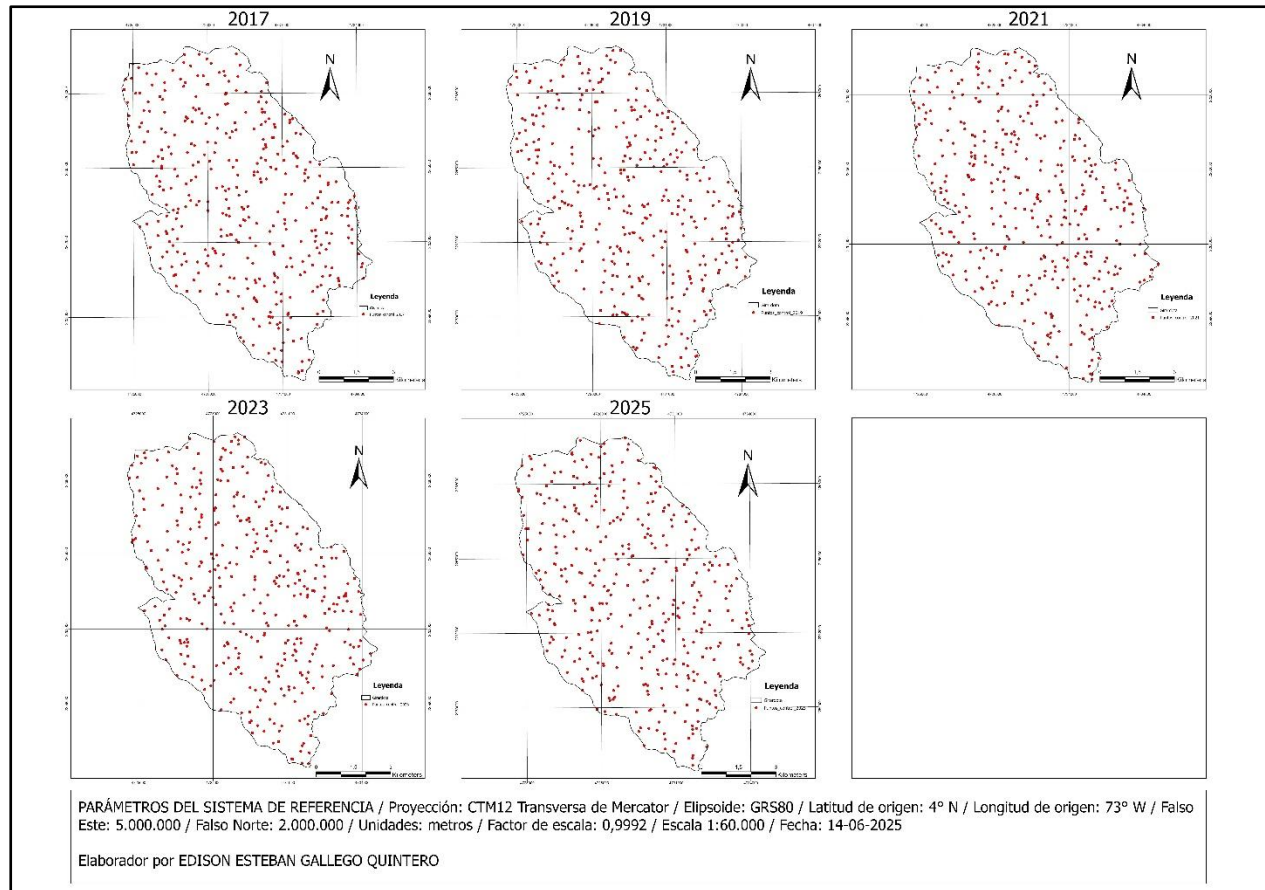
- **Control de calidad**

Se realiza matriz de confusión para cada año que consiste en la comparación de los resultados de la clasificación obtenida (clasificación supervisada) con los datos de referencia (datos verdaderos de campo según observación) y determina la precisión de la clasificación.

En total se evaluaron 385 puntos de control en cada ortomosaico que fueron creados en ArcGis Pro mediante la función *Create accuracy Assessment Points* (**Figura 12**)

Figura 12.

Puntos de control para completar matriz de confusión



Finalmente, se utiliza la función *Compute Confusion Matrix* de ArcGis Pro para completar el proceso de evaluación y obtener el cálculo de exactitud global e índice de Kappa y como resultado se obtienen los datos relacionados en la **Tabla 5**.

Tabla 5.

Resultados del control de calidad

Año	Índice de Kappa
2017	0,6729
2019	0,7842
2021	0,6568
2023	0,7998
2025	0,6571

De acuerdo con Landis & Koch (1977), el coeficiente de Kappa se interpreta de la siguiente manera (**Tabla 6**), teniendo en cuenta que este indicador corresponde a la valoración de la concordancia entre la clasificación supervisada y la observación real de las coberturas reales en el ortomosaico.

Tabla 6.

Interpretación del índice de Kappa

Coeficiente de Kappa	Fuerza de concordancia
< 0,00	Pobre
0,00 – 0,20	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderado
0,61 – 0,80	Considerable
0,81 – 1,00	Casi perfecto

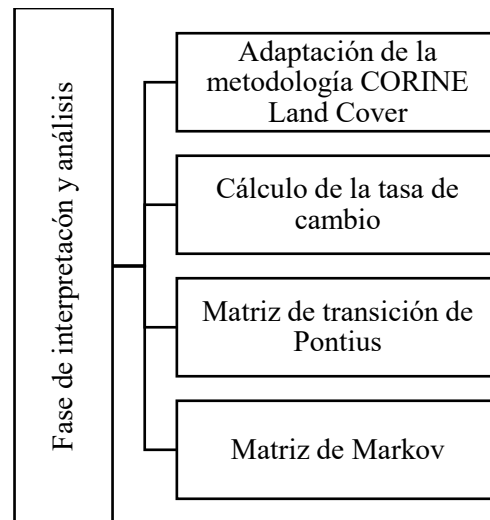
Fuente. Landis & Koch (1977)

6.3.4. Procedimiento para la interpretación y análisis

En esta fase se definen los métodos y procedimientos para interpretación de los resultados obtenidos (**Figura 13**) y el análisis espacio temporal de los cambios en las coberturas de la tierra.

Figura 13.

Procedimiento de interpretación y análisis



6.3.4.1. Adaptación de la metodología CORINE Land Cover

La Metodología CORINE Land Cover, desarrollada por la Agencia Europea de Medio Ambiente es ampliamente utilizada para la clasificación y monitoreo de coberturas de la tierra. En Colombia, fue adaptada por el IDEAM (2010b) a una escala de 1:100.000 y actualmente es utilizada por entidades oficiales para múltiples estudios ambientales. No obstante, su aplicación directa en regiones tropicales y a escalas más grandes (1:25.000) como es el caso del presente estudio en el municipio de Girardota, Antioquia, requiere de una adaptación contextual teniendo en cuenta las condiciones ecológicas, usos del suelo, dinámica territorial y características específicas de los datos disponibles.

Teniendo en cuenta lo anterior, la **Tabla 7**, relaciona la clasificación que se implementa para las coberturas identificadas, la cual se basa en la metodología CORINE Land Cover, pero está adaptada.

Tabla 7.

Coberturas de la tierra adaptadas de la metodología CORINE Land Cover

Coberturas (nivel 1)	Coberturas (nivel 2)	Coberturas (nivel 3)
Territorios artificializados	Zonas urbanizadas	Zonas urbanizadas
Territorios agrícolas	Áreas agrícolas heterogéneas	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
Bosques y áreas seminaturales	Bosques	Bosque fragmentado
Bosques y áreas seminaturales	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Vegetación secundaria o en transición
Superficies de agua	Aguas continentales	Aguas continentales

Fuente. El autor con base en IDEAM (2010b)

El estudio realizado con las imágenes satelitales cuya resolución espacial es de tres metros permite llegar fácilmente hasta el nivel tres y en estas cinco categorías se agruparon los usos del suelo como se describe a continuación:

- **Zonas urbanizadas**

En esta categoría se agrupa el tejido urbano continuo (zona urbana) y el tejido urbano discontinuo (viviendas dispersas) (*Figura 14*), también zonas industriales o comerciales y redes de comunicación (vías). En resumen, dentro de esta categoría se agrupan las áreas asociadas a ciudades y poblaciones, es decir, todo aquello que es construido o artificializado.

Figura 14.

Zonas urbanizadas



Nota. Fotografía a la izquierda; imagen satelital a la derecha.

- **Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales**

Comprende una combinación de espacios agrícolas heterogéneos donde se mezclan pastos, cultivos y espacios verdes sin que se logre establecer con claridad un límite específico entre ellos (**Figura 15**). En esta cobertura se agrupan territorios productivos y con actividad agropecuaria intensiva.

Figura 15.

Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales



Nota. Fotografía a la izquierda; imagen satelital a la derecha.

▪ **Bosque fragmentado**

Comprende territorios cubiertos por vegetación muy densa que corresponde a bosques naturales (**Figura 16**) cuya continuidad horizontal se encuentra interrumpida por las actividades antrópicas y no representa grandes extensiones de terreno, sino que se conforma por bloques fragmentados.

Figura 16.

Bosque fragmentado



Nota. Fotografía a la izquierda; imagen satelital a la derecha.

▪ **Vegetación secundaria o en transición**

Comprende aquellos territorios cubiertos por vegetación natural en estado de sucesión temprana que se presenta como resultado de la intervención de la vegetación primaria y puede encontrarse en un estado de transición donde posteriormente se puede convertir en bosques (**Figura 17**). En esta categoría se incluye la vegetación secundaria alta y la vegetación secundaria baja.

Figura 17.

Vegetación secundaria o en transición



Nota. Fotografía a la izquierda; imagen satelital a la derecha.

- **Aguas continentales**

Comprende corrientes de agua naturales que fluyen de manera continua y también cuerpos de agua intermitentes, estacionales, lagunas, ciénegas, estanques y depósitos de agua (**Figura 18**).

Figura 18.

Aguas continentales



Nota. Fotografía a la izquierda; imagen satelital a la derecha.

6.3.4.2. Cálculo de la tasa de cambio

La tasa de cambio se conoce como un indicador que mide la velocidad con la que una cobertura de la tierra cambia en un periodo de tiempo determinado y se expresa como un porcentaje anual y para calcularla se emplea la **Ecuación 3**.

Ecuación 3.

Tasa de cambio anual

$$Tasa\ de\ cambio\ anual\ (\%) = \left(\frac{A2 - A1}{A1 * T} \right) * 100$$

Dónde,

A1: área de la clase de cobertura en el año inicial

A2: área de la clase de cobertura en el año final

T: número de años entre los dos periodos (Año 2 – Año 1)

6.3.4.3. Matriz de transición de Pontius

La matriz de transición o de tabulación cruzada de Pontius et al. (2004), relaciona las categorías de uso del suelo en dos momentos temporales diferentes y es importante para el análisis de cambios en las coberturas del territorio debido a que permite evaluar los cambios identificando ganancias, pérdidas y transformaciones.

La metodología consiste en organizar los datos en una tabla donde se cruza el año inicial y el año final. Las áreas ubicadas en las diagonales muestran las áreas que no sufrieron cambio de uso en el periodo determinado, mientras que las demás muestran como cambiaron de una cobertura a otra (**Tabla 8**). En ArcGis Pro, se realiza la aplicación mediante la función *Intersect* que cruza los datos y devuelve como resultado una tabla de atributos y el mapa del área de estudio con la relación de las respectivas áreas según esta intersección.

Tabla 8.

Matriz de transición con códigos de tabulación

		T2					Total T1
		Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4	Cat 5	
T1	Cat 1	11	12	13	14	15	P1
	Cat 2	21	22	23	24	25	P2
	Cat 3	31	32	33	34	35	P3
	Cat 4	41	42	43	44	45	P4
	Cat 5	51	52	53	54	55	P5
	Total T2	P1	P2	P3	P4	P5	

Fuente. Pontius et al. (2004)

Dónde:

P: corresponde a la suma del área de cada categoría

T1: corresponde al tiempo inicial

T2: corresponde al tiempo final

6.3.4.4. Matriz de Marcov

El modelo de Marcov es probabilístico y establece la probabilidad de que una clase “*i*” se convierta en una clase “*j*” en el siguiente periodo de tiempo. Para esto, parte de la matriz de transición y la normaliza por filas para obtener la probabilidad relativa (%) de que una clase se convierta en otra y luego proyecta la distribución futura de áreas multiplicando esta probabilidad por el vector de la matriz de transición (ver ecuación 4).

Ecuación 4.

Cálculo de la matriz de Marcov

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{con } 0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad \text{y} \quad \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$$

$$\mathbf{S}_{t+1} = \mathbf{P}_{ij} \times \mathbf{S}_t$$

Fuente. Tahir et al. (2025b)

Dónde:

P_{ij} : matriz de transición

P_{ij} : es la probabilidad de que una cobertura de la tierra pase de un estado actual (*i*) a un estado futuro (*j*)

$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ la suma de probabilidades por fila es igual a 1

S_t : es el vector de columna con la cantidad de cada clase en un momento determinado (*t*)

S_{t+1} : corresponde a la proyección o estado futuro en el momento (*t*) determinado.

7. Resultados

7.1. Búsqueda y selección de imágenes satelitales

Una vez aplicados los criterios de selección en la plataforma de PlanetScope, se obtuvieron los resultados disponibles por cada año (**Tabla 9**) y aunque el estudio inicialmente se había planteado entre el periodo comprendido entre el año 2015 y el año 2025, no fue posible debido a la ausencia de resultados de imágenes satelitales con los criterios de selección establecidos y, por lo tanto, se replantea el estudio y se desarrolla en el periodo comprendido entre el año 2017 y el año 2025.

Tabla 9.

Resultados de la búsqueda de imágenes satelitales en PlanetScope

Año	Cantidad de resultados
2015	0
2016	0
2017	1
2018	2
2019	2
2020	7
2021	3
2022	0
2023	10
2024	14
2025	1
Total	40

Los resultados de la búsqueda de imágenes satelitales en PlanetScope evidencian que, aunque el estudio se había planteado inicialmente para el periodo 2015 - 2025, no fue posible trabajar con los años 2015, 2016 y 2022 debido a la ausencia de datos que cumplieran con los criterios de selección establecidos. Por esta razón, el análisis multitemporal se replantea para el intervalo comprendido

entre 2017 y 2025, periodo en el cual sí se encontraron imágenes con calidad y cobertura suficientes para el estudio.

La disponibilidad de imágenes en este rango temporal fue variable, con un número reducido en los primeros años (2017 y 2018) y un aumento progresivo en 2020, 2023 y 2024, alcanzando un total de 40 imágenes. No obstante, para garantizar una línea de tiempo coherente y homogénea, se estableció un esquema de análisis en periodos de dos años, seleccionando únicamente 2017, 2019, 2021, 2023 y 2025 como años de referencia para el seguimiento de los cambios.

▪ Escenas descargadas

Una escena es una porción de área que cubre parte de la superficie terrestre de interés y la **Tabla 10** relaciona la cantidad de escenas que se descargaron por cada año para obtener una cobertura total del municipio.

Tabla 10.

Cantidad de escenas descargadas

Año	Cantidad de escenas
2017	3
2019	3
2021	2
2023	2
2025	2
Total	12

Al realizar la descarga de escenas, se identificó que era necesario obtener varias por año para cubrir la totalidad del municipio. En total se descargaron 12 escenas, distribuidas de manera diferenciada en cada periodo según la cobertura requerida. Este proceso asegura que, a pesar de las limitaciones en la disponibilidad de datos, se cuenta con una base de información robusta y representativa para desarrollar el análisis multitemporal de las coberturas.

La ausencia de imágenes satelitales en algunos años, como 2015, 2016 y 2022, puede estar relacionada con las limitaciones propias de la constelación PlanetScope y sus periodos de operación. Aunque la empresa Planet comenzó a lanzar satélites en 2013, la cobertura global y sistemática se consolidó a partir de 2017, lo que explica la falta de registros previos en determinadas zonas. Además, las condiciones técnicas de captura, como la frecuencia de paso de los satélites, la cobertura espacial asignada a cada región y las prioridades de adquisición, pueden haber restringido la generación de imágenes disponibles en esos años específicos (Planet Scope, 2023).

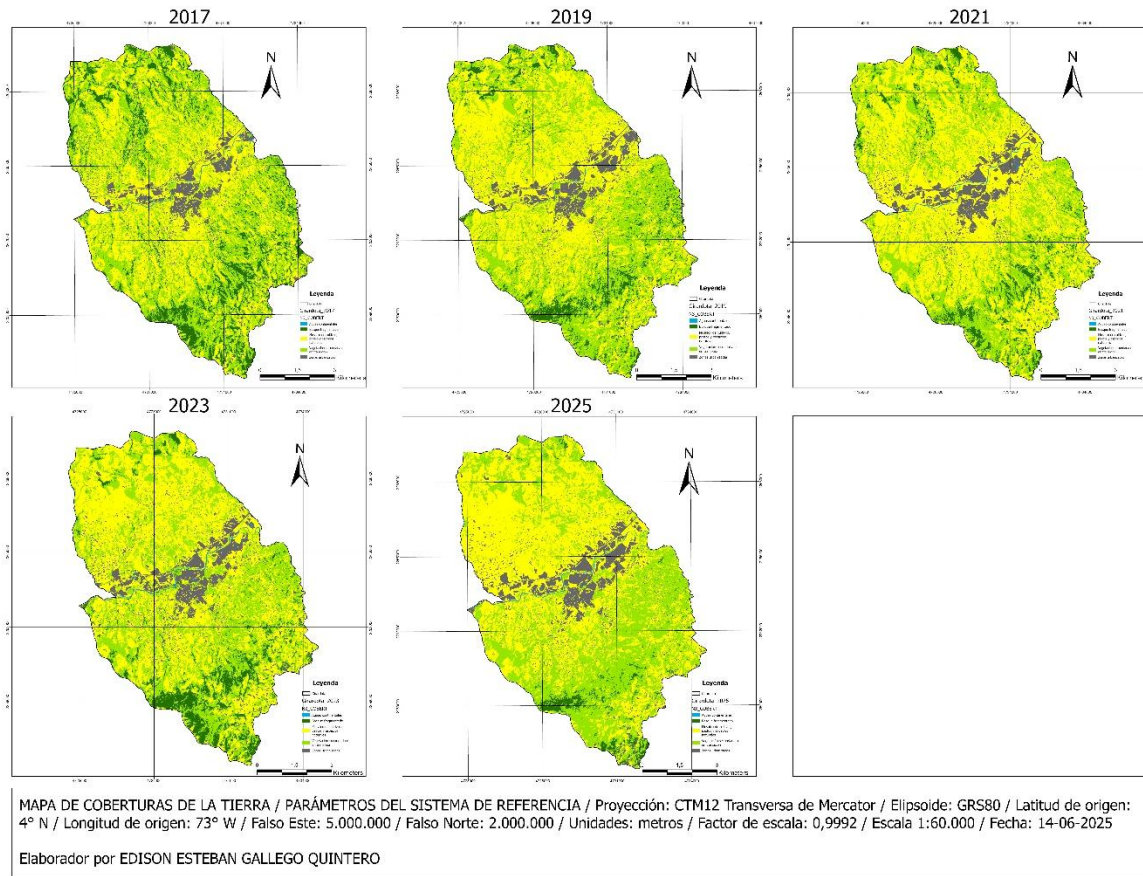
Otro factor que pudo influir en la ausencia de resultados son los criterios de selección establecidos en la búsqueda, como porcentaje de nubosidad, resolución espacial requerida y cobertura completa del municipio. Si bien en algunos años pudieron existir imágenes, estas no cumplían con las condiciones necesarias para garantizar calidad en el análisis multitemporal. Factores atmosféricos como la nubosidad persistente, sombras, bruma o condiciones climáticas desfavorables pueden haber limitado la cantidad de imágenes útiles, reduciendo así las opciones hasta llegar a la ausencia total en ciertos años (Zhu & Woodcock, 2012).

7.2. Clasificación de coberturas de la tierra

El análisis multitemporal muestra la secuencia de las coberturas de la tierra en los años 2017, 2019, 2021, 2023 y 2025 y se observa claramente como la cobertura de bosques han disminuido (**Figura 19**), mientras que las coberturas correspondientes a mosaico cultivos, pastos y espacios naturales han aumentado de manera significativa.

Figura 19.

Clasificación de coberturas de la tierra en Girardota, Antioquia



La **Tabla 11**, relaciona las cantidades de área correspondientes a cada cobertura en cada año y en consecuencia se observa una presión sobre los bosques y la vegetación secundaria o en transición, así como una dinámica elevada en los cambios de todas las coberturas, excepto las aguas continentales que mantiene valores moderadamente estables.

Tabla 11.

Coberturas de la tierra 2017 - 2025

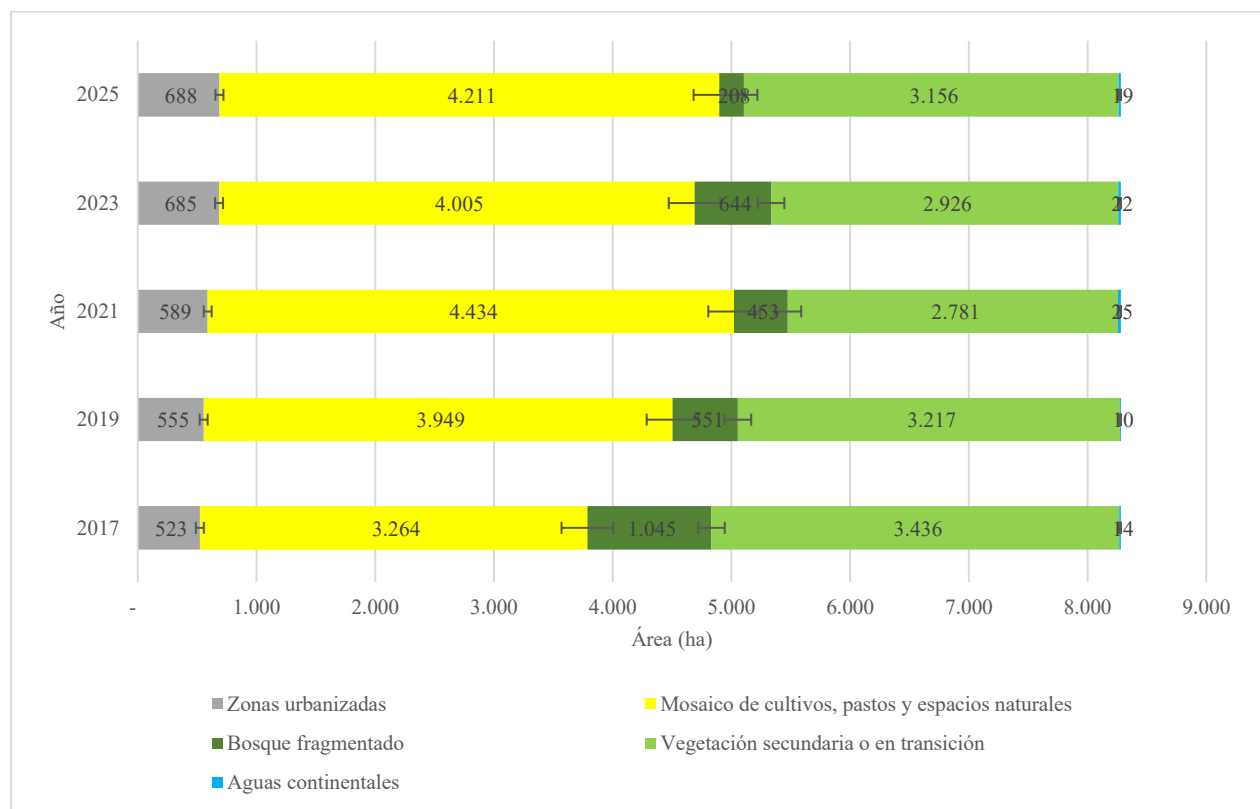
Coberturas de la tierra (nivel 3)	Área (ha)				
	Año 2017	Año 2019	Año 2021	Año 2023	Año 2025
Zonas urbanizadas	523	555	589	685	688
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3.264	3.949	4.434	4.005	4.211

Bosque fragmentado	1.045	551	453	644	208
Vegetación secundaria o en transición	3.436	3.217	2.781	2.926	3.156
Aguas continentales	14	10	25	22	19
Total	8.282	8.282	8.282	8.282	8.282

El uso del suelo en el municipio ha evolucionado en función del tiempo y las coberturas de la tierra se van transformando a medida que pasan los años (**Figura 20**), no obstante, los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales representan la cobertura que más ha ganado área desde el año 2017 hasta hoy (año 2025).

Figura 20.

Usos del suelo 2017 - 2025



En el año 2017 las áreas correspondientes a bosque fragmentado, vegetación secundaria o en transición y aguas continentales ocupan 4.495 hectáreas lo que equivale al 54,27% del área total

del municipio, mientras que en el año 2025 estas mismas coberturas suman 3.383 hectáreas lo que equivale al 40,85% del área total.

El municipio en el año 2025 cuenta con 3.156 hectáreas (38,1%) de vegetación secundaria o en transición y 208 hectáreas (2,51%) de bosque fragmentado y esta situación sugiere la existencia de un modelo socio ecológico cuya resiliencia o capacidad para regenerarse depende de la posibilidad que se le brinde a la vegetación secundaria o en transición de recuperarse luego de ser objeto de episodios sistemáticos de presión antropogénica.

Los resultados obtenidos a partir del análisis multitemporal muestran un cambio notorio en la estructura de las coberturas de la tierra entre 2017 y 2025. La reducción de la cobertura de bosques refleja un proceso constante de transformación del territorio, en el cual los ecosistemas naturales han cedido espacio frente a otros usos. Este patrón suele estar relacionado con dinámicas de deforestación y fragmentación que, además de disminuir la superficie boscosa, afectan directamente la capacidad del ecosistema para mantener procesos ecológicos clave como la regulación climática, la protección de suelos y la provisión de hábitats para múltiples especies.

Por otra parte, el aumento de la cobertura de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales evidencia la expansión de la frontera agropecuaria. Este fenómeno indica que las áreas boscosas están siendo reemplazadas por zonas destinadas a la producción agrícola y ganadera, lo que coincide con las tendencias de uso del suelo observadas en diversas regiones del país donde la presión por tierras productivas es cada vez mayor. Aunque este proceso responde a necesidades socioeconómicas, también genera impactos negativos como la pérdida de biodiversidad y la alteración de los ciclos hidrológicos.

En conjunto, estos resultados ponen en evidencia una transformación territorial que combina la reducción de ecosistemas boscosos con la expansión de coberturas agropecuarias y zonas urbanizadas. Este escenario plantea desafíos importantes para la gestión ambiental y el ordenamiento del territorio, ya que es necesario equilibrar las demandas de producción agrícola con la conservación de los ecosistemas estratégicos. De no establecerse medidas de manejo

adecuadas, la tendencia podría intensificarse en los próximos años, comprometiendo tanto la sostenibilidad ecológica como la seguridad ambiental de la región.

7.3. Cambios en las coberturas de la tierra

7.3.1. Ganancias y pérdidas de áreas

El análisis multitemporal muestra las ganancias y pérdidas entre las coberturas de la tierra en cada periodo (**Tabla 12**), lo que permite conocer que en el periodo comprendido entre 2017 y 2019 fue donde mayor área de bosque se perdió (494 ha), mientras que en el periodo comprendido entre 2019 y 2021 se registra la menor pérdida de esta cobertura (98 ha) y, por el contrario, en el periodo comprendido entre los años 2021 y 2023 se presenta una ganancia de 191 hectáreas de bosques.

Tabla 12.

Ganancias y pérdidas de área por periodo

Coberturas de la tierra (nivel 3)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
	2017-2019	2019-2021	2021-2023	2023-2025
Zonas urbanizadas	32,00	34,00	96,00	3,00
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	685,00	485,00	-429,00	206,00
Bosque fragmentado	-494,00	-98,00	191,00	-436,00
Vegetación secundaria o en transición	-219,00	-436,00	145,00	230,00
Aguas continentales	-4,00	15,00	-3,00	-3,00

Por otro lado, la vegetación secundaria o en transición registra la mayor pérdida de área (436 ha) en el periodo comprendido entre 2019 y 2021, mientras que en el periodo comprendido entre 2023 y 2025 se observa una ganancia de 230 hectáreas.

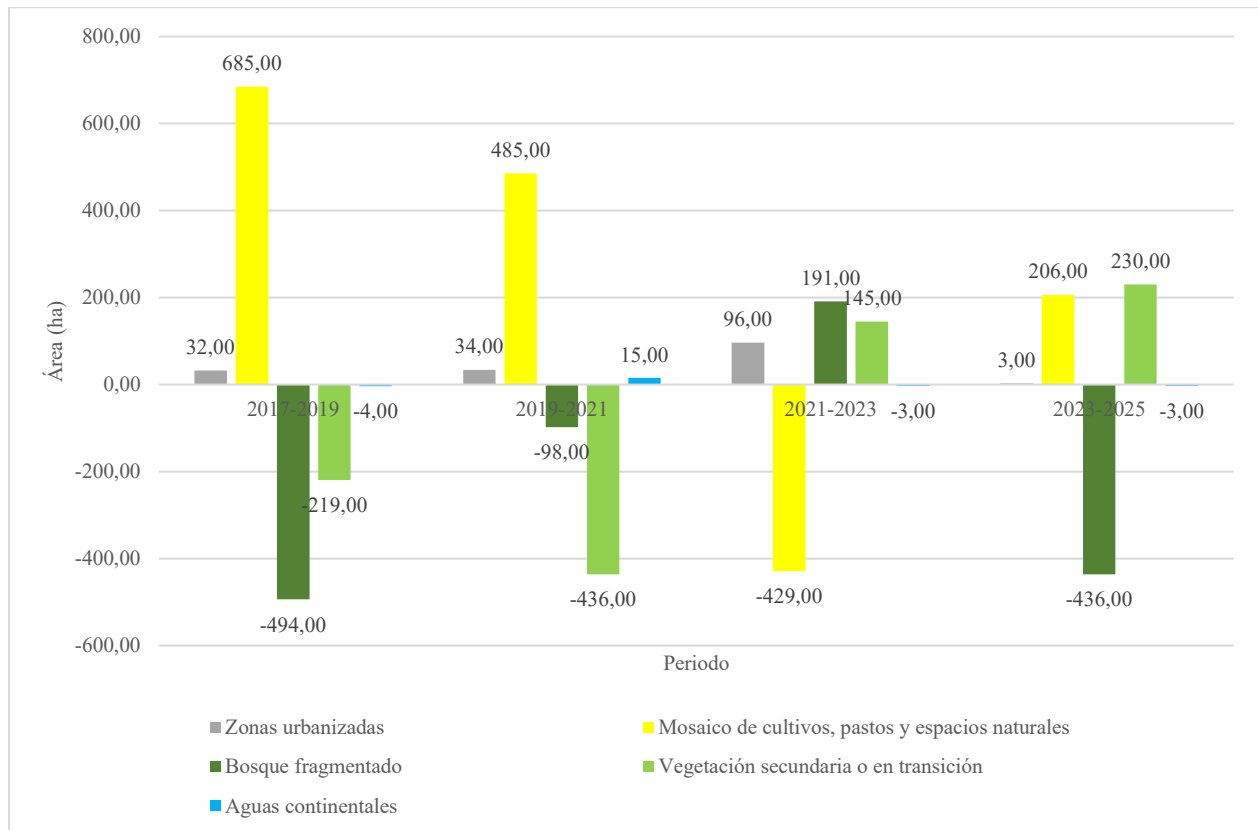
La cobertura asociada a cultivos, pastos y espacios naturales registra una pérdida de 429 hectáreas en el periodo comprendido entre 2021 y 2023, mientras que en los demás periodos de tiempo se observan ganancias significativas.

Las zonas urbanizadas por su parte conservan una lógica consecutiva donde van ganando área en cada periodo de tiempo y lo que coincide con las dinámicas normales del comportamiento social debido a que las viviendas se establecen para largos periodos de tiempo y no se sustituyen o eliminan en el corto plazo.

El balance global de las ganancias y pérdidas de área por periodo ilustrado en la **Figura 21**, permite determinar que se presentan dinámicas heterogéneas marcadas por la característica particular de pérdida de bosques, ganancia de cultivos y pastos, la estabilidad en la presencia de aguas continentales y un leve y sistemático incremento de las zonas urbanizadas o artificiales.

Figura 21.

Ganancias y pérdidas de área por periodo



Los resultados del análisis multitemporal de ganancias y pérdidas de coberturas de la tierra muestran que el bosque fragmentado es la cobertura más afectada a lo largo del periodo 2017-2025, lo que refleja una presión intensa sobre los ecosistemas naturales. Sin embargo, en el periodo 2021-2023 se observó una recuperación parcial con una ganancia de área, posiblemente asociada a procesos de regeneración natural o iniciativas de restauración. No obstante, esta ganancia fue temporal, ya que entre 2023 y 2025 la pérdida volvió a intensificarse, consolidando una tendencia de reducción neta en el tiempo.

En cuanto a la vegetación secundaria o en transición, los resultados reflejan su papel como una cobertura intermedia entre la deforestación y la regeneración. La mayor pérdida ocurrió entre 2019 y 2021, lo que puede estar asociado a la conversión de estas áreas hacia usos agropecuarios o urbanos. Posteriormente, entre 2023 y 2025, se evidenció una ganancia significativa que podría estar vinculada a procesos de sucesión ecológica en zonas previamente perturbadas. Esto indica que la vegetación secundaria responde de forma dinámica a las presiones y abandonos de la tierra, funcionando como un indicador de los cambios en el uso del suelo.

La cobertura de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales muestra un comportamiento variable, con ganancias importantes en la mayoría de los periodos, excepto entre 2021 y 2023, cuando perdió 429 hectáreas. Este patrón revela la fuerte dependencia de estas coberturas frente a las dinámicas socioeconómicas, como la expansión agrícola y ganadera, y a factores externos como políticas de producción o incluso variaciones climáticas. El hecho de que en la mayor parte de los periodos exista una tendencia de ganancia refuerza la idea de que la presión sobre los ecosistemas boscosos se orienta hacia la consolidación de áreas productivas.

Las zonas urbanizadas mantienen una lógica de crecimiento continuo a lo largo del periodo de estudio. Aunque las ganancias de superficie no son tan altas en comparación con las coberturas rurales, sí son consistentes y reflejan la expansión de la población y la infraestructura en el territorio. Este crecimiento, aunque esperado en términos sociales, implica un cambio permanente en el uso del suelo, ya que estas coberturas no retroceden en el corto plazo, consolidando un proceso de artificialización progresiva del territorio.

Finalmente, el balance global presentado en la *Figura 21* evidencia la coexistencia de dinámicas heterogéneas en las coberturas: una marcada pérdida neta de bosques, fluctuaciones en la vegetación secundaria, una fuerte expansión de áreas agropecuarias y un crecimiento sostenido de las zonas urbanizadas. La cobertura de aguas continentales, en contraste, se mantiene estable con variaciones mínimas, lo que indica que no ha sido un factor de transformación relevante. En conjunto, estos resultados confirman que la tendencia principal es la conversión de ecosistemas naturales en usos agropecuarios y urbanos, un proceso que representa un reto significativo para la planificación territorial y la gestión ambiental sostenible.

7.3.2. Tasa de cambio de las coberturas de la tierra

▪ Tasa de cambio anual por periodo

La **Tabla 13**, ilustra la tasa de cambio anual por cada periodo de tiempo analizado y confirma la estabilidad de la cobertura correspondiente a zonas urbanizadas y aguas continentales, mientras que el bosque fragmentado sufre oscilaciones extremas y la vegetación secundaria o en transición muestra una recuperación a partir del año 2021 y en consecuencia su comportamiento sugiere que áreas destinadas a actividades agrarias están regenerándose levemente.

Tabla 13.

Tasa de cambio anual por periodo

Coberturas de la tierra (nivel 3)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
	2017-2019	2019-2021	2021-2023	2023-2025
Zonas urbanizadas	3%	3%	8%	0%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	10%	6%	-5%	3%
Bosque fragmentado	-24%	-9%	21%	-34%
Vegetación secundaria o en transición	-3%	-7%	3%	4%
Aguas continentales	-14%	75%	-6%	-7%

▪ **Tasa de cambio anual en el periodo 2017 – 2025**

Los resultados entre este periodo de tiempo (año inicial y año final) muestran una síntesis de las dinámicas territoriales en cuanto a las coberturas de la tierra (**Tabla 14**), teniendo en cuenta que se observa una ligera disminución en la cobertura de vegetación secundaria, mientras que la urbanización y las áreas agrícolas crecen al mismo ritmo de manera constante.

Tabla 14.

Tasa de cambio anual en el periodo 2017 – 2025

Coberturas de la tierra (nivel 3)	Área (ha) 2017-2025
Zonas urbanizadas	4%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	4%
Bosque fragmentado	-10%
Vegetación secundaria o en transición	-1%
Aguas continentales	4%

Los resultados de la tasa de cambio anual en el periodo 2017–2025 permiten identificar de manera sintetizada las tendencias más relevantes en la dinámica de coberturas de la tierra. Se observa que mientras la urbanización y las áreas agropecuarias presentan un crecimiento sostenido del 4% anual, los bosques fragmentados registran una pérdida crítica del 10% por año. Este contraste evidencia una sustitución progresiva de ecosistemas naturales por actividades productivas y de expansión urbana, lo que refleja una transformación territorial marcada por la presión antrópica.

El aumento del 4% anual en las zonas urbanizadas indica un proceso de consolidación del crecimiento poblacional y del desarrollo de infraestructura. Aunque este ritmo no es tan acelerado como el de la pérdida de bosques, representa un cambio permanente en el uso del suelo, ya que estas áreas no suelen revertirse hacia coberturas naturales. Este patrón coincide con procesos de urbanización asociados al crecimiento de asentamientos humanos y al desarrollo de actividades

económicas, que generan una demanda creciente de servicios públicos, transporte y expansión de la frontera construida.

El mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales también registra un crecimiento del 4% anual, lo que confirma la expansión de la frontera agropecuaria. Este resultado muestra cómo la presión sobre los ecosistemas boscosos y la vegetación secundaria se traduce en la conversión hacia áreas productivas destinadas a la agricultura y la ganadería. Aunque este tipo de uso del suelo genera beneficios económicos a corto plazo, puede comprometer la sostenibilidad del territorio si no se implementan prácticas productivas responsables, ya que incrementa los riesgos de erosión, pérdida de fertilidad y degradación ambiental.

La ligera disminución de la vegetación secundaria o en transición (-1%) refleja su carácter dinámico como cobertura intermedia. Estos espacios suelen aumentar cuando hay procesos de regeneración natural o abandono de tierras, pero disminuyen cuando son transformados hacia usos agrícolas o urbanizados. Su reducción en este caso sugiere que no está predominando la regeneración, sino la consolidación de otros usos del suelo más estables y permanentes, lo que reduce la posibilidad de recuperación de áreas naturales en el largo plazo.

Finalmente, la pérdida de bosques fragmentados a una tasa del 10% anual es el resultado más alarmante, ya que muestra una degradación acelerada y sistemática de los ecosistemas naturales. A este ritmo, la cobertura boscosa podría reducirse a la mitad en menos de una década, comprometiendo la biodiversidad, la regulación hídrica y la captura de carbono. Este hallazgo evidencia la urgencia de implementar medidas de conservación, restauración y ordenamiento territorial que permitan frenar la tendencia y garantizar un equilibrio entre las necesidades productivas y la protección de los ecosistemas estratégicos.

7.3.3. Transición de las coberturas de la tierra

La matriz de transición (**Tabla 15**) evidencia un paisaje dinámico donde notablemente el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales se expande y a su vez es la cobertura que conserva la mayor cantidad de área sin cambios en el periodo de tiempo (2.381 hectáreas se conservaron sin

presentar cambios), mientras que en el bosque fragmentado solo se mantuvieron 141 hectáreas intactas sin presentar cambios y se registra una pérdida de 834 hectáreas.

Tabla 15.

Matriz de transición de Pontius

		Año 2025						
		Z-ur	M-cp	B-fr	V-st	A-co	Total	Pérdida
Año 2017	Z-ur	382	124	1	9	6	522	0
	M-cp	230	2.381	7	651	2	3271	0
	B-fr	8	199	141	694	-	1042	834
	V-st	63	1.511	59	1.798	2	3433	281
	A-co	4	2	-	-	8	14	0
	Total	687	4217	208	3152	18	8.282	
	Ganancia	165	946	0	0	4		3433

Para facilitar la visualización se utilizan las siguientes claves:

Z-ur: zonas urbanizadas

M-cp: mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

B-fr: bosque fragmentado

V-st: vegetación secundaria o en transición

A-co: aguas continentales

La matriz de transición para el periodo 2017-2025 muestra cómo las coberturas de la tierra cambiaron de un tipo a otro a lo largo de esos años. Este tipo de análisis permite entender no solo cuánto aumentó o disminuyó cada cobertura, sino desde dónde provienen sus ganancias y hacia dónde se dirigen sus pérdidas.

La matriz de transición evidencia que entre 2017 y 2025 el territorio experimentó un proceso de sustitución de coberturas naturales por usos agropecuarios y urbanos. Se observa que las zonas urbanizadas crecieron en 165 hectáreas, principalmente por la conversión de área del mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales a la construcción. Este patrón indica que la urbanización no se expandió sobre bosques directamente, sino sobre áreas previamente

transformadas, lo que responde a la lógica de crecimiento urbano en torno a suelos ya intervenidos y disponibles para la construcción.

El mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales es la categoría con mayor área total en 2025 (4.217 ha), pero también una de las más dinámicas: pierde 651 ha que se convierten en vegetación secundaria o en transición y lo cuáles es muy positivo desde el punto de vista ecológico, pero también pierde 230 hectáreas que se convierten en zonas urbanizadas. Todo lo anterior, evidencia la expansión de la frontera agrícola y ganadera, donde antiguas áreas de vegetación en transición se consolidan como sistemas productivos o áreas construidas. Es la cobertura más inestable, pues actúa como punto de entrada y salida en las transiciones territoriales.

El bosque fragmentado muestra una pérdida neta de 834 hectáreas. En 2025 solo permanecen 208 hectáreas, mientras que 694 ha pasaron a vegetación secundaria o en transición y 199 hectáreas a mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales. Esto refleja procesos de deforestación, degradación y fragmentación, en los que el bosque pierde continuidad y se convierte en coberturas de menor densidad o directamente en suelos productivos. La presión sobre esta cobertura proviene de la tala, la ganadería extensiva y la expansión agrícola.

La vegetación secundaria o en transición también presenta cambios moderados: de 3.433 hectáreas en 2017, pasó a 3.152 hectáreas en 2025 con una pérdida neta de 281 hectáreas. Sus transiciones principales son hacia mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (1.511 ha) y hacia bosque fragmentado (694 ha), aunque también aporta al crecimiento urbano. Esto confirma su papel como una cobertura intermedia e inestable, que puede regenerarse hacia bosque o, en la mayoría de los casos, ser transformada en suelos agropecuarios.

Las aguas continentales se mantienen prácticamente estables: de 14 hectáreas en 2017 pasaron a 18 hectáreas en 2025, con cambios muy pequeños (4 ha). Esto indica que los cuerpos de agua no han sido objeto de transformaciones significativas, posiblemente porque el río conserva su caudal estable y consolidado.

7.4.Tendencias de uso del suelo

Las tendencias de uso del suelo proyectadas según el modelo probabilístico de Markov (**Tabla 16**) y donde se toman como base los resultados de la matriz de transición entre el año 2017 y el año 2025 que muestra en diagonal (resaltado) las áreas que se mantienen sin sufrir posiblemente ningún cambio, mientras que los demás valores indican como una cobertura posiblemente se convierte a otra según los patrones analizados en un periodo de tiempo similar (2017 – 2025)

Tabla 16.

Matriz de Markov 2025 - 2033

		Año 2033					
		Z-ur	M-cp	B-fr	V-st	A-co	Total (ha)
Año 2025	Z-ur	503	163	1	12	8	687
	M-cp	297	3.070	9	839	3	4.217
	B-fr	2	40	28	139	-	208
	V-st	58	1.387	54	1.651	2	3.152
	A-co	5	3	-	-	10	18
	Total (ha)	864	4.662	93	2.640	23	8.282

Para facilitar la visualización se utilizan las siguientes claves:

Z-ur: zonas urbanizadas

M-cp: mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

B-fr: bosque fragmentado

V-st: vegetación secundaria o en transición

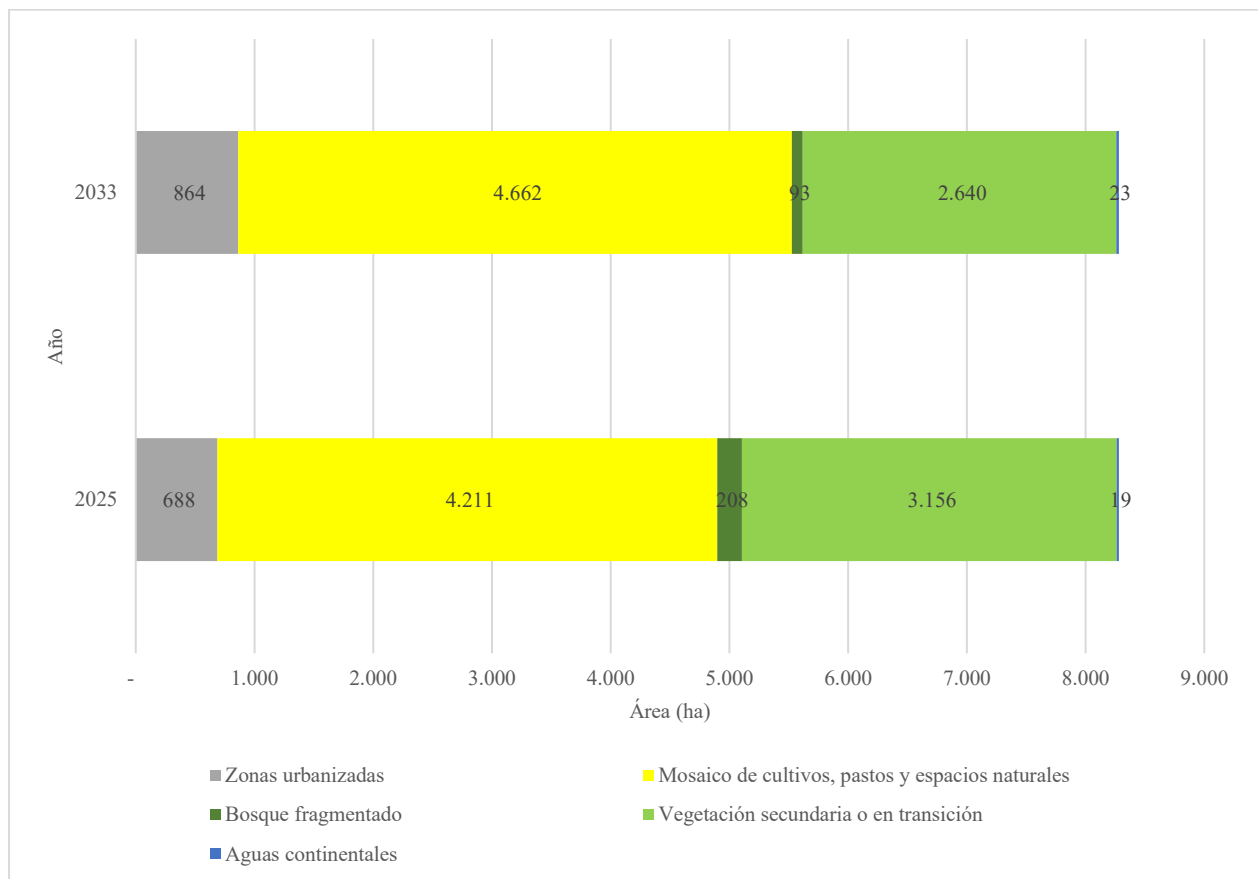
A-co: aguas continentales

Según estos datos, para el año 2033 la cobertura dominante con 4.662 hectáreas (56,29%) es mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales mientras que de bosques fragmentados se estiman 93 hectáreas que equivalen al 1,12% del área total.

La **Figura 22** ilustra las tendencias de uso del suelo y se observa como la presión aumenta sobre las coberturas de bosque fragmentado y vegetación secundaria llevando estas a un retroceso gradual y sistemático, al mismo tiempo se evidencia como incrementan las zonas urbanizadas y los cultivos, pastos y espacios naturales.

Figura 22.

Tendencias de uso del suelo 2025 - 2033



La proyección al año 2033 mediante la matriz de Markov refleja una dinámica territorial que sigue acentuando la transición observada en los años anteriores. En primer lugar, se evidencia un incremento en las zonas urbanizadas, que pasarán de 688 ha en 2025 a 864 ha en 2033. Esto significa un crecimiento sostenido de la mancha urbana, lo cual suele estar asociado a la expansión de viviendas, infraestructura y actividades económicas. Este patrón indica que la presión antrópica

sobre el territorio seguirá en aumento, especialmente hacia áreas que antes estaban cubiertas por ecosistemas naturales (bosques fragmentados y vegetación secundaria o en transición).

En segundo lugar, el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales crece de 4.211 ha a 4.662 ha, confirmando que las actividades agropecuarias y de uso mixto se consolidan como la cobertura predominante en el territorio. Este incremento puede deberse a la demanda de tierras para producción agrícola y ganadera, impulsada por factores socioeconómicos como el abastecimiento alimentario y la economía local. Sin embargo, también refleja la fragmentación de ecosistemas y la conversión de otras coberturas más conservadas hacia usos productivos.

En contraste, el bosque fragmentado disminuye drásticamente, pasando de 208 ha en 2025 a apenas 93 ha en 2033. Este resultado es altamente preocupante, pues evidencia la acelerada pérdida de ecosistemas boscosos que cumplen funciones clave como la regulación hídrica, la conservación de biodiversidad y la mitigación del cambio climático. La tendencia sugiere que, de no implementarse medidas de conservación efectivas, estos relictos de bosque podrían desaparecer casi por completo en el mediano plazo.

Por otra parte, la vegetación secundaria o en transición también pasará de 3.156 ha en 2025 a 2.640 ha en 2033. Este descenso indica que áreas en proceso de regeneración natural están siendo transformadas nuevamente hacia usos agropecuarios o urbanos, limitando la capacidad del territorio para recuperar servicios ecosistémicos. Esta disminución refleja la presión constante sobre los suelos y la falta de espacios suficientes para la recuperación de la cobertura vegetal.

Finalmente, las aguas continentales mantienen una leve variación, pasando de 19 ha a 23 ha en 2033. Aunque este cambio es menor en comparación con las demás coberturas, puede estar relacionado con dinámicas asociadas al cambio climático, la sedimentación del caudal o el comportamiento natural del río.

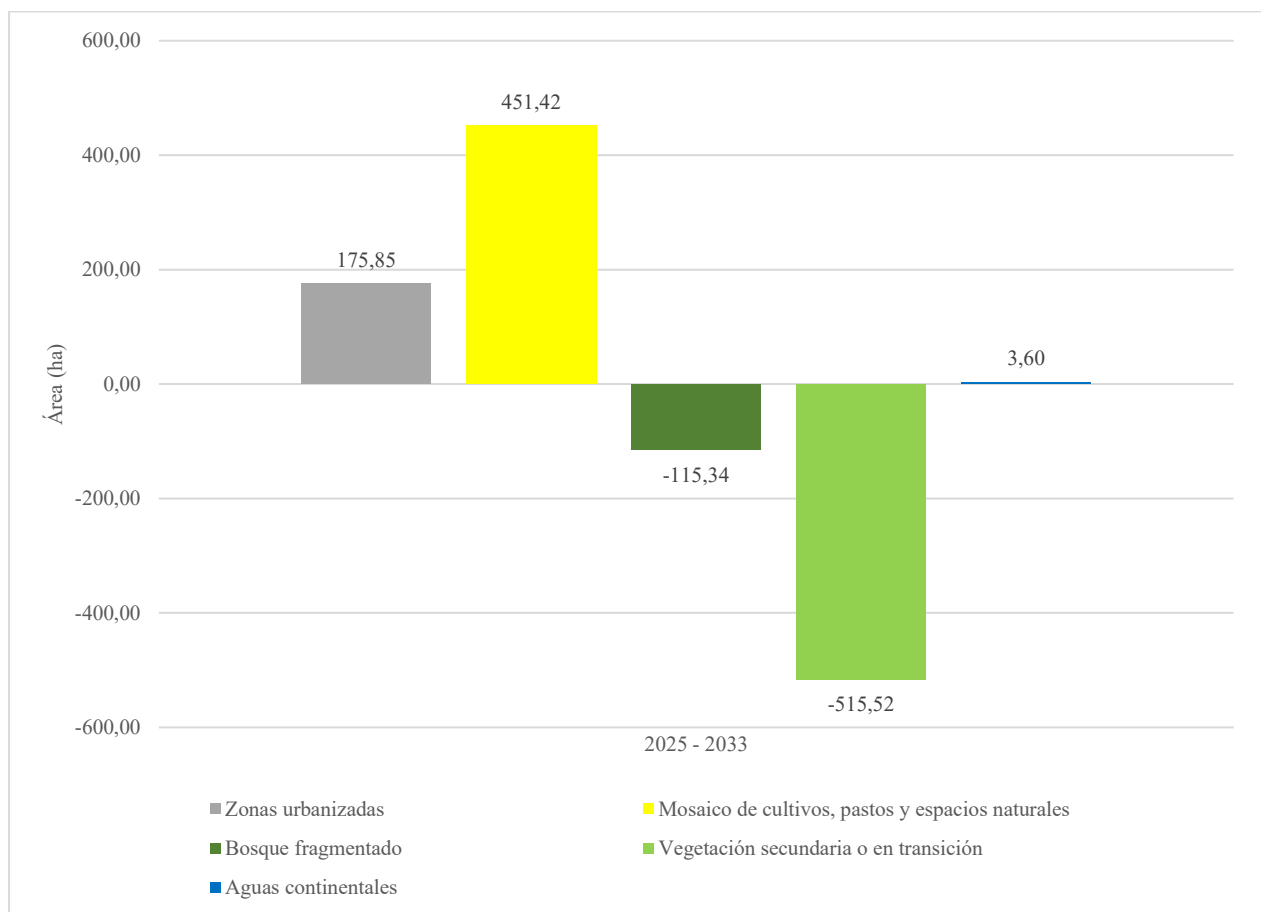
En conjunto, los resultados muestran un escenario de intensificación productiva y urbana a costa de ecosistemas boscosos y de regeneración, lo cual plantea grandes retos en materia de ordenamiento territorial, sostenibilidad y gestión ambiental.

7.4.1. Ganancias y pérdidas de coberturas proyectadas para el año 2033

La proyección hacia el año 2033 muestra las posibles ganancias y pérdidas de área para estos ocho años futuros (**Figura 23**) y como resultado se observa una pérdida de 515,52 hectáreas de vegetación secundaria y 115,34 hectáreas de bosque fragmentado, siendo estas las únicas coberturas que ceden y pierden área a las demás y lo que explica la transición lógica de una cobertura a otra reflejando la situación real del municipio con base en el comportamiento de los últimos años.

Figura 23.

Ganancias y pérdidas de área por cobertura entre los años 2025 y 2033



Teniendo en cuenta lo anterior, se conserva el comportamiento en las transiciones de las coberturas donde el bosque fragmentado se convierte en vegetación secundaria y a su vez, esta se convierte en mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mostrando una evolución gradual de las coberturas que reflejan el deterioro paulatino de los ecosistemas naturales.

Se observa en la gráfica de ganancias y pérdidas, que todos los valores negativos indican afectación a ecosistemas naturales y los positivos corresponden a la ganancia de ecosistemas intervenidos, siendo así evidente, que la presión antrópica se consolida como uno de los principales determinadores de la transformación de las coberturas y cuyos resultados son congruentes con otros estudios reportados en Colombia donde se conservan los mismos patrones de cambio.

7.4.2. Tasa de cambio de coberturas proyectadas para el año 2033

La tasa de cambio según la proyección entre los años 2025 y 2033 (**Tabla 17**) presenta una leve estabilidad en comparación al periodo comprendido entre los años 2017 y 2025. Entre tanto, se observa que las zonas urbanizadas siguen creciendo con un comportamiento estable y lineal, mientras el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales presenta una tasa de cambio del 1% siendo este uno de los valores más invariables en las coberturas.

Tabla 17.

Tasa de cambio para el periodo comprendido entre 2025 y 2033 según proyecciones

Coberturas de la tierra (nivel 3)	Área (ha) 2025 - 2033
Zonas urbanizadas	3%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1%
Bosque fragmentado	-7%
Vegetación secundaria o en transición	-2%
Aguas continentales	2%

La proyección de la tasa de cambio de coberturas del suelo para el periodo 2025 - 2033, obtenida mediante el modelo de Markov, evidencia una tendencia de transformación territorial

hacia un paisaje cada vez más dominado por actividades humanas. El crecimiento más notable corresponde a las zonas urbanizadas, con un incremento proyectado del 3% anual, lo cual refleja la presión continua de la expansión urbana. Este proceso conlleva la consolidación de nuevas áreas destinadas a vivienda, infraestructura y servicios, cambios que suelen ser irreversibles en términos de recuperación de coberturas naturales.

El mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales también presenta un aumento, aunque más moderado, con un 1% anual. Este crecimiento revela la estabilidad y permanencia de las actividades agropecuarias, que tienden a expandirse a expensas de coberturas naturales como la vegetación secundaria y los bosques fragmentados. El resultado es un territorio más productivo en términos agrícolas, pero con mayores niveles de fragmentación y pérdida de conectividad ecológica.

En contraste, el bosque fragmentado muestra una tendencia negativa alarmante, con una disminución del 7% anual. A este ritmo, los remanentes de bosque podrían reducirse a la mitad en menos de una década, lo cual compromete servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad. Esta reducción confirma que los procesos de deforestación y degradación continúan siendo las principales amenazas para la sostenibilidad ambiental del territorio.

La vegetación secundaria o en transición también presenta una disminución, aunque menos pronunciada, del 2% anual. Esta pérdida indica que los procesos de regeneración natural no logran consolidarse, ya que las áreas en recuperación son rápidamente reconvertidas a usos productivos o urbanizados. Con ello, se limita la posibilidad de restaurar la estructura y funcionalidad de los ecosistemas que podrían actuar como amortiguadores frente a la presión antrópica.

En conjunto, estas proyecciones muestran un proceso de simplificación del territorio, donde predominarán los usos urbanos y agropecuarios, mientras que las coberturas naturales tienden a reducirse. Este escenario implica retos significativos para la gestión territorial, puesto que, de no implementarse medidas efectivas de conservación, restauración y ordenamiento, se comprometerá la sostenibilidad ecológica de la región. Romper esta tendencia requiere políticas públicas

orientadas a la protección de relictos boscosos, el fortalecimiento de corredores ecológicos y una planificación urbana y rural que armonice el desarrollo socioeconómico con la conservación ambiental.

8. Discusión

Los objetivos de la presente investigación, enfocados en interpretar las coberturas de la tierra, identificar los cambios mediante matrices de transición y estimar las tendencias buscan resolver la hipótesis planteada. Entre tanto, los resultados obtenidos confirman que la expansión de la frontera urbana y las actividades agropecuarias son los principales determinantes de la pérdida de cobertura de bosque natural y vegetación secundaria o en transición. Este patrón responde a la presión ejercida por el crecimiento metropolitano sobre municipios como Girardota, donde la cercanía a Medellín incrementa la demanda de suelo para vivienda y servicios, al tiempo que la agricultura extensiva continúa ocupando espacios estratégicos para la conservación ecológica.

Estos resultados también concuerdan con lo reportado por Gomez-Ossa et al. (2023), quienes, al analizar coberturas de la tierra en el departamento de Antioquia, mediante imágenes satelitales y técnicas de segmentación, demostraron que la expansión urbana y agrícola ha sido determinante en la sustitución de coberturas naturales y en la reducción progresiva de la vegetación secundaria. Dichas evidencias respaldan el caso de Girardota, puesto que no es un fenómeno aislado, sino parte de una dinámica regional que amenaza la conectividad ecológica y refuerza la necesidad de implementar políticas de ordenamiento territorial y conservación de los ecosistemas.

El desconocimiento en las dinámicas territoriales en cuanto a los cambios en las coberturas de la tierra, evidenciado en la falta de información en el Municipio de Girardota (2024), muestra la necesidad de conocer estudios técnicos recientes que ilustren con información actualizada todos los fenómenos que ocurren en el territorio. No obstante, al cuantificar las coberturas de la tierra y analizar por medio de matrices de transición en un periodo de siete años y al proyectar las tendencias hacia el año 2033, se genera nuevo conocimiento que aporta datos e información útil en los procesos de administración del territorio, teniendo en cuenta que estos son congruentes con todos los estudios reportados en el área de influencia, tal y como lo explica Tamayo & Estrada (2022) en su publicación sobre brechas de planificación y expansión urbana inesperada en cinco áreas metropolitanas de Colombia, dentro de las que se encuentra el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

8.1. Interpretación de las coberturas de la tierra

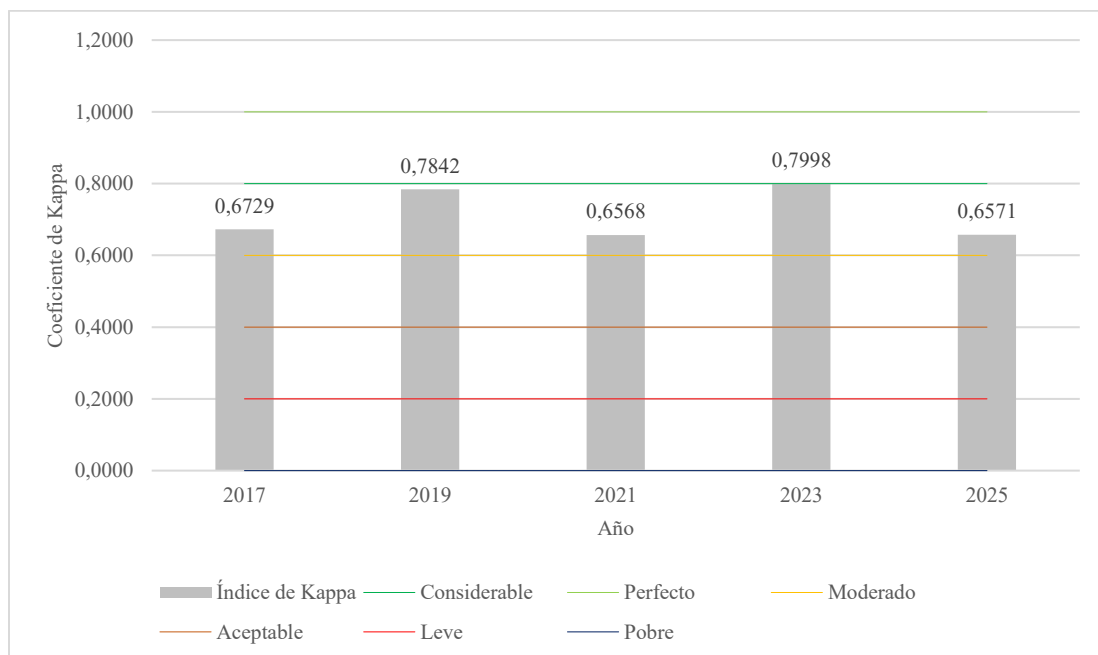
8.1.1. Precisión de la clasificación supervisada

Los resultados obtenidos mediante clasificación supervisada de las coberturas de la tierra haciendo uso del software ArcGis Pro, presenta cinco categorías que corresponden a las más representativas dentro del área de estudio a partir del nivel de detalle ofrecido por las imágenes satelitales.

La precisión de esta clasificación se evalúa mediante la matriz de confusión y el índice de Kappa y los resultados obtenidos (*Error! No se encuentra el origen de la referencia.*) muestran que oscilan entre 0,61 – 0,80 y lo que se interpreta como una concordancia considerable y quiere decir que existe una coincidencia importante con la realidad, sin embargo, también indica que existen discrepancias y errores menores en la clasificación de las coberturas.

Figura 24.

Resultados del índice de Kappa



El algoritmo *Maximum Likelihood Classification* (MLC), empleado en ArcGis Pro para esta clasificación presenta diferentes particularidades que también tienen relación directa con el grado de precisión como posibles desviaciones ocasionadas por la toma de muestras de entrenamiento que dependen de la persona que hace la fotointerpretación; sin embargo, hasta ahora es uno de los métodos más comunes y usados, tal y como lo explica Gupta et al. (2024) en su publicación en la *Revista Internacional de Investigación Científica y Tendencias de Ingeniería*, donde estudian los cambios en las coberturas del suelo mediante el mismo algoritmo de máxima verosimilitud (MLC).

En contraste con lo anterior, Pontius & Millones (2011), plantean una crítica contundente al uso del índice de Kappa como medida estándar para evaluar la precisión de clasificaciones de cobertura terrestre. Los autores argumentan que el Kappa presenta limitaciones conceptuales y prácticas, ya que puede inducir interpretaciones erróneas al no reflejar de manera adecuada la exactitud de los mapas ni las dinámicas de cambio. En su lugar, proponen medidas alternativas basadas en matrices de error que descomponen la exactitud en componentes más informativos, como errores de cantidad y de ubicación, concluyendo que la comunidad científica y de gestión territorial debería abandonar el uso del índice de Kappa y adoptar métricas más transparentes y útiles para la toma de decisiones en análisis espaciales.

También se conoce que Foody (2002), en su publicación en la revista *Remote Sensing of Environment* indicó que el índice de Kappa ha sido ampliamente usado, pero no necesariamente ofrece una medida más informativa de la precisión que otros indicadores como la exactitud global o las precisiones del usuario y del productor. El autor señala que su valor puede resultar difícil de interpretar, porque está influenciado por la distribución de las clases y por acuerdos “por azar” que en la práctica no siempre son relevantes. En consecuencia, aunque reconoce que el Kappa puede dar información adicional, advierte que no debe ser considerado como el único ni el mejor indicador de precisión, recomendando complementar o incluso reemplazarlo con métricas más claras y directamente relacionadas con los errores de clasificación.

8.1.2. Adaptación de la metodología CORINE Land Cover

Debido a las características de las imágenes satelitales, las condiciones agroecológicas y la dinámica ambiental propia del municipio es válido adaptar la metodología teniendo en cuenta que se presentan ambigüedades, diferencias para estudios a escalas grandes e impactos asociados a las realidades propias del territorio, así como también, excesiva complejidad para realizar análisis de variables ambientales generales.

Sin embargo, al respecto D. García & Camacho (2023), en su publicación titulada “análisis de las inconsistencias de las capas de estado CORINE (CLC) y las capas de cambios (1990-2018) para un caso de estudio en España”, muestran como la adaptación de la metodología introduce inconsistencias semánticas y espaciales que afectan de manera directa la posibilidad de comparar el estudio con otros debido a las diferencias técnicas en la agrupación de los datos.

En este sentido, estos autores establecen una crítica directa a la práctica de adaptación de la metodología de clasificación de coberturas de la tierra, no obstante, en contraste con este planteamiento, Fagua (2023) realiza un estudio sobre la importancia de una leyenda localmente apropiada en función de las dinámicas propias del territorio y encuentra que cuando no se adapta la metodología en mención, arroja menor precisión (índice Kappa= 0,61), mientras que una leyenda desarrollada específicamente para el área objeto de estudio presenta mayor coincidencia en la clasificación (índice Kappa= 0,76) principalmente debido a ambigüedades y umbrales espaciales diseñados para otros ecosistemas.

8.2.Determinación de los cambios en las coberturas de la tierra

8.2.1. Principales cambios en las coberturas de la tierra

La determinación de los cambios en las coberturas de la tierra se realiza mediante el cálculo de la tasa de cambio. Entre tanto, al analizar los cambios se observa que el periodo 2017-2019 estuvo marcado por la pérdida de bosques fragmentados, el periodo 2019-2021 estuvo caracterizado por la pérdida de bosques fragmentados y de vegetación secundaria o en transición, en el periodo 2021-2023 resalta la recuperación del bosque fragmentado y el retroceso del mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, lo que posiblemente está explicado por los efectos de la

pandemia (COVID-19) y finalmente, en el periodo comprendido entre 2023 y 2025 nuevamente se presenta un retroceso en la cobertura de bosque fragmentado y una leve recuperación de la vegetación secundaria o en transición.

En términos generales, se observa un comportamiento heterogéneo de ganancias y pérdidas que oscilan de manera aleatoria mostrando gradualmente pérdida de bosques y vegetación secundaria, mientras que aumenta el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, y las zonas urbanizadas que conservan un comportamiento estable, pero con tendencia creciente.

Los patrones observados durante el periodo de tiempo analizado (crecimiento urbano, oscilaciones en la recuperación y/o pérdida de bosque fragmentado y fluctuaciones en el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales) coincide con lo reportado en el Valle de Aburrá (Antioquia) por Cardona-Mesa et al. (2025a) en el análisis multitemporal con radar de apertura sintética (SAR) entre 2017 y 2024 en el cual encuentra como resultado el crecimiento de la expansión urbana, episodios de deforestación seguidos de una regeneración parcial de bosques, fluctuaciones en los cultivos y pastos, y variación en los cuerpos de agua con valores bruscamente elevados en algunos casos, confirmando la coherencia de los resultados con otros estudios dentro de la misma área objeto de estudio y en una época similar.

Los resultados obtenidos sobre el crecimiento urbano en Girardota concuerdan con otros estudios que indican que el municipio por encontrarse integrado al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, actúa siendo eje urbano alterno o receptor de población y actividades periurbanas donde predomina un modelo espacial policéntrico y fragmentado, en el cual la debilidad institucional local puede resultar en el crecimiento de construcciones desordenadas y presión sobre los usos del suelo rural (Bettini et al., 2012) y lo que fue evidenciado en los hallazgos de la presente investigación.

Diversos estudios sobre ciudades intermedias colombianas muestran que las dinámicas de urbanización periurbana están estrechamente vinculadas a modelos de expansión especulativa del mercado inmobiliario, impulsados por políticas urbanas neoliberales que externalizan el crecimiento urbano sin una adecuada regulación. Un análisis del caso de Montería entre 2006 y

2021 revela que las políticas y prácticas de desarrollo urbano facilitaron la fragmentación espacial y el incremento del área urbana, motivado principalmente por inversionistas privados que han moldeado las nuevas zonas de expansión de forma dispersa y poco planificada (Martinez et al., 2024). Esta situación, aunque en ciudades muy lejanas, es comparable al contexto de Girardota, donde el crecimiento urbano regulado de forma débil resulta en ocupaciones expansivas sobre tierras agrícolas y naturales, con consecuencias directas sobre la pérdida de cobertura vegetal y la fragmentación de bosques y vegetación secundaria o en transición.

8.2.2. Transición de las coberturas de la tierra

La validación de la transformación de las coberturas de la tierra a través del tiempo determinada mediante la matriz de transición de Pontius et al. (2004), muestra como fue evolucionando cada cobertura (**Tabla 18**) y el análisis realizado entre los años 2017 y 2025 indica que 1.511 hectáreas de vegetación secundaria o en transición se transforman en mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, mientras que 694 hectáreas de bosque fragmentado se convierten en vegetación secundaria, siendo estos dos los cambios más representativos en relación al área.

Tabla 18.

Transición de las coberturas de la tierra 2017 - 2025

Coberturas 2017 (N3)	Coberturas 2025 (N3)	Área (ha)
Zonas urbanizadas	Zonas urbanizadas	382
Zonas urbanizadas	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	124
Zonas urbanizadas	Bosque fragmentado	1
Zonas urbanizadas	Vegetación secundaria o en transición	9
Zonas urbanizadas	Aguas continentales	6
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Zonas urbanizadas	230

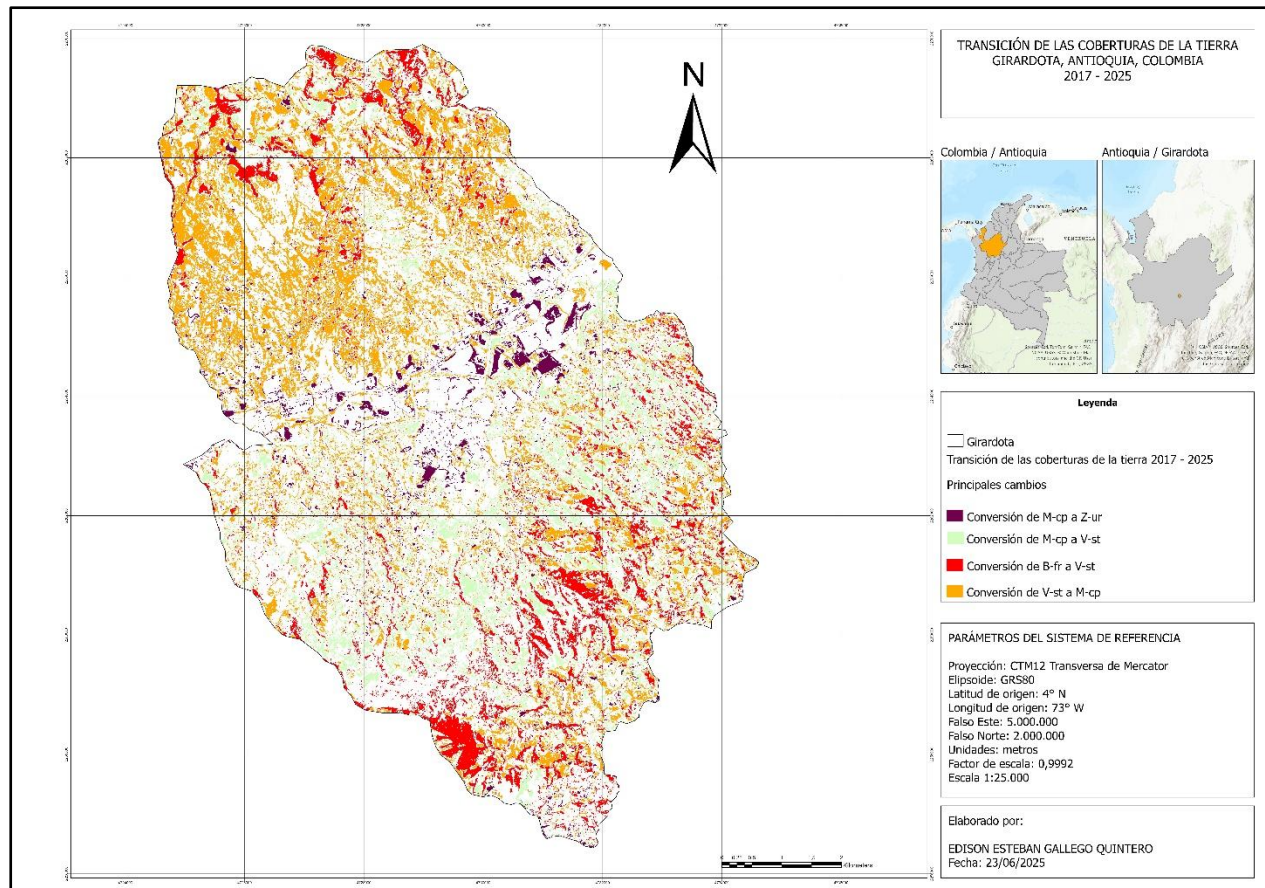
Coberturas 2017 (N3)	Coberturas 2025 (N3)	Área (ha)
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2.381
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Bosque fragmentado	7
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Vegetación secundaria o en transición	651
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Aguas continentales	2
Bosque fragmentado	Zonas urbanizadas	8
Bosque fragmentado	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	199
Bosque fragmentado	Bosque fragmentado	141
Bosque fragmentado	Vegetación secundaria o en transición	694
Bosque fragmentado	Aguas continentales	0
Vegetación secundaria o en transición	Zonas urbanizadas	63
Vegetación secundaria o en transición	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1.511
Vegetación secundaria o en transición	Bosque fragmentado	59
Vegetación secundaria o en transición	Vegetación secundaria o en transición	1.798
Vegetación secundaria o en transición	Aguas continentales	2
Aguas continentales	Zonas urbanizadas	4
Aguas continentales	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2
Aguas continentales	Vegetación secundaria o en transición	0
Aguas continentales	Aguas continentales	8
Total		8.282

En cuanto a su distribución espacial (**Figura 25**), se observa que la mayor área de bosque fragmentado convertido en vegetación secundaria o en transición se registra en el extremo sur del municipio, mientras que la transformación de la vegetación secundaria o en transición se concentra

en el norte y los cambios en el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales a zonas urbanizadas se presentan en el centro rodeando la cabecera municipal y la autopista norte.

Figura 25.

Transición de las coberturas de la tierra



Para facilitar la visualización se utilizan las siguientes claves:

Z-ur: zonas urbanizadas

M-cp: mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

B-fr: bosque fragmentado

V-st: vegetación secundaria o en transición

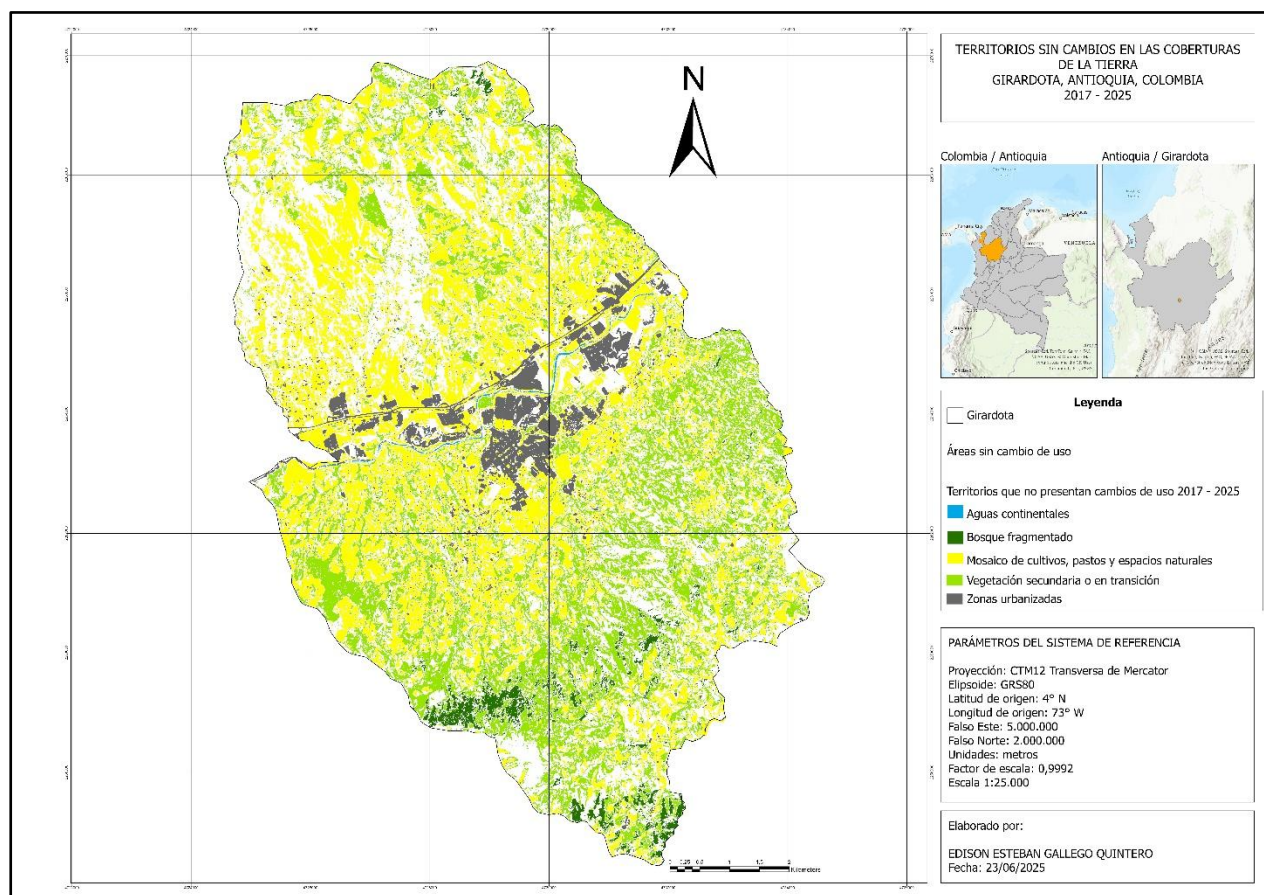
A-co: aguas continentales

Desde el punto de vista ecológico y de conservación ambiental, se registra un cambio positivo que corresponde a la conversión en el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales a vegetación secundaria o en transición y lo que significa una leve rehabilitación de algunos territorios, principalmente en el sureste y suroeste del municipio.

Así mismo, 4.711 hectáreas (56,88% del área total) no presentan cambios durante el periodo de tiempo analizado (**Figura 26**) y esto significa una permanencia en cuanto al uso del territorio, posiblemente asociado a zonas consolidadas con dinámicas estables o con algún tipo de restricción natural o legal que impiden su transformación. Este comportamiento también es indicativo de la permanencia en los patrones de ocupación territorial vinculados con actividades económicas sostenibles o limitaciones biofísicas del territorio que limitan su intervención antrópica.

Figura 26.

Territorios que no presentan cambios en las coberturas de la tierra entre 2017 y 2025



Por su parte, Villegas (2024), realiza un estudio para analizar la reconfiguración espacial en el Valle de Aburrá asociado a tensiones en el modelo urbano de ciudad y encuentra que entre los años 2000 y 2020 en los municipios del sur (Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí y Envigado) se produjo una expansión urbana bastante dispersa que contradice el tradicional modelo de ciudad compacta que normalmente concentra la presión antrópica sobre los ecosistemas periurbanos y en consecuencia, sus resultados comparten la misma tendencia identificada en la presente investigación donde se resalta el constante y paulatino incremento de la cobertura de zonas urbanizadas.

8.3. Proyección de las tendencias de uso del suelo

Los resultados encontrados indican una tasa de cambio de -7% para la cobertura de bosque fragmentado y lo que sugiere un elevado índice de deforestación en el municipio de Girardota, cifras que se relacionan aproximadamente con un estudio realizado por Etter & Arévalo (2014) donde presentan tres escenarios de transformación de coberturas de la tierra en Colombia para el año 2030 basados en lo siguiente: datos históricos, economía extractivista y economía industrializada con una deforestación proyectada del 12,9%, 26,8% y 5,6% respectivamente.

Por otro lado, el estudio realizado mediante el modelo d Markov, indica que, bajo la tendencia actual, en el año 2033 (*Tabla 19*) el municipio solamente contará con 93 hectáreas (1,12% del área total) correspondiente a la cobertura de bosque fragmentado, mientras que de vegetación secundaria o en transición tendrá 2.640 hectáreas (31,88% del área total) y la cobertura dominante con mayor extensión de territorio corresponderá al mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales con 4.662 hectáreas (56,3% del área total).

Tabla 19.

Coberturas de la tierra estimadas para el año 2033

Coberturas de la tierra (nivel 3)	Área (ha)
-----------------------------------	-----------

Zonas urbanizadas	864
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	4.662
Bosque fragmentado	93
Vegetación secundaria o en transición	2.640
Aguas continentales	23
Total	8.282

Estos resultados reflejan una continua expansión urbana, aunque en menor proporción que en otros contextos. Por ejemplo, un estudio en el Paisaje Cultural Cafetero proyecta una fuerte expansión urbana entre 2014 y 2034 usando datos multitemporales y modelos predictivos, confirmando que territorios rurales en crecimiento enfrentan similares dinámicas de conversión (Rojas Celis et al., 2025).

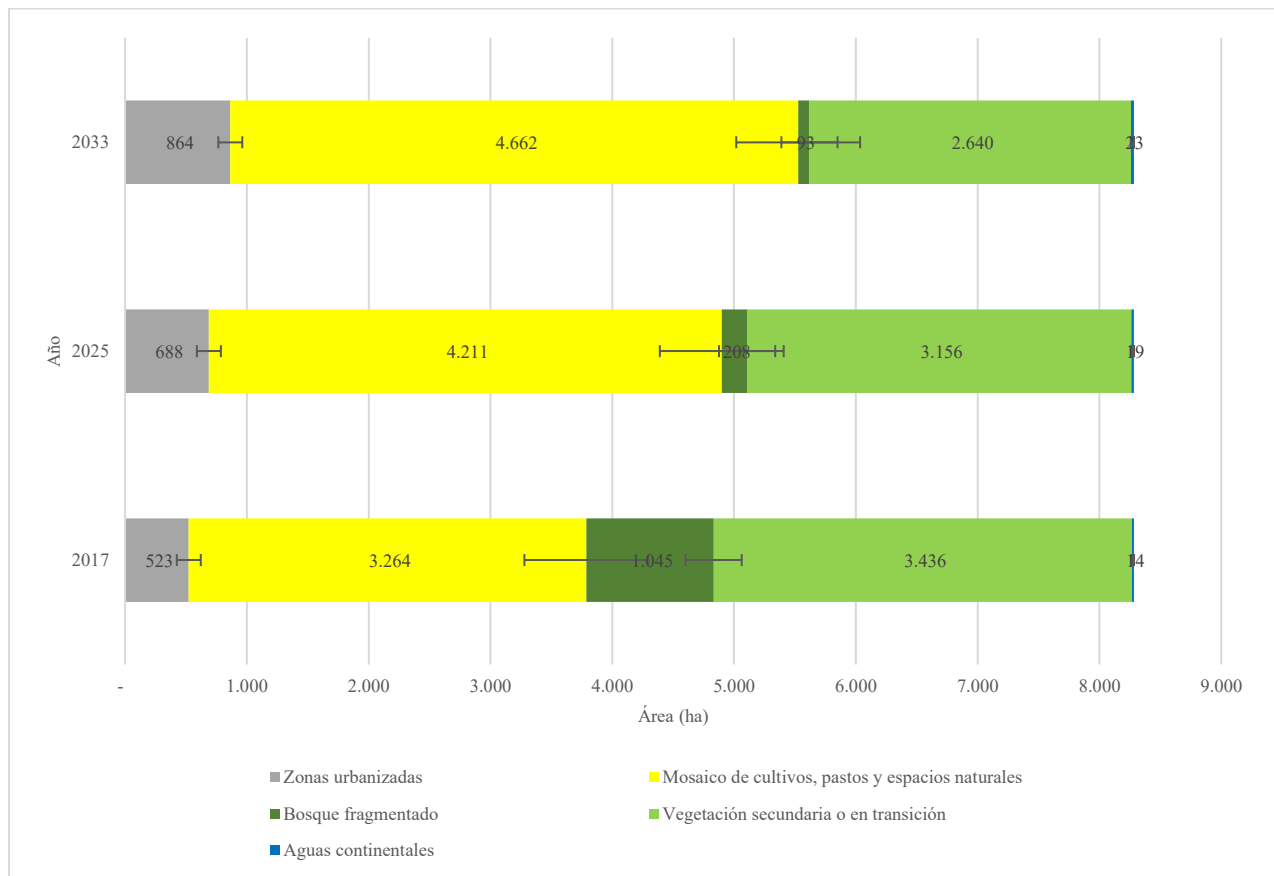
Como ya se mencionó, el bosque fragmentado se proyecta en apenas 93 hectáreas para 2033, evidenciando una severa reducción que compromete la conectividad ecológica. Este fenómeno coincide con otros estudios colombianos, como el caso del municipio de Madrid (Cundinamarca), donde el bosque intervenido decreció en un 86% entre 1977 y 2020, especialmente en áreas sometidas a urbanización e intensificación agrícola (García & Culma, 2022).

Por último, la presencia significativa de vegetación secundaria o en transición (2.640 ha) destaca la capacidad de los sistemas naturales de regenerar paisajes alterados. A nivel nacional, estudios revelaron una recuperación neta de cobertura leñosa en muchos municipios de Colombia entre 2001 y 2010, en algunos casos impulsada por el abandono de tierras agrícolas y conflictos armados (Armenteras et al., 2013). En ese sentido, Girardota podría beneficiarse de estrategias similares de restauración activa y manejo adaptativo, especialmente si se aprovechan los corredores de vegetación regenerada como base para procesos ecológicos estructurales.

En la **Figura 27**, se observan las coberturas de la tierra de los años 2017 y 2025, así como también la proyección para el año 2033 representadas en un gráfico. Se observa como el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales y las zonas urbanizadas aumentan progresivamente mientras que los bosques fragmentados y la vegetación secundaria o en transición reducen sustancialmente su área y lo que podría explicarse por la presión antrópica y las dinámicas territoriales propias de los municipios del Valle de Aburrá.

Figura 27.

Proyección de áreas para el año 2033



Desde el punto de vista técnico, estos resultados muestran pérdida de biodiversidad, afectación a la conectividad ecológica, degradación de los suelos, alteraciones en la calidad del recurso hídrico y aumento de las actividades agropecuarias intensivas.

La gráfica muestra una clara tendencia de aumento en zonas urbanizadas (de 523 ha en 2017 a 864 ha en 2033) y una disminución notable del bosque fragmentado (de 1.045 ha en 2017 a 93 ha en el año 2033), lo cual refleja una intensa presión urbana que redirige el uso del suelo. Este tipo de dinámica es consistente con lo observado en estudios de expansión urbana en Colombia, donde se documenta cómo el avance del área urbana se produce sin estrategias de planificación, extendiéndose por corredores periféricos e incrementando la fragmentación de las coberturas de bosque y vegetación secundaria (López & Castro, 2024).

La reducción drástica del bosque fragmentado, compensada parcialmente por un aumento de vegetación secundaria (de 3.436 ha a 2.640 ha), sugiere procesos de regeneración en áreas abandonadas o susceptibles. Este resultado, se alinea con hallazgos en los Andes (norte de Colombia), donde se observó en el periodo ocurrido entre 1985 y 2015 un crecimiento de la vegetación secundaria en zonas marginales del uso agrícola, resultado de una naturaleza resiliente frente a transformaciones antrópicas (Rubiano et al., 2017).

Si bien el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales sigue siendo dominante (4.662 ha proyectadas), la tendencia hacia la urbanización creciente subraya el riesgo de cambiar el uso del suelo productivo por territorios construidos si no se implementa una estrategia de planificación adecuada. Un análisis en el Tolima confirmó que, en los límites periurbanos, el mayor factor en la transformación territorial es la cercanía a vegetación natural, revelando que sin políticas claras la expansión agrícola se puede acelerar la pérdida de áreas con alto potencial ecológico (Anselm et al., 2018).

9. Conclusiones

El análisis multitemporal de las coberturas de la tierra en Girardota permitió evidenciar transformaciones significativas entre 2017-2025 y proyectar los cambios hacia 2033, donde la expansión de la frontera urbana y las actividades agropecuarias se consolidan como los principales factores asociados a la pérdida de bosque natural y vegetación secundaria o en transición. Estos resultados demuestran que los procesos de urbanización y cambio de uso del suelo ejercen una presión creciente sobre los ecosistemas locales, lo que implica un deterioro en la capacidad de provisión de servicios ambientales esenciales para la población local.

La aplicación de un enfoque multitemporal permitió no solo cuantificar la magnitud de los cambios, sino también identificar patrones espaciales que muestran cómo las dinámicas de urbanización tienden a concentrarse en las zonas bajas del municipio y a lo largo de los corredores viales, mientras que las áreas rurales de ladera se ven afectadas principalmente por la expansión agropecuaria. Este nivel de detalle fortalece la comprensión del territorio al visibilizar los sectores más vulnerables a procesos de transformación acelerada.

Las matrices de transición mostraron ser un instrumento clave para caracterizar las transiciones más frecuentes entre coberturas, revelando relaciones sistemáticas graduales como la conversión de bosques fragmentados a vegetación secundaria o en transición, y estos a su vez, a mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, y luego a zonas urbanizadas. Esta capacidad de conocer los procesos de conversión permite explicar de manera más precisa la evolución territorial, aportando un marco analítico que trasciende la simple descripción de pérdidas y ganancias netas de superficie.

Los resultados obtenidos constituyen un insumo técnico valioso para orientar la gestión territorial en Girardota, ya que proporcionan evidencia objetiva sobre la dirección y magnitud de los cambios recientes. El reconocimiento de estas dinámicas no solo permite anticipar posibles escenarios de deterioro ambiental, sino también proponer medidas de planificación que integren criterios de sostenibilidad, equilibrio entre usos del suelo y conservación de coberturas estratégicas para el municipio.

10. Recomendaciones

Se recomienda que los procesos de análisis multitemporal y matrices de transición aplicados en este estudio se integren dentro de las actividades de gestión territorial del municipio de Girardota, de manera que sirvan como herramientas para el monitoreo continuo de las coberturas de la tierra. Estos resultados pueden consolidarse como pilotos de reconocimiento de cambios con fines de mitigación, orientando la formulación de planes, programas y proyectos que reduzcan los impactos ambientales negativos y promuevan un desarrollo territorial más equilibrado y sostenible.

Para complementar los resultados de la proyección de coberturas hacia el año 2033, es importante utilizar algoritmos que permitan mostrar espacialmente estas tendencias y correlacionarlas con variables biofísicas como la pendiente, la altitud o la proximidad a cuerpos de agua. Se sugiere aplicar metodologías como Land Change Modeler (LCM) porque permite integrar patrones históricos de cambio con variables explicativas del territorio, estimar probabilidades de transición y generar mapas de escenarios futuros. De esta manera, no solo se visualiza la tendencia natural de transformación, sino también cómo podrían variar los cambios bajo diferentes condiciones de gestión o presión antrópica, lo que fortalece la toma de decisiones en planificación y mitigación ambiental.

Referencias

- Aide, T. M., Clark, M. L., Grau, H. R., López-Carr, D., Levy, M. A., Redo, D., Bonilla-Moheno, M., Riner, G., Andrade-Núñez, M. J., & Muñiz, M. (2013). Deforestation and Reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010). *Biotropica*, 45(2), 262-271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00908.x>
- Aide, T. M., Grau, H. R., Graesser, J., Andrade-Nuñez, M. J., Aráoz, E., Barros, A. P., Campos-Cerqueira, M., Chacon-Moreno, E., Cuesta, F., Espinoza, R., Peralvo, M., Polk, M. H., Rueda, X., Sanchez, A., Young, K. R., Zarbá, L., & Zimmerer, K. S. (2019). Woody vegetation dynamics in the tropical and subtropical Andes from 2001 to 2014: Satellite image interpretation and expert validation. *Global Change Biology*, 25(6), 2112-2126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.14618>
- Alcaldía de Medellín. (2017). *Dos momentos del Valle de Aburrá: entre lo prehispánico y lo colonial*. <https://patrimoniomedellin.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Cuadernillo-Dos-momentos-del-Valle-de-Aburra-entre-lo-prehispanico-y-lo-colonial.pdf>
- Anselm, N., Brokamp, G., & Schütt, B. (2018). Assessment of land cover change in peri-urban high Andean environments south of Bogotá, Colombia. *Land*, 7(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land7020075>
- Arellano-P, H., Rangel-Ch, J. O., & Rangel, J. O. (2016). *CCA–Fuzzy Land Cover: a new method for classifying vegetation types and coverages and its implications for deforestation analysis*. https://arxiv.org/abs/1508.01916?utm_source=chatgpt.com
- Armenteras, D., Cabrera, E., Rodríguez, N., & Retana, J. (2013). National and regional determinants of tropical deforestation in Colombia. *Regional Environmental Change*, 13(6), 1181-1193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10113-013-0433-7>
- Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N., & Retana, J. (2017a). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010).

Global Environmental Change, 46, 139-147.
<https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2017.09.002>

Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N., & Retana, J. (2017b). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Global Environmental Change*, 46, 139-147.
<https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2017.09.002>

Bettini, V., Iuav Di Venezia, U., Borri, D., Di Bari, P., Calderon, E., Camagni, R., Di Milano, P., Leonardi, R., Fistola, R., Battarra, R., Anna, R., & Rocca, L. (2012). Sprawl and fragmentation: the case of Medellín region in Colombia. En *TeMA Journal of Land Use Mobility and Environment* (Vol. 1). www.tema.unina.it

Calvano, F., & Rico, H. (2014). *El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas?* <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517751549002>

Cardona-Mesa, A. A., Vásquez-Salazar, R. D., Parra, J. C., Olmos-Severiche, C., Travieso-González, C. M., & Gómez, L. (2025a). A Methodology for the Multitemporal Analysis of Land Cover Changes and Urban Expansion Using Synthetic Aperture Radar (SAR) Imagery: A Case Study of the Aburrá Valley in Colombia. *Remote Sensing*, 17(3).
<https://doi.org/10.3390/rs17030554>

Cardona-Mesa, A. A., Vásquez-Salazar, R. D., Parra, J. C., Olmos-Severiche, C., Travieso-González, C. M., & Gómez, L. (2025b). A Methodology for the Multitemporal Analysis of Land Cover Changes and Urban Expansion Using Synthetic Aperture Radar (SAR) Imagery: A Case Study of the Aburrá Valley in Colombia. *Remote Sensing*, 17(3).
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs17030554>

Castañeda, H. N., Gómez, Á. M., Muñoz, M. A., & Herrera, J. A. (2023). Análisis ético de las dinámicas territoriales en el corredor multimodal del Aburrá Norte. *Ratio Juris*, 18(36).
<https://doi.org/10.24142/raju.v18n36a3>

- Castañeda Ruiz, H. N., Gómez Osorio, Á. M., Muñoz Ceballos, M. A., & Herrera Mejía, J. A. (2023). Análisis ético de las dinámicas territoriales en el corredor multimodal del Aburrá Norte. *Ratio Juris*, 18(36). <https://doi.org/10.24142/raju.v18n36a3>
- Corantioquia. (2015). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá - POMCA*. <https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2024/07/ficha-Girardota.pdf>
- Culma-Tamara, M. F., & García-Ubaque, C. A. (2022). Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020. *Tecnura*, 26(73), 49-66. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/22487638.19385>
- Das, G. G. (2014). Land Use, Land Cover, and Food-Energy-Environment Trade-Off: Key Issues and Insights for Millennium Development Goals. En *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 114-133). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00081-4>
- Dursun, F., Zorlu, K., & Gül, M. (2022). Using satellite imagery to assess the changes in land use and land cover in Diyarbakır city (SE Turkey). *Earth Sciences Research Journal*, 26(2), 119-130. <https://doi.org/10.15446/esrj.v26n2.92417>
- Ellis, E. C. (2021). Land use and ecological change: A global synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 59, 1-28. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220>
- Ellis, E. C. (2025). *Land Use and Ecological Change: A 12,000-Year History*. 22, 7. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220>
- Etter, A., & Arévalo, P. (2014). Escenarios futuros de la cobertura forestal en Colombia. En: Bello et al. (ed). *Biodiversidad 2014. Estado y tendencias de la biodiversidad continental en Colombia*. Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá D.C., Colombia. 2014. <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2014/cap2/210/#seccion6>
- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006a). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 74-87. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2005.05.017>

- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2006b). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 74-87. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2005.05.017>
- Etter, A., & Van Wyngaarden, W. (2000). Patterns of landscape transformation in Colombia, with emphasis in the Andean region. *Ambio*, 29(7), 432-439. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.7.432>
- Fagua. (2023). Advancing High-Resolution Land Cover Mapping in Colombia: The Importance of a Locally Appropriate Legend. *Remote Sensing*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/rs15102522>
- Fagua, J. C., Rodríguez, S., & Jantz, P. (2023). Advancing High-Resolution Land Cover Mapping in Colombia: The Importance of a Locally Appropriate Legend. *Remote Sensing*, 15(10). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15102522>
- Fagua, J. C., Rodríguez-Buriticá, S., & Jantz, P. (2023). Advancing High-Resolution Land Cover Mapping in Colombia: The Importance of a Locally Appropriate Legend. *Remote Sensing*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/rs15102522>
- FAO. (2018). *Land Cover Classification System (LCCS)*. <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1036361/>
- FAO, & MADS. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*. https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/suelo/Guia_de_buenas_practicas_para_la_gestion_y_uso_sostenible_de_los_suelos_en_areas_rurales.pdf
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- García, C. A., & Culma Tamara, M. F. (2022). Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020. *Tecnura*, 26(73), 49-66. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/22487638.19385>

- García, D., & Camacho, M. T. (2023). Analysing the inconsistencies of CORINE status layers (CLC) and layers of changes (CHA) (1990-2018) for a Spanish case study. *Annals of GIS*, 29(3), 369-386. <https://doi.org/10.1080/19475683.2023.2166583>
- Gomez-Ossa, L. F., Sanchez-Torres, G., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Land Cover Classification in the Antioquia Region of the Tropical Andes Using NICFI Satellite Data Program Imagery and Semantic Segmentation Techniques. *Data*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/data8120185>
- Goodchild, M. F. (2010). Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1(2010), 3-20. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2010.1.2>
- Gupta, P., Haryani, S., & Gupta, V. B. (2024). Detection of Landuse Land Cover Changes by using Maximum Likelihood Algorithm Application on Landsat Satellite Images. En *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends* (Vol. 10). <https://doi.org/10.61137/ijsret.vol.10.issue4.209>
- Gutiérrez, J. A., & Urrego, G. A. (2011). *Los sistemas de información geográfica y los planes de ordenamiento territorial en Colombia* (Vol. 16). <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/perspectiva/article/view/1758/1753>
- Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103421>
- Hernández, R., & Pavón, N. (2024). Índices para el monitoreo de cuerpos de agua usando sensores remotos. *Acta Universitaria*, 34, 1-19. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3814>
- IDEAM. (2010a). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra : metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023228/leyenda_coberturas.pdf
- IDEAM. (2010b). *Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2024). *Instructivo de actualización de estudios de cobertura de las tierras a diferentes escalas*.
https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/IN-AGR-PC06-01%20Actualizaci%C3%B3n%20de%20Estudios%20de%20Cobertura%20de%20la%20Tierra%20a%20Diferentes%20Escala_0.pdf
- Kühnl, M., Sapena, M., Wurm, M., Geiß, C., & Taubenböck, H. (2023). Multitemporal landslide exposure and vulnerability assessment in Medellín, Colombia. *Natural Hazards*, 119(2), 883-906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-022-05679-z>
- Lambin, E., & Geist, H. (2006). *Land-Use and Land-Cover Change*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). *The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data* (Vol. 33, Número 1). <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2529310>
- López, M. A., & Castro, M. (2024). *La mancha urbana en Colombia sigue expandiéndose*.
https://doi.org/https://doi.org/10.12804/dvcn_10336.42588_num7
- Maia, P. V. M., Santos, R. M., Vaz, J. R. P., Silva, M. O., & Lins, E. F. (2017). Thermal analysis of urban environments in Medellín, Colombia, using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 12(1), 147-153.
<https://doi.org/10.4090/juee>
- Martinez, U., Barbosa, V., & Thoene, U. (2024). Urban transformations in intermediate cities under the logic of neoliberal urbanism: The case of Monteria, Colombia. *Regional Science Policy and Practice*, 16(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rspp.2024.100058>
- Meyer, W. B., & Turner, B. L. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23(1), 39-61.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.23.110192.000351>
- Molina, A. M., López, L. F., & Villegas, G. I. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la planificación municipal. *Revista EIA*.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149216912002>

- Municipio de Girardota. (2020). *Revisión y ajuste plan básico de ordenamiento territorial municipio de Girardota*.
- Municipio de Girardota. (2024). *Plan de Desarrollo Territorial de Girardota 2024-2027: Decencia en lo Público*.
<https://www.girardota.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/PLAN%20DE%20DESARROLLO%20TERRITORIAL%20%202024-2027.pdf>
- Olaya, Víctor. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- Paegelow, M., Mas, J., Gallardo, M., Olmedo-Camacho, M. T., & García-Álvarez, D. (2022). *Pontius Jr. Methods Based on a Cross-Tabulation Matrix to Validate Land Use Cover Maps*.
https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7_9
- Pande, C. B., Srivastava, A., Moharir, K. N., Radwan, N., Mohd Sidek, L., Alshehri, F., Pal, S. C., Tolche, A. D., & Zhran, M. (2024). Characterizing land use/land cover change dynamics by an enhanced random forest machine learning model: a Google Earth Engine implementation. *Environmental Sciences Europe*, 36(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12302-024-00901-0>
- Patino, J. E., Hong, A., Duque, J. C., Rahimi, K., Zapata, S., & Lopera, V. M. (2021). Built environment and mortality risk from cardiovascular disease and diabetes in Medellín, Colombia: An ecological study. *Landscape and Urban Planning*, 213, 104126.
<https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2021.104126>
- Planet Scope. (2023). *Planet Imagery Product Specifications*.
https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf
- Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. En *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 32, Número 15, pp. 4407-4429). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>

- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2-3), 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Poveda-Sotelo, Y., Bermúdez-Cella, M. A., & Gil-Leguizamón, P. (2022). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51-72. <https://doi.org/https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>
- Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., Li, X., Crowell, S., Wu, X., Doughty, R., Zhang, Y., Liu, F., Sitch, S., & Iii, B. M. (2022). *Title: Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon Author list.* <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.07363>
- Reynolds, C. C., Escobedo, F. J., Clerici, N., & Zea-Camaño, J. (2017). Does «greening» of neotropical cities considerably mitigate carbon dioxide emissions? The case of Medellín, Colombia. *Sustainability (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su9050785>
- Ríos-Mesa, A. F., Palacio-Piedrahíta, J. C., Zарtha-Sossa, J. W., Mesas-Carrascosa, F. J., & Hincapie-Reyes, R. C. (2024). The Potential of Google Earth Engine as Decision Support for Agricultural and Forestry Planning Policies in Latin America and the Caribbean: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Journal of Sustainable Forestry*, 43(6-10), 99-128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10549811.2024.2448027>
- Rodríguez, J., & Olivella, R. (s. f.). *Introducción a los sistemas de información geográfica Conceptos y operaciones fundamentales.* Recuperado 21 de enero de 2025, de <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/53645/1/Introducci%C3%B3n%20a%20los%20sistemas%20de%20informaci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica.pdf>
- Rojas Celis, A. P., Shen, J., & Martínez Ojalora, J. D. (2025). Spatiotemporal Land Use and Land Cover Changes and Their Impact on Landscape Patterns in the Colombian Coffee Cultural Landscape (2014–2034). *Land*, 14(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land14051045>

- Rojas Gamba, N. I., Fonseca Salamanca, L. A., Pérez Rueda, S. L., & Blanco Suarez, M. A. (2022). Modelación de Crecimiento Urbano: Tunja 2017 - 2035. *Bitacora Urbano Territorial*, 32(1), 177-190. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v32n1.87758>
- Rubiano, K., Clerici, N., Norden, N., & Etter, A. (2017). Secondary forest and shrubland dynamics in a highly transformed landscape in the Northern Andes of Colombia (1985-2015). *Forests*, 8(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f8060216>
- Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M., Rodríguez, E., Hoyos, I., Mercado-Bettín, D., & Poveda, G. (2018). Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(3), 1735-1748. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1735-2018>
- Sánchez, B. (2018). La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión. *Revista científica*, 3(33), 243-253. <https://doi.org/10.14483/23448350.13370>
- Sastre, L. F., Marcos, J. L., Herrero, E., Hernández, S., & Carrión, P. (2016). Aplicación de tecnologías de teledetección al estudio de biomasa forestal. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 19, 61-76. <https://doi.org/10.17013/risti.19.61-76>
- Schwartz, N. B., Aide, T. M., Graesser, J., Grau, H. R., & Uriarte, M. (2020). Reversals of Reforestation Across Latin America Limit Climate Mitigation Potential of Tropical Forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00085>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Suárez, K. V., Cély, G. E., & Forero, F. E. (2016). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: caso microcuenca de la quebrada

Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1), 1-15.
<https://doi.org/10.21068/c2016v17r01a01>

Suárez-Parra, K. V., Cély-Reyes, G. E., & Forero-Ulloa, F. E. (2016). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1), 1-15. <https://doi.org/https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21068/C2016v17r01a01>

Tahir, Z., Haseeb, M., Mahmood, S. A., Batool, S., Abdullah-Al-Wadud, M., Ullah, S., & Tariq, A. (2025a). Predicting land use and land cover changes for sustainable land management using CA-Markov modelling and GIS techniques. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-87796-w>

Tahir, Z., Haseeb, M., Mahmood, S. A., Batool, S., Abdullah-Al-Wadud, M., Ullah, S., & Tariq, A. (2025b). Predicting land use and land cover changes for sustainable land management using CA-Markov modelling and GIS techniques. *Scientific Reports*, 15(1), 3271. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87796-w>

Tamayo, M. M. S., & Estrada, J. D. J. (2022). Planning gaps: unexpected urban expansion in five Colombian metropolitan areas. *Buildings and Cities*, 3(1), 725-744. <https://doi.org/https://doi.org/10.5334/bc.240>

Tello, L., & Díaz, J. P. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *TecnoLógicas*, 24(50), e1710. <https://doi.org/10.22430/22565337.1710>

Turner, L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). *The emergence of land change science for global environmental change and sustainability*. <https://doi.org/https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.0704119104>

Valencia, G., & Anaya, A. (2009). *Implementación de la metodología Corine Land Cover con imágenes Ikonos*. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15/v8n15a04.pdf>

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). *Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua Application of*

remote sensors for the analysis of vegetation cover and water bodies (Vol. 38).
<https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v38n4/0718-3429-idesia-38-04-99.pdf>

Villegas, S. V. (2024). Spatial Reconfiguration in the Aburrá Sur: Concentrated Deconcentration and Tensions in the City Model. *Territorios*, 51.
<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.10156>

Wagner, F. H., Dalagnol, R., Silva-Junior, C. H. L., Carter, G., Ritz, A. L., Hirye, M. C. M., Ometto, J. P. H. B., & Saatchi, S. (2023). Mapping Tropical Forest Cover and Deforestation with Planet NICFI Satellite Images and Deep Learning in Mato Grosso State (Brazil) from 2015 to 2021. *Remote Sensing*, 15(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.09806>

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83-94.
<https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.10.028>