



## **Análisis multitemporal de cambios de coberturas para el polígono del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá**

Luis Francisco Melo Rojas

Leidy Edith Mosquera Nova

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

Asesor

Juan Sebastián Grisales Noreña, Especialista (Esp) en Sistemas de Información Geográfica

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

2025

---

<b>Cita</b>	(Melo Rojas & Mosquera Nova, 2025)
<b>Referencia</b>	Melo Rojas, L. F. & Mosquera Nova, L. E. (2025). <i>Análisis multitemporal de cambios de coberturas para el polígono del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.

---



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, I

**Declaración de inteligencia artificial:** el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], 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](http://www.umanizales.edu.co)

**Revistas:** <http://revistasum.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 mis padres, por estar siempre ahí, con su amor incondicional y su ejemplo de vida.  
A Pao, por su apoyo constante y por motivarme siempre a seguir creciendo profesionalmente.  
A Vicki, por ser mi motor y por impulsarme a mostrar siempre mi mejor versión.

Francisco

A mis padres y hermanos, por creer en mí sin dudar y ser mi motor en cada paso.  
Gracias por acompañarme con amor y firmeza, incluso en medio de las adversidades.  
Su apoyo ha sido mi mayor fortaleza en los momentos más difíciles.  
Este logro es también de ustedes, con todo mi corazón.

Leidy

### **Agradecimientos**

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo constante durante todo el curso de la especialización, a la Dirección de Postgrados, por su asesoría administrativa que facilitó el desarrollo de la especialización y a nuestro asesor de este trabajo de grado, por su paciencia, dedicación, valiosa disposición y acertadas recomendaciones que enriquecieron cada etapa de esta investigación

**Tabla de contenido**

Resumen .....9

Abstract ..... 10

Introducción ..... 11

1 Planteamiento del problema de investigación ..... 13

    1.1 Descripción del área problemática ..... 14

    1.2 Formulación del problema ..... 17

    1.3 Justificación..... 17

2. Objetivos ..... 19

    2.1 Objetivo general ..... 19

    2.2 Objetivos específicos..... 19

3. Antecedentes ..... 20

4. Referente normativo y legal ..... 23

5. Referente teórico ..... 25

    5.1 Información geográfica ..... 26

        5.1.1 Referenciación espacial..... 26

        5.1.2 Sistemas de información geográfica ..... 27

        5.1.3 Teledetección ..... 27

        5.1.4 Imágenes satelitales..... 29

6. Metodología ..... 31

    6.1 Enfoque metodológico ..... 31

    6.2 Tipo de estudio ..... 32

    6.3 Procedimiento..... 33

        6.3.1 Fase de recolección de información ..... 33

            • Instrumentos y técnicas de recolección..... 33

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIOS DE COBERTURAS PARA EL POLÍGONO .....	5
• Adquisición de imágenes satelitales. ....	34
6.3.2 Fase de identificación de cobertura de la tierra.....	36
6.3.2.1 Delimitación del área de estudio. ....	37
6.3.2.2 procesamiento digital de imágenes de satélite .....	39
6.4 clasificación supervisada.....	42
6.4.1 fase de clasificación de usos del suelo .....	44
6.4.2 Fase de cálculo de áreas de mayor degradación.....	46
6.4.2.1 Instrumentos y técnica de recolección. ....	47
6.4.2.2 determinación de las estadísticas de zonas de degradación. ....	47
6.4.2.2.1 zonificación del territorio. ....	47
6.4.2.2.2 superposición de capas temáticas. ....	47
6.4.2.2.3 Modelo de valoración del impacto ambiental .....	48
7. Resultados .....	49
8. Discusión.....	66
9. Conclusiones .....	72
10. Recomendaciones .....	74
11. Referencias .....	76

### Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Listado de imágenes de satélite utilizadas para el análisis multitemporal</i> .....	36
<b>Tabla 2</b> Coberturas de la tierra 1994, discriminado en Área y porcentaje .....	53
<b>Tabla 3</b> Coberturas de la tierra 2000, discriminado en Área y porcentaje .....	55
<b>Tabla 4</b> Coberturas de la tierra 2007, discriminado en Área y porcentaje .....	57
<b>Tabla 5</b> Coberturas de la tierra 2014, discriminado en Área y porcentaje .....	60
<b>Tabla 6</b> Coberturas de la tierra 2018, discriminado en Área y porcentaje .....	62
<b>Tabla 7</b> Coberturas de la tierra 2023, discriminado en Área y porcentaje .....	64
<b>Tabla 8</b> Clasificación de suelo según metodología Corine Land Cover .....	65
<b>Tabla 9</b> Comparación de área en (Ha) de coberturas de 1994 a 2023 .....	68

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Localización geográfica del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá .....	15
<b>Figura 2</b> Flujo metodológico para el uso de datos geoespaciales .....	34
<b>Figura 3</b> Ejemplo de proceso para la búsqueda y descarga de imágenes satelitales para el área de estudio del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá .....	35
<b>Figura 4</b> Composición de bandas ArcGIS Pro .....	37
<b>Figura 5</b> Recorte área de estudio con bandas combinadas ArcGIS Pro .....	38
<b>Figura 6</b> Bandas según color ArcGIS Pro .....	39
<b>Figura 7</b> Proceso de captura de muestras .....	40
<b>Figura 8</b> Tabla de atributos .....	41
<b>Figura 9</b> Herramienta máximo Likelihood Classification.....	42
<b>Figura 10</b> Proceso de clasificación supervisada.....	43
<b>Figura 11</b> Distancias espectrales .....	44
<b>Figura 12</b> Imagen con Unidades de coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000.....	46
<b>Figura 13</b> Imágenes en color natural para el intervalo de 1994 a 2023 con realce optimized linear .....	50
<b>Figura 14</b> Imágenes en color natural para el intervalo de 1994 a 2023 con realce linear 2 .....	51
<b>Figura 15</b> Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 1994 .....	52
<b>Figura 16</b> Análisis Porcentual de clases año 1994 .....	53
<b>Figura 17</b> Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2000 .....	54
<b>Figura 18</b> Análisis Porcentual de clases año 2000 .....	55
<b>Figura 19</b> Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2007 .....	56
<b>Figura 20</b> Análisis Porcentual de clases año 2007 .....	57
<b>Figura 21</b> Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2014 .....	59

**Figura 22** Análisis Porcentual de clases año 2014 .....60

**Figura 23** Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2018 .....61

**Figura 24** Análisis Porcentual de clases año 2018 .....62

**Figura 25** Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2023 .....63

**Figura 26** Análisis Porcentual de clases año 2023 .....64

**Figura 27** Análisis comparativo clasificación supervisada por años .....67

**Figura 28** Análisis comparativo clases por años .....69

## Resumen

El presente informe tiene como objetivo identificar y documentar las transformaciones espaciales y temporales en el uso y cobertura de la tierra dentro de esta área de importancia científica. Utilizando un enfoque metodológico mixto, el estudio emplea imágenes satelitales Landsat 5 y 8 junto con la metodología Corine Land Cover (CLC), un marco estandarizado para la clasificación de la cobertura terrestre. El análisis se centra en los cambios entre 1994 y 2023, revelando tendencias como la reducción de las zonas naturales y el aumento de las actividades humanas, como la agricultura intensiva y la construcción en áreas rurales, generando una fuerte presión sobre los ecosistemas naturales del entorno.

Para garantizar resultados sólidos, se emplean técnicas como la clasificación supervisada de imágenes y análisis espacial multitemporal con software especializado (ArcGISPro, QGIS y ENVI). El estudio no solo ofrece una visión clara de los cambios en el territorio, sino que también facilita la toma de decisiones basadas en evidencia científica, promoviendo estrategias de gestión sostenible que aseguren la preservación del área y su valor ambiental y patrimonial.

Este estudio descriptivo también integra componentes exploratorios debido a la escasez de investigaciones previas en la región seleccionada. El presente análisis constituye un aporte novedoso al estudio del cambio de coberturas en áreas de interés paleontológico en Colombia, integrando técnicas SIG con un enfoque de conservación patrimonial.

*Palabras clave:* teledetección, análisis multitemporal, clasificación supervisada, degradación, uso del suelo, yacimiento paleontológico.

### **Abstract**

The present report aims to identify and document spatial and temporal transformations in land use and cover within this scientifically significant area. Using a mixed methodological approach, the study employs geospatial tools such as Landsat 5 y 8 satellite imagery alongside the Corine Land Cover (CLC) methodology, a standardized framework for land cover classification. The analysis focuses on changes between 1994 and 2023, revealing trends such as reduced natural areas and increased human activities, including intensive agriculture, and construction in rural areas, generating a strong pressure on the natural ecosystems of the surrounding area.

To guarantee solid results, techniques such as supervised image classification and multitemporal spatial analysis with specialized software (ArcGIS, QGIS and ENVI) are used. The study not only provides a clear view of changes in the territory, but also facilitates decision-making based on scientific evidence, promoting sustainable management strategies that ensure the preservation of the area and its environmental and heritage value.

This descriptive study also incorporates exploratory components due to the scarcity of previous research in the selected region. The present analysis represents a novel contribution to the study of land cover change in areas of paleontological interest in Colombia, integrating GIS techniques with a heritage conservation approach.

*Keywords:* remote sensing, multitemporal analysis, supervised classification, degradation, land use, paleontological site.

## **Introducción**

El departamento de Boyacá presenta una riqueza geológica reconocida por investigadores, en geociencias, entidades nacionales y departamentales, estudiantes y hoy día, por comunidades locales que buscan articuladamente proteger lo que se denomina patrimonio geológico y paleontológico. Uno de los sitios más importantes no solo a nivel departamental sino nacional y hasta internacional es el yacimiento paleontológico de reptiles marinos del Cretácico Inferior del Ricaurte Alto, Boyacá. En los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva han sido encontrados, excavados y estudiados gran cantidad de reptiles marinos que vivieron hace más de 100 millones de años y que hacen de esta zona un sitio de relevancia nacional e internacional que requiere una figura de protección.

En respuesta a esta necesidad, en el año 2018 se estableció la normativa que busca proteger este tipo de áreas con riqueza geológica y paleontológica – Decreto 1353 de 2018, siendo el Servicio Geológico Colombiano (SGC) quién está a cargo de la gestión integral de este tipo de patrimonio que incluye la declaratoria de Zonas de Protección Patrimonial Geológicas y Paleontológicas. El SGC toma como caso piloto para construir los lineamientos para el proceso de declaratoria de este tipo de zona el yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, generando inicialmente un acercamiento con los entes territoriales y comunidades locales.

A partir de este contexto normativo y territorial, el presente trabajo se propone como una contribución significativa tanto a nivel local como nacional, al aplicar herramientas de análisis multitemporal y teledetección en el estudio de un área de alto valor paleontológico, con el fin de aportar insumos técnicos para su conservación y ordenamiento territorial. La presente investigación contribuye al análisis de crecimiento de las fronteras urbanas y agrícolas que afectan o pueden afectar el polígono del yacimiento paleontológico, estudios que deberán ser incorporados en un plan de manejo geológico que acompañará la declaratoria de la Zona de Protección.

El análisis multitemporal para identificar los cambios superficiales que pueden afectar el yacimiento paleontológico se realizó entre los años 1994 y 2023 con ayuda de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos, las cuales facilitan el análisis del fenómeno y su dinámica de crecimiento. Para este estudio se utilizaron seis imágenes Landsat, que cubren el intervalo de tiempo de 30 años y las cuales son las más empleadas en aplicaciones de teledetección en formas geológicas. La clasificación de las coberturas vegetales y centros urbanos identificadas en el área de estudio, se realizó según la metodología Corine Land Cover adaptada

para Colombia, insumo que permite establecer la leyenda de mapas y determinar los cambios multitemporales según requerimientos y generalidades nacionales.

La novedad del estudio radica en su enfoque metodológico, poco explorado en Colombia, que integra los Sistemas de Información Geográfica con criterios de geoconservación en un yacimiento fósil. Como consecuencia, este estudio aporta a las medidas preventivas y recomendaciones para la futura zona de protección a declarar. Estudios como el planteado en el presente documento contribuyen para la toma de decisiones encaminadas a la protección y manejo del patrimonio geológico y paleontológico del país, además permite identificar la dinámica de cambios y de ampliación de las fronteras urbanísticas y agrícolas en el área de estudio contribuyendo a los instrumentos de ordenamiento territorial de los municipios involucrados.

Finalmente, a diferencia de estudios previos en otras regiones del país, este trabajo representa un abordaje inédito en el contexto colombiano, al aplicar un análisis multitemporal de coberturas en un yacimiento paleontológico, combinando técnicas SIG con criterios de conservación del patrimonio geológico, ofreciendo un referente replicable para otras zonas de interés geocientífico en el territorio nacional.

## **1 Planteamiento del problema de investigación**

El yacimiento paleontológico del sur de la provincia del Ricaurte alto en el departamento de Boyacá busca consolidarse como la primera Zona de Protección Patrimonial Geológica y Paleontológica (Zona de Protección), con el fin de proteger un área de especial interés geológico y paleontológico para Colombia. El yacimiento en cuestión posee una extensión de 3708,26 Ha, donde se presentan diversos procesos naturales sobrepuestos por una gama de actividades humanas que pueden afectar su conservación.

En este sentido, el proceso de declaratoria de la Zona de Protección que abarca parte de los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva deberá contener un análisis de su integridad, la cual se refiere al grado de preservación de los atributos donde se materializa el valor científico del sitio de la geodiversidad, teniendo en cuenta los procesos naturales y las acciones humanas que inciden o han incidido en su estado actual.

Por otra parte, debido a la distribución de las rocas donde se han hallado los reptiles marinos que dan la importancia científica al yacimiento y si bien no es posible evaluar el potencial fósil de la unidad geológica que los contiene, se entiende que aún hay bastante por descubrir bajo la superficie. Esto plantea la necesidad de partir por el reconocimiento de los factores de riesgo que pueden afectar las áreas más vulnerables del yacimiento paleontológico.

En cuanto al contexto normativo local, los municipios que presentan áreas de interés para el yacimiento cuentan con esquemas de ordenamiento o plan básico, elaborados entre los años 2000 y 2004, en la actualidad vigentes. A futuro y en concordancia con la actualización de los instrumentos de ordenamiento de los municipios, una vez declarada la Zona de Protección Geológica y Paleontológica, se deberá propiciar el proceso de incorporación de las directrices y estrategias de Geoconservación planteadas en el Plan de Manejo en el nuevo instrumento de ordenamiento del municipio, para que se incorpore la protección y conservación del Patrimonio Geológico y Paleontológico según del Decreto 1353 de 2018.

En este contexto, el uso de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica como la teledetección, incluyendo el análisis multitemporal como herramienta fundamental para identificar y cuantificar los impactos que han venido degradando el área que cubre el yacimiento paleontológico. El reconocimiento de las variables que han generado el cambio en superficie, el porcentaje de transformación que se han llevado a cabo en los últimos años, los ecosistemas que

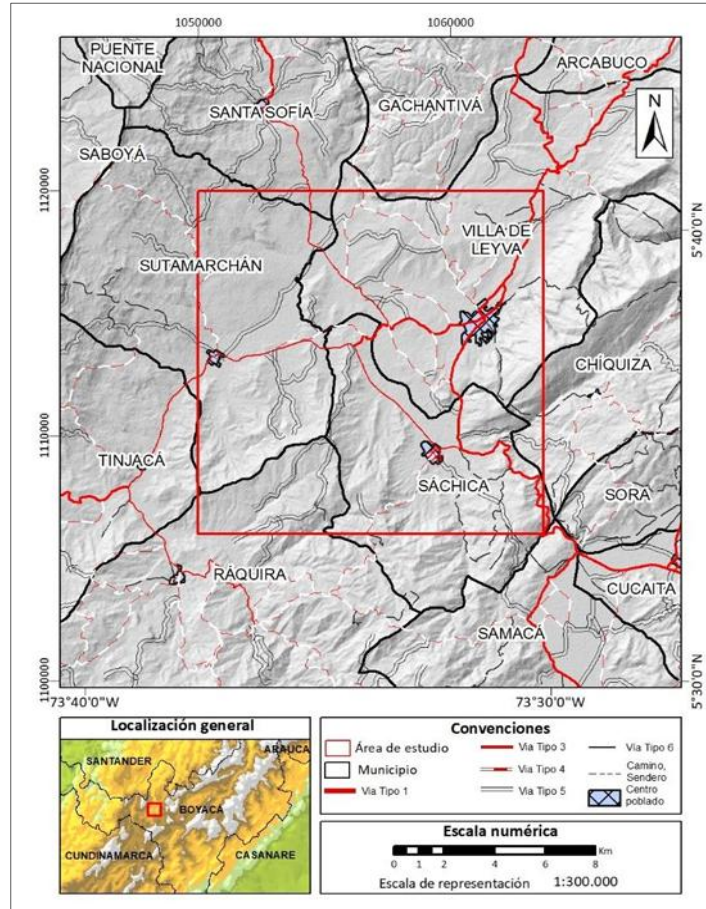
se han visto afectados, la pérdida de cobertura y exposición de elementos abióticos, en este caso los fósiles, son factores fundamentales para generar cartografía actualizada, toma de decisiones, y formulación de estrategias y políticas en cuanto a la planificación del territorio, y manejo del patrimonio paleontológico de esta región.

### **1.1 Descripción del área problemática**

El yacimiento paleontológico está sobre el margen occidental de la cordillera Oriental, al sur – suroeste del departamento de Boyacá, en jurisdicción de los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva (Figura 1). Su distribución geográfica se enmarca en las planchas geológicas a escala 1:100 000: 190 Tunja y 191 Chiquinquirá (definidas sobre el Datum Bogotá) y en las planchas topográficas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:25 000 número 190IIB, 190IID, 191IA y 191IC (también definidas sobre el Datum Bogotá).

**Figura 1**

*Localización geográfica del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá*



*Nota.* Fuente Servicio Geológico Colombiano

El análisis de riesgos de degradación se enfoca en evaluar qué factores naturales y humanos pueden afectar la integridad del sitio de la geodiversidad, específicamente a sus atributos. Por ello, su abordaje parte de la información desarrollada previamente donde se realiza un análisis sobre el proceso de transformación de los suelos y cambios en la cobertura en el área en los últimos años para determinar así las medidas preventivas y posibles riesgos que ocasione la pérdida de información científica relevante en el yacimiento paleontológico.

En lo que respecta a las amenazas naturales, están dadas por un paisaje seco erosionado, sin cobertura vegetal o con mínima presencia de plantas invasoras. Es un área muy degradada con procesos irreversibles donde es dominante la erosión bajo todas sus formas. El suelo no existe bajo una considerable extensión y se reduce a pequeñas manchas muy empobrecidas donde cultivan campesinos minifundistas (García Ortiz et al., 2013). Si bien la erosión ha facilitado la exposición

de las rocas y el hallazgo de fósiles, también ha llevado a la pérdida de volúmenes de roca que contienen material paleontológico los cuales quedan expuestos a procesos de oxidación o disolución o son arrastrados por las corrientes esporádicas de los drenajes iniciando procesos de abrasión y fragmentación lo que representa el principal riesgo de degradación natural para el yacimiento (Luque Ripoll, 2010).

Por otro lado, el mayor impacto sobre el yacimiento es ocasionado por la degradación antrópica debido a factores como la expansión urbana y agrícola, así como el auge por el turismo en la región. El desarrollo urbano de los municipios ha venido en aumento los últimos años requiriendo además de infraestructura civil (vías, redes, puentes), generando en ocasiones pérdida de material fosilífero en dichas intervenciones. Otro factor es el incremento en la infraestructura para la producción agrícola como invernaderos y el uso de maquinaria para el arado de la tierra sin ningún control o acompañamiento de personal capacitado para el reconocimiento de posibles nuevos hallazgos. Además, factores como el saqueo de fósiles, los efectos del cambio climático y el turismo llegan a generar pérdida de material por el mismo interés que generan los fósiles que se hallan con facilidad en esta región.

En este contexto, la incorporación de estudios que aporten a la conservación y protección del yacimiento paleontológico deberán ser incorporados en los instrumentos de planificación territorial de los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva permitió identificar distintos tipos de construcciones que se utilizan en el área del polígono del yacimiento paleontológico: las viviendas rurales y campestres, y los invernaderos. Además, Villa de Leyva por ejemplo centra su renglón económico en el turismo, así como los otros municipios han venido impulsando el sector del turismo asociado a los sitios reconocidos del municipio.

Finalmente, dentro de los objetivos principales que contempla un plan de manejo de una Zona de Protección de este tipo se encuentran (1) precisar lineamientos de geoconservación y acciones de protección de carácter preventivo y/o correctivo necesarias para la conservación de los Bienes de Interés Geológico y Paleontológico mueble e inmueble incluidos en de la Zona de Protección; (2) gestionar la articulación con las entidades territoriales a fin de conservar los valores otorgados, la mitigación de los riesgos y amenazas tanto naturales como antrópicas que afectan los valores que motivaron la declaratoria del bienes o bienes que la integran y el aprovechamiento de las potencialidades que presenta el patrimonio geológico y paleontológico; y (3) definir la zonificación que garantice la conservación y monitoreo de los geotopos o geositios que conforman

el yacimiento paleontológico, con el fin de preservar sus valores intrínsecos, históricos, científicos, educativos y culturales.

## **1.2 Formulación del problema**

El yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, es un área de gran valor científico por su riqueza fósil y su relevancia geológica. Sin embargo, durante las últimas décadas, esta zona ha enfrentado un proceso de deterioro debido a diversas actividades humanas, como la expansión urbana y rural, la minería y el saqueo de fósiles, las cuales se han llevado a cabo sin un acompañamiento técnico adecuado. Estas intervenciones no solo han generado impactos negativos sobre el valor científico del lugar, sino también han afectado su integridad ambiental y geológica.

Aun así, a pesar de su importancia, no se dispone de estudios detallados que permitan identificar con precisión las áreas afectadas, cuantificar los impactos generados y delimitar las zonas prioritarias para su conservación. La falta de información sobre los cambios en el uso del suelo y las coberturas en el área ha dificultado la implementación de estrategias de manejo y protección efectivas. Por esta razón, resulta indispensable realizar un análisis multitemporal de las transformaciones que ha experimentado el yacimiento, empleando herramientas como la metodología Corine Land Cover y tecnologías de teledetección. Este análisis permitirá comprender la magnitud de los impactos, establecer medidas de conservación basadas en evidencia y garantizar una gestión sostenible de este patrimonio paleontológico.

**Pregunta de Investigación:** ¿Cómo han evolucionado los cambios en el uso del suelo y las coberturas en el polígono del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, en las últimas décadas, y qué impactos han generado estas transformaciones en su integridad científica?

## **1.3 Justificación**

Este trabajo representa un aporte pionero en el contexto nacional, ya que hasta la fecha no se han identificado estudios en Colombia que apliquen técnicas de análisis multitemporal y teledetección para evaluar la transformación de coberturas en un yacimiento paleontológico con miras a su protección legal y planificación territorial. La integración de herramientas SIG en el proceso de declaratoria de una Zona de Protección Patrimonial Geológica y Paleontológica constituye un

enfoque novedoso en el país, que puede servir de modelo para otros sitios con potencial patrimonial. Así, este análisis no solo busca informar decisiones locales, sino también abrir un camino metodológico replicable en el ámbito nacional para la conservación del patrimonio geológico desde la perspectiva del análisis espacial y multitemporal.

En consecuencia, el caso de estudio para la primera declaratoria de una Zona de Protección, tiene como objetivo diseñar, desarrollar, implementar y estimular las posibilidades de investigación, educación y divulgación, además del disfrute que pueda ofrecer el patrimonio geológico y paleontológico. Dentro de los objetivos de declaratoria de zonas de protección está el de mitigar riesgos y amenazas tanto naturales como antrópicas que afectan los valores que motivaron la declaratoria de los Bienes de Interés Geológicos y Paleontológicos que la integran y fomentar la corresponsabilidad en la protección de los mismos, implementando acciones para conservar los atributos en los que se materializan los valores científicos, educativos y culturales que sustenten su declaratoria.

Para ello, esta estrategia debe ser soportada técnicamente por un Plan de Manejo y Protección Geológico (PMPG) con el fin de lograr una adecuada gestión de los bienes de interés muebles e inmuebles de la Nación que la conforman.

Finalmente, el PMPG tiene como objetivo promover procesos de planeación y gestión del patrimonio geológico y paleontológico mediante los cuales se establezcan acciones que contribuyan a garantizar la protección, conservación y sostenibilidad de los bienes muebles e inmuebles que la conforman y los valores científico, educativo y cultural que los sustentan.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Determinar el cambio de usos del suelo y coberturas del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá por medio de análisis multitemporal en el periodo comprendido entre 1994-2023.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Recopilar información primaria y secundaria asociada con el área de estudio.
- Identificar y clasificar las coberturas de uso del suelo a partir de la clasificación supervisada con base en la metodología Corine Land Cover para el yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá entre los años 1994 a 2023.
- Analizar los cambios en las coberturas de la tierra en el área del polígono del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá entre los años 1994 a 2023 a partir de la comparación de los resultados obtenidos entre imágenes.
- Establecer estadísticas con las zonas de mayor degradación a partir de la superposición de las capas con las imágenes satelitales procesadas.

### 3. Antecedentes

El análisis multitemporal de cambios en el uso del suelo ha sido ampliamente estudiado debido a su relevancia en la planificación territorial y la conservación ambiental. Ban (2016) destacó las tendencias y desafíos en el uso de la teledetección multitemporal, resaltando su capacidad para identificar cambios en áreas de interés ecológico. Por su parte, Bruzzone y Prieto (2000) desarrollaron métodos automáticos para la detección de cambios no supervisados en imágenes satelitales, subrayando su utilidad en la evaluación de transformaciones urbanas y rurales.

En Colombia, Ardila León y Quintero Delgado (2013) emplearon sistemas de información geográfica (SIG) para interpretar zonas inundables en Boyacá, evidenciando la importancia de estas herramientas en contextos locales. De manera similar, Rojas y García (2016) utilizaron la metodología Corine Land Cover (CLC) para analizar cambios en la cobertura terrestre, demostrando su eficacia en la clasificación de usos del suelo y el monitoreo de tendencias temporales, lo cual se alinea con los objetivos de esta investigación.

Por otro lado, Chaves et al. (2020) evalúan el uso de imágenes de Landsat 5 y 8 para mapear coberturas terrestres, destacando la precisión de estas plataformas para monitorear dinámicas espaciales y temporales. De forma complementaria, Gamba y Dell'Acqua (2016) estudian la detección de cambios en áreas urbanas, señalando los impactos de la expansión humana sobre los paisajes naturales.

En relación con el cambio climático, el IPCC (2014) indicó que las modificaciones en el uso del suelo están directamente relacionadas con los efectos del calentamiento global, lo cual subraya la necesidad de estrategias de conservación en sitios paleontológicos. En ese sentido, Aderogba (2012) abordó cómo las dinámicas globales afectan los paisajes locales, ofreciendo un marco conceptual relevante para el análisis de transformaciones en Ricaurte Alto.

Los estudios aplicados refuerzan la necesidad de integrar metodologías multitemporales y SIG en investigaciones ambientales. Por ejemplo, López-Jamióy (2023) analizó las amenazas por inundación en Putumayo, mientras que Melo-Ojeda (2015) realizó un diagnóstico ambiental en la cuenca baja del río Tunjuelito. A su vez, Matoma y Cañas (2017) interpretaron coberturas terrestres para proyectos de compensación ambiental, mientras que Franco Zapata y Albán Chindoy (2022) aplicaron SIG para zonificaciones de áreas con riesgo de inundación, demostrando la versatilidad de estas herramientas en diversos contextos.

Por otro lado, la reconstrucción de índices de vegetación también ha sido ampliamente explorada. Roerink et al. (2000) desarrollaron métodos para generar compuestos libres de nubes mediante análisis de Fourier, facilitando la evaluación de cambios en la vegetación. Asimismo, Tobón (2020) destacó la importancia de clasificaciones detalladas de las coberturas terrestres, mientras que el Servicio de Monitoreo Copernicus (2023) validó la metodología CLC como un estándar para estudios multitemporales.

En lo que respecta al monitoreo de ecosistemas sensibles, Wang et al. (2016) utilizaron teledetección multitemporal para evaluar humedales y cuerpos de agua, subrayando la aplicabilidad de estas técnicas en la conservación de recursos naturales. De igual forma, Martínez-Gutiérrez (2022) y Robayo-Mejía (2014) analizan amenazas por inundación en Bogotá, resaltando cómo la integración de datos geoespaciales puede apoyar la planificación territorial.

En cuanto a metodologías específicas, Dzikowski (2022) profundizó en los enfoques cambios en el uso del suelo, destacando la importancia de adaptar estas herramientas a contextos locales. Por su parte, Rodríguez-Gaviria (2016), por su parte, diseñó estrategias para evaluar riesgos de inundación en áreas con información limitada, lo que evidencia la versatilidad de los enfoques multitemporales.

Finalmente, Galvis-Aponte y Quintero-Fragozo (2017) examinaron las dinámicas económicas de los municipios ribereños de la Magdalena, demostrando cómo los factores socioeconómicos influyen en las transformaciones del territorio. Sus hallazgos, junto con los de Ardila León y Quintero Delgado (2013), refuerzan la necesidad de abordar los cambios en el uso del suelo desde perspectivas integrales que combinan aspectos ambientales, sociales y tecnológicos.

En síntesis, estos antecedentes destacan la importancia de utilizar metodologías multitemporales, herramientas SIG y enfoques estandarizados para evaluar los cambios en el uso del suelo. Esto proporciona una base sólida para la conservación y gestión sostenible del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, alineándose con los objetivos del presente estudio.

Las metodologías de análisis multitemporal y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) referenciadas en estudios previos no solo fundamentan teóricamente esta investigación, sino que también se aplican directamente en la evaluación de transformaciones en el área de Ricaurte Alto. Por ejemplo, la precisión de las imágenes Landsat 5 y 8 señalada por Chaves et al. (2020) fue esencial para detectar cambios espaciales en la cobertura terrestre del yacimiento, mientras que el

enfoque propuesto por Bruzzone y Prieto (2000) permitió implementar técnicas de detección no supervisada que enriquecieron el análisis comparativo entre períodos. Asimismo, la metodología Corine Land Cover descrita por Rojas y García (2016) orientó la clasificación de las coberturas observadas, aportando una taxonomía estandarizada adecuada para el contexto colombiano. Estos enfoques fueron complementados con los aportes de Martínez-Gutiérrez (2022) y Robayo-Mejía (2014), quienes demostraron la utilidad de integrar datos geoespaciales en contextos urbanos y de riesgo, lo cual se reflejó en la identificación de zonas vulnerables dentro del yacimiento. De este modo, el uso articulado de estas metodologías respalda los resultados obtenidos y contribuye a una comprensión integral de los cambios ambientales y su posible impacto en el patrimonio paleontológico de la región.

#### **4. Referente normativo y legal**

De acuerdo con lo establecido en el Decreto Ley 4131 de 2011, el Servicio Geológico Colombiano es la entidad nacional encargada de la protección del Patrimonio Geológico y Paleontológico de Colombia, la cual tiene como objetivos caracterizar y valorar sitios de la geodiversidad para determinar si cuentan con valor científico, educativo o cultural.

Atendiendo a lo estipulado en el artículo 2.2.5.10.4 del Decreto 1353 de 2018, el SGC establece la metodología a seguir para la declaratoria de los bienes de interés Geológico y Paleontológico como Geotopo y Geositios.

En este sentido, la declaratoria de un Geotopo o conjunto de Geotopos como Zona de Protección Patrimonial Geológica y Paleontológica se realizará en razón a las facultades legales otorgadas al Servicio Geológico Colombiano, en especial las conferidas por el Decreto Ley 4131 de 2011, en concordancia con el artículo 2 del Decreto 2703 de 2013 y los Decretos 1073 de 2015 y 1353 de 2018.

Una vez sea declarado el Geotopo o conjunto de Geotopos, cualquier persona natural, jurídica, extranjera o autoridad territorial podrá presentar solicitud de declaratoria de un Geotopo o conjunto de Geotopos como Zona de Protección Patrimonial Geológica y Paleontológica al Servicio Geológico Colombiano, de conformidad con lo establecido en el artículo 2.2.5.10.1.3 del Decreto 1353 de 2018 o cuando esta Entidad o quien haga sus veces de manera oficiosa lo considere oportuno. Para tal efecto, se consultará previamente a otras entidades públicas y autoridades territoriales que puedan haber concedido permisos o licencias dentro de dichas áreas o que puedan tener interés en la decisión.

Por consiguiente, de acuerdo con el artículo 2.2.5.10.5 del Decreto 1353 de 2018, el Servicio Geológico Colombiano evaluará la pertinencia y necesidad de declarar un Geotopo o conjunto de Geotopos como Zona de Protección. En caso positivo, informará a la autoridad territorial, quien deberá iniciar la formulación del Plan de Manejo y Protección Geológico en coordinación con el Servicio Geológico Colombiano, el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) y las autoridades ambientales regionales, cuando el patrimonio geológico y paleontológico se encuentre localizado en áreas de especial importancia ecológica regional, de conformidad con lo establecido en la Ley 397 de 1997, la Ley 1185 de 2008 y el Decreto 1076. de 2015 o las normas que los modifican o sustituyen.

De igual manera, de acuerdo con los artículos 2.2.5.10.5 y 2.2.5.10.1.3 del Decreto 1353 de 2018, al finalizar el Plan de Manejo y Protección Geológico, la autoridad territorial enviará el documento al Servicio Geológico Colombiano, quien lo remitirá al Ministerio de Minas y Energía. Este último, a través de sus áreas técnicas, emitirá un informe respecto de las actividades mineras, de hidrocarburos y de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de energía que puedan presentarse en la zona de eventual declaración.

Así mismo, las autoridades territoriales tendrán la facultad de incluir las Zonas de Protección en sus instrumentos de ordenamiento territorial, conforme a lo señalado en la Ley 388 de 1997, cuando pretenden hacer inversiones públicas para su conservación. Igualmente, evaluarán la posibilidad de incorporar a sus usos del suelo el polígono de la Zona de Protección, con el fin de que el ordenamiento territorial tenga en cuenta los lineamientos de manejo para la Zona de Protección y deberán informar al Servicio Geológico Colombiano sobre estas gestiones.

En consecuencia, una vez se declare la Zona de Protección, esta ingresará al Inventario Nacional Geológico y Paleontológico (INGEP) y, con ello, será considerada parte del patrimonio de la Nación, de acuerdo con lo establecido en la Ley 163 de 1959, el Decreto 1353 de 2018 y en concordancia con lo consagrado en los artículos 8, 63 y 72 de la Constitución Política. Por lo tanto, deben ser protegidos por la policía y las autoridades territoriales en sus jurisdicciones, quienes deben adoptar las medidas recomendadas y brindadas por el Servicio Geológico Colombiano, siempre que estas estén en consonancia con sus funciones y no entren en contradicción con otras disposiciones normativas.

Finalmente, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 2.2.5.10.5 del Decreto 1353 de 2018, cuando la Zona de Protección se encuentre al interior de las áreas protegidas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), el Servicio Geológico Colombiano deberá generar recomendaciones en torno a la protección del Patrimonio Geológico y Paleontológico de la Nación a la autoridad ambiental administradora del área protegida. A su vez, esta las deberá incorporar en el plan de manejo ambiental correspondiente, en caso de ser necesario y siempre que no contradigan el régimen de usos vigente del área.

## 5. Referente teórico

El yacimiento paleontológico de reptiles marinos ubicado entre los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva en el sur de la región del Ricaurte Alto, departamento de Boyacá, Colombia, se caracteriza por la diversidad, cantidad y calidad fósil, especialmente por la presencia de plesiosaurios, ictiosaurios y tortugas marinas. Algunos de éstos son holotipos , preservados en tres dimensiones y usualmente articulados, información que ha contribuido a la comprensión actual de la diversidad y evolución de estas especies. Dadas las características excepcionales de estos organismos fósiles, investigadores del área propusieron a este yacimiento paleontológico como un nuevo Lagerstätte (Selden & Nudds, 2012).

Por consiguiente, este yacimiento paleontológico ha sido seleccionado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) para ser declarado como la primera Zona Protección Patrimonial Geológica y Paleontológica de Colombia (en adelante Zona de Protección). En tanto es la entidad encargada de diseñar e implementar la política de protección, conservación y preservación del patrimonio geológico y paleontológico del país, ha definido como una de sus estrategias de acción, la declaratoria de Zonas de Protección.

En relación con esto, los factores involucrados en el análisis multitemporal del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, donde este análisis multitemporal se define de acuerdo a Chuvieco (1990), como un análisis en teledetección, el cual es la comparación de coberturas interpretadas en dos o más imágenes de satélite, en dos o más fotografías aéreas o en mapas de un mismo lugar en diferentes periodos, con lo cual se permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas de la tierra que han sido clasificadas de acuerdo a un código o parámetro, donde estas coberturas de la tierra se definen de acuerdo a Di Gregorio y Jansen (1998), como la cobertura física que se observa sobre la superficie de la tierra, asimismo, esta es una definición que no solo tiene en cuenta la descripción de la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra, sino que describe también otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua, sin embargo, otras fuentes como el IDEAM, describen las coberturas de la tierra como “unidades delimitables que surgen a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales” (IDEAM, 1997).

## **5.1 Información geográfica**

El medio ambiente está en un constante proceso dinámico, generando datos sobre sus componentes y su interacción con las comunidades cercanas, que dependen de los recursos y servicios que este proporciona. En este contexto, en el país, existen diversas organizaciones ambientales dedicadas a la recopilación de esta información, con el fin de almacenarla, gestionarla y procesarla, lo que posibilita a los usuarios utilizarla para desarrollar estrategias orientadas a su adecuada gestión.

Por otra parte, cuando se habla de información geográfica, se está haciendo a un dato que ocupa un espacio cartográfico específico, representando una ubicación determinada dentro de un sistema de referencia geográfico. Este sistema describe las características de un objeto o fenómeno, permitiendo inferir sus causas y posibles consecuencias mediante la interpretación de patrones y variaciones en los datos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014).

En el caso colombiano, estas metodologías y herramientas se utilizan principalmente para analizar la información generada mediante tecnologías avanzadas, con el objetivo de evaluar el uso actual de los suelos. A partir de este análisis, se pueden implementar políticas orientadas al uso potencial de dichos suelos, priorizando la conservación y restauración de estos.

### ***5.1.1 Referenciación espacial***

La georreferenciación es un proceso mediante el cual se determina la ubicación de un objeto sobre la superficie terrestre, de acuerdo con un sistema de referencia geográfico. En este sentido, las coordenadas asociadas a este proceso son medidas de latitud y longitud (Sastre, 2008).

Por su parte, Colombia emplea su propio modelo de coordenadas y georreferenciación, conocido como MAGNA-SIRGAS, el cual garantiza la compatibilidad de las coordenadas del país con los métodos espaciales de posicionamiento. Cabe destacar que SIRGAS es una extensión del ITRF y debe ser densificado para cumplir con los requerimientos de precisión necesarios para los usuarios de información georreferenciada en los diferentes países (IGAC, 2004).

### ***5.1.2 Sistemas de información geográfica***

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como un proceso organizado que involucra hardware, software, datos geográficos y personal capacitado. Este sistema está diseñado para capturar, almacenar, gestionar, analizar, modelar y representar información geográficamente referenciada, con el fin de proporcionar herramientas útiles para la planificación y gestión adecuada del territorio. Los SIG permiten desarrollar estrategias que facilitan la modelización descriptiva y predictiva de la evolución temporal y espacial de los elementos del medio ambiente (Sastre, 2008).

La capacidad integral de los SIG los convierte en la herramienta ideal para el procesamiento y la gestión de los resultados obtenidos a partir de otras tecnologías centradas en el uso de la información espacial, las cuales están más o menos vinculadas a un SIG (Olaya, 2011).

### ***5.1.3 Teledetección***

La teledetección, también conocida como percepción remota, es una técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre a través de sensores ubicados en plataformas aéreas. Este proceso involucra la interacción de varios componentes, tales como la energía, los elementos terrestres y atmosféricos, los sistemas sensores y los sistemas de recepción de la información (Ardila, 2013). El principio fundamental de la percepción remota radica en el tratamiento posterior de las imágenes para, a partir de una aplicación específica, generar información útil que permita abordar preguntas, así como plantear métodos predictivos y preventivos ante problemas ambientales (Chuvienco, 1995).

En este contexto, la clasificación del uso/cobertura del suelo ha sido durante mucho tiempo un tema de interés en la investigación de observación de la Tierra. Estos estudios proporcionan caracterizaciones de grandes extensiones de la superficie terrestre clasificando la variación continua de sus atributos en clases discretas y contribuyen al establecimiento de líneas de base en los estudios de cambio. La clasificación del uso/cobertura del suelo, que son esenciales para la gestión y el seguimiento de la superficie terrestre. Por este motivo, estos estudios son cruciales para la gestión y el seguimiento de la superficie terrestre (Solórzano et al., 2021).

Por otro lado, se han desarrollado diversos sistemas de clasificación de LULC con distintos fines. Especialmente en las regiones tropicales, varios estudios han hecho hincapié en la importancia de distinguir entre los bosques antiguos y las plantaciones, así como entre los bosques

secundarios, debido a sus diferencias en la gestión medioambiental y la conservación de la biodiversidad. Aunque estas tres clases pueden tener similitud, los bosques secundarios y las plantaciones suelen tener menos biomasa sobre el suelo, albergan menos biodiversidad y proporcionan ecosistemas diferentes.

Los estudios anteriores se han basado en sensores remotos para obtener señales de reflectancia o retrodispersión de la superficie terrestre para predecir diferentes usos/cobertura del suelo. Por lo tanto, con el desarrollo y otros avances tecnológicos, se han propuesto nuevos métodos para obtener clasificaciones de usos del suelo. Recientemente, los enfoques de aprendizaje profundo han ganado mucha popularidad debido al aumento de la precisión, en comparación con anteriores. Además, los algoritmos de aprendizaje profundo son capaces de obtener patrones complejos y no lineales en las dimensiones espacial y temporal, y no requieren una transformación previa de las entradas, por ejemplo, calculando transformaciones espectrales como los índices de vegetación (Solórzano et al., 2021).

Por su parte, la interpretación de coberturas es uno de los factores principales que se consideraron en el presente trabajo, para realizar esta interpretación se revisará el procedimiento establecido por el IDEAM (2020), donde en principio se efectuó la interpretación a partir de la visualización en computador de las imágenes satelitales, empleando diversos tipos de software (entre ellos Arcgis, Qgis, PyQgis, etc.), donde cada interprete cuenta con una licencia del software, y una configuración predeterminada para delimitar las unidades de mapeo (tipo de coberturas naturales y/o antrópicas), posteriormente para realizar una adecuada interpretación se realizó un procesamiento digital de las imágenes, esto quiere decir mejoramientos espectrales, corte y proyecciones (Suárez y Vargas, 2021).

Finalmente, una de las formas más empleadas para extraer información temática a partir de imágenes satelitales es la clasificación supervisada. Sin embargo, depende de la capacidad del algoritmo utilizado para discriminar las categorías (Vargas-Sanabria, 2018). La estrategia para aplicarla puede diferir desde el algoritmo de asignación seleccionado, el número de bandas incluidas y el tamaño de las áreas de entrenamiento (Argañaraz y Entraigas, 2011). La fiabilidad de los mapas puede variar dependiendo tanto del tipo de imágenes, como de los algoritmos de clasificación empleados, especialmente cuando la matriz de usos de la tierra evaluada es muy heterogénea (Ávila-Pérez et al., 2020). En este sentido, el uso combinado de estos algoritmos, datos

geográficos auxiliares, e imágenes de satélite, permiten cartografiar y diferenciar la cobertura del suelo.

#### ***5.1.4 Imágenes satelitales***

Las imágenes satelitales multitemporales son representaciones visuales de la información capturada por sensores en satélites artificiales, constituyen una herramienta invaluable para el monitoreo e identificación de los elementos que conforman el medio ambiente y sus dinámicas ecosistémicas. Estas imágenes permiten realizar un seguimiento detallado de la evolución de fenómenos terrestres y sus cambios a lo largo del tiempo, ayudando a identificar factores determinantes en la modificación de la cobertura terrestre.

- **Imágenes Landsat:** Las imágenes Landsat están compuestas por siete bandas multispectrales, que abarcan desde el rango visible hasta el infrarrojo medio, con una resolución espacial de 30 metros en la mayoría de los casos. Estas imágenes se utilizan principalmente para identificar y clasificar las diferentes coberturas terrestres, evaluar la humedad del suelo, clasificar la vegetación, elaborar mapas hidrotermales y realizar estudios multitemporales (Soluciones Integrales en Geomática, 2016).

Adicionalmente, las imágenes del satélite Landsat 8 incluyen dos nuevas bandas espectrales: una banda en el azul visible (banda 1), diseñada especialmente para la investigación de recursos hídricos y zonas costeras, y una nueva banda en el infrarrojo (banda 9), que permite detectar nubes cirrus. Asimismo, se incluye una banda adicional de control de calidad en cada producto de datos generado, lo que mejora la precisión de la información obtenida (IGAC, 2013).

Respecto al análisis multitemporal, la metodología de análisis multitemporal, es una técnica de análisis que permite obtener conclusiones con relación a las transformaciones espaciales de una región. Al realizar el procesamiento multitemporal de imágenes satelitales, se debe obtener una serie de datos que estén referenciados de acuerdo con la fecha de su origen, y que finalmente tienen que convertirse en un conjunto único de datos (Mehl y Peinado, 1997). El objetivo principal de los estudios multitemporales es detectar cambios en la cobertura entre dos fechas de referencia, evidenciando la marcada repercusión de la acción humana sobre los recursos naturales (Trejos, 2008).

Por otro lado, otra herramienta por utilizar en el presente trabajo es la metodología Corine Land Cover, ampliamente utilizada para la clasificación de la cobertura terrestre debido a su capacidad para proporcionar información detallada sobre el uso del suelo en Europa, según lo señalado por la Agencia Europea de Medio Ambiente en 2019. Esta metodología se basa en la interpretación de diferentes características visuales en imágenes satelitales y utiliza una taxonomía estandarizada para clasificar la cobertura terrestre en diversas categorías. Con el tiempo, se ha mejorado la precisión de la clasificación de Corine Land Cover, y ahora se considera una herramienta valiosa para la gestión del territorio y la evaluación del impacto ambiental.

Finalmente, se han adaptado versiones locales de la metodología Corine Land Cover para su uso en otras partes del mundo, como América Latina. En el caso de Colombia, por ejemplo, los conjuntos de datos locales se han desarrollado para clasificar la cobertura terrestre. Estos datos han sido cruciales para monitorear los cambios en la cobertura terrestre y planificar la gestión ambiental a nivel regional y nacional.

## **6. Metodología**

La metodología utilizada en esta investigación contempla un enfoque metodológico mixto que integra herramientas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y la metodología estandarizada Corine Land Cover (CLC). El componente cuantitativo se enfoca en procesar imágenes satelitales y emplear técnicas SIG para identificar y medir los cambios espaciales y temporales, mientras que el componente cualitativo busca interpretar los factores históricos, sociales y ambientales que explican estas transformaciones. Este enfoque no experimental y longitudinal permite observar los fenómenos tal como han ocurrido a lo largo del tiempo, ofreciendo una perspectiva integral del territorio en estudio.

### **6.1 Enfoque metodológico**

La presente investigación adopta un enfoque metodológico mixto, integrando elementos cuantitativos y cualitativos para garantizar un análisis completo de los cambios en el uso del suelo y la cobertura terrestre en el yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto. En este sentido, el enfoque cuantitativo es fundamental para identificar y medir transformaciones en áreas específicas durante un intervalo de tiempo definido. Para ello, se utilizarán imágenes satelitales tipo Landsat 5 y 8 las cuales han demostrado ser herramientas confiables en estudios de teledetección (Chaves et al., 2020). El procesamiento de las imágenes a través del uso SIG asegura la objetividad y consistencia en la recolección y análisis de datos geoespaciales. Además, el cálculo estadístico será empleado para determinar porcentajes de aumento o disminución en distintas categorías de cobertura terrestre. Se realiza el procesamiento de imágenes con mediciones repetidas en diferentes momentos temporales para asegurar los resultados. Las herramientas automatizadas y basadas en algoritmos como son los SIG garantizan la objetividad del trabajo, requisito en la recolección de datos cuantitativos.

Por otro lado, el enfoque cuantitativo también incluye la aplicación de la metodología Corine Land Cover (CLC), reconocida a nivel internacional y adaptada al contexto colombiano (Rojas & García, 2016). Teniendo en cuenta que esta metodología CLC es un estándar ampliamente reconocido para la clasificación del suelo, asegura que los datos recolectados y analizados sean pertinentes y adecuados para los objetivos de la investigación. Este enfoque permitirá obtener una

visión clara de las áreas con mayor incidencia de cambios, alineando las categorías de análisis con la realidad actual del territorio.

Finalmente, el enfoque cualitativo busca interpretar los factores históricos, sociales y ambientales que han influido en las transformaciones detectadas (Aderogba, 2012). En consecuencia, esta interpretación será clave para desarrollar un Plan de Manejo Geológico en colaboración con el Servicio Geológico Colombiano, con miras a la declaratoria de la Zona de Protección Geológica y Paleontológica del yacimiento de Ricaurte Alto. De esta manera, el enfoque metodológico mixto no solo garantiza la precisión técnica, sino también la integración de aspectos contextuales que enriquecen la gestión y conservación del territorio.

## **6.2 Tipo de estudio**

El presente trabajo se enmarca dentro de un enfoque descriptivo, cuyo propósito principal es documentar los cambios espaciales y temporales en la cobertura del suelo dentro del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá. Además, la naturaleza descriptiva del análisis facilita la interpretación de los procesos que han moldeado el territorio, ofreciendo información clave para la toma de decisiones relacionadas con la conservación paleontológica y el manejo ambiental de una región de alto valor científico y patrimonial (IPCC, 2014).

Los estudios descriptivos son fundamentales como base para desarrollar investigaciones correlacionales. En este caso, además de describir los cambios en el uso del suelo y las coberturas, el análisis buscará identificar posibles relaciones entre las transformaciones detectadas y factores que podrían influir en ellas, como la urbanización, la expansión agrícola o las políticas de conservación implementadas en la región. Esta aproximación no solo contribuirá a la protección efectiva del yacimiento, sino que también permitirá incorporar los hallazgos en los instrumentos de ordenamiento territorial de los municipios involucrados (Rojas & García, 2016).

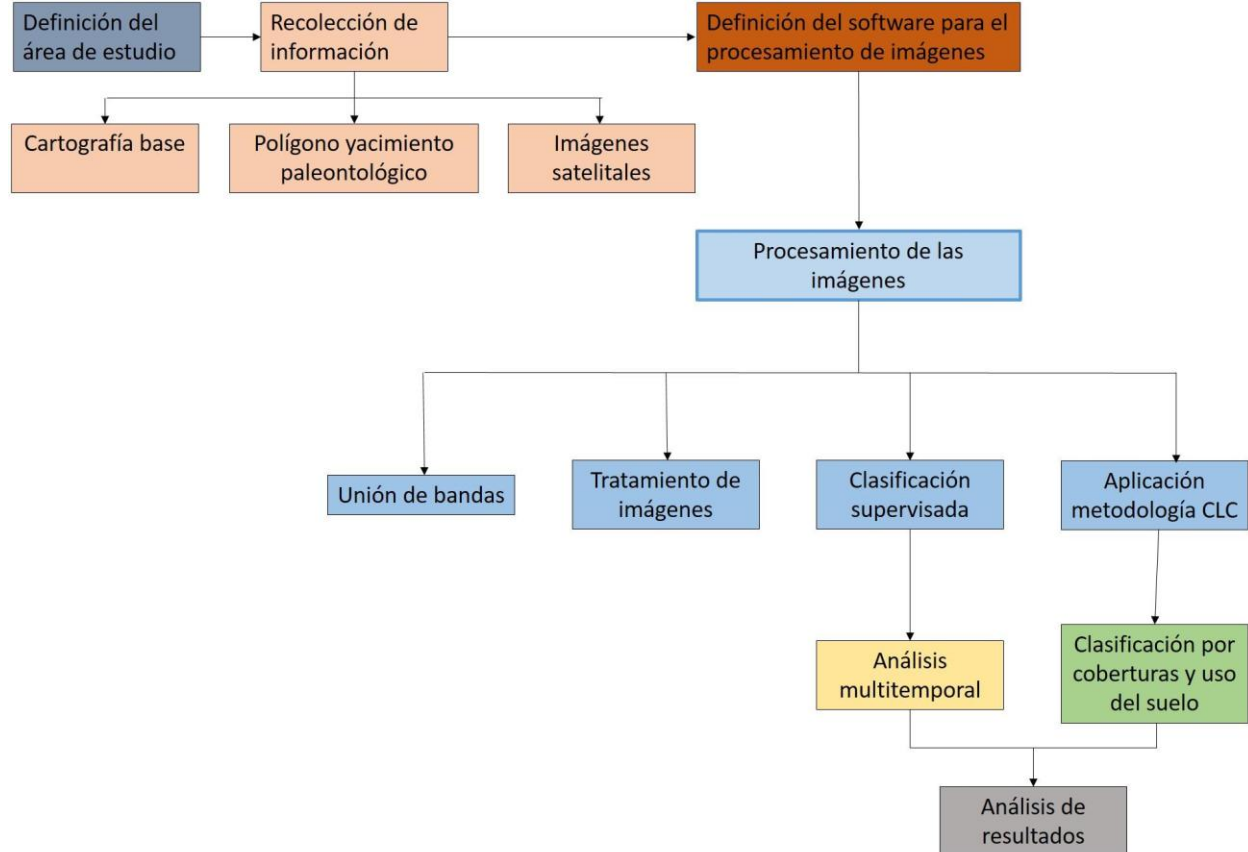
Si bien los estudios multitemporales son ampliamente aplicados en la actualidad (Chaves et al., 2020), en el caso particular del Ricaurte Alto, la investigación en esta temática sigue siendo limitada. Por esta razón, además del enfoque descriptivo, el estudio incluye elementos exploratorios que permiten abordar vacíos de conocimiento y sentar las bases para futuras investigaciones en el área. Esta combinación de enfoques asegura que la investigación no solo describe las transformaciones del territorio, sino que también aporta nuevas perspectivas para su conservación y gestión sostenible.

## 6.3 Procedimiento

### 6.3.1 Fase de recolección de información

En esta fase se revisó, recopiló y analizó la información bibliográfica de las fuentes secundarias, principalmente del Servicio Geológico Colombiano, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y las alcaldías de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva; además, de la Leyenda Nacional De Coberturas De La Tierra Metodología Corine Land Cover (CLC). Con la información de la base cartográfica, y geológica, también se recopiló la información concerniente a las imágenes satelitales asociadas al área y que serán posteriormente procesadas. Adicionalmente, se realiza revisión de información relacionada con los cambios de cobertura como insumos para la aplicación del tema central de este trabajo en el área de estudio. Todo el flujo de trabajo realizado durante el desarrollo del presente trabajo se muestra en la (Figura 2).

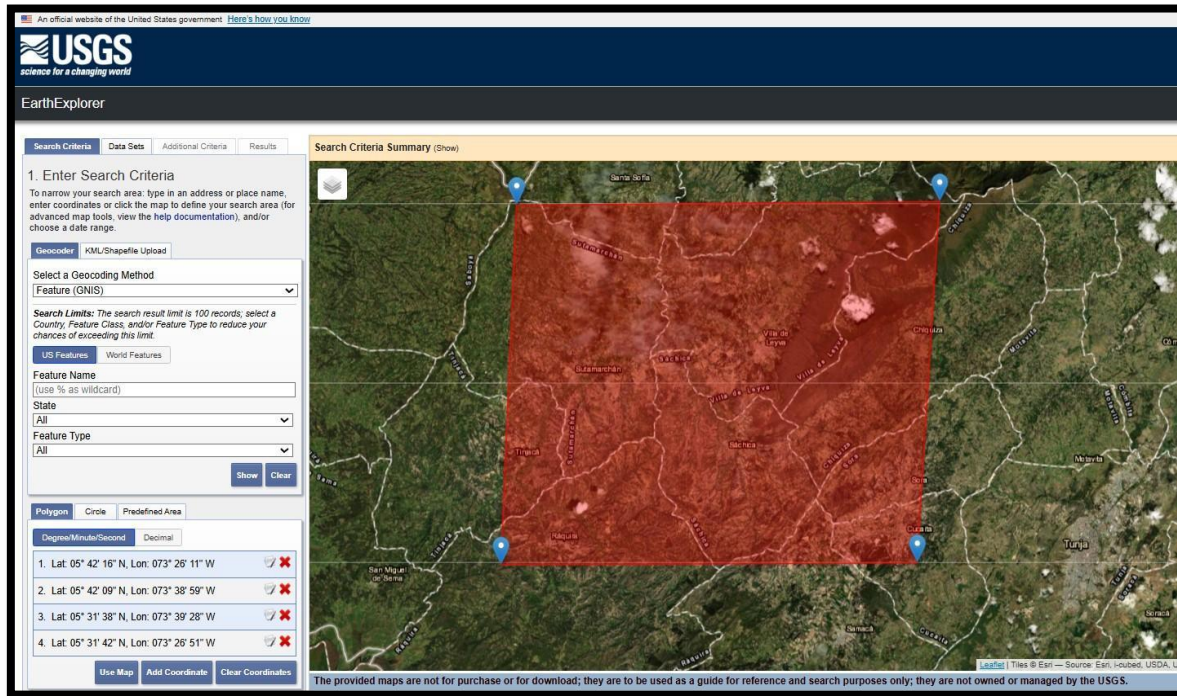
- **Instrumentos y técnicas de recolección.** En primera instancia se realizó la revisión de las imágenes satelitales que se ajustaban para alcanzar los objetivos del presente trabajo, lo que implica que dichas imágenes existan para el área de estudio, así como que se encuentren imágenes para el intervalo de tiempo definido, además, de contener buena resolución, baja nubosidad, entre otros factores. Las imágenes tipo Landsat fueron seleccionadas por cumplir con los parámetros previamente mencionados. Adicionalmente se procede a la consecución de información relacionada con bases de datos geoespaciales, cartografía histórica, modelos digitales de elevación de 12.5 metros y mapas de pendientes.

**Figura 2***Flujo metodológico para el uso de datos geoespaciales*

- **Adquisición de imágenes satelitales.** Se definió el área de estudio tomando como referencia el polígono propuesto por el Servicio Geológico Colombiano, donde se proyecta establecer una Zona de Protección Patrimonial Geológica y Paleontológica. Esta zona corresponde al yacimiento de reptiles marinos del Cretácico Inferior, ubicado en el sector del Ricaurte alto, en Boyacá. Con base en esta delimitación, se dibujó un polígono rectangular que abarcara completamente el área de interés. Luego, se seleccionó un rango temporal entre 1994 y 2023, y se aplicaron filtros según la misión satelital, priorizando aquellas imágenes con una cobertura nubosa menor al 10% (Figura 3). Finalmente, se descargaron las imágenes en formatos GeoTIFF, SAFE o JP2, junto con sus metadatos. Las imágenes obtenidas cuentan con una resolución espacial de 3 metros.

### Figura 3

Ejemplo de proceso para la búsqueda y descarga de imágenes satelitales para el área de estudio del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá



Nota. Fuente USGS

Para evaluar la cobertura vegetal durante el intervalo de tiempo definido (1994 a 2023) se utilizaron seis imágenes de satélite de la serie Landsat, descargadas del servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes encontradas son de los satélites Landsat 5 y 8 con imágenes desde 1994 hasta el 2007; el satélite Landsat 7 con imágenes desde 2000 hasta 2007; y con los satélites Landsat 8 con imágenes desde 2014 hasta el año 2023 (Tabla 1).

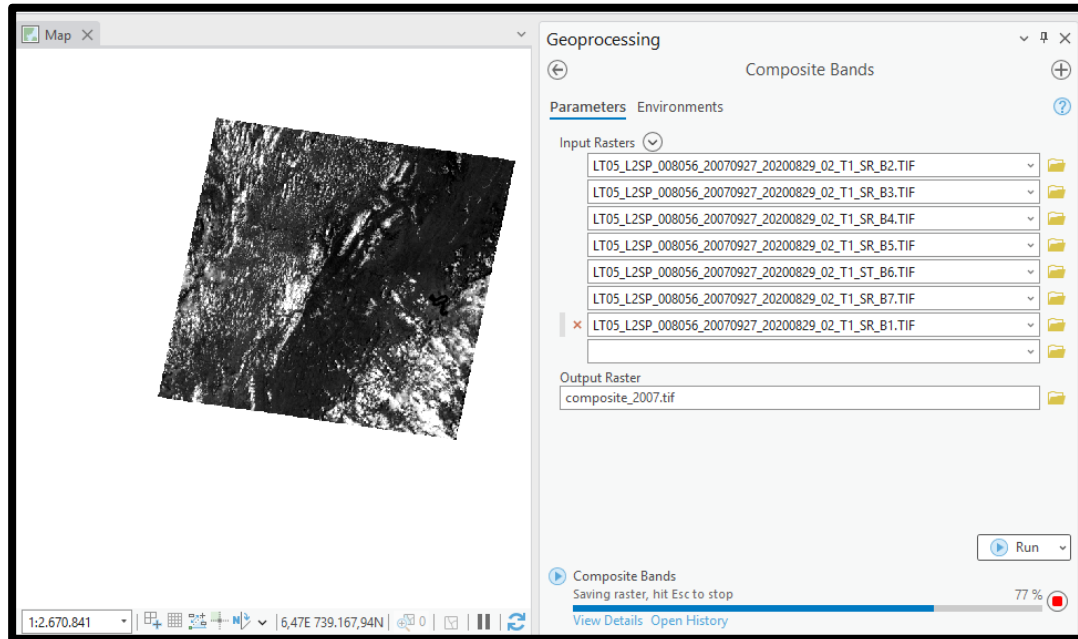
**Tabla 1***Listado de imágenes de satélite utilizadas para el análisis multitemporal*

IMAGEN DE SATÉLITE	IDENTIFICADOR DE LA IMAGEN	FECHA DE CAPTURA
Landsat 5	LT05_L1TP_008056_19940211_20231208_02_T1	1994/02/11
Landsat 5	LE07_L2SP_008056_20000204_20200918_02_T1	2000/02/04
Landsat 5	LT05_L2SP_008056_20070927_20200829_02_T1	2007/09/27
Landsat 8	LC08_L2SP_008056_20140101_20200912_02_T1	2014/01/01
Landsat 8	LC08_L2SP_008056_20180317_20200901_02_T1	2018/03/17
Landsat 8	LC08_L2SP_008056_20231212_20231215_02_T1	2023/12/12

### ***6.3.2 Fase de identificación de cobertura de la tierra***

En una primera etapa, se utilizó el software ENVI para realizar la combinación de bandas con el objetivo de identificar, de manera general, el contraste entre las coberturas vegetales y los suelos descubiertos, así como para observar los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo en zonas extensas. Posteriormente, este proceso se replicó en ArcGIS Pro, empleando la herramienta Composite Bands (Figura 4), donde se integraron todas las bandas disponibles. Se revisaron específicamente las correspondientes a los canales rojo (banda 3), azul (banda 1) y verde (banda 2), con el fin de asegurar una correcta visualización.

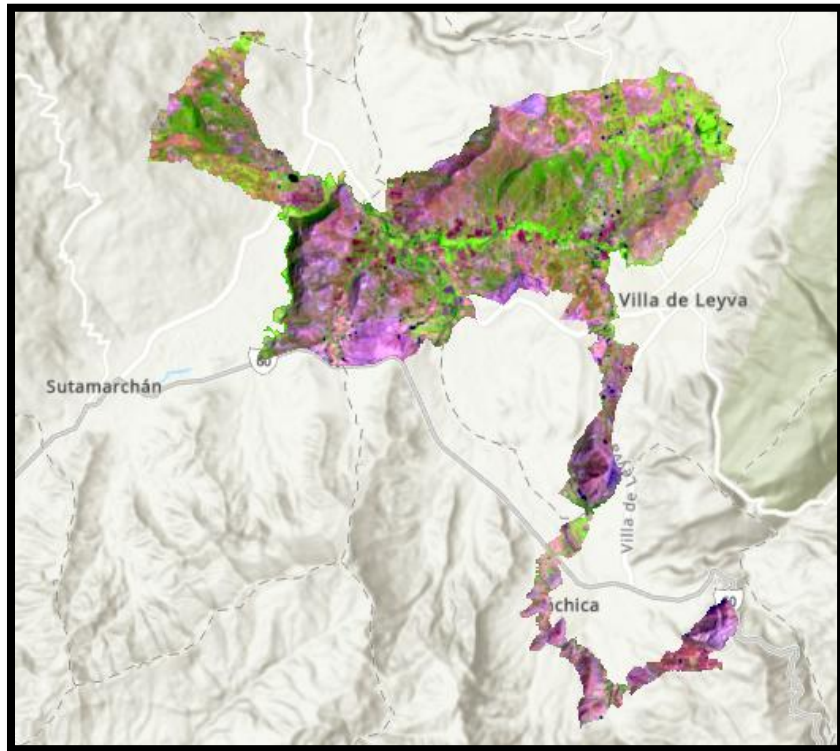
**Figura 4**  
*Composición de bandas ArcGIS Pro*



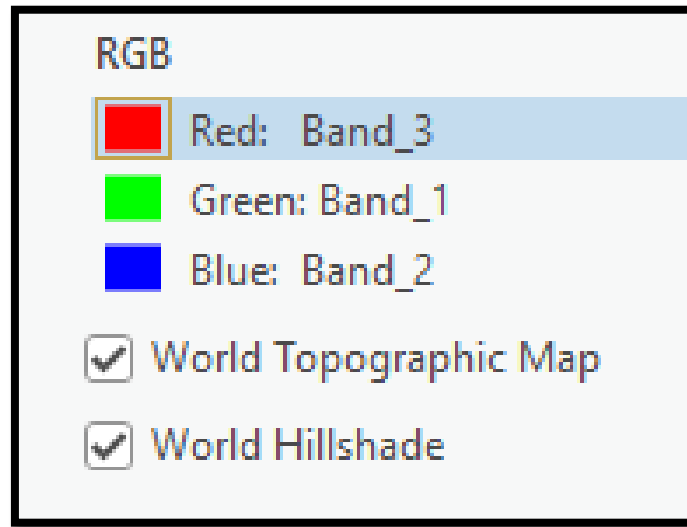
**6.3.2.1 Delimitación del área de estudio.** En ArcGIS Pro, se cargó el polígono del área de estudio del yacimiento paleontológico. Para mejorar la visualización, se utilizó la herramienta simbología, eliminando el color de fondo y resaltando los bordes. Esto permitió una representación más clara del terreno, facilitando su análisis y la identificación de sus características principales (Figura 5). Finalmente, el resultado se exportó en formato TIF para su posterior análisis.

**Figura 5**

*Recorte área de estudio con bandas combinadas ArcGIS Pro*

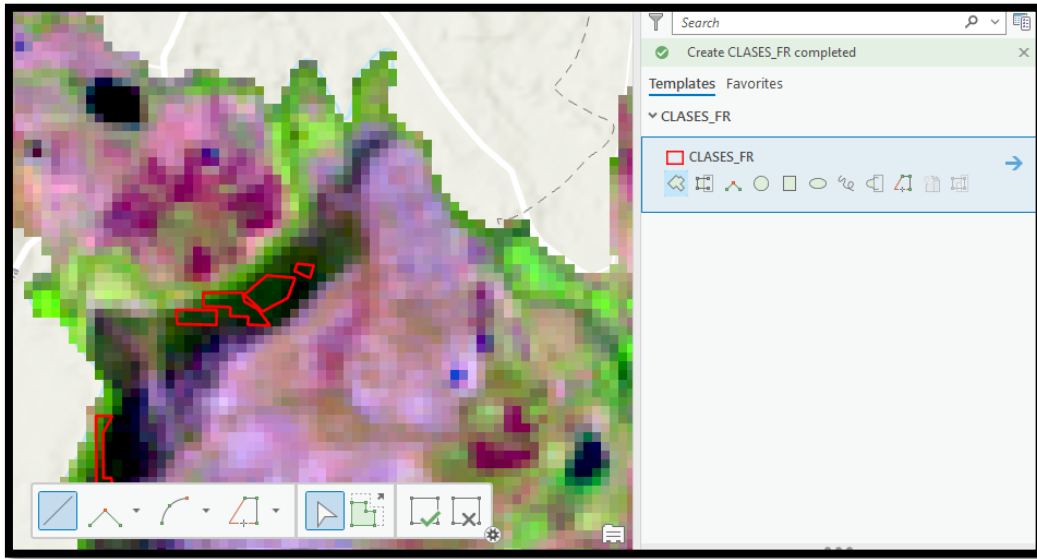


Se utilizó combinación de bandas para las imágenes de los satélites Landsat 5 y Landsat 8. Para Landsat 5 se utilizó la combinación de las bandas B3, B2 y B1, que corresponden a las bandas roja, verde y azul, con el objetivo de obtener colores similares a como los percibe el ojo humano; vegetación saludable se muestra verde, campos recientemente despejados se ven muy claros, vegetación bajo estrés aparece marrón y amarillo, y las zonas urbanas se ven en gris. Además, la combinación B5-B4-B3, la cual ofrece un notorio contraste para estudios de vegetación entre colores, la vegetación saludable aparece en un verde brillante y los suelos en un púrpura pálido (Figura 6).

**Figura 6***Bandas según color ArcGIS Pro*

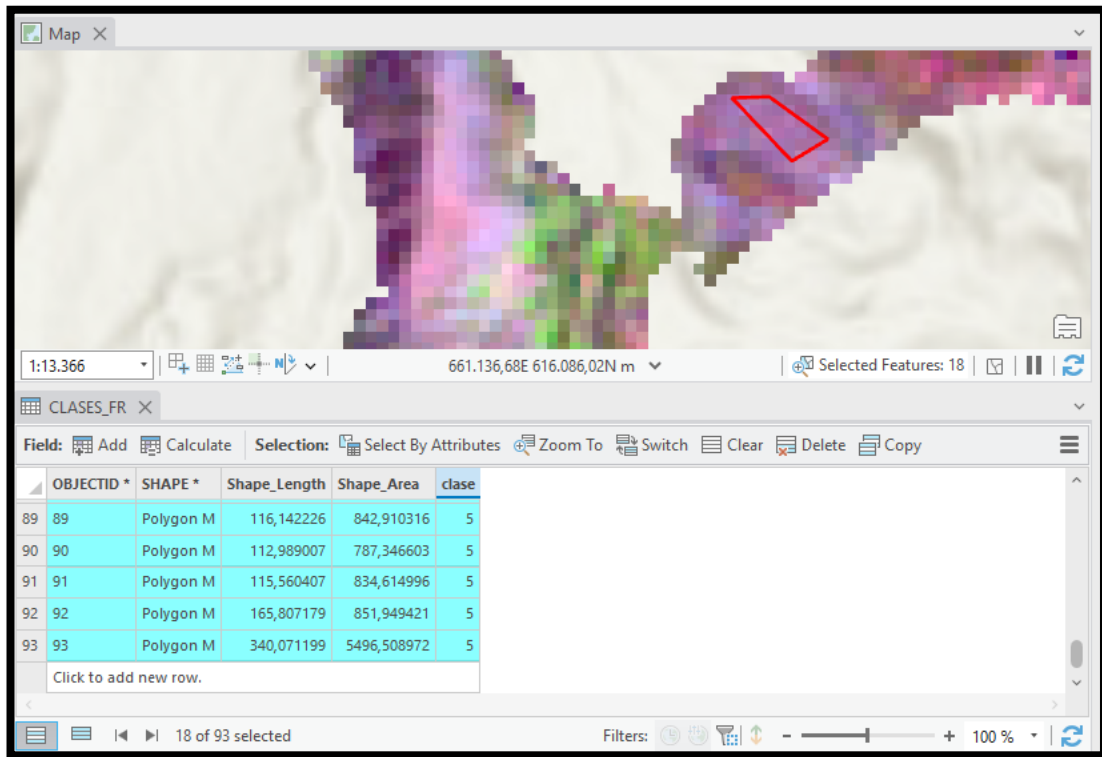
Las combinaciones para las imágenes Landsat 8, las bandas B4, B3 y B2, cuya combinación de bandas corresponde al “color natural”. Esta combinación facilita el estudio de la vegetación, aumentando su protagonismo en relación con las zonas urbanizadas y los suelos expuestos. Finalmente, se usó la combinación B6-B5-B4, que usa con el mismo objetivo de la combinación B5-B4-B3 del Landsat 5, para diferenciación de la vegetación.

**6.3.2.2 procesamiento digital de imágenes de satélite.** El procesamiento de las imágenes se realizó en el software ENVI 5.3 y ArcGIS Pro en el cual se cargaron inicialmente los archivos tipo TIFF de cada una de las bandas correspondientes a las seis imágenes seleccionadas para el intervalo de tiempo entre 1994 y 2023. Para dar inicio al procesamiento, se cargó en ArcGIS Pro el archivo TIFF previamente generado, que contenía la combinación de todas las bandas espectrales. Seguidamente, se creó una geodatabase con el propósito de construir una clase de entidad (feature class), en la cual se definieron tanto el nombre como el tipo de geometría, estableciéndola como poligonal (Figura 7).

**Figura 7***Proceso de captura de muestras*

A continuación, se realizó la digitalización manual de los polígonos que representaban las distintas clases de cobertura del terreno. Para cada clase se delimitaron entre 30 y 50 muestras, generando un polígono independiente por cada una (Figura 8). Al finalizar este proceso, se asignó un identificador numérico a cada clase dentro de la tabla de atributos del archivo.

**Figura 8**  
*Tabla de atributos*

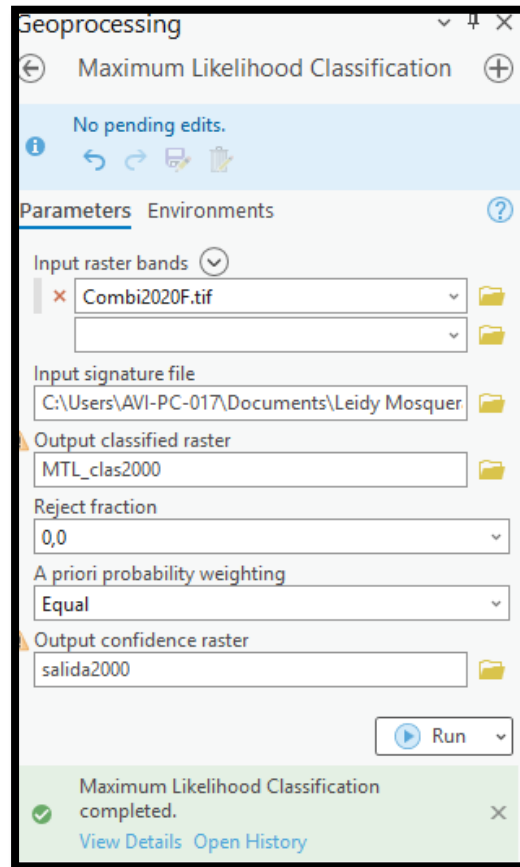


OBJECTID *	SHAPE *	Shape_Length	Shape_Area	clase
89	Polygon M	116,142226	842,910316	5
90	Polygon M	112,989007	787,346603	5
91	Polygon M	115,560407	834,614996	5
92	Polygon M	165,807179	851,949421	5
93	Polygon M	340,071199	5496,508972	5

Con las muestras ya capturadas, se procedió a la generación de las firmas espectrales mediante la herramienta *Crear Firma*. Para ello, se utilizó como entrada el archivo TIFF con las bandas combinadas, junto con la clase de entidad creada. El resultado fue un archivo de firma espectral necesario para llevar a cabo la clasificación supervisada.

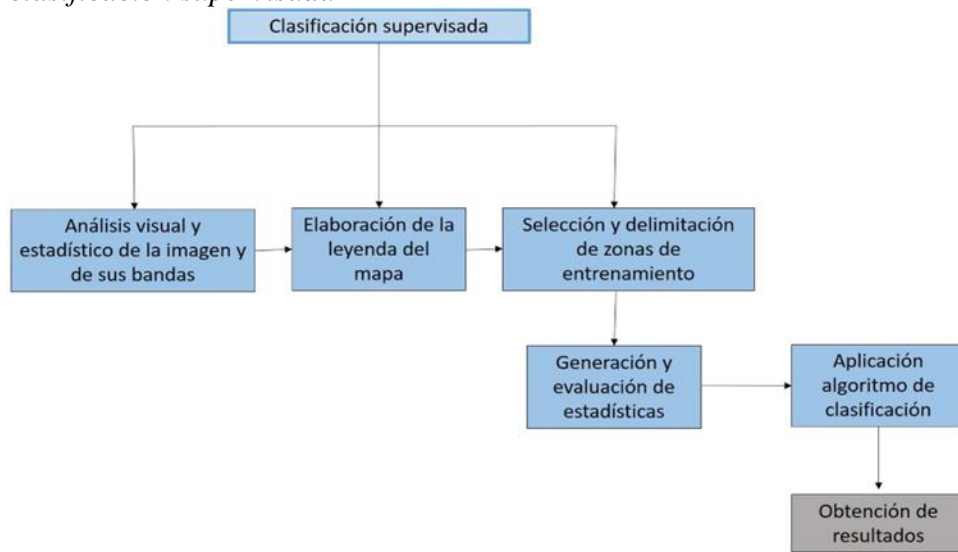
Una vez generadas las firmas, se ejecutó el proceso de clasificación supervisada. En esta etapa, se seleccionó nuevamente el archivo TIFF y se incorporó el archivo de firma espectral obtenido previamente. Se definió un nombre de salida para la nueva capa clasificada (en formato. aux), dejando la fracción de rechazo en 0. Finalmente, se nombró la capa resultante según el año correspondiente, por ejemplo: “MTL\_clas2000” (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

**Figura 9**  
*Herramienta *máximum Likelihood Classification**



#### 6.4 clasificación supervisada

Se procesaron imágenes satelitales en ArcGIS Pro para analizar el uso y cobertura del suelo mediante clasificación supervisada. Se seleccionaron entre 30 y 50 muestras por clase, representando áreas homogéneas de diferentes coberturas. Estas muestras sirvieron para generar las firmas espectrales necesarias. Luego, se aplicó la herramienta Maximum Likelihood Classification (Figura 10), que asigna cada píxel a la clase más probable según sus características espectrales. El archivo de entrada fue una imagen compuesta en formato TIFF con todas las bandas. El resultado fue una capa clasificada con la distribución de coberturas. Este proceso permitió identificar cambios en el territorio con precisión.

**Figura 10***Proceso de clasificación supervisada*

*Nota.* Fuente modificado de Posada, (2008)

Las características espectrales del área de estudio fueron utilizadas para entrenar un algoritmo de clasificación supervisada. En primer lugar, este proceso consistió en analizar los valores estadísticos de cada banda espectral dentro de las zonas previamente definidas como muestras. A partir de esta información, el algoritmo evaluó cada píxel de la imagen y lo clasificó según su similitud con los patrones aprendidos. La delimitación de las coberturas se basó en atributos como el tono y la uniformidad, especialmente dentro del área correspondiente al yacimiento paleontológico.

Por otro lado, se tomaron entre 30 y 50 muestras por clase, incluyendo categorías como espacios naturales, vegetación saludable, pastos, suelos desnudos o degradados, cultivos transitorios, cuerpos de agua artificiales e invernaderos. Sin embargo, no fue posible mantener el mismo número ni tipo de clases en todos los años analizados. Al finalizar la clasificación, el algoritmo generó una tabla con los resultados (Figura 11), asignando colores automáticamente a cada clase y mostrando las distancias espectrales entre ellas, como se aprecia en la figura siguiente.

**Figura 11**  
*Distancias espectrales*



Es importante mencionar, que como apoyo en el proceso de la calcificación supervisada fue de suma importancia el conocimiento previo del área de estudio y de los tipos de coberturas, además, del trabajo de campo realizado al área de estudio, análisis de fotografías aéreas, mapas e informes técnicos y las referencias de los profesionales del SGC que han hecho múltiples investigaciones en la zona del yacimiento paleontológico.

#### ***6.4.1 fase de clasificación de usos del suelo***

Para alcanzar el objetivo de identificar las coberturas de uso del suelo en el área del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, entre 1994 y 2023, se empleará la metodología Corine Land Cover (CLC), adaptada específicamente para Colombia. En primer lugar, esta metodología se organiza en seis niveles jerárquicos, con un primer nivel que clasifica 5 grandes tipos de cobertura, un segundo nivel con 15 clases, un tercero con 53, seguido de un cuarto con 19,

un quinto con 10 y un sexto con 7. Este esquema permitió un análisis detallado y ajustado al contexto local.

Además, a partir de la información de cartografía básica e instrumentos de ordenamiento territorial se tiene que en el área de interés se encuentra en las cuencas de los ríos Sutamarchán y Sáchica. Todas las coberturas de suelo para estas cuencas y que cubren el polígono de interés se clasificaron con base en la metodología CLC a una escala de 1:100.000, adaptando la clasificación según las características regionales y las necesidades del estudio.

Para identificar las coberturas de uso del suelo en el yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, se aplicó la metodología Corine Land Cover (CLC) (Figura 12) con el objetivo de clasificar el uso del suelo en categorías como zonas urbanas, agrícolas, bosques y cuerpos de agua, permitiendo identificar áreas con transformaciones significativas.

**Figura 12**

Imagen con Unidades de coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000

<b>1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS</b>	<b>3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES</b>
<b>1.1. Zonas urbanizadas</b>	<b>3.1. Bosques</b>
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
<b>1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación</b>	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
<b>1.3. Zonas de extracción minera y escombreras</b>	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
<b>1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas</b>	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativa	<b>3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva</b>
<b>2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS</b>	3.2.1.1. Herbazal denso
<b>2.1. Cultivos transitorios</b>	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.3. Arracachal
<b>2.2. Cultivos permanentes</b>	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.2. Caña	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.4. Tabaco	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.5. Papaya	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.6. Amapola	<b>3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación</b>
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.2. Café	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.4. Viñedos	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.5. Coca	<b>4. AREAS HÚMEDAS</b>
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	<b>4.1. Áreas húmedas continentales</b>
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas Pantanosas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.2. Turberas
2.2.3.3. Cítricos	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.4. Mango	<b>4.2. Áreas húmedas costeras</b>
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.2. Salitral
<b>2.3. Pastos</b>	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar
2.3.1. Pastos limpios	<b>5. SUPERFICIES DE AGUA</b>
2.3.2. Pastos arbolados	<b>5.1. Aguas continentales</b>
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.1. Ríos (50 m)
<b>2.4. Áreas agrícolas heterogéneas</b>	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.3. Canales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	<b>5.2. Aguas marítimas</b>
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Nota. Fuente Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia

#### 6.4.2 Fase de cálculo de áreas de mayor degradación

A partir del procesamiento y la clasificación de las imágenes según la metodología CLC, se realizó un análisis estadístico en ArcGIS Pro con el propósito de identificar los cambios en la

cobertura del suelo a lo largo de los últimos 30 años. Este análisis permitió reconocer zonas que originalmente estaban cubiertas por bosques y áreas seminaturales, pero que con el tiempo han sido reemplazadas por superficies con cultivos o espacios artificiales como invernaderos. A partir de estos resultados, se generó una zonificación que destaca las áreas más afectadas por la transformación del paisaje, lo cual permite orientar estrategias de conservación hacia los sectores con mayor nivel de alteración ambiental.

**6.4.2.1 Instrumentos y técnica de recolección.** Se utilizaron las imágenes de los años 1994, 2000, 2007, 2014 y 2023 procesadas y con la clasificación CLC. Sobre la imagen se generaron los polígonos dentro del área de estudio para generar los cálculos porcentuales para cada cobertura de tierra establecida.

**Observación de campo (opcional):** Se cuenta por parte de los autores con información in situ de las condiciones actuales de las zonas más críticas desde una perspectiva de conservación.

**6.4.2.2 determinación de las estadísticas de zonas de degradación.** Para identificar las áreas degradadas dentro del área de estudio, se aplicó una metodología integrada en ArcGIS Pro, dividida en los siguientes pasos:

**6.4.2.2.1 zonificación del territorio.** Se elaboró una zonificación basada en tres tipos de criterios:

- **Criterios de conservación:** para identificar zonas con alto valor ecológico.
- **Criterios de relevancia científica:** considerando la presencia de hallazgos paleontológicos y geológicos.
- **Criterios geoespaciales:** como altitud, pendiente y cercanía a elementos naturales o artificiales.

**6.4.2.2.2 superposición de capas temáticas.** Se integraron distintas capas de información, incluyendo:

- Clasificación de coberturas del suelo obtenida mediante teledetección.
- Áreas degradadas.
- Información geológica y paleontológica del yacimiento.

Esta superposición permitió observar cómo ha cambiado el uso del suelo en zonas específicas.

**6.4.2.2.3 Modelo de valoración del impacto ambiental.** Finalmente, se aplicó un modelo que permitió relacionar la transformación del paisaje con las presiones humanas. Este análisis ayudó a clasificar las zonas según su nivel de degradación y priorizar aquellas que requieren acciones de conservación a corto, mediano y largo plazo.

## 7. Resultados

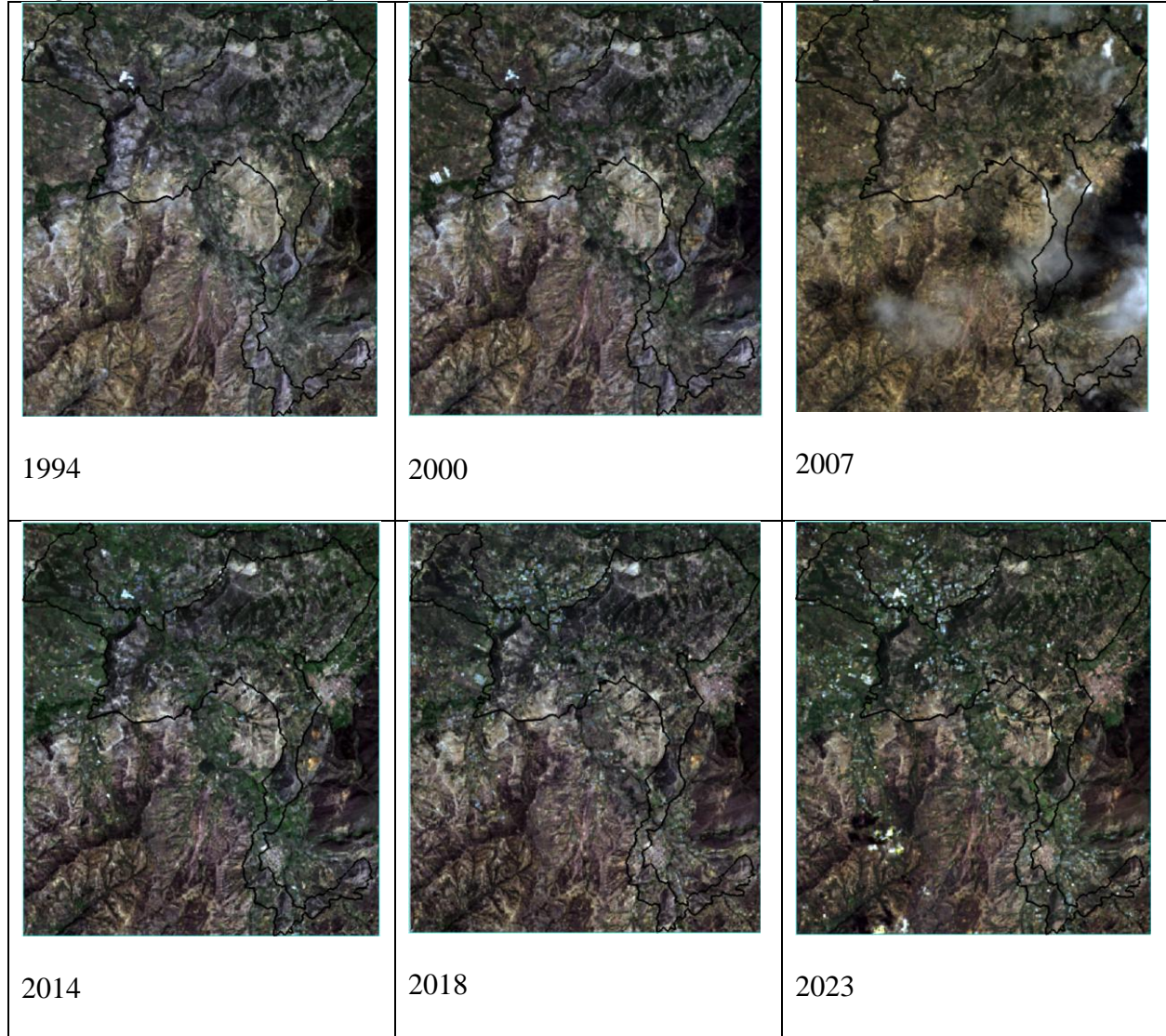
En este capítulo se presentan los resultados multitemporales para el polígono del yacimiento paleontológico del Ricaurte alto, Boyacá, así como los análisis de la información por medio de tablas, gráficos y mapas, donde se pudieron estimar los cambios en área (pérdidas o ganancia) ocurridos en los diferentes tipos de coberturas, para el intervalo de tiempo 1994 a 2023.

En el marco del primer objetivo específico de esta investigación, se llevó a cabo una exhaustiva recopilación y análisis de información primaria y secundaria relacionada con el área de estudio, ubicada en el yacimiento paleontológico de Ricaurte Alto, Boyacá. Para ello, se realizó una revisión detallada de la información cartográfica y geológica suministrada por entidades como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Servicio Geológico Colombiano, la cual fue proporcionada en archivos tipo shapefile. Estos archivos sirvieron como base tanto para la delimitación precisa del área de estudio como para la ejecución del análisis multitemporal de las coberturas de tierra. Se procedió a la compilación de los datos disponibles, priorizando aquellos que resultaron ser de mayor utilidad para los objetivos de la investigación, lo que permitió estructurar la información de manera eficiente para los análisis subsiguientes.

En cuanto a las composiciones a color natural, se puede observar que es posible distinguir diferentes coberturas: al norte predominan tonalidades verdes oscuro que indican vegetación densa y saludable; hacia el centro y norte, se aprecian colores lila y rosado claro que reflejan zonas degradadas; mientras que, en el sur, se observan tonalidades café y pardas, propias de pastizales y coberturas naturales de un tono verde fosforescente, en un tono vino tiento los cultivos transitorios y azul oscuro los cuerpos de agua artificiales. Cabe destacar la aparición de pequeñas zonas celestes, especialmente visibles en las imágenes de 2018 y 2023 (Figura 13), que se incrementan significativamente en tamaño hacia la parte central y norte del área. Estas tonalidades hacen referencia a cultivos bajo invernadero, principalmente de tomate.

**Figura 13**

*Imágenes en color natural para el intervalo de 1994 a 2023 con realce optimized linear*



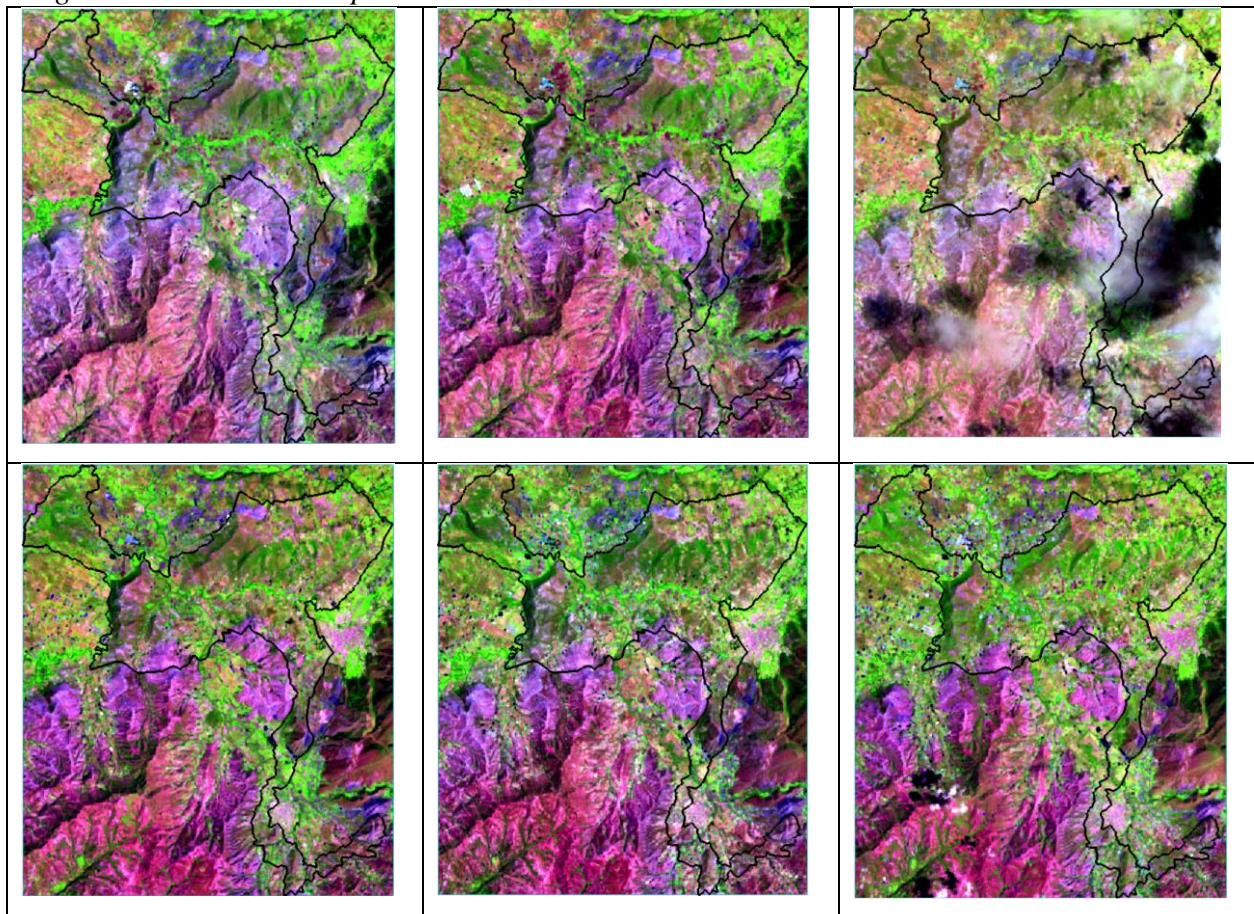
Para mejorar la interpretación de los distintos usos del suelo y el estado de la vegetación, se aplicaron combinaciones de bandas específicas. En las imágenes Landsat 5 se utilizó la combinación RGB (5,4,3), mientras que en Landsat 8 se empleó la combinación (6,5,4), lo que permitió una mejor diferenciación entre áreas con vegetación sana y aquellas con signos de degradación. En estas composiciones, la vegetación en buen estado se presenta en verde brillante, mientras que las zonas degradadas se identifican por sus tonos púrpura pálido. Asimismo, la combinación RGB (5,6,4) en la imagen Landsat 8 del año 2020 resultó útil para resaltar los distintos

usos del suelo, mostrando variaciones de colores cafés, naranjas y amarillos, mientras que los cuerpos de agua se distinguen por su característico tono azul oscuro (Figura 14).

Como parte del análisis inicial, se identificaron visualmente las principales coberturas del área, tales como vegetación arbustiva, cultivos bajo invernadero, suelos descubiertos, cultivos de papa y cebolla, además de aljibes para almacenamiento de agua. Estas actividades representan las principales transformaciones en el paisaje y generan alteraciones visibles en la zona del yacimiento paleontológico.

### Figura 14

*Imágenes en color natural para el intervalo de 1994 a 2023 con realce linear 2*

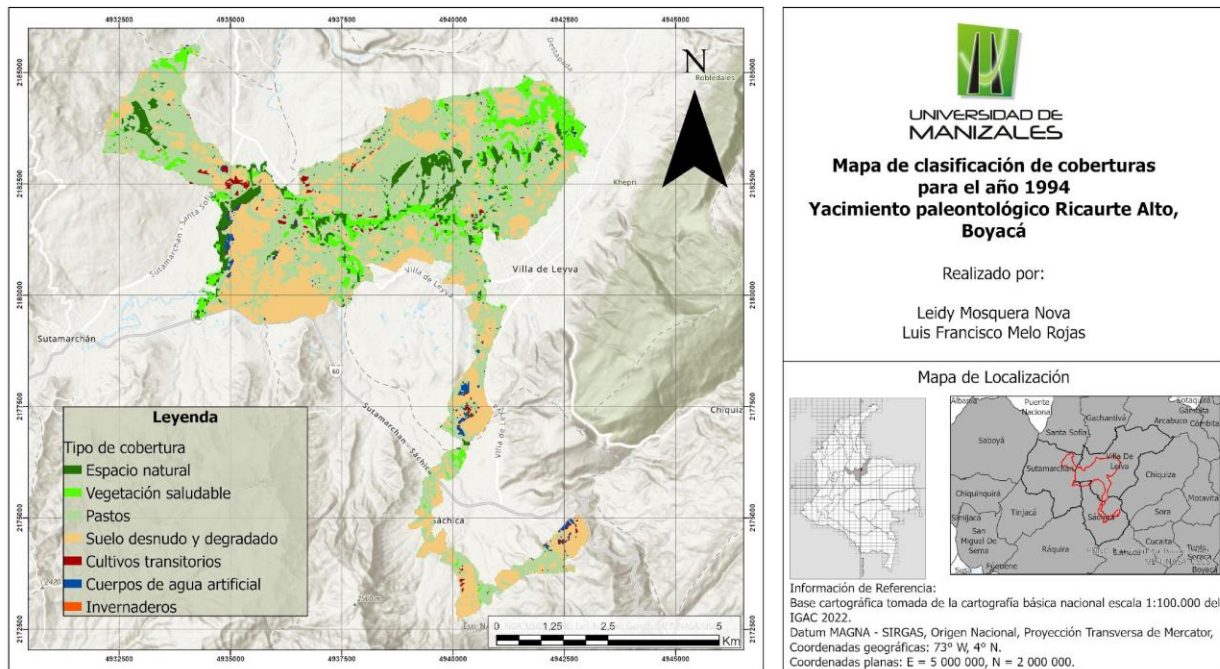


A continuación, se muestra la caracterización detallada de las coberturas del suelo en las seis temporalidades dentro del polígono del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, se llevó a cabo mediante clasificación supervisada, tomando como base la metodología del Corine Land Cover (CLC). Este enfoque permitió identificar hasta el nivel 3 de cobertura, utilizando

imágenes satelitales corregidas y firmas espectrales específicas. El proceso arrojó mapas temáticos que evidencian la transformación del uso del suelo entre 1994 y 2023, facilitando el análisis de patrones de cambio y su impacto sobre el patrimonio paleontológico y el entorno natural.

En este contexto, El análisis de las coberturas correspondientes al año 1994 revela una clara predominancia de los pastos y el suelo desnudo y degradado, los cuales cubren gran parte del área estudiada. En menor proporción, se observan espacios naturales, aunque en comparación con los pastos, su presencia es significativamente reducida (Figura 15). Además, comienzan a visibilizarse, aunque en un porcentaje muy bajo, algunas zonas dedicadas a cultivos transitorios. Esta distribución sugiere que, en ese periodo, el uso del suelo estaba orientado principalmente a actividades ganaderas y a la degradación del terreno, con una incipiente incursión de prácticas agrícolas transitorias en el paisaje.

**Figura 15**  
*Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 1994*



Al analizar la clasificación de coberturas correspondiente al año 1994 (ver Tabla 2 y Figura 16), se identifica que la categoría dominante fue la de suelos pastos, con una extensión aproximada de 1885,101 ha, lo que representa el 50,99% del área estudiada. Le siguen los Suelos desnudos y degradados, que ocupan 1127,273 ha, equivalentes al 30,49%. En tercer lugar, se encuentran la

vegetación saludable, con 360,021 ha (9,74%), y luego los espacios naturales, que abarcan 247,594 ha, es decir, el 6,70% del total. En menor proporción aparecen los cultivos transitorios, con una superficie de 41,702 ha (1,13%), y los cuerpos de agua artificial, que suman 35,055 ha, representando el 0,95%.

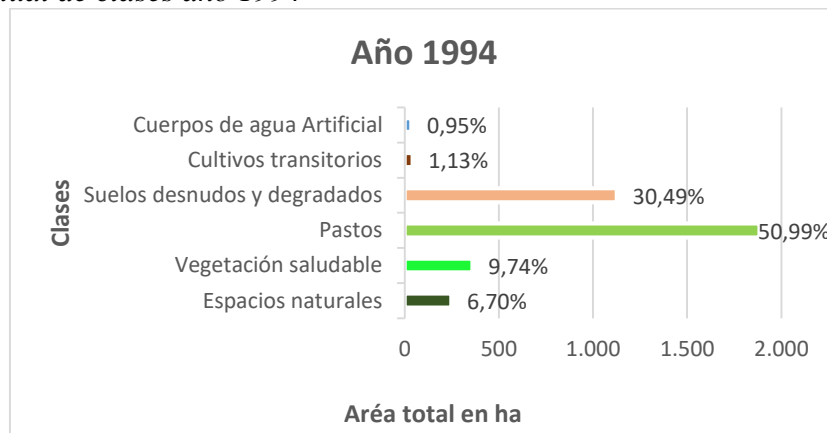
**Tabla 2**

*Coberturas de la tierra 994, discriminado en Área y porcentaje*

Año 1994		
Clase	Área Total (ha)	% Área Total
Pastos	1885,101	50,99%
Suelos desnudos y degradados	1127,273	30,49%
Vegetación saludable	360,021	9,74%
Espacios naturales	247,594	6,70%
Cultivos transitorios	41,702	1,13%

**Figura 16**

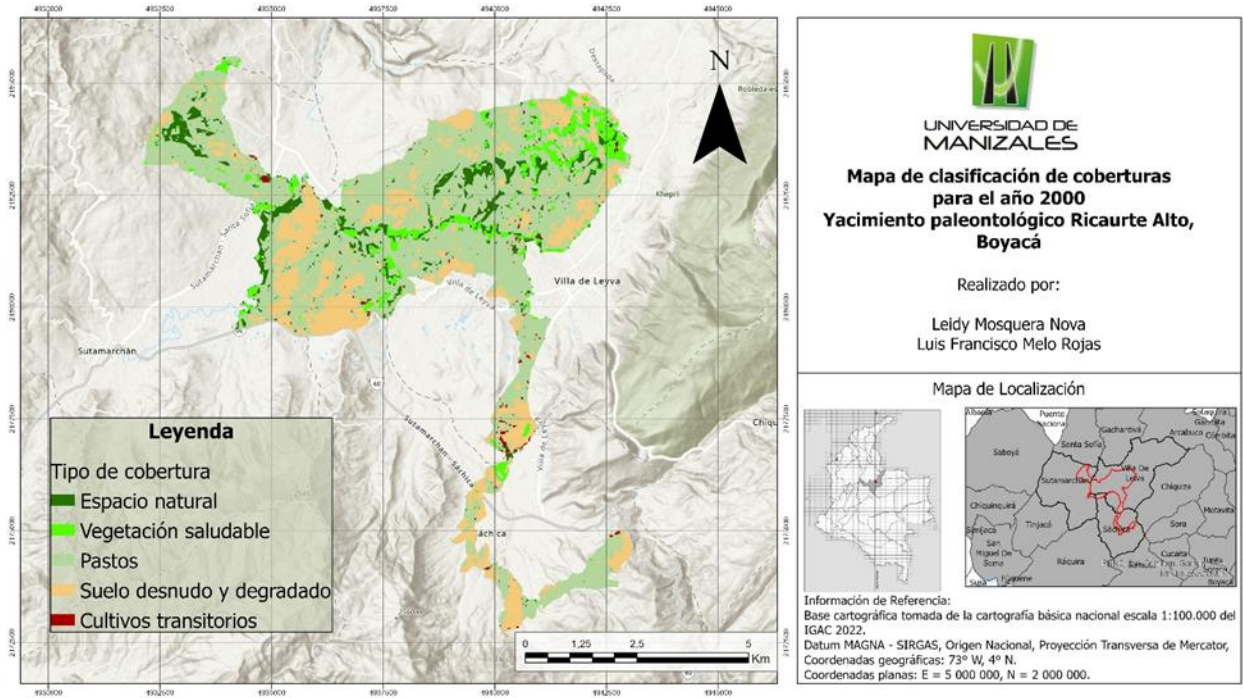
*Análisis Porcentual de clases año 1994*



El análisis de las coberturas correspondientes al año 2000 revela una clara predominancia de los pastos (Figura 17), los cuales cubren gran parte del área estudiada, continua los suelos desnudos y degradados en aquellas áreas de principal importancia paleontológica. En menor proporción, se observan la vegetación saludable que se asocia a los bordes de los ríos principales que atraviesan el área y sectores al norte de Villa de Leyva asociados a drenajes que provienen del

cerro Iguaque; en similar proporción se encuentran los espacios naturales asociados a los sectores aún inalterados con bosques o vegetación arbustiva. Finalmente se encuentran en un mínimo porcentaje los cultivos transitorios. Esta distribución sugiere que, en ese periodo, el uso del suelo estaba orientado principalmente a actividades ganaderas y a la degradación del terreno, con una incipiente incursión de prácticas agrícolas transitorias en el paisaje.

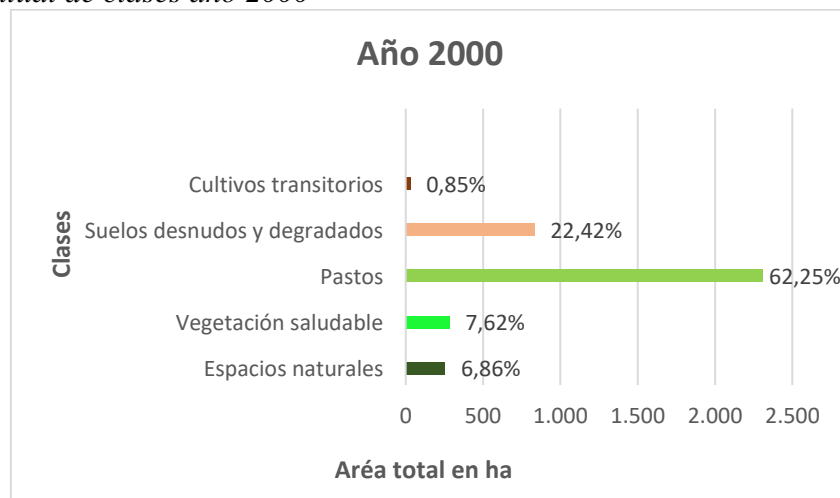
**Figura 17**  
*Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2000*



Al analizar la clasificación de coberturas correspondiente al año 2000 (ver Tabla 3 y Figura 18), se identifica que la categoría dominante fue pastos, con una extensión aproximada de 2311,616 ha, lo que representa el 65,25% del área estudiada. Le siguiente fue suelos desnudos y degradados, que ocupan 832,368 ha, equivalentes al 22,42%. En tercer lugar, se encuentran la vegetación saludable, con 282,809 ha (7,62%), y luego Vegetación espacios naturales, que abarcan 254,867 ha, es decir, el 6,86% del total y en menor proporción aparecen los Cultivos transitorios, con una superficie de 31,516 ha (0,85%).

**Tabla 3***Coberturas de la tierra 2000, discriminado en Área y porcentaje*

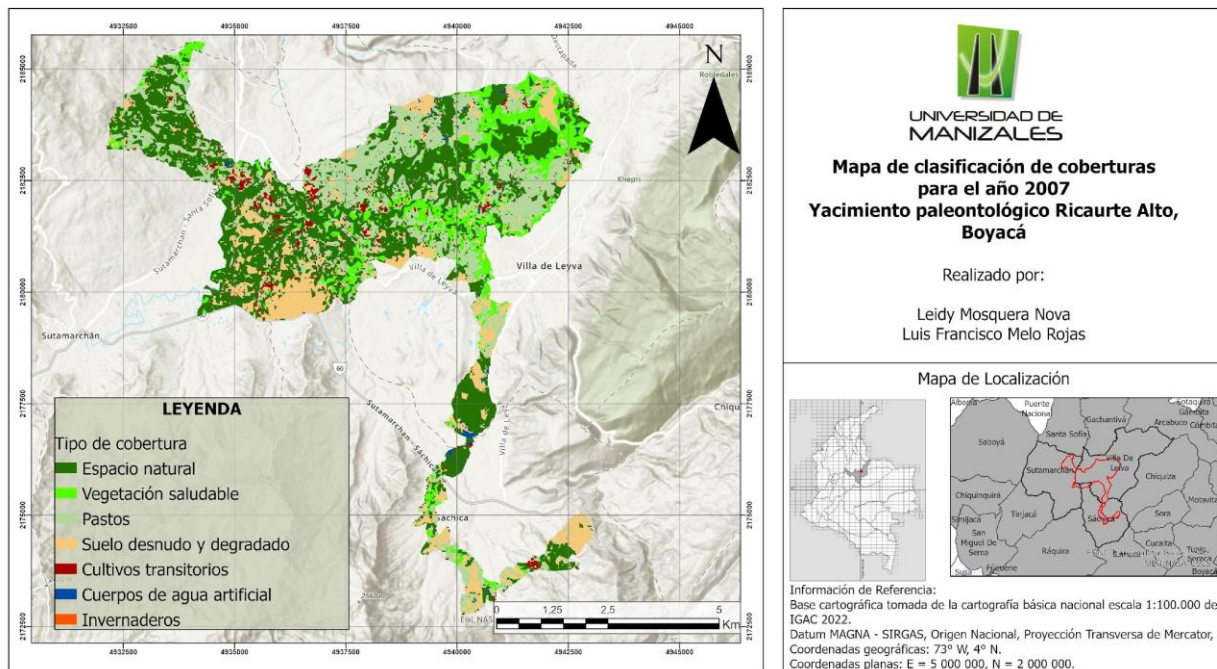
Año 2000		
Clase	Área Total (ha)	% Área Total
Pastos	2311,616	62,25%
Suelos desnudos y degradados	832,368	22,42%
Vegetación saludable	282,809	7,62%
Espacios naturales	254,867	6,86%
Cultivos transitorios	31,516	0,85%

**Figura 18***Análisis Porcentual de clases año 2000*

Entre 1994 y 2000, el uso predominante del suelo fue el de pastos y suelos desnudos y degradados, con una proporción significativa de terreno en este último, lo cual se asocia a la actividad agrícola y la sobreexplotación de los recursos naturales, situación comúnmente reportada en estudios previos sobre la región (Ardila León y Quintero Delgado, 2013). Este patrón también se refleja en las investigaciones de Chaves et al. (2020) y Gamba y Dell'Acqua (2016), quienes señalan que las prácticas agrícolas, junto con la expansión urbana, son responsables de la pérdida de vegetación en regiones de importancia ecológica y paleontológica.

En el análisis de las coberturas correspondientes al año 2007, se observa una predominancia de los espacios naturales, los cuales cubren una parte significativa del área estudiada (Figura 19). Aunque los pastos siguen siendo una cobertura notable, su extensión se ha reducido, manteniendo una proporción similar a la de los espacios naturales. Asimismo, se registra una disminución considerable de los suelos degradados, lo que sugiere una mejora en la calidad del terreno en comparación con el año 1994. Por otro lado, la proporción de cultivos transitorios se mantiene en niveles similares a los observados en 1994, evidenciando que esta actividad agrícola continúa siendo una práctica presente en la región, aunque en una extensión aún limitada.

**Figura 19**  
*Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2007*



Al analizar la clasificación de coberturas correspondiente al año 2007 (ver Tabla 4 y Figura 20), se identifica que la categoría dominante fue espacios naturales, con una extensión aproximada de 1458,298 ha, lo que representa el 39,45% del área estudiada. Le sigue los pastos, que ocupan 1074,632 ha, equivalentes al 29,07%. En tercer lugar, se encuentran los suelos desnudos y degradados, con 524,266 ha (14,18%), y luego la vegetación saludable, que abarcan 499,436 ha,

es decir, el 13,51% del total. En menor proporción los cultivos transitorios, con una superficie de 120,058 ha (3.24%), y los cuerpos de agua artificial, que suman 19,975 ha, representando el 0,54%.

**Tabla 4**

*Coberturas de la tierra 2007, discriminado en Área y porcentaje*

Año 2007		
Clase	Área Total (ha)	% Área Total
Espacios naturales	1458,298	39,45%
Pastos	1074,632	29,07%
Suelos desnudos y degradados	524,266	14,18%
Vegetación saludable	499,436	13,51%
Cultivos transitorios	120,058	3,24%
Cuerpos de agua Artificial	19,975	0,54%

**Figura 20**

*Análisis Porcentual de clases año 2007*

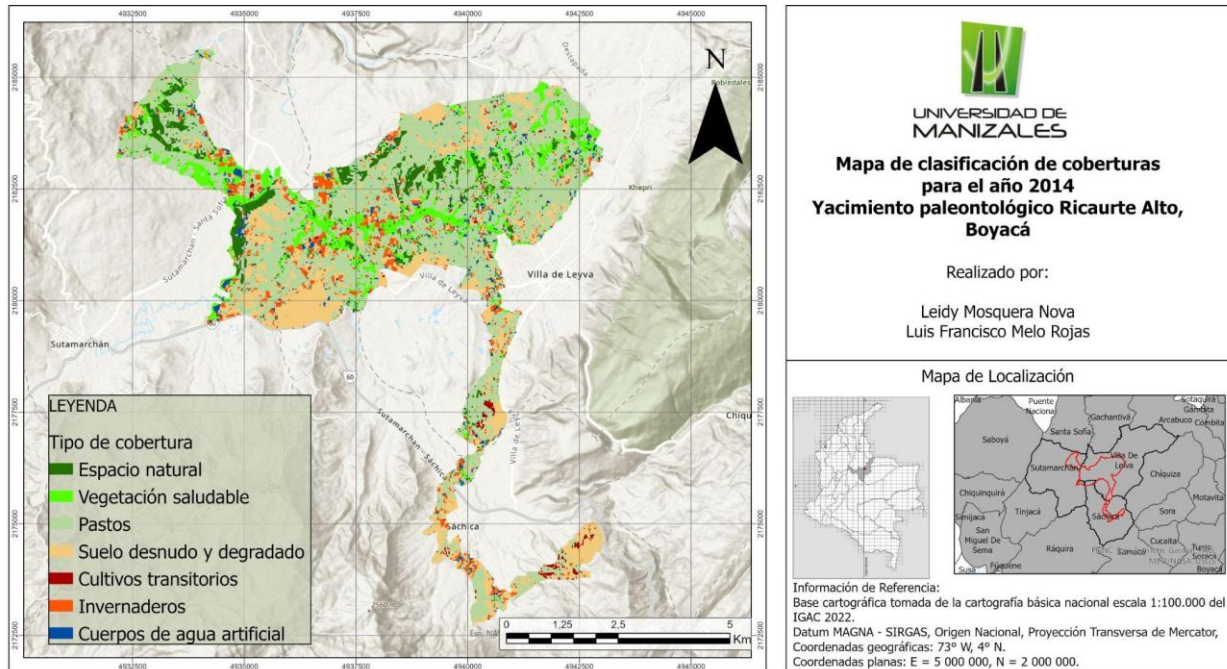


A partir del año 2007, los espacios naturales empiezan a ganar terreno, teniendo en cuenta que en estos espacios naturales incluyen vegetación secundaria, mientras que los pastos y los suelos degradados siguen dominando la región. Esta aparente estabilización en la calidad del suelo podría estar relacionada con las primeras estrategias de restauración ecológica o un cambio en las prácticas

de uso del suelo hacia formas menos intensivas. En este sentido, estudios como los de Dzikowski (2022) y Rodríguez-Gaviria (2016) resaltan cómo la implementación de medidas de conservación y el uso de sistemas de información geográfica (SIG) pueden facilitar una mejor gestión territorial y la restauración de áreas degradadas.

En el análisis de las coberturas correspondiente al año 2014, se observa una clara predominancia de los pastos (Figura 21), que vuelven a ocupar una parte considerable del área estudiada. En segundo lugar, se encuentran los suelos degradados y los espacios naturales, aunque en menor proporción que los pastos. Un aspecto destacable de este período es la incursión de una nueva cobertura asociada a invernaderos, lo que sugiere un cambio en el uso del suelo hacia actividades agrícolas más intensivas, probablemente relacionadas con cultivos de alto valor que requieren protección y control climático. Este fenómeno representa una tendencia emergente en el paisaje, reflejando una transición en las prácticas productivas de la región. Este fenómeno es un claro indicio de un cambio hacia una agricultura intensiva y controlada, tendencia que también se refleja en otros estudios recientes (Melo-Ojeda, 2015; López-Jamioy, 2023), donde se observa una expansión de este tipo de cultivos en diversas regiones de Colombia.

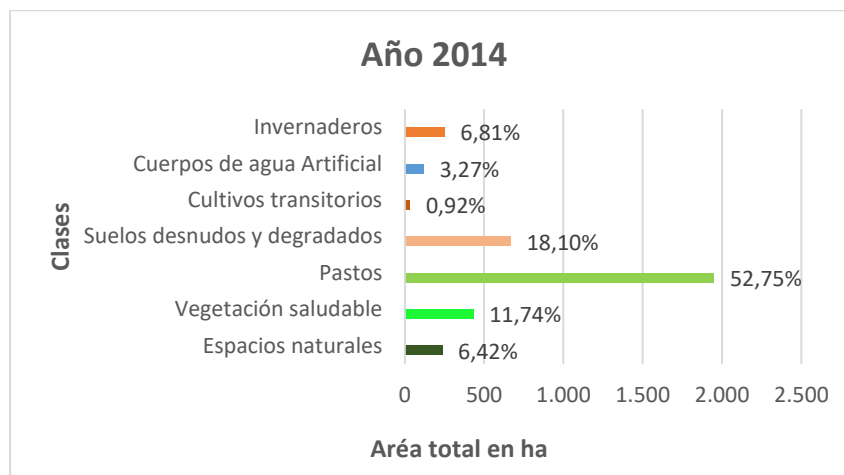
**Figura 21**  
 Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2014



Al revisar la clasificación de coberturas correspondiente al año 2014 (ver Tabla 5 y Figura 22) se observa que la mayor proporción del territorio está ocupada por los pastos, con una superficie estimada de 1949,833 ha, lo que equivale al 52,75% del área analizada. En segundo lugar, se encuentran los suelos desnudos y degradados, que abarcan 669,111 ha (18,10%), seguidos por la vegetación saludable con 433,858 ha, correspondientes al 11,74%. Las áreas con invernaderos con 251,671 ha, es decir, el 6,81% del total. En proporciones menores se identificaron los espacios naturales, que cubren 237,238 ha (6,42%), los cuerpos de agua artificial con 120,862 ha (3,27 %) y, finalmente, los cultivos transitorios, que suman 34,131 ha, equivalentes al 0,92%.

**Tabla 5***Coberturas de la tierra 2014, discriminado en Área y porcentaje*

Año 2014		
Clase	Área Total (ha)	% Área Total
Pastos	1949,833	52,75%
Suelos desnudos y degradados	669,111	18,10%
Vegetación saludable	433,858	11,74%
Invernaderos	251,671	6,81%
Espacios naturales	237,238	6,42%
Cuerpos de agua Artificial	120,862	3,27%
Cultivos transitorios	34,131	0,92%

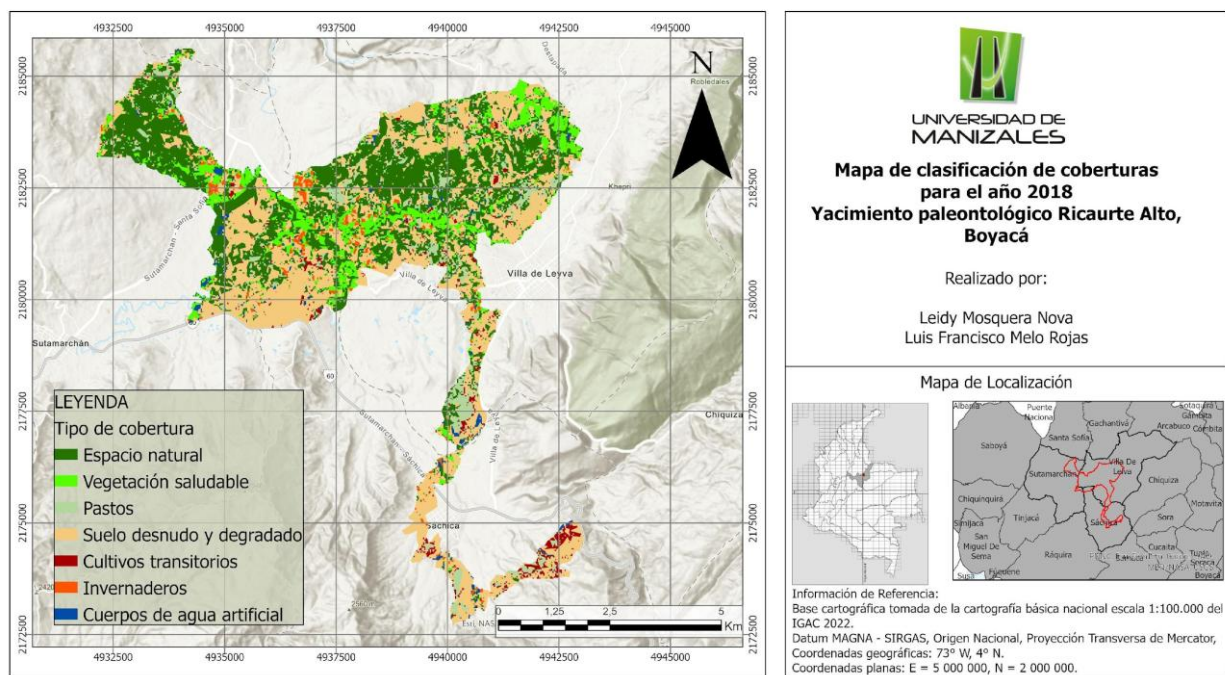
**Figura 22***Análisis Porcentual de clases año 2014*

En el análisis de las coberturas correspondientes al año 2018, se observa un cambio significativo en la distribución del uso del suelo (Figura 23). Los espacios naturales, que predominaban en años anteriores, han sido reemplazados en gran medida por zonas de pastos, lo que refleja un retroceso en la conservación de los ecosistemas naturales. Además, se mantiene una notable predominancia de suelos degradados, lo que indica que la degradación del terreno continúa

siendo un desafío para la región. Por otro lado, aunque la cobertura asociada a cultivos bajo invernadero sigue presente, su proporción es similar a la observada en 2014, lo que sugiere que esta práctica agrícola continúa de manera limitada en el área, sin una expansión significativa. A partir de 2018, los espacios naturales sufren una notable reducción, lo cual refleja una intensificación de las actividades agrícolas y ganaderas, además de la urbanización en las áreas adyacentes.

**Figura 23**

*Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2018*



Al revisar la clasificación de coberturas correspondiente al año 2018 (ver Tabla 6 y Figura 24), se observa que la mayor proporción del territorio está ocupada por los suelos desnudos y degradados, con una superficie estimada de 1394,863 ha, lo que equivale al 37,73% del área analizada. En segundo lugar, se encuentran los espacios naturales, que abarcan 1345,646 ha (36,40%), seguidos por la vegetación saludable con 410,502 ha, correspondientes al 11,10%. Las áreas con pastos representan 290,379 ha, es decir, el 7,86 % del total. En proporciones menores se identificaron los cultivos transitorios, que cubren 99,238 ha (2,70%), los invernaderos con 97,238

ha (2,63%) y, finalmente, los cuerpos de agua artificial, que suman 58,563 ha, equivalentes al 1,58%.

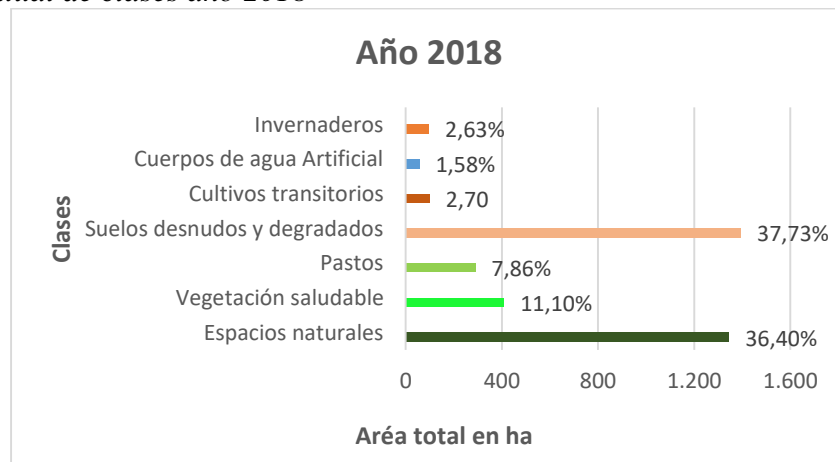
**Tabla 6**

*Coberturas de la tierra 2018, discriminado en Área y porcentaje*

Año 2018		
Clase	Área Total (ha)	% Área Total
Suelos desnudos y degradados	1394,863	37,73%
Espacios naturales	1345,646	36,40%
Vegetación saludable	410,502	11,10%
Pastos	290,379	7,86%
Cultivos transitorios	99,652	2,70%
Invernaderos	97,238	2,63%
Cuerpos de agua Artificial	58,563	1,58%

**Figura 24**

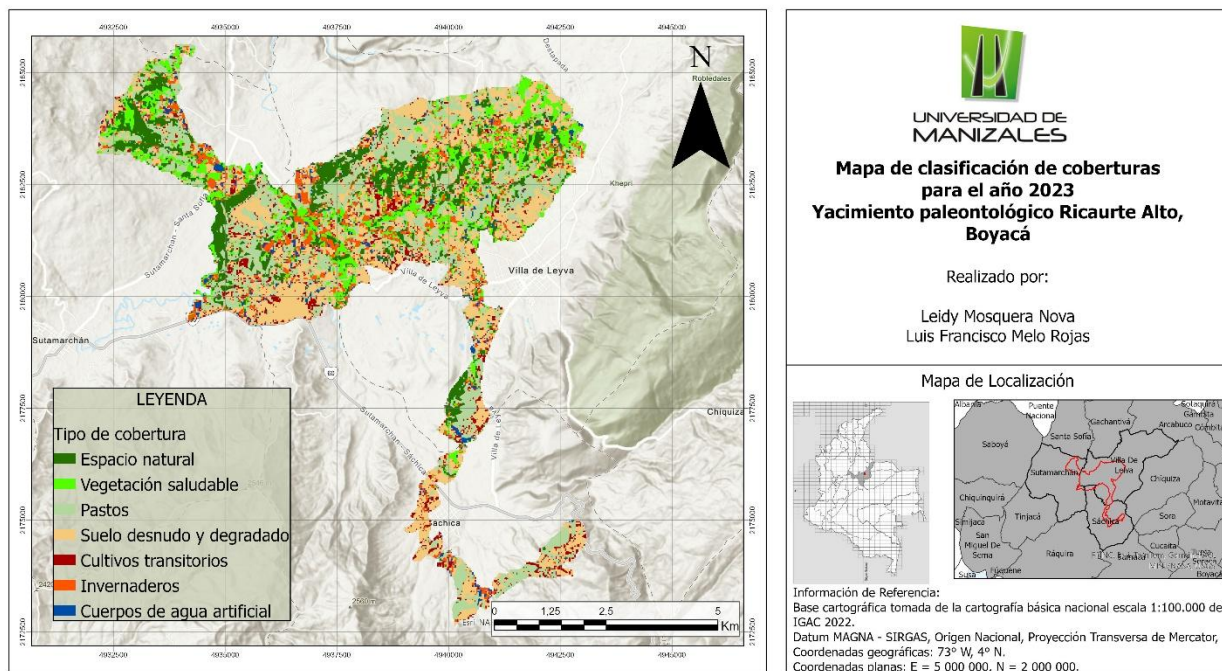
*Análisis Porcentual de clases año 2018*



En el análisis de las coberturas correspondientes al año 2023, se observa una distribución similar entre suelos degradados y pastos (Figura 25), los cuales predominan en casi igual proporción en el área estudiada. Sin embargo, se registra una reducción considerable de los

espacios naturales, lo que refleja una transformación en el uso del suelo hacia actividades más intensivas. Un aspecto destacado es la expansión de la cobertura asociada a invernaderos, que casi duplica la proporción observada en 2018, lo que sugiere un aumento significativo en la actividad agrícola protegida, probablemente como respuesta a la demanda de cultivos que requieren condiciones controladas y un manejo más intensivo.

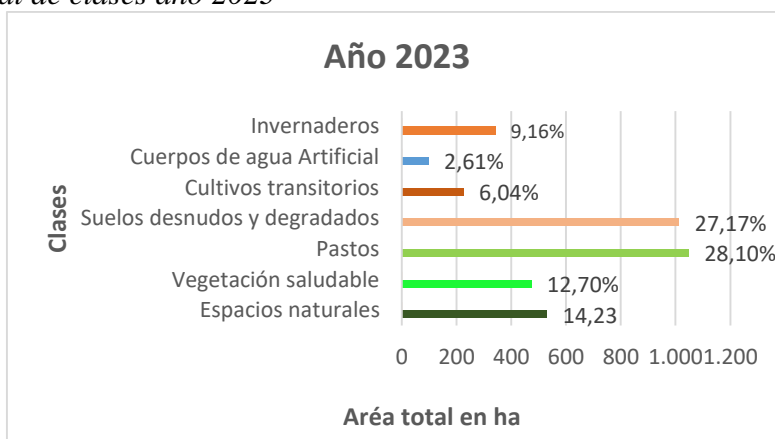
**Figura 25**  
*Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2023*



Al revisar la clasificación de coberturas correspondiente al año 2023 (ver Tabla 7 y Figura 26), se observa que la mayor proporción del territorio está ocupada por los pastos, con una superficie estimada de 1046,641 ha, lo que equivale al 28,10% del área analizada. En segundo lugar, se encuentran los suelos desnudos y degradados, que abarcan 1012,012 ha (227,17%), seguidos por los espacios naturales con 529,912 ha, correspondientes al 14,23%. Las vegetación saludable representan 472,906 ha, es decir, el 12,70% del total. En proporciones menores se identificaron los invernaderos, que cubren 341,003 ha (9,16%), los cultivos transitorios con 225,021 hectáreas (6,04%) y, finalmente, los cuerpos de agua artificial, que suman 97,151 ha, equivalentes al 2,61%.

**Tabla 7***Coberturas de la tierra 2023, discriminado en Área y porcentaje*

Año 2023		
Clase	Área Total (ha)	% Área Total
Pastos	1046,641	28,10%
Suelos desnudos y degradados	1012,012	27,17%
Espacios naturales	529,912	14,23%
Vegetación saludable	472,906	12,70%
Invernaderos	341,003	9,16%
Cultivos transitorios	225,021	6,04%
Cuerpos de agua Artificial	97,151	2,61%

**Figura 26***Análisis Porcentual de clases año 2023*

Se definieron las coberturas a través de la metodología CORINE Land Cover, en territorios artificializados con tejido urbano continuo y discontinuo, territorios agrícolas con cultivos herbáceos, áreas agrícolas heterogéneas con mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, áreas con poca vegetación con tierras desnudas y degradadas, y las superficies de agua con cuerpos de agua degradadas se consideró que describe, caracteriza y clasifica la cubierta biofísica de la superficie terrestre utilizando imágenes de satélite de resolución media (Landsat), y finalmente

generar los mapas de polígonos para cada periodo donde se representan las coberturas para la zona de estudio como se reflejan a continuación.

Con base a los resultados obtenidos en la clasificación supervisada y los tipos de cobertura identificados, a continuación, se muestran la clasificación Corine Land Cover (CLC), seleccionándose aquellos más relevantes para el análisis de los cambios en el yacimiento paleontológico (Tabla 8).

**Tabla 8**

*Clasificación de suelo según metodología Corine Land Cover*

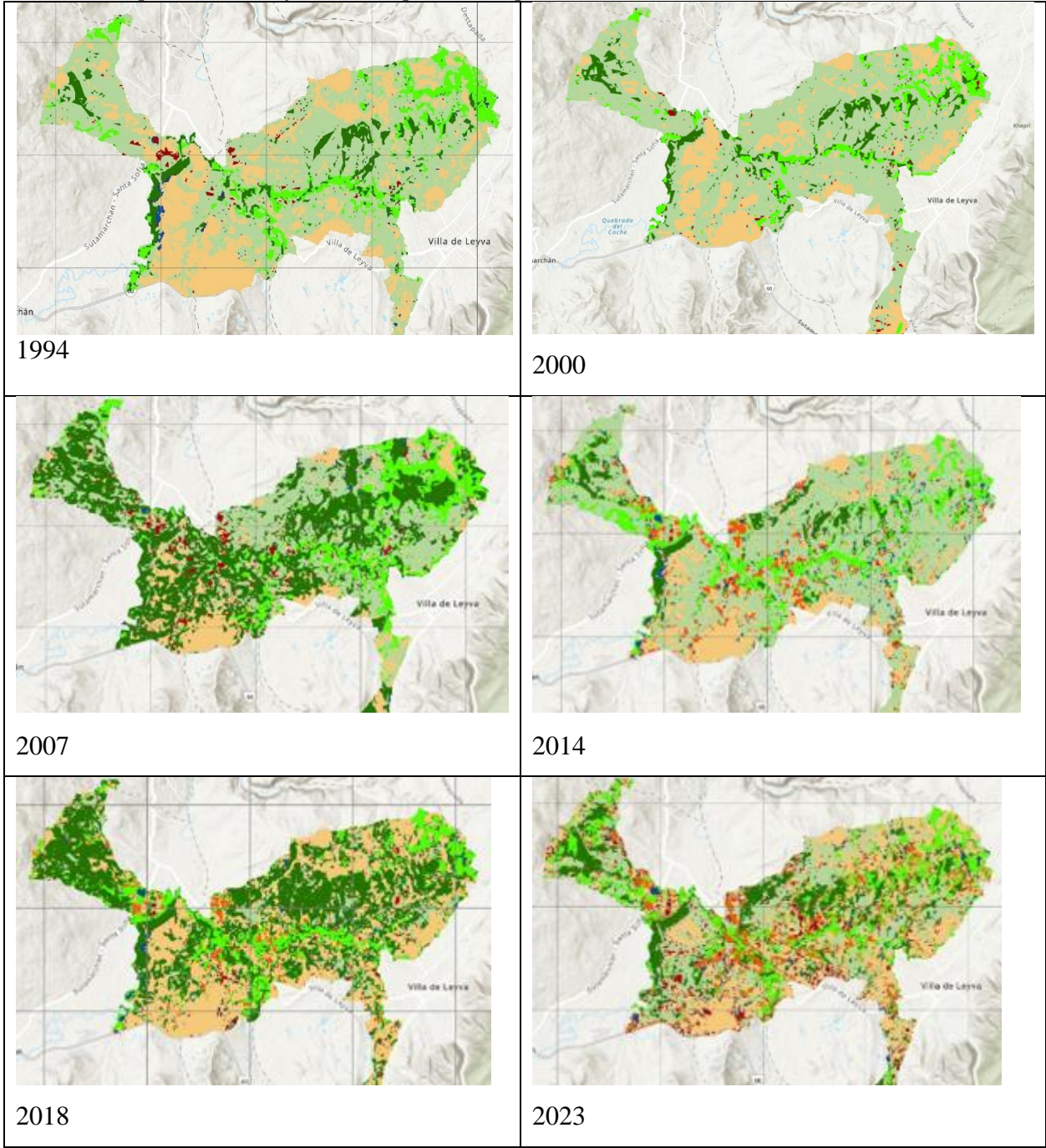
<b>TIPO DE COBERTURA GENERALIZADA</b>	<b>CLASIFICACIÓN USO DEL SUELO METODOLOGÍA CORINE LAND COVER</b>
Cultivos transitorios	2.1.5. Cultivos transitorios Tubérculos
Invernaderos	2.2.5. Cultivos confinados
Pastos	2.3.3. Vegetación secundaria o en transición
Espacios naturales	2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales
Vegetación saludable	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
Suelo desnudo y degradado	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
Cuerpos de agua artificial	5.1.4 Cuerpos de aguas artificiales

## 8. Discusión

Durante el periodo comprendido entre 1994 y 2023, el análisis multitemporal realizado sobre las coberturas del suelo del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto ha evidenciado transformaciones significativas en el uso del suelo (Figura 27 y Tabla 9). En este sentido, los resultados muestran que, en 1994, los pastos representaban el 50,99% del paisaje, pero experimentaron una notable reducción en el año 2000. Este cambio puede ser interpretado como un reflejo de las presiones antropogénicas que afectaron a la región, como la expansión urbana y la intensificación de la agricultura, un patrón observado también en otras áreas del país (Rodríguez-Gaviria, 2016; Dzikowski, 2022). Posteriormente, la recuperación parcial de áreas naturales en 2000 y nuevamente en 2018, refleja los esfuerzos de restauración o recuperación ecológica en algunas zonas. Este fenómeno es común en regiones donde existen políticas públicas o iniciativas de conservación que buscan mitigar el impacto de las actividades humanas, como lo señalan los estudios de Gamba y Dell'Acqua (2016), quienes documentan que las áreas protegidas y los esfuerzos de restauración pueden generar una revitalización temporal de los ecosistemas.

Sin embargo, la tendencia a la reducción de vegetación saludable a lo largo de los años sugiere que, en general, los esfuerzos de restauración no han sido suficientes para contrarrestar la degradación de los ecosistemas. Este deterioro continuo refleja el impacto acumulado de la expansión de la agricultura y la urbanización, que a menudo no se ven suficientemente controlados. La constante disminución de áreas con vegetación saludable es consistente con los hallazgos de estudios como el de Ban (2016), quienes advierten sobre los efectos a largo plazo de la expansión urbana y agrícola sobre los ecosistemas nativos, incluso cuando se implementan estrategias de conservación parcial. En cuanto a los pastos, mantuvieron una participación estable, con un incremento considerable en 2023 (28.10%). El crecimiento de los cuerpos de agua artificiales y la incorporación de invernaderos desde 2007 reflejan cambios en los usos del suelo, posiblemente relacionados con prácticas agrícolas intensivas y estrategias de adaptación a las condiciones climáticas actuales.

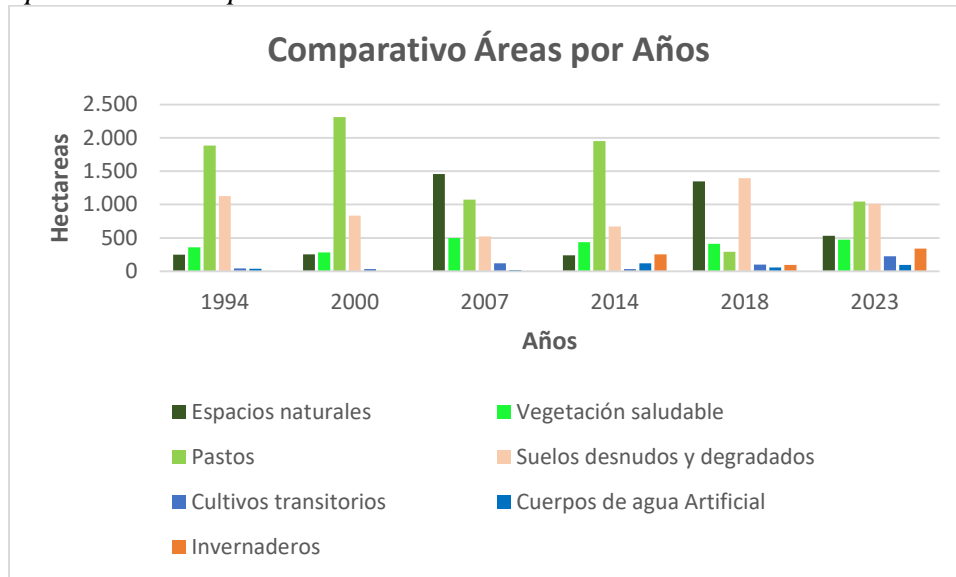
**Figura 27**  
*Análisis comparativo clasificación supervisada por años*



**Tabla 9***Comparación de área en (Ha) de coberturas de 1994 a 2023*

Año	1994		2000		2007		2014		2018		2023	
Clase	Área	Área %	Área	Área %	Área	Área %	Área	Área %	Área	Área %	Área	Área %
	(ha)		(ha)		(ha)		(ha)		(ha)		(ha)	
<b>Espacios naturales</b>	247	6,70%	255	6,86%	1.458	39,45%	237	6,42%	1.346	36,40%	530	14,23%
<b>Vegetación saludable</b>	360	9,74%	283	7,62%	499	13,51%	434	11,74%	410	11,10%	473	12,70%
<b>Pastos</b>	1.885	50,99%	2.312	62,25%	1.075	29,07%	1.950	52,75%	290	7,86%	1.047	28,10%
<b>Suelos desnudos y degradados</b>	1.127	30,49%	832	22,42%	524	14,18%	669	18,10%	1.395	37,73%	1.012	27,17%
<b>Cultivos transitorios</b>	42	1,13%	31	0,85%	120	3,24%	34	0,92%	100	2,70%	225	6,04%
<b>Cuerpos de agua Artificial</b>	35	0,95%			20	0,54%	121	3,27%	58	1,58%	97	2,61%
<b>Invernaderos</b>							252	6,81%	97	2,63%	341	9,16%

La Figura 28 presenta una gráfica comparativa que permite visualizar de manera más clara los cambios en las coberturas de suelo a lo largo del tiempo. A través de las barras, es posible identificar con mayor precisión las variaciones en la extensión de cada clase, facilitando así la interpretación de los patrones de transformación del paisaje. Esta representación visual destaca, por ejemplo, el comportamiento fluctuante de los suelos degradados y el crecimiento progresivo de áreas artificializadas.

**Figura 28***Análisis comparativo clases por años*

En primer lugar, el análisis multitemporal del uso del suelo en el área del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, ha permitido una evaluación detallada de los cambios ocurridos entre 1994 y 2023, y cómo estos cambios impactan tanto el paisaje como el patrimonio paleontológico. A través de la clasificación supervisada y el uso del sistema Corine Land Cover (CLC), se ha logrado identificar seis tipos de uso del suelo, los cuales corresponden hasta el nivel 3 de la clasificación CLC. Los resultados obtenidos a partir de esta metodología revelaron tanto transformaciones notables en el uso del suelo como una compleja interacción entre las actividades humanas y los espacios naturales en la región.

En cuanto a la tipología, los seis tipos de uso del suelo identificados incluyen tanto áreas de cultivos transitorios como confinados, y tierras degradadas que, en su mayoría, se asocian con las zonas de mayor importancia científica del yacimiento paleontológico. Las tierras degradadas representan un desafío para la conservación del yacimiento, ya que estos suelos están directamente relacionados con procesos de erosión y pérdida de información paleontológica que afectan la integridad del yacimiento.

Por otra parte, en cuanto a las implicaciones para la conservación del yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, los resultados muestran que el impacto de las actividades humanas sobre el terreno es evidente. Las zonas de pastos y áreas degradadas, aunque continúan siendo predominantes, están siendo progresivamente desplazadas por actividades agrícolas y

ganaderas. El aumento de las coberturas de invernaderos y la expansión de la agricultura intensiva en áreas cercanas a los yacimientos pueden constituir una amenaza para la conservación del patrimonio paleontológico, al generar presiones sobre el entorno físico, incluyendo la compactación del suelo y la alteración de los drenajes naturales.

Este hallazgo resalta la importancia de implementar políticas de conservación y gestión integrada del territorio, como las sugeridas por estudios de conservación como el de Rojas y García (2016), quienes proponen estrategias basadas en el monitoreo constante mediante teledetección para identificar áreas vulnerables y adoptar medidas de protección preventiva.

Así mismo, un aspecto importante de la clasificación Corine Land Cover es la inclusión de las construcciones y áreas urbanizadas en la categoría de "tierras degradadas", dado que no era evidente y distinguible las áreas para este tipo específico de cobertura. Este fenómeno ha sido particularmente notable en los últimos años, ya que la expansión de la construcción en la región ha crecido considerablemente, lo que contribuye a la alteración del paisaje en las cercanías del yacimiento. La falta de una clase diferenciada para las construcciones puede dificultar la cuantificación precisa de la expansión urbana y sus impactos directos sobre los espacios naturales y el patrimonio paleontológico.

Si bien se ha observado un incremento de áreas artificializadas y de cultivos bajo invernadero, se ha destacado también la reducción de los espacios naturales en las últimas décadas, especialmente en las áreas cercanas a las márgenes de quebradas. Estos ecosistemas frágiles, aunque parcialmente conservados, siguen siendo presionados por la expansión agrícola y ganadera, lo que ha fragmentado el paisaje. En este sentido, el comportamiento observado en Ricaurte Alto es consistente con lo reportado por Chaves et al. (2020), quienes identifican que la fragmentación de los ecosistemas naturales es un fenómeno común en áreas con alta presión antropogénica. Este patrón refleja la coexistencia de prácticas agrícolas y la preservación de ciertos ecosistemas, lo que señala un reto importante para la gestión de la región: balancear el uso productivo de la tierra con la conservación de los ecosistemas naturales.

Los resultados obtenidos de la clasificación Corine Land Cover y el análisis multitemporal de las imágenes satelitales muestran cómo el paisaje ha experimentado transformaciones significativas en las últimas tres décadas. El análisis multitemporal de las coberturas del suelo en el Ricaurte Alto evidencia una interacción compleja entre el desarrollo humano y la conservación de los ecosistemas. Si bien ha habido esfuerzos de restauración, la presión de actividades humanas

sobre los ecosistemas naturales, especialmente a través de la agricultura intensiva y la urbanización, sigue siendo una amenaza significativa. Este fenómeno se traduce en una reducción de los espacios naturales, lo que podría afectar la conservación del yacimiento paleontológico si no se implementan medidas de protección adecuadas. Para garantizar la protección del yacimiento paleontológico, es fundamental implementar estrategias que integren la gestión sostenible del paisaje con la conservación activa de los ecosistemas naturales.

## 9. Conclusiones

El análisis multitemporal del uso y cobertura del suelo en el yacimiento paleontológico del Ricaurte Alto, Boyacá, entre 1994 y 2023, evidenció transformaciones significativas en el paisaje, marcadas por una disminución sostenida de la vegetación saludable y un incremento de áreas asociadas a pastos, suelos degradados y cultivos bajo invernadero. Este cambio progresivo refleja una intensificación de las actividades agrícolas y una presión creciente sobre los ecosistemas naturales que conforman el entorno del yacimiento.

Estas dinámicas de uso del suelo revelan un conflicto persistente entre la expansión agrícola y la conservación del patrimonio natural. La conversión de áreas naturales y seminaturales en territorios productivos ha reducido la capacidad de amortiguamiento ecológico del paisaje y pone en riesgo la estabilidad geológica y la integridad del patrimonio paleontológico, especialmente en zonas donde las coberturas degradadas se superponen con áreas de alto interés científico

Los cultivos bajo invernadero, cuya presencia se incrementó especialmente a partir de 2014, son indicativos de un cambio hacia modelos agrícolas más intensivos, pero también más invasivos para el equilibrio ecosistémico local. Este fenómeno demanda acciones urgentes de gestión del territorio que incorporen principios de sostenibilidad y planificación basada en evidencia científica.

Ante este panorama, es indispensable impulsar una gestión integrada del territorio que permita articular el desarrollo agrícola con la protección del patrimonio geológico y paleontológico. Se recomienda priorizar la restauración ecológica de áreas degradadas, la delimitación de zonas de protección especial y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, particularmente en las cercanías del yacimiento

Comprender cómo ciertas actividades humanas o decisiones políticas impactan el área es un paso esencial para desarrollar estrategias más efectivas de manejo y protección. Los resultados de este análisis apoyarán la formulación de un plan de manejo geológico y paleontológico, promoviendo la declaratoria del yacimiento como una zona de protección especial. Al mismo tiempo, los hallazgos podrán integrarse en los planes de desarrollo municipal, alineándose con enfoques de gestión territorial basados en evidencia científica (Ban, 2016).

Los resultados evidencian que áreas previamente cubiertas por bosques y espacios seminaturales han sido transformadas en su mayoría por cultivos y superficies artificiales, como invernaderos. Además, se observó que los espacios que en los años 90 eran clasificados como pastos o áreas naturales han sido sustituidos, en su mayoría, por zonas degradadas o cultivos, tanto

transitorios como confinados. Estos hallazgos sugieren una zonificación que destaca las áreas más afectadas, enfocando las estrategias de conservación en los sectores con mayor grado de degradación o alteración.

La degradación del suelo en el área en los últimos años es notoria, la construcción conjunta de un plan de manejo, en este caso de tipo geológico y paleontológico se hace necesario. Un plan de manejo geológico busca promover procesos de planeación y gestión del patrimonio geológico y paleontológico mediante los cuales se establezcan acciones que contribuyan a garantizar la protección, conservación y sostenibilidad de los bienes muebles e inmuebles que la conforman y los valores científico, educativo y cultural que los sustentan.

El desarrollo urbanístico y la expansión de áreas agropecuarias en la zona del yacimiento paleontológico suponen una amenaza para su conservación a corto y mediano plazo. Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias interinstitucionales con las autoridades locales y departamentales para garantizar su preservación y maximizar su potencial. Además, resulta crucial llevar a cabo un proceso de sensibilización que promueva el desarrollo económico sostenible en armonía con la conservación de este valioso patrimonio.

Finalmente, este trabajo demuestra que la integración de análisis multitemporal y SIG no solo permite caracterizar los cambios de cobertura y su impacto sobre un área de interés paleontológico, sino que también ofrece una base técnica sólida para la toma de decisiones en materia de planificación territorial y conservación del patrimonio. En el contexto colombiano, donde la gestión del patrimonio geológico aún se encuentra en desarrollo, este enfoque representa un avance significativo y pionero. La metodología implementada puede ser replicada en otras regiones del país, fortaleciendo los procesos de declaratoria, manejo y protección de zonas con alto valor geocientífico, y posicionando el uso de tecnologías geoespaciales como herramienta estratégica para la geoconservación en Colombia.

## 10. Recomendaciones

Desarrollar un sistema de monitoreo multitemporal continuo utilizando imágenes satelitales y metodologías como CORINE Land Cover, con el fin de rastrear de manera sistemática las transformaciones del uso del suelo en el área del yacimiento. Esto permitiría detectar oportunamente tendencias como la expansión de invernaderos o el incremento de tierras degradadas, fenómenos que, según los resultados del análisis 1994–2023, se han intensificado y afectan directamente la integridad del patrimonio paleontológico.

Incorporar variables climáticas y modelos de cambio climático en futuros estudios para analizar su posible influencia sobre los patrones de uso del suelo. Dado el aumento significativo de invernaderos y cuerpos de agua artificiales a partir de 2014, es pertinente explorar si estas coberturas están respondiendo a fenómenos como El Niño o La Niña, lo cual permitiría diseñar estrategias de adaptación más eficaces desde el enfoque territorial.

Diseñar un plan de manejo geológico y paleontológico basado en la evidencia que contemple la zonificación de las áreas más afectadas por la degradación del suelo, identificadas en este estudio. Este plan debe integrar acciones correctivas y preventivas de geoconservación, priorizando las zonas con alto valor científico, pero en riesgo, como las áreas que pasaron de vegetación natural a tierras degradadas.

Fortalecer la articulación institucional con entidades como las Secretarías de Planeación, Cultura, Educación y Turismo, orientando acciones hacia la mitigación de impactos antrópicos en el yacimiento. La evidencia de avance urbano encubierto dentro de la categoría de suelos degradados subraya la necesidad de integrar la protección del patrimonio geológico en los instrumentos de ordenamiento territorial.

Fomentar procesos de educación y apropiación comunitaria mediante jornadas de sensibilización continuas, que incluyan a habitantes rurales y urbanos. Dado que las transformaciones del paisaje están vinculadas a actividades humanas —como el cambio a cultivos intensivos—, es clave que la comunidad comprenda el valor del yacimiento y participe activamente en su protección.

Integrar enfoques interdisciplinarios en futuras investigaciones, combinando análisis ambientales, sociales y climáticos. La coexistencia de mosaicos de cultivos y espacios naturales, detectada en el análisis de coberturas, refleja la complejidad del territorio y exige soluciones que reconozcan las necesidades socioeconómicas locales sin comprometer la conservación.

Aplicar herramientas geoespaciales como los SIG en la planificación municipal, fortaleciendo la toma de decisiones sobre el uso del suelo. Los hallazgos demuestran cómo estas herramientas permiten no solo visualizar la dinámica del territorio, sino orientar la gestión sostenible del mismo en función de la conservación del patrimonio paleontológico.

Ampliar la resolución temporal y espacial de los análisis multitemporales mediante el uso de imágenes satelitales de mayor resolución, como las del programa Sentinel-2. Aunque el estudio basado en imágenes Landsat permitió identificar cambios significativos entre 1994 y 2023, una mayor frecuencia de observación y nivel de detalle permitiría detectar transformaciones más sutiles en los bordes de ecosistemas o zonas de transición. Esto contribuiría a una comprensión más precisa de las dinámicas territoriales y facilitaría la implementación de medidas de conservación más focalizadas.

## 11. Referencias

- Aderogba, Kofo A. (2012). Global warming and challenges of floods in Lagos metropolis, Nigeria, Department of Geography & Environmental Sciences, Tai Solarin University of Education, Vol. 2, No. 1, ISSN: 2223-9944
- Alcaldías de Sáchica, Sutamarchán y Villa de Leyva. (sf). *Información territorial y de planificación municipal*.
- Ardila León, J. F., & Quintero Delgado, O. Y. (2013). Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: Río Soapaga, sector Paz De Río, Boyacá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 55-76.
- Argañaraz, J.P., Entraigas, I., 2011. Análisis comparativo entre las máquinas de vectores soporte y el clasificador de máxima probabilidad para la discriminación de cubiertas de suelo. *Revista de Teledetección* 36, 26-39.
- Ávila-Pérez, I.D., Ortiz-Malavasi, E., Soto-Montoya, C., Vargas-Solano, Y., Aguilar-Arias, H., Miller-Granados, C., 2020. Evaluation of four classification algorithms of Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images to identify forest cover in highly fragmented regions in Costa Rica. *Revista de Teledetección* 57, 37-49. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13340>.
- Ban, Y. (2016). Multitemporal Remote Sensing: Current Status, Trends and Challenges. In: Ban, Y. (eds) *Multitemporal Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 20. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_1)
- Bruzzone L, Prieto DF (2000) Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 38:1171–1182
- Chaves, MED, Picoli, MCA y Sanches, ID (2020). Aplicaciones recientes de Landsat 8/OLI y Sentinel-2/MSI para el mapeo del uso y la cobertura del suelo. *Teledetección*, 12(18).
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de la teledetección espacial*. Editorial Rialp.
- Di Gregorio, A., & L.J.M. Jansen. (1998). *Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual*.
- Dzikowski, J. (2022). *Metodologías de análisis en estudios de cambio de uso de suelo. Puerta de investigación*.
- Franco Zapata, K., & Albán Chindoy, C. R. (2022). Zonificación por inundación en el Valle de Sibundoy utilizando sistemas de información geográfica.
- Galvis-Aponte, Luis Armando, Quintero-Fragozo Luis Armando (2017). "Geografía económica de los municipios ribereños del Magdalena," Documentos de trabajo sobre Economía Regional y Urbana 265, Banco de la República de Colombia.

- García Ortiz, E., Fernández Martínez, E., & Fuertes Gutiérrez, I. (2013). Análisis del riesgo de degradación de algunos yacimientos de icnitas de dinosaurio de La Rioja, España. 1. Fragilidad y vulnerabilidad natural. Cuadernos del Museo Geominero, 15.
- Gamba, P., Dell'Acqua, F. (2016). Change Detection in Urban Areas: Spatial and Temporal Scales. In: Ban, Y. (eds) Multitemporal Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing, vol 20. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_3).
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación. (5ª ed.) McGrawHill.
- IDEAM-Universidad Nacional de Colombia, (2013); Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales - IDEAM, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente - Facultad de Minas - UNAL; <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19869>
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad- Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White, Eds.). IPCC.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER). (2022). Plan Local de Gestión del Riesgo de Cambio Climático (PLGRCC) de la Cuenca Hidrográfica del Río Tunjuelito. Bogotá, D.C.: IDIGER.
- López-Jamioy, M. (2023). Evaluación de la amenaza por inundación del río Mocoa y río Caquetá en el sector Puerto Limón, Putumayo (Colombia). Universidad Antonio Nariño. Bogotá, D.C.
- Luque Ripoll, L. (2010). Los geólogos en los yacimientos paleontológicos. Asociación Paleontológica Alcoyana "Isurus".
- Martínez-Gutiérrez, C. A. (2022). Análisis de la amenaza por inundación en la cuenca baja del río Tunjuelito, Bogotá D.C. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D.C.
- Matoma, J., & Cañas, J. A. (2017). Interpretación de Coberturas de la Tierra y Análisis Multitemporal para el Área de Compensación Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico de El Quimbo [Universidad distrital Francisco Jose De Caldas]. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6205>
- Melo-Ojeda, J. D. (2015). Diagnóstico ambiental de la cuenca baja del río Tunjuelito, Bogotá D.C. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C.
- Mehl, W., & Peinado, F. M. (1997). Análisis multitemporal de la cubierta vegetal mediante datos NOAA-AVHRR. GeoFocus (Alicante), (0), 186-189.

- Ministerio de ambiente. (2014). Decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (2021). Anexo 1 Convocatoria nacional para el reconocimiento y medición de grupos de investigación, desarrollo tecnológico o de innovación y para el reconocimiento de investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación – 2021.
- Olaya, V. (2011). Sistemas de Información Geográfica [Material del curso]. Universidad de Oviedo.
- Robayo-Mejía, L.A. (2014). Análisis de amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a través de sistemas de información geográfica. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, D.C.
- Rodríguez-Gaviria, E. M. (2016). Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa. Biblioteca Digital, Universidad Nacional de Colombia, 379.
- Roerink GJ, Menenti M, Verhoef W (2000) Reconstructing cloud free NDVI composites using Fourier analysis of time series. *Int J Remote Sens* 21(9):1911–1917)
- Rojas, A., & Garcia, D. (2016). ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO EN LOS MUNICIPIOS EL ROSAL Y SUBACHOQUE. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). Universidad Francisco Jose De Caldas.
- Sastre, J. M. (2008). *Geomática*. Editorial Síntesis.
- Selden, P. A., & Nudds, J. R. (2012). *Windows on the past: The first half billion years of life*. Siri Scientific Press.
- Servicio de Monitoreo Terrestre Copernicus (2023). Cobertura terrestre CORINE.
- Servicio Geológico Colombiano. (sf). *Información geológica y cartográfica de Colombia* . Recuperado de <https://www.sgc.gov.co>
- Solórzano, J.V.; Mas, J.F.; Gao, Y.; Gallardo-Cruz, J.A. Land Use Land Cover Classification with
- Suarez Casas, J. y Vargas Perez, J.(2021). Análisis multitemporal en el cambio de la dinámica fluvial en relación con el cambio de coberturas de la tierra en el afluente principal de la subcuenca del río San Juan- Cundinamarca. Universidad Santo Tomas. Bogotá D.C.
- Trejos, T. (2008). Análisis multitemporal de la deforestación en la Amazonia suroriental colombiana, mediante el uso de sensores remotos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 32(123), 181-190.

Tobón, Y. (2020). CLASIFICACIÓN DE LAS COBERTURAS DE LA TIERRA. Universidad de Antioquia.

U-Net: Advantages of Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery. *Remote Sens.* 2021, 13, 3600. <https://doi.org/10.3390/rs13183600>

Universidad de Cranfield. (2023). Análisis de cambios multitemporales en el uso de suelo. Recuperado de <http://cranfield.ac.uk> .

Vargas-Sanabria, D., Campos-Vargas, C., 2018. Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 31-1, 58-69. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3497>

Wang, Y., Qi, S., Xu, J. (2016). Multitemporal Remote Sensing for Inland Water Bodies and Wetland Monitoring. In: Ban, Y. (eds) *Multitemporal Remote Sensing. Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol 20. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_17))

## **Anexos**

### **Anexo 1. Mapas de clasificación de coberturas**

- Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 1994
- Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2000
- Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2007
- Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2014
- Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 2018
- Mapa de clasificación de coberturas de la tierra para el año 202