



**Uso de Random Forest y Máxima Verosimilitud para análisis de coberturas ajustadas a Corine Land Cover.  
Municipio Olaya Antioquia.**

Martha Patricia Fernández Rodas - Mario Andrés Monje Córdoba

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

Asesor: Vladimir Henao Céspedes, Doctor (PhD) en Ingeniería

Asesores de recursos académicos: Diego Alejandro Soto Herrera (asesor bibliográfico), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

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

2025

---

<b>Cita</b>	(Fernández Rodas & Monje Córdoba, 2025)
<b>Referencia</b>	Fernández, M. & Monje, M. (2025). <i>Uso de Random Forest y Máxima Verosimilitud para análisis de coberturas ajustadas a Corine Land Cover. Municipio Olaya Antioquia</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.

---



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

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

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

**Universidad de Manizales:** [www.umanizales.edu.co](http://www.umanizales.edu.co)

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

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

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

## **Dedicatoria**

A mis padres, Jhonatan y Mireya, por su apoyo incondicional durante todo mi proceso formativo, a mis abuelos, Hernando Monje y Ana Córdoba, quienes con su sabiduría, cariño y enseñanzas me han inspirado a seguir adelante. Su ejemplo de vida y sus palabras siempre han sido un faro en los momentos de dificultad. Este logro también les pertenece.

A las personas que me han motivado a seguir con sus palabras de aliento, les expreso mi más sincero agradecimiento. En especial, al Profesor Héctor Cruz de la Universidad de Cundinamarca, por despertar en mí el interés y la pasión por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y convertirlos en parte de mi proyecto de vida profesional. Sus enseñanzas fueron fundamentales para lo que soy hoy en día y continúan siendo inspiración para seguir creciendo con el mismo compromiso y pasión que él me transmitió.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo constante e incondicional a lo largo de este camino.

A mi pareja, Valeria, quien fue mi pilar, mi apoyo inquebrantable, y a quien agradezco profundamente por su amor, paciencia y por brindarme su tiempo incluso en los momentos más difíciles. Gracias por acompañarme en cada desvelo, por motivarme cuando más lo necesitaba, y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mis amigos Jonnier, Andrés y Natalia, quienes me brindaron su ayuda, palabras de aliento y motivación para continuar.

De igual manera, agradezco al COM del Agrado Huila, en especial a mis jefes Adriana Moreno por su confianza y por permitirme compaginar mis responsabilidades laborales con mis estudios y Felipe Castro, muchas gracias por el apoyo constante, su ayuda y sobre todo, por su valiosa amistad. Extiendo también mi gratitud a todos aquellos que hicieron parte de este sueño



5.4.3.3 Aplicación del proceso de clasificación supervisada. ....	42
5.4.4 FASE 4. Validación de resultados .....	44
5.4.4.1 Configuración de los parámetros de entrada en la herramienta <i>Copy Raster</i> : .....	44
5.4.4.2 Configuración de los parámetros de entrada en la herramienta <i>Create Accuracy Assessment Points</i> .....	45
5.4.4.3 Configuración de los parámetros de entrada en la herramienta <i>Compute Confusion Matrix</i> . ....	46
5.4.5 FASE 5. Mapas tematicos de coberturas CLC.....	47
6. Resultados .....	48
7. Discusión.....	55
8. Conclusiones .....	56
Referencias .....	58

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Marco legal Normativo referente .....	32
<b>Tabla 2</b> Clases identificadas CLC. ....	41
<b>Tabla 3</b> Valoración del coeficiente kappa. ....	47
<b>Tabla 4</b> Resultados Matriz de confusión y Índice Kappa algoritmo de Random Forest.....	50
<b>Tabla 5</b> Resultados Matriz de confusión y Índice Kappa algoritmo de Máxima Verosimilitud. ....	51
<b>Tabla 6</b> Resultados Matriz de confusión y índice kappa.....	52

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Mapa Ubicación Olaya – Antioquia .....	36
<b>Figura 2</b> Diagrama de fases metodológico.....	37
<b>Figura 3</b> Plataforma de búsqueda Planet Scope. ....	38
<b>Figura 4</b> Selección de imagen .....	39
<b>Figura 5</b> Descarga de imágenes.....	39
<b>Figura 6</b> Imagen satelital Olaya Antioquia. ....	40
<b>Figura 7</b> Resultado clasificación supervisada Máxima Verosimilitud (A) y Random Forest (B) .....	43
<b>Figura 8</b> Puntos de muestreo para las dos clasificaciones.....	46
<b>Figura 9</b> Mapas de Máxima Verosimilitud y Random Forest.....	49
<b>Figura 10</b> Mapa final (Máxima Verosimilitud).....	54

## Resumen

La clasificación de coberturas es una herramienta importante para la planificación y gestión del territorio. En Colombia, se ha adaptado la metodología Corine Land Cover (CLC), la cual define los parámetros para identificar y clasificar coberturas y usos del suelo, proporcionando una base técnica para la toma de decisiones por parte de entes gubernamentales. En este contexto, el municipio de Olaya – Antioquia presenta limitaciones en su Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.), al carecer de una caracterización metodológica para la clasificación de sus coberturas. Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo aplicar los algoritmos de clasificación supervisada Random Forest y Máxima Verosimilitud, ajustados al estándar CLC y a partir de imágenes satelitales PlanetScope con resolución de 3 metros, para definir cuál algoritmo obtuvo mejor desempeño y generar insumos cartográficos que apoyen el E.O.T.. Se identificaron cinco clases principales: territorios artificializados, bosques, áreas abiertas sin o con poca vegetación, ríos y cuerpos de agua artificiales. La evaluación de precisión, mediante matrices de confusión e índice Kappa, evidenció que Máxima Verosimilitud obtuvo mejores resultados con una precisión del 85 % y un índice Kappa de 0,81, frente al 79 % y 0,74 de Random Forest. Se identificaron limitaciones en la diferenciación de coberturas con firmas espectrales similares, como zonas urbanas y arenas ribereñas. Se concluye que ambos algoritmos son viables para la clasificación supervisada, aunque se recomienda incorporar datos complementarios para mejorar la precisión. Este trabajo constituye un insumo técnico valioso para la actualización del E.O.T. y la gestión territorial del municipio.

*Palabras clave:* Clasificación supervisada, machine learning, Random Forest, maxima verosimilitud, teledetección, coberturas del suelo, corine land cover

## **Abstract**

Land cover classification is an important tool for territorial planning and management. In Colombia, the Corine Land Cover (CLC) methodology has been adapted to define standardized parameters for identifying and classifying land cover and land use, providing a technical basis for decision-making by government agencies. In this context, the municipality of Olaya – Antioquia presents limitations in its Territorial Ordering Scheme (E.O.T.), as it lacks a methodological approach for the classification of its land cover. Therefore, this research aimed to apply the supervised classification algorithms Random Forest and Maximum Likelihood, adjusted to the CLC standard and based on 3-meter resolution PlanetScope satellite imagery, to determine which algorithm performed better and to generate cartographic inputs to support the E.O.T.. Five main classes were identified: artificial surfaces, forests, open areas with little or no vegetation, rivers, and artificial water bodies. Accuracy assessment using confusion matrices and the Kappa index showed that Maximum Likelihood achieved better results, with an accuracy of 85% and a Kappa index of 0.81, compared to 79% accuracy and a Kappa of 0.74 from Random Forest. Limitations were observed in distinguishing spectrally similar covers, such as urban areas and riverbank sands. It is concluded that both algorithms are suitable for supervised classification, although it is recommended to incorporate complementary data to improve accuracy. This study provides a valuable technical input for updating the E.O.T. and strengthening land use planning in the municipality.

*Keywords:* Supervised classification, machine learning, Random Forest, maximum likelihood, remote sensing, land cover , corine land cover

## **Introducción**

La clasificación de las coberturas del suelo es de suma importancia para la planificación territorial y la gestión ambiental, debido a que esta posibilita la monitorización de grandes extensiones de superficie y permite la toma de decisiones informadas respecto a los diferentes usos de suelo, la expansión urbana y la conservación ambiental. De igual manera la correcta implementación de esta clasificación facilita realización de estudios ambientales para la prevención y gestión del riesgo de desastres, así como la gestión adecuada de los recursos naturales fomentando el desarrollo sostenible, aspectos de vital importancia para el desarrollo del país.

En Colombia los Planes de Ordenamiento Territorial (P.O.T.) sirven como eje central de la organización espacial y funcional de los territorios categorizándose según el número de habitantes que contiene un municipio siendo para el municipio de Olaya- Antioquia un Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.) debido a que este cuenta con una población de 3224 habitantes y en este la presencia de mapas es fundamental para la gestión municipal, sin embargo para el actual E.O.T. del municipio de Olaya la presencia de información relacionada a las metodologías utilizadas para la elaboración de la clasificación de las coberturas no es clara.

Si bien la normativa exige la caracterización biofísica del territorio, no se genera una especificidad en la metodología de clasificación de coberturas. Sin embargo, entidades como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el MinAmbiente recomiendan el uso de la metodología Corine Land Cover para asegurar el rigor del proceso.

Debido a esto las herramientas tecnológicas como lo es teledetección y fotogrametría se han posicionado como elementos necesarios para analizar multitemporalmente los cambios en las coberturas vegetales lo que ha propiciado que su uso se incorpore de manera directa a la

formulación y ejecución de los POTs incorporando algoritmos de clasificación como el Random Forest y la Máxima Verosimilitud.

Tras lo anterior y como objetivo principal de la presente tesis se pretende comparar los algoritmos de Random Forest y Máxima Verosimilitud en la clasificación de coberturas ajustadas a Corine Land Cover para el municipio de Olaya- Antioquia y evaluar el desempeño de dichos algoritmos.

## **1. Planteamiento del problema**

La clasificación de las coberturas del suelo en el territorio es una herramienta clave para la planificación territorial y gestión ambiental, ya que permite monitorear y tomar decisiones con base a los usos del suelo, expansión urbana y conservación ambiental, realización de estudios ambientales para la prevención y gestión del riesgo de desastres, además de gestionar de manera óptima los recursos naturales, por lo tanto, la clasificación de coberturas es importante para la gestión eficiente y sostenible de todos los municipios del país.

Con el fin de favorecer el uso adecuado y proporcionado del suelo sin afectar el desarrollo sostenible de las regiones, se generan los planes de ordenamiento territorial, los cuales se encuentran separados por categorías dependiendo de la población presente en cada territorio. Estas categorías son: esquemas de ordenamiento territorial (menos de 30,000 habitantes), planes básicos de ordenamiento territorial (entre 30,000 y 100,000 habitantes) y planes de ordenamiento territorial (más de 100,000 habitantes). Para el municipio de Olaya-Antioquia se emplea el esquema de ordenamiento territorial ya que, según la Gobernación de Antioquia (2021), el municipio cuenta con 3,224 habitantes.

En el *Esquema de Ordenamiento Territorial Municipal del municipio de Olaya-Antioquia* (2023), también conocido como E.O.T.M., presenta una última revisión y ajuste en el año 2023, el cual presenta los mapas relacionados con el plan de ordenamiento territorial del municipio. En su revisión detallada de todas las salidas gráficas como áreas de protección ambiental, mapas de riesgos, mapas de infraestructura vial y de servicios públicos, mapa de equipamientos urbanos y rurales, mapa de usos del suelo propuestos, entre otros, en el E.O.T.M no se especifica la metodología para la elaboración de los mapas y obtención de los insumos utilizados, fuentes y temporalidad de los datos para la clasificación de las coberturas del municipio. Sin embargo, la normativa colombiana, según el *Decreto 1077 de 2015*. No menciona una metodología particular para clasificar coberturas vegetales o del suelo en los E.O.T., sino que es un requisito implícito dentro de los estudios técnicos del E.O.T., ya que es necesaria para definir la zonificación ambiental y de uso del suelo. Pero sí establece que estos instrumentos deben incluir la caracterización del territorio y la identificación de sus condiciones biofísicas. Por ejemplo, existen las guías del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Ministerio de Ambiente, en donde recomiendan la clasificación de coberturas con base en la metodología Corine Land Cover. Por consiguiente, es muy importante tener un mapa explícito con la clasificación de las coberturas, ya que está directamente relacionada con los usos del suelo, la gestión territorial y planificación ambiental del municipio.

### **1.1 Descripción del área problema**

A nivel global, los cambios de coberturas y usos del suelo son una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental. La expansión urbana y agrícola, junto con la deforestación, están contribuyendo al cambio climático y a la pérdida de hábitats naturales, esto, según la organización de las naciones unidas, afirman que una de las principales causas del

cambio climático se debe al crecimiento urbano (ONU, 2021), además otro estudio realizado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), publicado en su boletín de divulgación científica *La expansión urbana de Mérida, la de Yucatán, México y su contribución al cambio climático*, demuestran como los factores de la metropolización han contribuido a un aumento en la temperatura ambiental y como han afectado la biodiversidad, los recursos naturales y su población (Espadas Manrique et al., 2021).

Debido a lo anterior, se han buscado múltiples alternativas para la solución y mitigación de dichos problemas, especialmente aquellos relacionados con el crecimiento urbano descontrolado y sus efectos sobre el ambiente. Una de las herramientas más utilizadas en este contexto son las imágenes satelitales para llevar a cabo análisis multitemporales enfocados al cambio de las coberturas vegetales. Las aplicaciones de estas imágenes incluyen estimaciones de pérdida de suelo y cambios en la cobertura vegetal debido a eventos naturales o antrópicos, como cambios en el uso del suelo. (Cuichan et al., 2024, pág. 3).

Estos análisis se pueden ver reflejados también en la formulación e implementación de los Planes de Ordenamiento Territorial, esto con el fin de hacer un diagnóstico del estado actual del territorio, conociendo y clasificando los tipos y usos de las coberturas como áreas artificiales, áreas agrícolas, bosques y seminaturales, humedales, cuerpos de agua etc. Dando una mirada en el contexto nacional, algunos estudios como el de Niño Martínez (2020), ha realizado análisis multitemporales mediante imágenes satelitales para la determinación de los cambios y usos del suelo en el municipio de san francisco de sales – Cundinamarca. De forma similar, Patiño Narváez (2015) realizó una clasificación de las coberturas de la tierra en el suelo rural del municipio de Pupiales - Nariño usando la integración y aplicación de herramientas SIG para la caracterización del territorio.

El uso de la teledetección y fotogrametría para monitorear las coberturas del suelo permite identificar tendencias y patrones de deforestación y urbanización. Es necesario fortalecer la infraestructura tecnológica y capacitar a los profesionales en el uso de teledetección y Sistemas de Información geográfica, con el fin de mantener un monitoreo constante para el análisis de los recursos del territorio, mejorando la implementación en los Planes de Ordenamiento Territorial y promoviendo una gestión sostenible del territorio a nivel nacional. (Sánchez- Díaz, 2018).

En este contexto, la identificación y clasificación de las coberturas es clave ya que no solo sirve para realizar estudios ambientales sino también para la planificación territorial y gestión ambiental. En Colombia, estos procesos están orientados por marcos normativos como según lo establecido en la Ley 388 de 1997, ARTÍCULO 9. Define que, los planes de ordenamiento territorial son el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas adoptadas para orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo.

El municipio de Olaya, Antioquia, se enfrenta a un contexto de urbanización creciente, esto soportado por el Acuerdo Número 014 del 31 de agosto del 2016 “Modificación E.O.T. Perímetro y expansión urbanos “, el cual dictamina el aumento del área urbana y así mismo a sus corregimientos en el año 2016, promoviendo el desarrollo y construcción de vivienda, infraestructura social y de interés prioritario. Por consiguiente, una adecuada clasificación actualizada de las coberturas permite una planificación equilibrada entre expansión, desarrollo y conservación ambiental, teniendo en cuenta que si la planificación es desarrollada de manera inadecuada puede tener impactos negativos sobre el desarrollo y el medio ambiente, como lo menciona Ramírez (2018), el crecimiento urbano en las ciudades latinoamericanas ha sido descontrolado y acelerado generando consecuencias como infraestructura pobre, asentamientos informales y deterioro ambiental, en relación, una planificación inadecuada puede llevar a usos del

suelo que no corresponden, provocando transformaciones negativas en ecosistemas estratégicos afectando de forma directa el desarrollo sostenible del territorio (Román Núñez & Farelo Guerra, 2018) . Actualmente, el Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.) de Olaya 2023, no especifica la metodología aplicada para clasificar coberturas, por lo tanto, este insumo cartográfico es de suma importancia para la toma de decisiones informadas para el desarrollo del municipio.

## **1.2 Formulación del problema**

¿De qué manera la implementación de una clasificación supervisada basada en la metodología Corine Land Cover puede contribuir a mejorar la identificación y análisis de las coberturas del suelo en el municipio de Olaya, Antioquia?

## **1.3 Antecedentes**

El análisis de coberturas terrestres mediante técnicas de clasificación supervisada ha cobrado gran relevancia en estudios de ordenamiento territorial y gestión ambiental. metodologías como Corine Land Cover (IDEAM ,2010).

La aplicación de técnicas de **machine learning en el análisis de coberturas terrestres** han sido ampliamente utilizadas para caracterizar el suelo, y su impacto en la planificación territorial, en diferentes regiones, proporcionando datos fundamentales para la toma de decisiones. A continuación, se presentan los antecedentes más relevantes que sustentan esta investigación.

El suelo representa un pilar esencial en la organización del territorio y la protección de nuestros ecosistemas; la detección remota y la creación de mapas se revelan como instrumentos valiosos para vigilar su utilización, facilitando así la puesta en marcha de directrices y reglamentos para una administración sostenible. La técnica Corine Land Cover, adaptada a las características de cada lugar, ha sido muy bien recibida para este propósito, ya que ofrece una base teórica sólida para la investigación. Jesús David Garavito Sánchez (2017) menciona que "el estudio destaca lo importante que son la teledetección y la cartografía para cuidar el medio ambiente. También señala

que es urgente tener una ley que apoye la gestión de los recursos naturales". Esto resalta lo esencial que son estas herramientas para planificar y proteger nuestro entorno (Garavito Sánchez, 2017).

Como conclusión general, la adaptación de la metodología CORINE Land Cover CLC al contexto colombiano ha permitido desarrollar mapas temáticos de las coberturas de la tierra a diferentes escalas y en distintas regiones del país. En especial, trabajos previos que emplearon imágenes satelitales de media resolución, como Landsat y alta resolución como PlanetScope, para llevar a cabo clasificaciones supervisadas a través de procesos automáticos y de complementación con la interpretación visual, permitieron una mayor comprensión sobre el uso de suelo y sus cambios de manera más precisa y actualizada a lo largo del tiempo. En su totalidad, la investigación se basa en la teledetección, de acuerdo con la integración de técnicas, metodologías y un marco normativo ajustado a la realidad de Colombia. (Gutiérrez Mora,2011).

Los sistemas de información geográfica (SIG) se han vuelto cruciales como herramientas fundamentales al tomar decisiones sobre organización ambiental y del territorio. Dentro de este panorama, usar software especializado para catalogar la vegetación facilita conseguir información certera y confiable para estudios ecológicos y urbanos variados. En este estudio, evaluamos tres aspectos cruciales —rendimiento, eficacia y precisión— al comparar Quantum GIS (QGIS) con PCI Geomatics (PCI) al monitorear la clasificación de la cobertura vegetal en Cundinamarca. Presentan una reseña de los beneficios y desventajas de cada software, llegando a la conclusión de que ambos exhiben fortalezas singulares y que los requerimientos del usuario final determinarán cuál se ajusta mejor a sus objetivos. (Melo Cristancho, 2017).

Los algoritmos de aprendizaje automático, como Random Forest y Support Vector Machines (SVM), han demostrado ser eficientes para clasificar cobertura de suelo en imágenes satelitales. Se comparan sus tasas de precisión y facilidad de implementación. Estos modelos ofrecen alta precisión en la clasificación de suelos y pueden reducir el margen de error en análisis

geoespaciales. Esta investigación destaca la necesidad de mejorar la calidad de los conjuntos de datos, optimizar la parametrización de los algoritmos y ampliar el análisis de los resultados más allá de la exactitud general (Tobar Díaz, Yan Gao, François, & Cambrón Sandoval, 2023).

En Colombia, la organización del territorio representa un desafío mayúsculo, sobre todo en zonas campestres donde las modificaciones descontroladas del suelo dificultan la aplicación de estrategias perdurables. El Plan de Ordenamiento Territorial (E.O.T.), según lo estipulado por la Ley 388 de 1997, busca encauzar la evolución física del territorio y supervisar el aprovechamiento del suelo para asegurar una expansión balanceada y sustentable. Sin embargo, en el Municipio de Olaya, Antioquia, se enfrenta a grandes desafíos en la gestión integral de su territorio debido a los descontrolados cambios en la cobertura y uso del suelo. Estos cambios, impulsados por la urbanización y la expansión agrícola, están generando un impacto negativo tanto en el medio ambiente como en el bienestar local. El Esquema de Ordenamiento Territorial carece de una metodología adecuada y precisa para monitorear los cambios de uso del suelo, lo que impide una toma de decisiones informada y eficaz, al no tener datos precisos y no cuantificados, no se tiene un control y gestión de los recursos disponibles en el municipio (Espinosa Rico, 2008).

El crecimiento poblacional y el desarrollo industrial han acelerado los cambios en el uso y cobertura del suelo (LULC), afectando la biodiversidad y los ecosistemas. Machine Learning ha sido utilizado para analizar estos cambios y predecir tendencias futuras, la expansión urbana genera una reducción de áreas naturales, lo que requiere estrategias de planificación para mitigar su impacto. Este estudio subraya lo crucial que es verificar la exactitud y el índice Kappa al confirmar la validez de los mapas de cobertura del suelo, señalando que RF sobresale como el método de clasificación más fiable. Aparte, se recurre a indicadores como el NDVI, el NDWI y el NDBI para refinar la forma en que se ven y se ratifican los hallazgos (Talukdar et al., 2020).

Determinar la dinámica de los cambios de coberturas y uso del suelo en la cuenca del Río Combeima, utilizando técnicas de clasificación supervisada de imágenes satelitales para entender los patrones de transformación territorial. Este estudio aplica la clasificación supervisada de imágenes Landsat (usando el algoritmo de Máxima Verosimilitud) para identificar y mapear coberturas y usos del suelo en una cuenca andina colombiana. Analiza los cambios entre diferentes periodos, relacionándolos con la presión antrópica y la deforestación. Es un ejemplo concreto de aplicación en el contexto colombiano este estudio es relevante por el uso de clasificación supervisada en un contexto andino colombiano, similar al de Olaya, Antioquia, nos ayudará a entender cómo se abordan los cambios de cobertura en Colombia y las metodologías empleadas. (Hernández Cárdenas & Herrera Buitrago, 2014)

La clasificación de uso y cobertura del suelo es fundamental para ayudar a acciones ambientales, climáticos, conservación de biodiversidad, desarrollo sostenible y planificación agrícola, y se utiliza en algoritmos de clasificación, como la utilización de imágenes multitemporales Sentinel-2 ofrece ventajas distintas sobre las imágenes de una sola fecha al permitir la observación de variaciones fenológicas y estacionales a través del paisaje y la integración de índices espectrales mejoran significativamente la precisión en la clasificación de uso y cobertura del suelo. Este enfoque puede ser adaptado para mejorar la clasificación supervisada en diferentes contextos geográficos y temáticos, especialmente en áreas donde las variaciones estacionales son pronunciadas.

Aprovechar las imágenes de satélite, tipo las que capturan Sentinel-2 y Landsat-8, nos da la capacidad de conseguir datos exactos y al día sobre el uso que se le está dando al suelo en diferentes lugares. Concretamente, la clasificación supervisada ha resultado ser bastante buena para reconocer distintos tipos de terrenos si tiene zonas de interés que sean una buena muestra y datos que le sirvan de guía. Si usamos estas técnicas en sitios específicos, como las zonas rurales y

urbanas aquí en Colombia, se vuelve más sencillo hacer mapas de cobertura que sirven de apoyo para decidir temas ambientales y para la planificación del territorio. León et al. (2021) evidencian que el uso de técnicas de clasificación supervisada en imágenes satelitales, adaptadas al esquema de Corine Land Cover, permite la creación de mapas de cobertura terrestre exactos para la administración ambiental y la planificación territorial en zonas colombianas. (León et al., 2021).

En el ámbito de la teledetección, se ha explorado bastante cómo las imágenes de satélite ayudan a distinguir entre terrenos distintos. En sitios fragmentados como Costa Rica, acertar con los esquemas de organización resulta fundamental para la gestión de los recursos naturales y la preservación de las áreas protegidas. Este análisis se basa en estudios anteriores que han evidenciado que los algoritmos de Máxima Verosimilitud, Máquinas de Vectores Soporte (SVM) y Redes Neuronales brindan resultados superiores en comparación con técnicas más sencillas como la Clasificación por Mínima Distancia. Este estudio confirma que, para obtener una clasificación precisa de cobertura boscosa en paisajes fragmentados, es recomendable utilizar imágenes de Sentinel-2 en combinación con algoritmos como SVM, Máxima Verosimilitud o Redes Neuronales, preferiblemente en la temporada seca. Esto mejora la fiabilidad del análisis y permite una mejor gestión de los recursos naturales (Ávila-Pérez et al., 2020).

La combinación de evaluación inmediata, así como la evaluación de las imágenes derivadas de las fotografías aéreas digitales, experimentan mapas confiables de la cubierta vegetal y el uso del suelo. Los estudios actuales, como el análisis en el corredor biológico Chichinautzin, indican que esta técnica es capaz de acumular precisión casi perfecta, especialmente en áreas de escisión ecológica y con un impacto en el ecosistema. El uso de ambos métodos nos permite ajustar y verificar los resultados, reducir los errores y mejorar la claridad del mapa, crucial para administrar las reservas de la naturaleza. Este estudio ofrece una base sólida para crear mapas temáticos de la vida vegetal y el uso de la tierra mediante la fusión de métodos digitales y visuales, enfatizando la

necesidad de confirmar mapas con controles en el sitio e imágenes aéreas para garantizar la precisión en futuros hallazgos y opciones (Álvaro et al., s. F.,2008)

Recientemente, el análisis de la ocupación y el aprovechamiento del suelo mediante teledetección se ha hecho necesario, ya que puede proporcionar información actual y con una gran extensión geográfica, que es necesaria para la planificación del territorio, el control del medio ambiente y la gestión de la ciudad.

En estudios de ordenamiento territorial, la representación cartográfica de las coberturas del suelo a partir de sensores remotos ha resultado ser una herramienta fundamental para la gestión de las urbes. Da Silva, Insaurrealde y Cardozo (2013) examinaron la ciudad de Resistencia, Argentina, usando métodos de clasificación de imágenes y cálculos de índices de vegetación y agua (NDVI y MNDWI). Su investigación destacó la utilidad de la teledetección para identificar cambios en el uso del suelo y mejorar el ordenamiento territorial, proporcionando una base metodológica relevante para estudios similares. Este estudio demostró que los sensores remotos y las técnicas de procesamiento digital son herramientas eficaces para mapear coberturas del suelo en entornos urbanos. Sin embargo, se recomendó el uso de imágenes de mayor resolución para mejorar la precisión en zonas urbanas heterogéneas (Da Silva, Insaurrealde & Cardozo, 2013).

En una indagación realizada por Perea-Ardila, Vaquiro y Rodríguez-Valenzuela (2022), se llevó a cabo el estudio de la ocupación y utilización del espacio en el Parque Nacional Natural Los Nevados y su zona de influencia en Colombia aplicando imágenes RapidEye de gran definición. Implementaron métodos de detección remota y clasificación dirigida, consiguiendo producir mapas temáticos a escala 1:25,000 y unificar 14 tipos de cobertura según el modelo nacional. Con una exactitud general del 89.52 % y un índice Kappa de 0.88, comprobaron la exactitud y eficiencia de tales procedimientos en lugares de considerable complejidad ambiental. Dicho estudio representa un precedente metodológico esencial para esta indagación, pues facilita la adaptación y mejora de

estas estrategias en entornos urbanos mediante el empleo de sensores satelitales de última generación y sistemas de inteligencia artificial. (Perea-Ardila, Vaquiro & Rodríguez-Valenzuela, 2022).

En 2016, los investigadores utilizaron un análisis basado en el tiempo con una clasificación de imágenes guiadas desde satélites Landsat para detectar caminos ecológicos en el parque, situados en Bogotá, lejos de las nubes. Para el análisis, el trabajo utilizó dos imágenes de Landsat (Landsat 7 y 8) de diferentes años (1999 y 2015, respectivamente), las imágenes se sometieron a corrección atmosférica, luego se clasificó mediante técnicas de clasificación supervisadas junto con el apoyo de la información cartográfica del Catastro del Distrito (como los ortofotos de 2014) fue crucial para la verificación y refinamiento de la clasificación. Este método permite la observación de los cambios en el ecosistema, señala las regiones para la preservación y la recuperación del hábitat, y traza la posición y la condición de las vías ecológicas. En esta investigación en particular, el enfoque principal fue reconocer y rastrear la cubierta de las plantas que ayuda a la vinculación ecológica y la utilidad del parque (Capote, 2016).

Aprovechar secuencias de datos temporales con fotos Landsat es un camino confiable y acertado para lograr una clasificación detallada del aprovechamiento del suelo en zonas de agricultura. Facilita distinguir, con más exactitud, las diversas clases de siembras y los distintos estilos de gestión, y con ello dejar atrás el inconveniente de la clasificación originado por las imágenes tomadas en un solo día. Esta información, compleja en el tiempo y la naturaleza, es, por tanto, fundamental para el monitoreo agrícola, la estimación de rendimientos, la detección de cambios en el uso del suelo y, finalmente, para la planificación y organización del territorio en áreas de vocación agrícola. Según Nolasco, Willington y Bocco (2014), en el trabajo presentado se realiza una clasificación de uso del suelo con especial atención al sector agrícola donde la metodología propuesta se basa en el análisis de series temporales de imágenes Landsat para

construir mapas detallados de carácter diferencial y poder caracterizar la dinámica de los cultivos y el manejo del suelo (Nolasco et al., 2014).

El análisis multitemporal revela una correlación entre la biomasa y las variaciones climáticas, evidenciando el impacto del cambio climático en la cobertura vegetal del desierto.

Según Santos Gómez et al. (2024), este estudio aplica técnicas de Machine Learning para la clasificación y análisis de índices de biomasa en el Desierto de Atacama, con el fin de comprender su relación con el cambio climático, se utilizaron imágenes Landsat y modelos de clasificación para identificar variaciones en la vegetación. El análisis multitemporal revela una correlación entre la biomasa y las variaciones climáticas, evidenciando el impacto del cambio climático en la cobertura vegetal del desierto, aportando herramientas para el monitoreo ambiental en ecosistemas árido (Santos Gómez et al., 2024).

Numerosos estudios de investigación han documentado exhaustivamente el uso de técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geoespacial (SIG) para caracterizar la cobertura del suelo y la planificación ambiental. Específicamente, en un estudio realizado en el Bosque de Galilea, Tolima, se aplicó la metodología Corine Land Cover (CLC-3) utilizando imágenes satelitales de 2017, imágenes de Planet Scope, análisis de separación espectral y clasificación visual de coberturas para cartografía de 1:25,000. Basándonos en el cálculo del índice Kappa, se encontró que un 76.63% de los mapas creados eran bastante buenos y exhibían una precisión considerable. Los hallazgos derivados del estudio posibilitaron distinguir eficazmente las zonas urbanas en forma de pasillos, gracias a las áreas con abundancia de arboleda. Se destaca la oportunidad de monitoreo y gestión específica para la protección y manejo fondo forestal. Este trabajo proporciona una adecuada base metodológica y de seguridad para la caracterización de coberturas de suelo a través del análisis de la cobertura terrestre (Vargas Portela et al., 2020) .

El uso de técnicas de clasificación monitoreadas por la teledetección nos permitió identificar y analizar con precisión una variedad de coberturas de tierra que facilitan la gestión ambiental, la planificación urbana y el monitoreo de los cambios en el paisaje. Varios estudios, como los realizados en la región de Prahova de Rumania, aseguran que disociar las clases de cobertura del suelo aumenta la precisión, tanto desde la verificación en el campo como de la introducción de los datos procedentes del satélite con las bases de datos existentes. La certeza de los métodos de rango internacional (los estipulados por el sistema de cubiertas del suelo Corine) permite asegurar la comparabilidad y la consistencia en el presentimiento de los datos en distintas regiones. Este trabajo proporciona una base metodológica sólida para el análisis de coberturas en Olaya, Antioquia, mediante la aplicación de técnicas de clasificación supervisada y el ajuste a estándares internacionales como CORINE (Rujoiu-Mare & Mihai, 2016)

La recolección de información mediante imágenes satelitales, sobre todo las provenientes de Sentinel-1 y Sentinel-2, ha ganado terreno en el campo de los sistemas de información geográfica (SIG) gracias a su aptitud para optimizar la exactitud en la categorización de la capa superficial terrestre. La región del Magdalena Bajo en Colombia se ha convertido crecientemente en un área piloto, donde la demanda de monitorización y gestión de los recursos naturales ha proliferado, ayudados por los impactos de la agricultura y la actividad de ganado lo que se refiere a la fragmentación del paisaje y a su degradación, entre otros. Estudios anteriores han demostrado que la combinación de datos ópticos y de radar permite restricciones como la nubosidad, fomenta una evaluación más precisa del seguro de la tierra y contribuye a las decisiones basadas en la gestión ambiental y la adaptación al cambio climático. La unión de estos elementos resulta esencial para que los sistemas de información geográfica evolucionen, sobre todo al usarlos para manejar el medio ambiente y organizar el territorio, lo cual facilita tomar decisiones con más datos y mejores resultados (Clerici, Valbuena Calderón & Posada, 2017).

En el estudio realizado por Alzate y Sánchez (2018), se llevó a cabo un análisis multitemporal de los cambios en el uso del suelo en las veredas Pantanillo y Las Palmas del municipio de Envigado, utilizando imágenes satelitales del programa Landsat. Para la clasificación de las coberturas del suelo, se aplicó la comparación de información primaria generada a partir de imágenes satelitales Landsat y ortofotografías, junto con información secundaria de Planes de Ordenamiento Territorial (P.O.T.) y el método de clasificación supervisada Mahalanobis, que demostró ser el más efectivo al presentar los mejores índices kappa y una adecuada discriminación de las coberturas definidas. Este trabajo se relaciona directamente con el estudio nuestro estudio, ya que proporciona una metodología que puede ser aplicada para evaluar el impacto de las transformaciones en el uso del suelo en otras áreas del municipio. (Alzate Giraldo & Sánchez Gómez, 2018).

Debido a que ahora hay muchas más imágenes de satélite multiespectrales de alta calidad disponibles, el estudio de la capa superficial terrestre con métodos de clasificación supervisada ha cobrado mucha importancia en los últimos años. En particular, se ha visto que juntar sensores como Sentinel-2 y PlanetScope con ortofotos de alta exactitud sirve para mejorar la capacidad de distinguir capas en territorios fragmentados y de pequeña extensión.

Estudios novedosos, tal como el de Zhang y su equipo en (2016), han indagado en alternativas para optimizar dicho panorama, poniendo en práctica métodos de “pan-sharpening” para intensificar la nitidez espacial de los indicadores espectrales empleados en la detección de recursos hídricos y cobertura forestal. Con estas técnicas se puede fusionar imágenes de múltiples espectros con datos pancromáticos de alta resolución, generando mapas notablemente exactos y minuciosos. Esto cobra especial relevancia en escenarios donde los cambios en los recursos naturales son súbitos y acelerados, y una detección precoz se vuelve crucial para la administración y protección duradera.

La utilización de datos satelitales de diferentes resoluciones, como PlanetScope y Sentinel-2, ha demostrado ser efectiva para mapear especies forestales en áreas alpinas, indicando que, mediante la incorporación de características texturales y topográficas, incluso las imágenes de menor resolución como las de Sentinel-2. Esta estrategia permite aprovechar la disponibilidad y bajo costo de las imágenes gratuitas de Sentinel-2, además de facilitar transferencias metodológicas a otras regiones alpinas, mejorando así las capacidades de monitoreo forestal en áreas de difícil acceso y en ecosistemas donde la heterogeneidad vegetal presenta desafíos significativos a (Rösch et al., 2022).

El algoritmo Random Forest es un método recurrente dentro de la clasificación en las imágenes de teledetección y, además, da una estimación interna de la precisión que permite calcular la exactitud de la clasificación a partir de la validación cruzada. Sin embargo, se sugiere que esta estimación subestima el error de predicción debido a la falta de libertad estadística entre los casos de entrenamiento y validación y especialmente cuando se aplican áreas de entrenamiento compuestas por múltiples píxeles. Esta situación también supone la pérdida de la libertad estadística entre los casos de entrenamiento y validación que se he planteado anteriormente. La investigación expone un nuevo procedimiento en el cual se modifica el algoritmo de manera que impedirá esta subestimación garantizando, desde el ajuste del algoritmo, que todos los píxeles de una misma área de entrenamiento, se a siguen de manera coherente en los conjuntos de datos de entrenamiento y de validación (Cánovas-García et al. ,2016)

Un ejemplo de la aplicación del Random Forest en la clasificación de datos es el trabajo de Gislason et al. (2006), el cual utilizó este algoritmo en la clasificación de datos de teledetección multifuente, en donde se mostró su alta precisión y también su capacidad para estimar la importancia de las variables. En el documento presente se indica que Random Forest supera a los

demás clasificadores en cuanto a precisión y coeficiente kappa que, por tanto, constituyen una buena evidencia de su efectividad para realizar tareas de clasificación de imágenes satelitales.

Investigaciones anteriores han evidenciado que la clasificación supervisada de imágenes satelitales, por ejemplo, las Landsat-TM y SPOT, tiene un buen rendimiento en el mapeo del uso del suelo en regiones semiáridas de Brasil, es posible alcanzar precisiones de un 92.28%. La clasificación supervisada no solo es adecuada para distinguir los diferentes tipos de cobertura terrestre, sino que también es fundamental para la gestión sostenible de los recursos naturales en áreas propensas a sequías y limitaciones agrícolas. Por tanto, el uso de estas técnicas en el presente trabajo puede contribuir a realizar una mejor planificación y uso del suelo en situaciones similares (Ulbricht, Teotia & Civco, 1992/1993)

## **2. Justificación**

El estudio de las coberturas terrestres es un componente esencial para la gestión ambiental y la organización territorial, dado que favorece la evaluación de las transformaciones en el paisaje y su impacto en los ecosistemas de las regiones. En Colombia, se ha implementado la metodología Corine Land Cover para la categorización del suelo, con el propósito de mejorar la exactitud en la identificación de coberturas y fortalecer la planificación territorial. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), este método se ha ajustado a nivel nacional y se ha empleado en varias investigaciones para analizar la dinámica de las coberturas terrestres. (IDEAM,2018)

La correcta clasificación de las coberturas terrestres puede generar un impacto mayor en la aplicación de políticas de ordenamiento territorial y en la conservación del medio ambiente. Según Rujoiu-Mare y Mihai (2020), el uso de técnicas de clasificación, como la clasificación Corine Land

Cover aplicado a estudios regionales, contribuye a la mejora de la calidad de los datos de la cubierta vegetal e incluso hacer posible el establecimiento de estrategias sustentables en la gestión de suelos. El objetivo de este trabajo es conseguir optimizar la aplicación de esta técnica para el municipio de Olaya, aportando datos relevantes para la organización territorial y conservación de los ecosistemas del entorno.

En una dimensión de la investigación académica, Gómez, White y Wulder (2020) encaminaron especialmente a las técnicas existentes para la clasificación supervisada, destacando algoritmos como el Random Forest, el cual destaca por su facilidad de tratamiento de grandes volúmenes de datos, su gran grado de exactitud, y su resistencia ante problemas de sobreajuste que pueden hacer su aparición al permitir una clasificación en un contexto en el cual ya existe una diferente cantidad de clases de cobertura de la tierra que encierra condiciones espectrales complejas. Por su parte, el Método de Máxima Verisimilitud se caracteriza por ser una técnica basada en principios estadísticos, pero por ser, a su vez, un método que es muy conocido por su base teórica, sobre todo cuando los datos presentan una distribución normal del tipo multivariado (Richards, 2013). Este método sigue siendo usado y tiene aplicación en aquellos contextos en los que se precisa trabajar con datos espaciales que ofrecen una interpretación clara de las variables que corresponden a los mismos, situación que es aprovechable por administraciones públicas, instituciones ambientales, y asociaciones de planificación del uso del territorio.

En la situación específica de Olaya, Antioquia, la falta de una caracterización actualizada de las coberturas terrestres representa un reto para la toma de decisiones fundamentadas en la gestión territorial y la preservación del medio ambiente. Estudios como el realizado por Ariza y Torres (2021) en el bosque de Galilea, Tolima, han evidenciado la efectividad de Corine Land Cover para optimizar la detección de coberturas en ecosistemas clave, simplificando la administración territorial y la vigilancia del medio ambiente (Ariza & Torres, 2021). Sin embargo, en regiones

agrícolas, aún continúan desafíos que requiere una evaluación detallada de su aplicabilidad en estos entornos específicos, los cambios en el uso del suelo pueden ser más dinámicos debido a la influencia de factores como la rotación de cultivos, la expansión de la frontera agrícola y la implementación de nuevas tecnologías de producción. Este estudio tiene como objetivo robustecer la implementación de este método en Olaya, ofreciendo datos significativos para la organización territorial y la preservación de los ecosistemas locales.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Analizar las coberturas ajustadas a Corine Land Cover en el municipio de Olaya a partir de la aplicación de los algoritmos Random Forest y Máxima Verosimilitud.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Aplicar los algoritmos de clasificación supervisada, Random Forest y máxima verosimilitud para identificar y categorizar las coberturas del suelo ajustadas a la metodología Corine Land Cover.
- Evaluar el desempeño de los algoritmos, a partir de métricas en el proceso de clasificación de coberturas en el municipio de Olaya - Antioquia.
- Diseñar un mapa temático de coberturas del suelo del municipio de Olaya, que sirva como insumo técnico para los procesos de planificación territorial contemplados en el E.O.T..

#### **4. Marco teórico**

La capa de vegetación es fundamental para el desarrollo de las regiones, pues, según el Ministerio de Ambiente, esta es “la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales” (2022, p. 17). Por lo que su identificación delimitación y protección es importante para el progreso ambiental.

Tras lo anterior, es necesario que se utilicen herramientas que faciliten la obtención de información que permita la evaluación a una mayor escala del suelo y sus coberturas. Debido a esto, surge la teledetección, en la cual el doctor en ciencias de la información Francisco Romero (2005) plantea que esta estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, con la finalidad de definir las relaciones existentes entre éstas y cómo estas relaciones definen las características de los diferentes materiales terrestres. Por lo que su objetivo esencial busca la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se presentan a partir de su comportamiento espectral.

Así mismo, como se plantea la incorporación de la teledetección en la obtención de los datos, es necesario contar con un sistema de información que permita el procesamiento de estos. Por lo que, de acuerdo con el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2006), un Sistema de Información Geográfico (SIG) permite gestionar datos e información relacionándola con un espacio definido a partir de modelos gráficos, con la finalidad de satisfacer diversas necesidades según el objetivo. Esto quiere decir que en un solo mapa el sistema puede definir la distribución de recursos, poblaciones e infraestructuras a partir del trabajo sistemático de un software, un hardware y una base de datos geográficos.

En este contexto una imagen satelital según Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México (CONABIO, 2021.), la define como una representación visual

que se obtiene mediante un sensor remoto (satélite) que capta la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra. Uno de los componentes para los análisis y estudios a partir de imágenes satelitales, son los rasters, El cual son conformados por una matriz de celdas en cuadrícula, cada celda contiene un valor y almacena información específica que pueden ser recopiladas a través de fotografías aéreas, imágenes digitales o mapas escaneados (ArcMap, 2021).

Tomando en cuenta el avance de los modelos cartográficos y del continuo cambio en la zonificación territorial, fue necesario que se incorporara el programa Corine Land Cover (Coordination of Information of the Environment), el cual nace por una resolución del Consejo de ministros de la Unión Europea (CE/338/85) a fecha del 27 de junio de 1985. “En el cual se genera un proyecto experimental para la recogida, coordinación y coherencia de la información sobre la situación del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad” (Comisión de las Comunidades Europeas, 1998). En Colombia, entidades como el IDEAM han adaptado la metodología CORINE Land Cover para generar información nacional sobre cambios en las coberturas, facilitando la comparación a lo largo del tiempo y la planeación territorial (IDEAM, 2017).

Por consiguiente, existen técnicas para realizar una correcta clasificación aplicando diferentes metodologías, como por ejemplo la clasificación supervisada y no supervisada, la clasificación supervisada es el método mediante el cual se procesan rasters con información visual de la superficie, y que mediante el entrenamiento de algoritmos clasificadores puede generar un nuevo raster con las clases ingresadas en el entrenamiento. Mientras que la clasificación no supervisada no requiere de datos previos, sino que agrupa píxeles automáticamente basándose en la similitud de los valores en las celdas. Esta herramienta permite discretizar en clases zonales que facilitan la comprensión de la distribución de estas y su cuantificación (Urquía, 2018).

Un algoritmo de clasificación bastante popular en este campo debido a su alta precisión es el de “Maximum Likelihood” o máxima verosimilitud (MV), que, según İşbiLen (2023) lo define como un método que utilizamos para estimar los parámetros de un modelo de modo, que los parámetros elegidos maximicen la probabilidad de que el modelo asumido produzca los datos que podemos observar en el mundo real, es decir, este algoritmo parte de un supuesto de que cada clase de cobertura sigan una distribución normal con base a estadística (media y varianza) y que cada pixel de la imagen a la clase tiene mayor posibilidad de pertenecer en función a los datos espectrales y el entrenamiento realizado.

De igual manera todos estos métodos deben de estar soportados por rangos de fiabilidad y de tolerancia, ninguno es perfecto por lo cual se deben evaluar los datos obtenidos para tener certeza sobre los resultados, por lo tanto, uno de los métodos más conocidos es el coeficiente kappa de Cohen, el cual Cohen (1960), lo define como una medida estadística para evaluar el grado de concordancia entre dos evaluadores que clasifican elementos, además, esta medida tiene en cuenta la relación directa que pueda ocurrir por azar.

#### **4.1. Referente normativo y legal**

El marco legal normativo colombiano, que rige el ordenamiento territorial, está compuesto por leyes y decretos ambientales y urbanísticos que establecen las directrices cruciales para la creación de los Esquemas de Ordenamiento Territorial (E.O.T.). En este marco, el análisis y la identificación de las coberturas vegetales son elementos esenciales para fundamentar la planificación del uso del suelo, como se ilustra en la tabla 1.

**Tabla 1***Marco legal Normativo referente*

<b>NORMA</b>	<b>AÑO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Ley 99	1993	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y establece el Ministerio de Ambiente como la autoridad central en políticas de medio ambiente, regulación de recursos naturales, y ordenamiento del territorio. Promueve la conservación de ecosistemas estratégicos en los P.O.T.
Ley 388	1997	Establece los principios y lineamientos para el ordenamiento territorial en Colombia. Define los Planes de Ordenamiento Territorial (P.O.T.) para orientar el desarrollo físico del territorio y regular el uso del suelo en los municipios, con el objetivo de promover el desarrollo sostenible.
Decreto 4002	2004	Reglamenta los artículos de la Ley 388 de 1997, estableciendo que los concejos municipales deben revisar y ajustar periódicamente los P.O.T. para alinearlos con las necesidades actuales del municipio y con políticas de desarrollo y sostenibilidad.
CORINE Land Cover (Gobierno de España (2018))	2004	Metodología adoptada en Colombia para la clasificación estandarizada de las coberturas y usos del suelo. Permite un análisis comparativo a nivel nacional e internacional, siendo clave para identificar cambios significativos en el uso del suelo y planificar acciones de conservación.

Resolución 2090	2014	Emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, define criterios para la gestión de áreas de reserva ambiental y el uso sostenible del suelo en zonas de especial interés ecológico, fortaleciendo la conservación ambiental en planes territoriales.
Ley de Desarrollo Sostenible 1930	2018	Promueve la planificación sostenible del territorio rural para asegurar el aprovechamiento de los recursos naturales de manera sostenible. Establece medidas para prevenir la degradación ambiental y mejorar la gestión del suelo en áreas rurales y de reserva.

*Nota:* En esta tabla se plasman las leyes y decretos que se relacionan al desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia

## 5. Metodología

### 5.1. Enfoque metodológico

El presente trabajo de grado tiene como objetivo principal analizar las coberturas ajustadas a Corine Land Cover en el municipio de Olaya a partir de la aplicación de los algoritmos Random Forest y Máxima Verosimilitud para la identificación y categorización de dichas coberturas. Este insumo cartográfico se propone como herramienta técnica de apoyo para los procesos de planificación territorial sostenible que se adelantan en el marco del Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.).

Para cumplir con este propósito, se ha diseñado una metodología que integra el uso de imágenes satelitales obtenidas de PlanetScope con una resolución espacial de 3 metros, dicho acceso fue adquirido mediante una cuenta enlazada al correo institucional con fines para el desarrollo de esta investigación.

La metodología Corine Land Cover es un inventario pan-europeo de cobertura del suelo con 44 clases, elaborado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), la versión 2018 que proporciona datos temáticos a resolución de 100 m con unidad mínima de mapeo de 25 ha para capas de estado, y 5 ha para capas de cambio. Sin embargo, se advierte que la discriminación de las 44 clases específicas de Nivel 3 solo es viable en zonas homogéneas y extensas, y que las coberturas fragmentadas o lineales (por ejemplo, áreas deportivas o sistemas agroforestales) quedan fuera de la capacidad resolutoria de Planet Scope, Sentinel 2 y Landsat (Bolpagni et al., 2018).

Considerando lo anterior, para este proyecto:

- Se realizará la clasificación de Nivel 1, Nivel 2 y en el caso del nivel 3 será de tipo exploratorio de Corine Land Cover.
- En zonas donde la resolución espacial de PlanetScope permitan una discriminación superior, se propondrán análisis exploratorios de Nivel 3, los cuales se consignarán como resultados indicativos y no oficiales.

Este planteamiento metodológico asegura que se logren satisfactoriamente los objetivos específicos planteados en el trabajo:

- **Aplicar algoritmos de clasificación supervisada** sobre imágenes satelitales de alta resolución espacial, ajustadas al estándar Corine Land Cover.
- **Evaluar el desempeño de dichos algoritmos** mediante métricas de precisión global, por clase y coeficiente Kappa.

- **Diseñar un mapa temático de coberturas ajustado a CLC**, compatible con el Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.) municipal, garantizando su pertinencia como insumo técnico para la toma de decisiones en la gestión territorial.

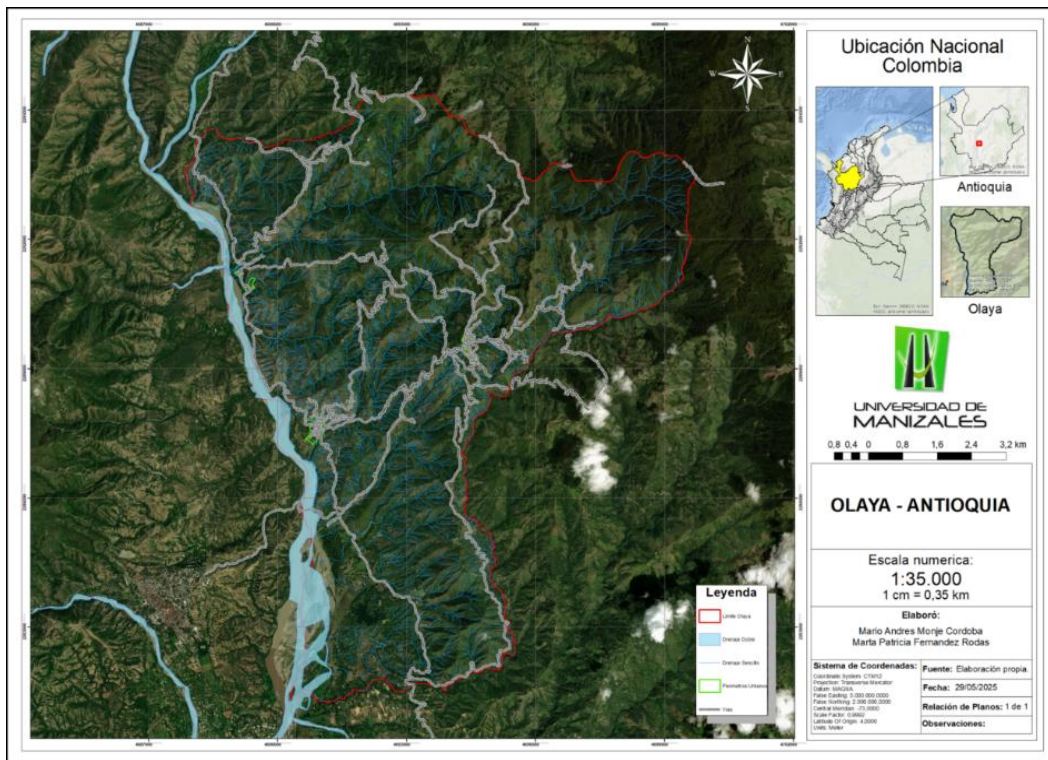
## **5.2. Tipo de estudio**

Al tener en cuenta los diferentes procedimientos y resultados, en este trabajo se define con un enfoque de datos numéricos y medibles, esta investigación se orienta en el enfoque cuantitativo, ya que se apoya en el análisis estadístico de resultados obtenidos a partir del procesamiento de imágenes satelitales, esto por medio de algoritmos de clasificación supervisada. Las interpretaciones que se realizan no dependen de opiniones o percepciones individuales, sino en datos concretos que permiten evaluar la precisión a través de validaciones como matrices de confusión y el coeficiente Kappa, para determinar el grado de concordancia y precisión de los resultados obtenidos.

## **5.3. Área de estudio**

El área de estudio seleccionada está delimitada al municipio de Olaya ubicado en la subregión Occidente del departamento de Antioquia Colombia como se evidencia en la figura 1, con una extensión de 160 km<sup>2</sup>, temperatura media de 26° y una elevación de 500 m. En el cual se busca realizar la clasificación supervisada adaptada a la metodología corine land cover y machine learning, para generar un insumo cartográfico que sirva como insumo ara proporcionar un insumo cartográfico que apoye la planificación territorial sostenible en el contexto del Esquema de Ordenamiento Territorial (E.O.T.).

**Figura 1**  
*Mapa Ubicación Olaya – Antioquia*

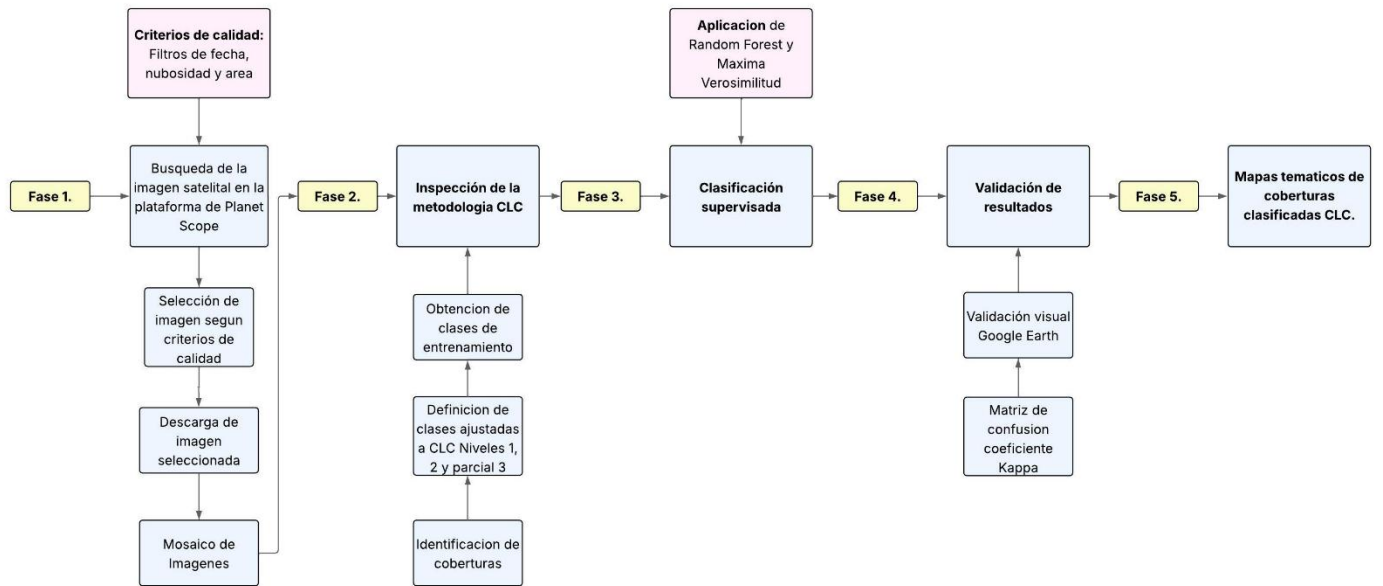


Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. Procedimiento

Esta investigación se realizó a partir de una serie de fases concatenadas y causales plasmadas en la figura 2 para dar cumplimiento a los objetivos enmarcados y descritos por 5 fases:

**Figura 2**  
*Diagrama de fases metodológico.*



Fuente: Elaboración Propia.

### 5.4.1 FASE 1. Obtención de la imagen satelital.

Se buscó la imagen satelital en la plataforma de PlanetScope, tal como se visualiza en la

Figura 3

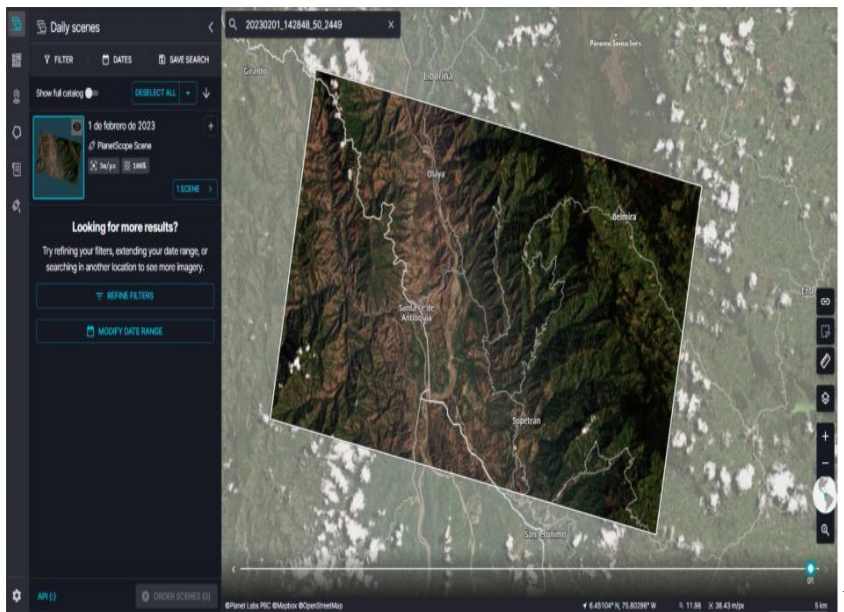
**Figura 3**  
*Plataforma de búsqueda Planet Scope.*



Fuente: Planet Scope.

Una vez en la plataforma de Planet Scope, se procedió a ubicar la zona de interés y filtrar por mes, en donde se selecciona el mes de febrero del año 2023 como se aprecia en la figura 4. Este mes en específico se selecciona ya que la imagen presentó un porcentaje general de nubes del 0.41% y en la zona de estudio fue del 0% , además, para mantener una temporalidad con respecto a la vigencia del Esquema de Ordenamiento Territorial de Olaya Antioquia.

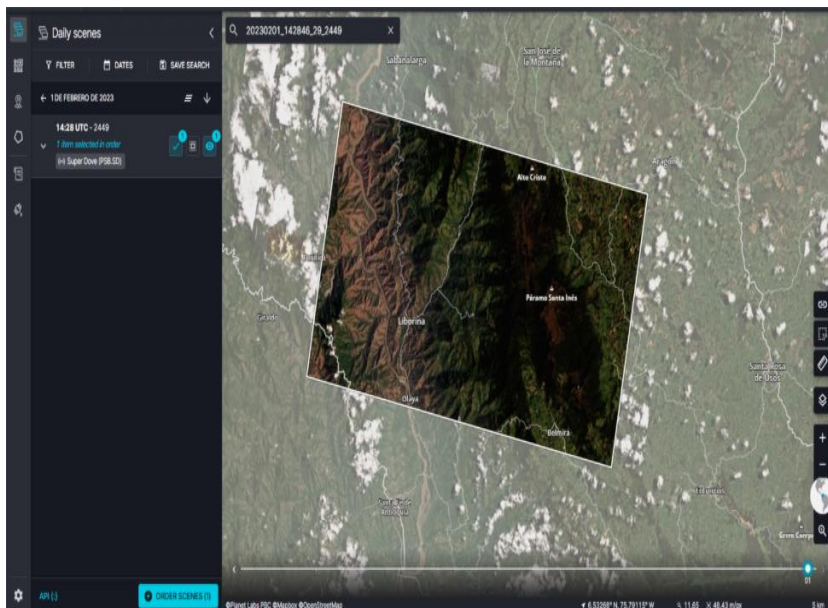
**Figura 4**  
*Selección de imagen*



Fuente: Planet Scope.

Debido a que en la primera imagen escogida no cubre con totalidad el área de estudio, se descargó la imagen de la colindante como ve en la figura 5 para realizar un mosaico y cubrir todo el municipio.

**Figura 5**  
*Descarga de imágenes.*



Fuente: Planet Scope.

Una vez descargadas las imágenes satelitales, se recortaron con respecto al límite municipal del municipio de Olaya Antioquia como se plasma en la figura 6 usando la herramienta *Extract By Mask* de ArcMap 10.8 y se realizó un mosaico combinando dichas imágenes.

**Figura 6**

*Imagen satelital Olaya Antioquia.*



Fuente: Elaboración Propia.

**5.4.2 FASE 2. Inspección de la metodología Corine Land Cover.**

Para la identificación de las coberturas, con ayuda de la imagen satelital de planet scope y la combinación de bandas espectrales para resaltar vegetación, se realiza una inspección visual con

la finalidad de identificar suelo, zonas artificializadas y cuerpos de agua, logrando percibir clases de niveles 1, 2 y 3, esto también siendo corroborado con el satélite de Google Earth. Dichas coberturas se reflejan en la tabla 2:

**Tabla 2**  
*Clases identificadas CLC.*

Nombre	Nivel Corine Land Cover
Territorios Artificializados	1.
Bosques	3.1
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3
Ríos (50m)	5.1.1
Cuerpos de agua artificiales	5.1.4

Fuente: Elaboración propia.

#### **5.4.3 FASE 3. Clasificación supervisada**

Una vez inspeccionada las coberturas que se lograran identificar en la fase anterior, se utilizaron técnicas de clasificación supervisada para categorizar la diferencia de coberturas. Inicialmente se creó un archivo en formato .shp que contiene las muestras de entrenamiento, identificando coberturas como bosques, áreas sin o poca vegetación, cuerpos de agua, zonas artificializadas etc. Se tomaron más de 50 muestras por cada clase identificada para que los algoritmos aprendieran a reconocer correctamente los patrones espectrales asociados a cada tipo de cobertura. Estas muestras fueron fundamentales para entrenar el clasificador, garantizando una representación adecuada de la variabilidad interna de cada clase.

Posteriormente se utilizó el algoritmo de Random Forest y Máxima Verosimilitud, a través de la herramienta de ArcGIS Pro, *Train Trees Classifier* y *Train Maximum Likelihood Classifier*, las cuales funcionan relacionando el archivo de entrenamiento creado previamente y la imagen satelital multibanda, describiendo el proceso como:

#### **5.4.3.1 Datos de entrada necesarios para la ejecución del entrenador de algoritmos:**

Elementos fundamentales requeridos para iniciar el entrenamiento de los algoritmos Random Forest y Máxima Verosimilitud

- Imagen Satelital multibanda.
- Polígonos de entrenamiento en formato .shp, el cual contenga un campo de atributos con el nombre por clase y dicho campo debe nombrarse como **CLASSFIELD**
- Un campo de valor numérico con un numero entero asignado para cada tipo de cobertura nombrado como CLASSVALUE

#### **5.4.3.2 Configuración de los parámetros de entrada para los algoritmos de entrenamiento:**

La siguiente es la ruta que se debe seguir para ejecutar tanto el algoritmo Random Forest como el algoritmo Máxima Verosimilitud:

- Toolboxes > Image Analyst Tools > Classification > Train Random Trees Classifier y Train Maximum Likelihood Classifier.
- Input raster: Imagen satelital de Olaya.
- Training Sample File: seleccionar el archivo Shapefile con las muestras de entrenamiento
- Field Containing Class Labels: seleccionar los valores asignados para cada clase
- Output Classifier File (ecd): Ruta de salida.

Al finaliza se crea un archivo en formato. ecd, que contiene el modelo entrenado para ambos algoritmos.

#### **5.4.3.3 Aplicación del proceso de clasificación supervisada.**

Al culminar la fase de entrenamiento de los algoritmos se procedió a iniciar el proceso de clasificación supervisada utilizando como técnica el algoritmo Random Forest y Máxima Verosimilitud

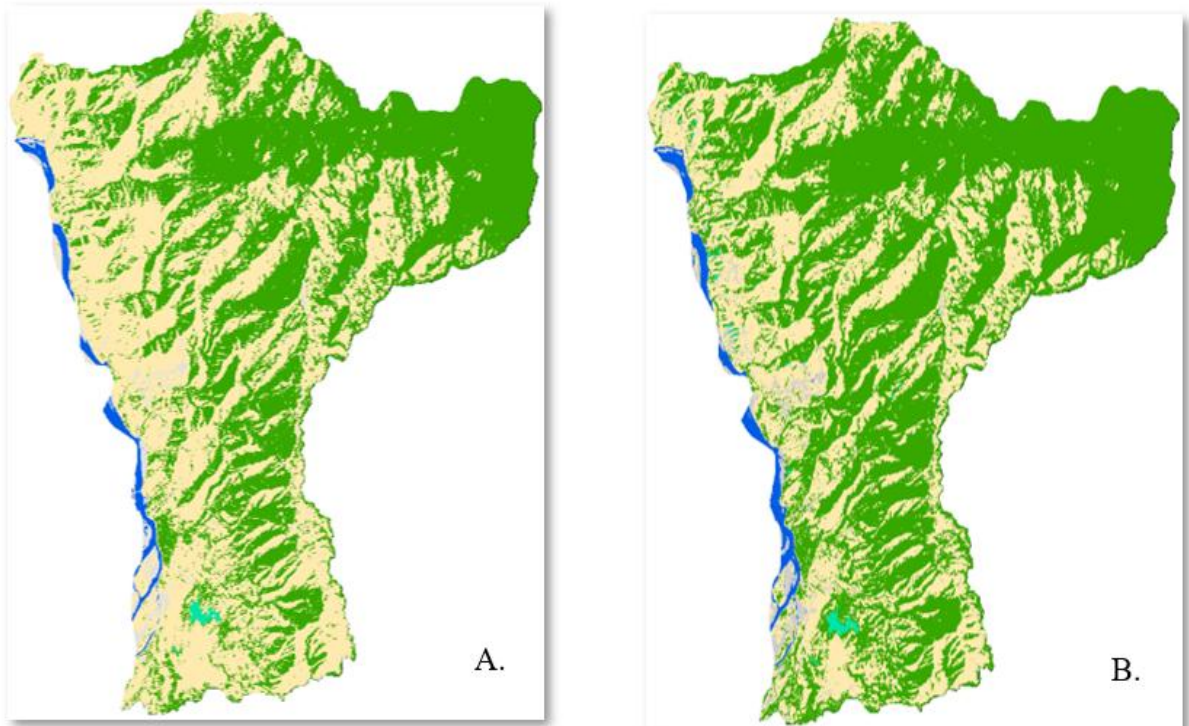
- Abrir la herramienta Classify Raster

- Input Raster: Se selecciona la imagen satelital de Olaya.
- Input ECD file: Se seleccionan los archivos .ecd de los entrenamientos de Random Forest y Maximum Likelihood previamente creado
- Output Classified Raster: Ruta de salida y nombre del raster clasificado por cada algoritmo.

En este proceso se generan los rasters clasificados con los diferentes tipos de coberturas que se identificaron en el archivo de entrenamiento, y por último se aplicó un geoproceso llamado *Majority Filter*, esto con el fin para suavizar el mapa clasificado, eliminando pixeles aislados o que generen ruido, esto para los dos rasters clasificados de la figura 7.

**Figura 7**

*Resultado clasificación supervisada Máxima Verosimilitud (A) y Random Forest (B)*



Fuente: Elaboración Propia.

La imagen A corresponde a la clasificación obtenida del algoritmo de Máxima Verosimilitud mientras que la imagen B es el resultado de la aplicación del algoritmo Random Forest, en donde para ambas imágenes se emplea la misma simbología en la cual el color verde corresponde a 3.1 Bosques, el amarillo Sahara a 3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación, el gris a 1. Territorios artificializados, azul a 5.1.1 Ríos (50m) y en color cian 5.1.4. Cuerpos de agua artificiales.

#### **5.4.4 FASE 4. Validación de resultados**

Para generar los resultados de la matriz de confusión y índice Kappa, a los rasters generados de la clasificación con Random Forest y Máxima Verosimilitud, se les realiza un geoproceto llamado, *Copy Raster*, esto debido a que, en los pixeles resultantes de la clasificación supervisada, no son compatibles con la herramienta de evaluación de precisión en ArcGIS Pro, como *Create Accuracy Assessment Points* y *Compute Confusion Matrix*. Por lo tanto, se hace un posprocesado para poder generar los puntos de muestreo y la matriz de confusión, a los raster

##### **5.4.4.1 Configuración de los parámetros de entrada en la herramienta *Copy Raster*:**

Con la finalidad de poder implementar la herramienta *Copy Raster* se debe seguir la siguiente ruta.

- Toolboxes > Data Management Tools > Raster>Raster Dataset> Copy Raster.
- Input raster: Raster clasificado de ambos algoritmos
- Output Classifier File: Ruta de salida en formato .tiff
- Pixel Type: 8 bit unsigned
- Format: TIFF format

Una vez realizado este proceso para los dos rasters clasificados, se procedió a usar la herramienta de *Create Accuracy Assessment Points*, para generar puntos de muestreo sobre los rasters clasificados.

#### **5.4.4.2 Configuración de los parámetros de entrada en la herramienta *Create Accuracy Assessment Points***

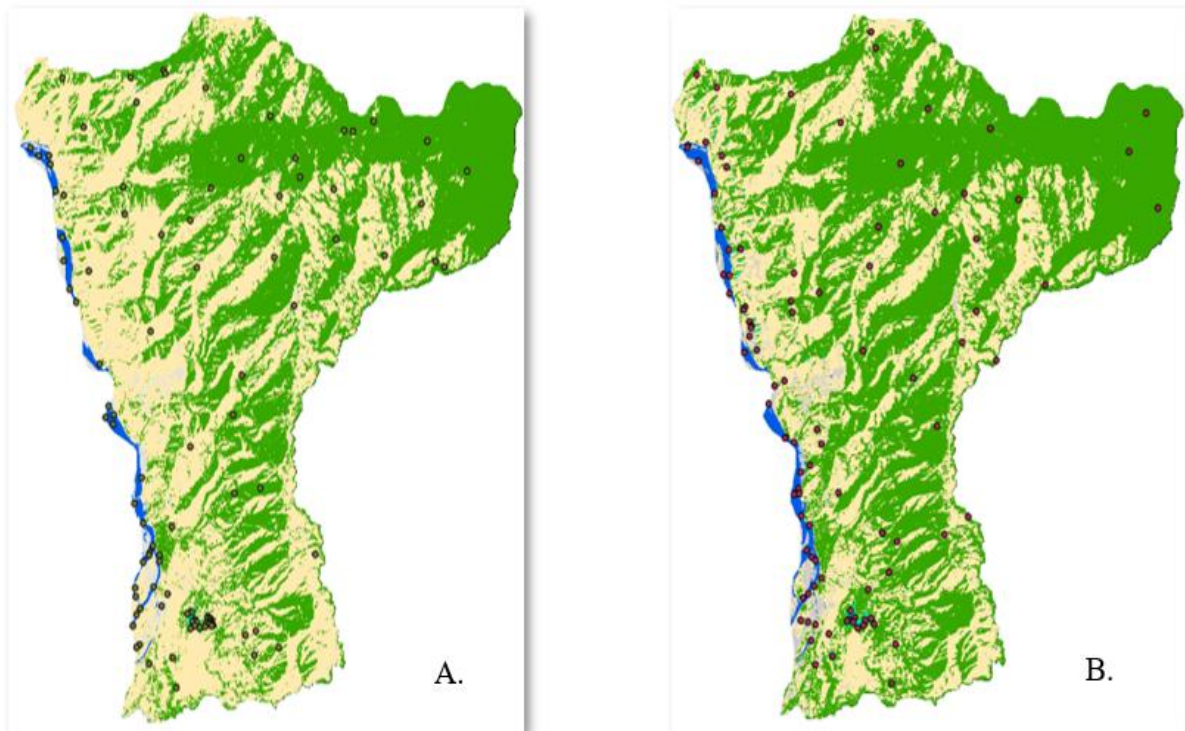
A continuación se presenta la ruta necesaria para implementar la herramienta *Create Accuracy Assessment Points*.

- Toolboxes > Image Analyst Tools > Classification and Pattern Recognition> Create Accuracy Assessment Points.
- Input raster: Raters generados en el paso anterior.
- Output Classifier File: Ruta de salida de las muestras
- Target Field: Classifield
- Number of Random Points: 100 muestras
- Sampling Strategy: Equalized stratified random (esta opción de muestreo para genera la misma cantidad de puntos por clase, sin importar cuántos píxeles tenga cada clase en el ráster).

Una vez generados los puntos de muestreo mediante la herramienta *Create Accuracy Assessment Points* evidenciado en la figura 8, se procedió a verificar manualmente la clase real de cada punto en el campo *GrndTruth* de la tabla de atributos. Esta verificación se realizó utilizando la imagen satelital de planet Scope, la cual permitió identificar visualmente la cobertura terrestre correspondiente a cada punto. Este paso de la identificación e interpretación visual fue fundamental para asignar la clase verdadera del terreno a cada punto de muestra, esto con el fin de garantizar una comparación confiable entre la clasificación automática y la realidad del terreno

## Figura 8

*Puntos de muestreo para las dos clasificaciones.*



Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente mediante la herramienta de *Compute Confusion Matrix* se procede a realizar los cálculos correspondientes a la matriz de confusión e índice kappa, con el fin de evaluar la precisión de los algoritmos de clasificación supervisada.

### **5.4.4.3 Configuración de los parámetros de entrada en la herramienta *Compute Confusion Matrix*.**

Para llevar a cabo la matriz de confusión e índice Kappa se sigue la siguiente ruta.

- Toolboxes > Spatial Analyst Tools > Segmentation and Classification>Compute Confusion Matrix
- Input Accuracy Assessment Points: Se ingresan los Puntos de muestreo anteriormente creados.
- Output Confusión Matrix: Ruta de salida en formato .csv

Estos procesos se replican para cada algoritmo de clasificación con el fin de obtener resultados independientes y comparables. La evaluación de la precisión de las clasificaciones se realizó a través del análisis de matrices de confusión, lo que permitió determinar cuál de los modelos presentó un mejor desempeño en términos de exactitud. Como resultado, se generaron dos archivos en formato *.csv*, que contienen los datos correspondientes a la matriz de confusión y al índice Kappa. Estos valores se presentan en las tablas 4 y 5 en la sección de resultados.

De acuerdo con el valor del índice Kappa de ajuste  $k$ , puede establecerse el nivel de concordancia entre la clasificación obtenida y la realidad del terreno categorizándose como se evidencia en la tabla 3 (Cerde & Villaroel, 2008).

**Tabla 3**  
*Valoración del coeficiente kappa.*

Índice Kappa	Fuerza de la concordancia
0.00	Pobre (Poor)
0.1 - 0.20	Leve (Slight)
0.21 - 0.40	Aceptable (Fair)
0.41 - 0.60	Moderada (Moderate)
0.61 - 0.80	Considerable (Substantial)
0.81 - 1.00	Casi perfecta (Almost perfect)

Fuente: Obtenido de Landis y Koch, 1977.

#### **5.4.5 FASE 5. Mapas temáticos de coberturas CLC**

Una vez realizada la clasificación se procede a realizar los mapas temáticos de los dos algoritmos de clasificación utilizando recursos de libre acceso suministrados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi en la plataforma de Colombia en mapas tales como límites departamentales y municipales, mientras que el basemap se obtuvo de la plataforma SAS Planet.

Adicionalmente se estructura el formato de la salida grafica en donde se le agrega la grilla, el sistema de coordenadas (origen único nacional 9377), la leyenda con su respectiva simbología indicando las clases identificadas de coberturas Corine Land Cover, la escala numérica y grafica del mapa (1:35000) debido al nivel de detalle requerido para el área municipal.

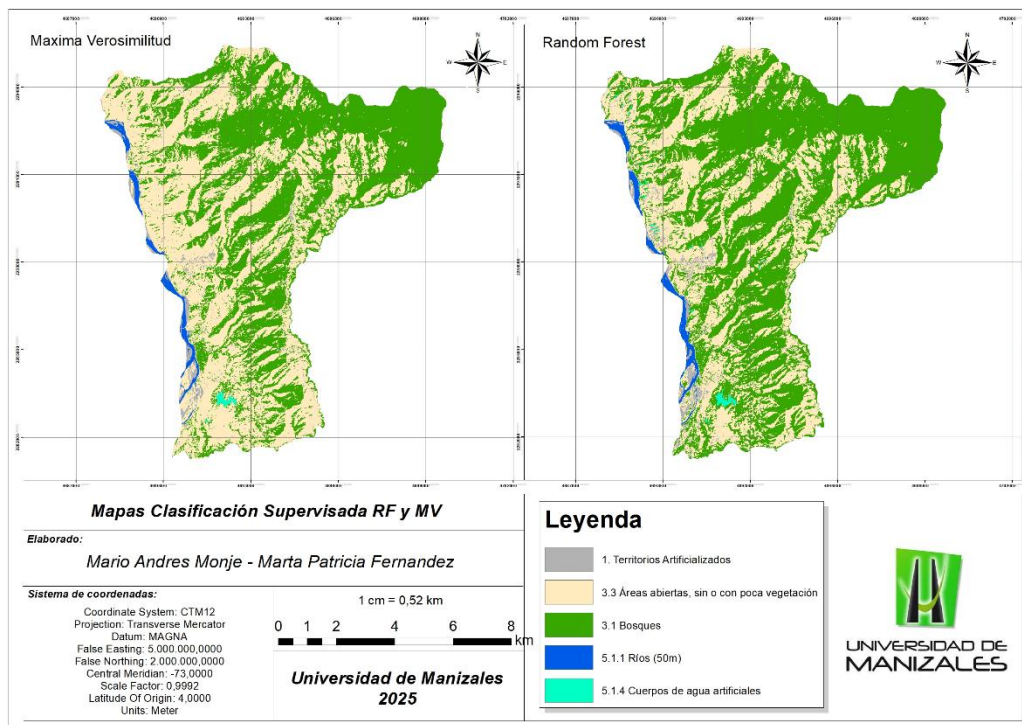
Finalmente se presentan los dos mapas obtenidos uno para cada algoritmo y se define cual de estos es el que más se ajusta a los requerimientos técnicos de mayor precisión el cual será el producto final.

Es importante aclarar que los mapas generados en este trabajo tienen una resolución espacial de 3 m, derivados de imágenes PlanetScope, y corresponden a un ejercicio académico y metodológico. Por lo tanto, no constituyen productos oficiales del IDEAM, los cuales se generan a partir de metodologías institucionales y datos de referencia nacionales.

## **6. Resultados**

Se logra una clasificación supervisada aplicando los algoritmos de Random Forest y Máxima verosimilitud al raster de la zona de estudio plasmada en la figura 9, donde se pudieron identificar y clasificar 5 tipos de coberturas según la metodología Corine Land Cover que corresponden a las condiciones reales del terreno y con ayuda visual de la imagen satelital de Planet Scope de 3 metros de resolución: 1. Territorios Artificializados, 3.1 Bosques, 3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación, 5.1.1 Ríos (50m), 5.1.4 Cuerpos de agua artificiales.

**Figura 9**  
*Mapas de Máxima Verosimilitud y Random Forest*



Cabe resaltar que los productos cartográficos obtenidos en esta investigación presentan una resolución espacial de 3m, correspondiente a imágenes **PlanetScope**. Estos resultados son de carácter **académico** y **metodológico**, enfocado al análisis de coberturas en el municipio de Olaya. Por lo tanto, no corresponden a productos oficiales del IDEAM, los cuales se elaboran bajo protocolos institucionales y con insumos de referencia nacionales como el uso de imágenes satelitales de Landsat y Sentinel, planetscope no se considera como insumo oficial del IDEAM.

Una vez calculadas las matrices de confusión e índice kappa para ambos algoritmos como se evidencia en las tablas 4 y 5 de clasificación supervisada se obtienen que, para la clasificación usando el algoritmo de Random Forest, el índice Kappa es de 0,74 (74%) determinando según la tabla 4. la fuerza de concordancia entre la clasificación supervisada y las condiciones reales del terreno es considerable, debido a que se encuentra entre el rango de 0.61 – 0.80.

A continuación se plasman los datos obtenidos a tras realizar la matriz de confusión y el índice Kappa para el algoritmo Random Forest en donde se analizan como los valores que no pertenecen a la diagonal de datos precisos, suponen errores los cuales para la clase de territorios artificializados son del 50 % distribuidos en 9 datos erróneos identificados como áreas sin o con poca vegetación y un dato como bosque, adicionalmente para los cuerpos de aguas artificiales presenta un 40% de datos erróneos correspondientes 4 de áreas abiertas sin o con poca vegetación y 4 a bosques.

**Tabla 4**  
*Resultados Matriz de confusión y Índice Kappa algoritmo de Random Forest*

Clases	Territorios artificializados	áreas abiertas, sin o con poca vegetación	bosques	Ríos (50 m)	Cuerpos de agua artificiales	Total	Accuracy	Kappa
-Territorios artificializados	10	9	1	0	0	20	0,5	0
-Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	1	18	1	0	0	20	0,9	0
-Bosques	0	1	19	0	0	20	0,95	0
-Ríos (50 m)	0	0	0	20	0	20	1	0
-Cuerpos de agua artificiales	0	4	4	0	12	20	0,6	0
Total	11	32	25	20	12	100	0	0
P_Accuracy	0,909	0,563	0,76	1	1	0	0,79	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0,74

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la clasificación supervisada empleando el algoritmo de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood*), se tiene que el índice Kappa es de 0,81 (81%) determinando según la tabla 5. la fuerza de concordancia entre la clasificación supervisada y las condiciones reales del terreno es casi perfecta, debido a que se encuentra entre el rango de 0.81 – 1.00.

A continuación, se plasman los datos obtenidos a tras realizar la matriz de confusión y el índice Kappa para el algoritmo Máxima Verosimilitud en donde se analizan los valores que no pertenecen a la diagonal de datos precisos, suponen errores los cuales para la clase de territorios artificizados son del 60 % distribuidos en 7 datos erróneos identificados como áreas sin o con poca vegetación y 2 datos como bosques.

**Tabla 5**  
*Resultados Matriz de confusión y Índice Kappa algoritmo de Máxima Verosimilitud.*

Clases	Territorios artificializados	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Bosques	Ríos (50 m)	Cuerpos de agua artificiales	Total	Acc urac y	Kappa
Territorios artificializados	9	7	2	2	0	20	0,4	0
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	0	18	2	0	0	20	0,9	0
Bosques	0	2	18	0	0	20	0,9	0
Ríos (50 m)	0	0	0	20	0	20	1	0
Cuerpos de agua artificiales	0	0	0	0	20	20	1	0
Total	9	27	22	22	20	100	0	0
P_Accuracy	1	0,643	0,818	0,909	1	0	0,85	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0,81

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se determina que el algoritmo que presenta una mayor precisión es la Máxima Verosimilitud según la tabla 6 la cual plasma los resultados resumidos de la matriz de confusión e índices Kappa

**Tabla 6**

*Resultados Matriz de confusión y índice kappa.*

<b>Indicador</b>	<b>Random Forest</b>	<b>Máxima Verosimilitud</b>
<b>Accuracy total</b>	0,79	0,85
<b>Índice Kappa</b>	0,7375	0,81

Respecto a las dificultades encontradas al momento de clasificar se pueden destacar las siguientes:

Uno de los principales problemas en la clasificación supervisada, es la diferenciación entre superficies naturales y artificiales. Esto se manifiesta especialmente en zonas donde los materiales presentan firmas espectrales similares principalmente cuando se presentan territorios modificados bien sea por procesos antrópicos o naturales como lo plantea (Povedo, Bermudez y Gil, 2022), como ocurre con la arena ubicada junto a cuerpos de agua y las áreas artificializadas, tales como viviendas, caminos y otras infraestructuras, esto debido que durante el proceso de clasificación, los algoritmos asignan categorías a partir de la similitud en los valores espectrales de los píxeles, sin embargo, cuando la firma espectral de dos coberturas es prácticamente indiferenciable, como lo que ocurre entre la arena ribereña del río y los territorios artificializados, se generan confusiones que afectan la precisión y fiabilidad de los resultados. Por lo tanto, se puede decir que esto es una limitación a los métodos de clasificación basados únicamente en información espectral, resaltando la necesidad de complementar el análisis con otros enfoques o fuentes de información.

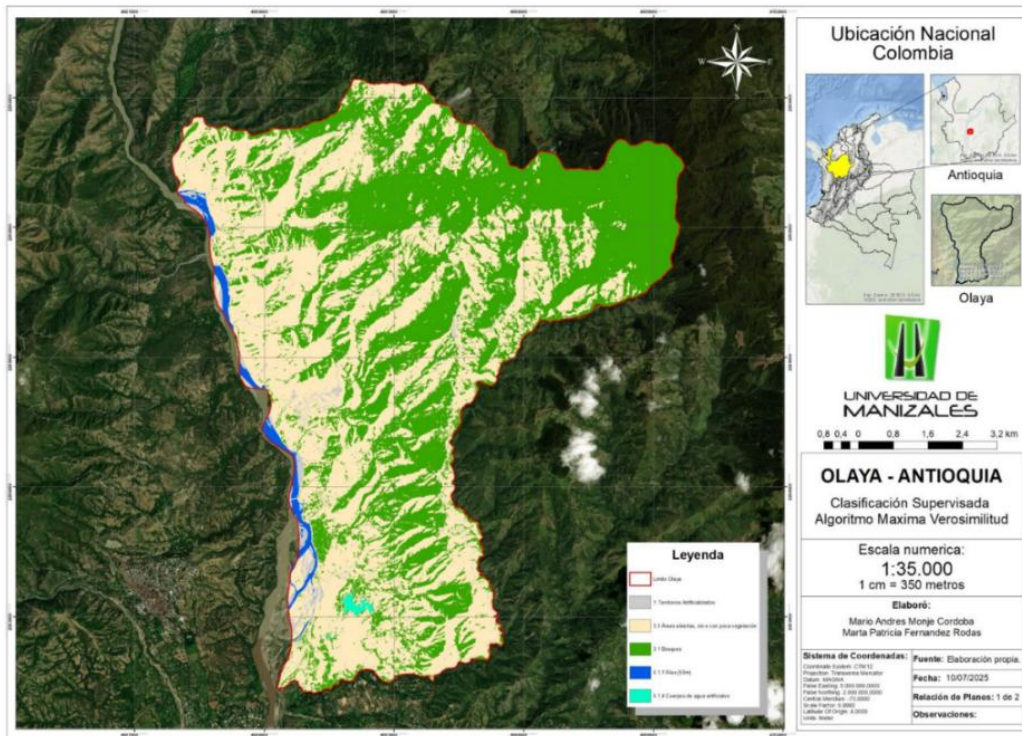
Por otro lado, la clasificación de cuerpos de agua en el algoritmo de Random Forest presenta inconsistencias clasificando estos valores en zonas donde es inexistente, cabe mencionar que para

los dos modelos se realizaron más de 50 muestras de entrenamiento por cada clase, dando como resultado que el algoritmo de Random Forest presentó este inconveniente, que al compararlo con el algoritmo de Máxima Verosimilitud, este último funcionó mucho mejor clasificando casi perfectamente estas coberturas y en los sitios reales del terreno.

Respecto a la precisión general de ambos algoritmos se obtuvo un porcentaje de 79% para Random Forest y 85% para máxima verosimilitud, por lo tanto, este último tuvo una mejor discriminación de clases, más específicamente en coberturas como cuerpos de agua artificiales y ríos, donde se alcanzó una precisión del 100%, esto puede deberse a la distribución homogénea de estas clases ya que el algoritmo entendió perfectamente que este comportamiento se trataba de dichas coberturas. Cabe resaltar y volver a mencionar que ambos algoritmos tuvieron confusiones a la hora de clasificar los territorios artificializados y la arena ribereña del río debido a sus índices espectrales similares, por lo tanto, esto lleva a la necesidad de incorporar datos adicionales o auxiliares, como capas topográficas, imágenes multitemporales o índices espectrales para resolver este problema.

Por lo tanto, el algoritmo que mejor funcionó fue el de máxima verosimilitud, no solo por alcanzar la mayor precisión global e índice Kappa (0,81), sino también por su capacidad para representar estadísticamente las clases de cobertura con mayor fiabilidad con respecto a la realidad del terreno, lo que lo hace una herramienta fuerte para estudios de clasificación supervisada en territorios con características biofísicas claramente diferenciadas, como ocurre en Olaya, Antioquia como y se ilustra en la figura 10.

**Figura 10**  
*Mapa final (Máxima Verosimilitud)*



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, a pesar de que las imágenes de PlanetScope utilizadas presentan una resolución espacial de 3 metros, una de las más altas disponibles comercialmente, se identificaron limitantes a este tipo de resolución debido a que, al momento de diferenciar coberturas con bordes difusos o fragmentados, como lo que ocurre con las áreas artificializadas, zonas ribereñas al río o pequeñas zonas de vegetación secundaria, por lo tanto, la clasificación supervisada alcanzó el mejor rendimiento posible para imágenes con este tipo de resolución, destacando que los resultados obtenidos evidencian un limitante técnico elevado para el nivel de detalle espacial ofrecido por dicha imagen satelital. Sin embargo, para alcanzar una mayor precisión en la identificación de coberturas más complejas o de menor escala, como lo pueden ser la identificación de zonas agrícolas y cultivos, es recomendable usar imágenes de resolución centrimétrica obtenidas por medio de drones, así se podría realizar una clasificación supervisada mucho más detallada.

## 7. Discusión

Los resultados obtenidos en la clasificación supervisada de coberturas del suelo en el municipio de Olaya, Antioquia, mediante los algoritmos de Random Forest y Máxima Verosimilitud ajustados a la metodología Corine Land Cover, evidencian una precisión del 100% para ambos algoritmos en la identificación de la cobertura de ríos, 90 % para coberturas sin o con poca vegetación y para zonas con territorios artificializados presentan una precisión considerablemente baja en la identificación pues ninguno de los algoritmos supero el 50% de exactitud en este apartado, así pues el algoritmo Random Forest presento una mejora del 5% respecto al algoritmo de Máxima Verosimilitud en la identificación bosques sin embargo este ultimo algoritmo presenta una clasificación al 100% de exactitud de zonas con cuerpos de agua artificiales mientras que el Random Forest de únicamente el 60% lo que refleja en términos generales una mayor precisión en la identificación de coberturas por parte del algoritmo de Máxima Verosimilitud.

Así mismo los valores de índice Kappa obtenidos por ambos algoritmos indican un desempeño más que favorable con valores de 0.81 para Máxima Verosimilitud y 0.74 para Random Forest, denotando una concordancia casi perfecta, principalmente para los terrenos que presentaban una elevada homogeneidad de firmas espectrales como lo pueden ser los cuerpos de agua, lo que indica la capacidad de esta herramienta para ser usada en contextos en los que se posean grandes extensiones de terreno independientemente de si son cuerpos hídricos o superficies de suelo.

Por otro lado estas tecnologías presentan una serie de desafíos en su aplicación y estos se evidencian principalmente cuando se toman áreas con condiciones espectrales de mayor complejidad las cuales a su vez presentan una heterogeneidad considerablemente alta en sus coberturas, este desafío se identificó principalmente en el algoritmo Random Forest, por lo que para el municipio de Olaya, el Algoritmo que presenta unos mejores resultados sería el de Máxima

Verosimilitud pues si bien posee confusiones similares estas no se elevan al nivel de las identificadas en el algoritmo Random Forest.

## **8. Conclusiones**

- El uso de la metodología Corine Land Cover adaptada al contexto de Olaya-Antioquia demostró ser una herramienta útil, clara y replicable para la zonificación de nuestro territorio, conociendo e identificando las coberturas presentes en nuestro entorno que aporta un insumo clave para la actualización de instrumentos de planificación territorial.

- Se identificaron limitaciones importantes en la identificación espectral de ciertas coberturas, como la similitud entre territorios artificializados y arenas ribereñas del río, esto evidencia que solamente usar los valores espectrales de las imágenes satelitales puede ser insuficiente en contextos donde las firmas espectrales son prácticamente similares.

- La clasificación supervisada basada en imágenes satelitales, en este caso de PlanetScope con 3 m de resolución espacial (La más alta comercialmente) ofreció una base sólida para la generación de mapas temáticos confiables, que podrían integrarse en los sistemas de información geográfica municipales, destinar recursos y mejorar esta infraestructura para apoyar la toma de decisiones ambientales y de planificación urbana.

- Se concluye que los dos algoritmos son una opción viable para la clasificación supervisada de coberturas en el municipio de Olaya, Antioquia, con resultados satisfactorios respecto a la exactitud general y el índice Kappa. Sin embargo, el algoritmo de Máxima Verosimilitud mostró un mejor desempeño (Kappa = 0,81 (81%)) frente a Random Forest (Kappa = 0,74 (74%)), sugiriendo que, en zonas con clases bien diferenciadas espectralmente, este algoritmo se desempeña mucho mejor.

## 9. Recomendaciones

- Se recomienda integrar y usar imágenes de mayor resolución espacial, como las obtenidas a través de drones (UAV), esto con el fin de tener mayor detalle a la hora de clasificar e identificar coberturas, especialmente en zonas de alta fragmentación o con coberturas espectralmente similares, debido a que las imágenes satelitales de cualquier satélite presentan limitaciones para distinguir coberturas espectralmente iguales o de menor área.
- Se recomienda complementar futuras investigaciones con análisis multitemporales, índices espectrales y validación en campo, lo cual permitiría mejorar la precisión y ampliar el enfoque hacia la detección de cambios o monitoreo ambiental continuo y de igual forma incorporar información complementaria como modelos digitales de elevación (MDE), índices espectrales (NDVI, NDBI, NDWI) y variables topográficas (pendientes, curvas de nivel), lo cual ayudaría a complementar los algoritmos de clasificación al introducir variabilidad ecológica o estructural no capturada por las bandas espectrales de las imágenes satelitales.
- Se recomienda para aumentar la fiabilidad en los datos, realizar validaciones de campo, esto con el fin de reforzar la precisión de los puntos de validación utilizados en la matriz de confusión, especialmente en áreas donde la interpretación visual puede confundirse e inducir a un error.
- Se sugiere probar otros algoritmos de clasificación supervisada, como Support Vector Machines (SVM) o redes neuronales convolucionales (CNN), que han demostrado buen desempeño en estudios similares y pueden ofrecer mejores resultados en coberturas con alta complejidad espectral o espacial.

## Referencias

- Acuerdo Nro. 05 del 2000. (2000,27 de mayo). Alcaldía municipal de Olaya-Antioquia  
[https://olayaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/olayaantioquia/content/files/000353/17615\\_eot-olaya-1.pdf](https://olayaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/olayaantioquia/content/files/000353/17615_eot-olaya-1.pdf)
- Acuerdo Nro. 01 del 2015. (2015,13 de febrero). Alcaldía municipal de Olaya-Antioquia  
[https://olayaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/olayaantioquia/content/files/000353/17616\\_acuerdo-no-001-de-2015-incorporacion-sector-cementerio-a-la-zona-urbana-1.pdf](https://olayaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/olayaantioquia/content/files/000353/17616_acuerdo-no-001-de-2015-incorporacion-sector-cementerio-a-la-zona-urbana-1.pdf)
- Alcaldía de Olaya, Antioquia. (2016). *Acuerdo n. 014 de 2016: Perímetro urbano y expansión urbana, Sucre* [PDF].  
[https://olayaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/olayaantioquia/content/files/000353/17617\\_acuerdo-n-014-de-2016-perimetro-urbano-y-expansion-urbana-sucre-1.pdf](https://olayaantioquia.micolombiadigital.gov.co/sites/olayaantioquia/content/files/000353/17617_acuerdo-n-014-de-2016-perimetro-urbano-y-expansion-urbana-sucre-1.pdf)
- Álvaro, V., López, J., & De Lourdes, M. (2008.). Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones geográficas*  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112008000300005&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112008000300005&script=sci_arttext)
- ArcMap. (s. f.). *¿Qué son los datos ráster?* <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm#:~:text=Los%20r%C3%A1steres%20son%20fotograf%C3%ADas%20a%C3%A9reas,de%20uso%20de%20la%20tierra>.
- Arfa, A., & Minaei, M. (2024). Utilizing multitemporal indices and spectral bands of Sentinel-2 to enhance land use and land cover classification with Random Forest and support vector

machine. *Advances in Space Research*, 74(11), 5580-

5590. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027311772400886X>

Ávila, I., Ortiz, E., Soto, C., Vargas, Y., Aguilar, H., & Miller, C. (2020). Evaluación de cuatro algoritmos de clasificación de imágenes satelitales Landsat-8 y Sentinel-2 para la identificación de cobertura boscosa en paisajes altamente fragmentados en Costa Rica. *Revista de teledetección*, (57), 37-49.

<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/13340>

Cánovas, F., Alonso, F., & Gomariz, F. (2016). Modificación del algoritmo Random Forest para su empleo en clasificación de imágenes de teledetección. En Aplicaciones geotecnológicas para el desarrollo económico sostenible. XVII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. *Universidad de Málaga* 359–

368 [https://www.researchgate.net/publication/304825355\\_Modificacion\\_del\\_algoritmo\\_Random\\_Forest\\_para\\_su\\_empleo\\_en\\_clasificacion\\_de\\_imagenes\\_de\\_teledeteccion](https://www.researchgate.net/publication/304825355_Modificacion_del_algoritmo_Random_Forest_para_su_empleo_en_clasificacion_de_imagenes_de_teledeteccion)

Capote, R. (2016). Análisis multitemporal por medio de clasificación supervisada de imágenes landsat del parque Entre Nubes de la ciudad de Bogotá para identificar corredores ecológicos. *Universidad Militar Nueva Granada*

<https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/ef3d308f-5a66-49f0-b271-e907fe1db3ca/content>

Castellanos, H., Posada, C., Mora, C., Lozano, R., Arévalo, L., Martínez N., Murcia U., Martínez, N., Ceballos, J., Mayorga, N., Riveros, V. (2010). LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA. METODOLOGIA CORINE LAND COVER ADAPTADA PARA COLOMBIA. ESCALA 1:100.000. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.

<https://www.researchgate.net/publication/303960063>

Cerda, J., & Villaroel, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54-58.

doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>

Clerici, N., Valbuena, C. & Posada, J. (2017). Fusion of Sentinel-1A and Sentinel-2A data for land cover mapping: a case study in the lower Magdalena region, Colombia. *Journal of Maps*, 13(2), 718-726.

[https://www.researchgate.net/publication/319653063\\_Fusion\\_of\\_Sentinel-](https://www.researchgate.net/publication/319653063_Fusion_of_Sentinel-)

[1A\\_and\\_Sentinel-](https://www.researchgate.net/publication/319653063_Fusion_of_Sentinel-1A_and_Sentinel-)

[2A\\_data\\_for\\_land\\_cover\\_mapping\\_a\\_case\\_study\\_in\\_the\\_lower\\_Magdalena\\_region\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/319653063_Fusion_of_Sentinel-2A_data_for_land_cover_mapping_a_case_study_in_the_lower_Magdalena_region_Colombia)

Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational And*

*Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

Cohen, W. y Goward, S.(2004). Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing.

*BioScience* 54( 6),535-545.

[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0535:LRIEAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LRIEAO]2.0.CO;2)

CONABIO. (2021). Imágenes de satélite en línea | Biodiversidad Mexicana. *Biodiversidad*

*Mexicana*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/imagenes-satelite>

Cristancho, J. (2017). Comparación de una Clasificación Supervisada para Coberturas Vegetales con PCI Geomatics y QGIS en el Municipio de Cundinamarca. *Universidad Militar*

*Nueva Granada* <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/f71da814-ca06-40c1-826d-c421e684db64/content>

Cuichan, S., Heras, M., Moreno, J. y Quevedo, V. (2024). Pérdida de cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo en la Amazonia ecuatoriana. *Agroecología Global. Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar.* 6 (10), 1-16. <https://doi.org/10.35381/a.g.v6i10.3579>

COMC89 542. (1989, 22 de septiembre). Comisión de las comunidades europeas.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:51989PC0542>

(2016-02-02) Clasificación de la cobertura de la tierra en el suelo rural del municipio de Pupiales – Nariño mediante la aplicación de herramientas SIG. Recuperado de:

<https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/2510> Departamento Administrativo de la Función Pública. (s.f.). *Decreto 1077 de 2015 - Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Gestor Normativo.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>

Da Silva, C. Insaurralde, J. & Cardozo, O. (2014). Cartografía de coberturas del suelo mediante Sensores Remotos, de la ciudad de Resistencia, Argentina (2013). *CONICET* 1-18  
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/21825>

David, G. (2017). Clasificación de uso y cobertura del suelo Corine Land Cover y elaboración de cartografía temática como sustentación a él plan general de ordenación forestal (PGOF) y a la fase de diagnóstico del plan de ordenación de cuencas Rio Loro y Rio Las Ceibas en el departamento de Huila. *Universidad Distrital* <https://repository.udistrital.edu.co/items/bde1f169-b313-44bf-a701-e1309a644bf8>

Decreto 4002 de 2004. (2004, 30 de noviembre). Presidencia de la república. Diario oficial. N. 45749. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1879008>

Decreto 4065 de 2008.(2008,24 de octubre). Presidencia de la república. Diario oficial. N. 47152.

<https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=1879127>

Documentos de interés - *E.O.T.*. (s. f.). <http://www.olaya-antioquia.gov.co/tema/documentos-de-interes>

Espadas, C., Reyes, C. & Carrillo, G. (2021). La expansión urbana de Mérida, la de Yucatán, México y su contribución al cambio climático. *El Herbario CICY*, 13, 232–238.

[https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde\\_Herbario/2021/2021-12-02-](https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2021/2021-12-02-Espadas-et-al.-La-expansion-urbana-de-Merida.pdf)

[Espadas-et-al.-La-expansion-urbana-de-Merida.pdf](https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2021/2021-12-02-Espadas-et-al.-La-expansion-urbana-de-Merida.pdf)

Giraldo, G. (2018). Análisis multitemporal por teledetección del cambio de coberturas en las veredas Pantanillo y xLas Palmas del municipio de Envigado en el periodo comprendido entre los años 1997 y 2016. Doctoral dissertation, *Universidad Católica de Manizales*.

[https://repositorio.ucm.edu.co/server/api/core/bitstreams/cce5daed-8243-48ce-8478-](https://repositorio.ucm.edu.co/server/api/core/bitstreams/cce5daed-8243-48ce-8478-3912e40fb1c0/content)

[3912e40fb1c0/content](https://repositorio.ucm.edu.co/server/api/core/bitstreams/cce5daed-8243-48ce-8478-3912e40fb1c0/content)

Gobernación de Antioquia. (2021). *Ficha municipal estadística 2020-2021: Olaya*.

<https://www.antioquiadatos.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/Fichas-municipales-estadisticas2021/OCCIDENTE/Olaya.pdf>

Gobierno de España. (2018). CORINE Land Cover. *Instituto Geográfico Nacional* 1-12.

[https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa\\_Marco\\_Copernicus\\_User\\_Uptake/9\\_Corine\\_Land\\_Cover.pdf](https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/9_Corine_Land_Cover.pdf)

Gómez, C., White, J., & Wulder, M. (2020). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 296–314. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.019>

Gómez, S., Pino, E., Huayna, G., Espinoza, J., Acosta, K., & Cabrera, F. (2024). Machine

Learning para la Clasificación y Análisis de los Índices de Biomasa y su relación con el

Cambio Climático, Desierto de Atacama. *Manglar*, 21(1), 95–106.

<https://doi.org/10.57188/manglar.2024.010>

Gutiérrez, Y. (2011). Implementación de la metodología Corine Land Cover para generación de la capa geográfica de coberturas de la tierra del año 2019, escala 1: 25000, a partir de imágenes satelitales Planet Scope para la jurisdicción de Corpochivor. *Universidad Distrital* <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/24817826-90c6-43c1-adcd-9846f481cb90/content>

IDEAM, et al (2007). Metodología Corine land Cover.

<https://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>.

Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.(2006). LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA. *Geoenseñanza* 11(1), 107-116

<https://www.redalyc.org/pdf/360/36012424010.pdf>

İşbiLen, E. (2023, 12 abril). What is Maximum Likelihood Estimation (MLE)? *Built In*.

<https://builtin.com/data-science/maximum-likelihood-estimation>

Kulkarni, A. & Lowe, B. (2016). Random Forest algorithm for land cover classification. *Journal of Computing Sciences in Colleges*, 31(6), 17–24.

[https://scholarworks.uttyler.edu/context/compsci\\_fac/article/1002/viewcontent/1458195438\\_17\\_03\\_2016.pdf](https://scholarworks.uttyler.edu/context/compsci_fac/article/1002/viewcontent/1458195438_17_03_2016.pdf)

Landis, J., & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data.

*Biometrics*, 33(1), 159–174.

Leon, J., Medina, R., Ovalle, D. (2021). Vista de Mapa de coberturas del suelo utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat-8 del municipio de Covarachía –

Colombia.Hashtag. *Revista CUN* (19),8-27

<https://revistas.cun.edu.co/index.php/hashtag/article/view/930/634>

Ley 388 de 1997.(1997,18 de julio). Congreso de la república de Colombia. Diario oficial. N. 43091. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1879127>

Ley 99 de 1993.(1993,22 de diciembre). Congreso de la república de Colombia. Diario oficial. N. 41146. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1635523>

Ley 1930 de 2018.(2018,27 de julio).Congreso de la republica de Colombia. Diario oficial. N. 50.667. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30035750>

Lizarraga, D. (2019). Detección de cambios multitemporal en coberturas de uso del suelo mediante herramientas SIG y teledetección [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de La Plata]. *SEDICI Repositorio de la UNLP*.  
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/111198>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Guía metodológica para la elaboración de planes de trabajo de cobertura vegetal.1-48. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Guia-Metodologica-PT-Cobertura-Vegetal.pdf>

Minitab. (s. f.). Estadísticos kappa y coeficientes de Kendall, LLC. *All Rights Reserved*. 2024.  
<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/attribute-agreement-analysis/kappa-statistics-and-kendall-s-coefficients/>

Naciones Unidas. (2021, 23 noviembre). Las ciudades, “causa y solución” del cambio climático *Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462322>

Nolasco, M., Willington, E. & Bocco, M. (2014). Clasificación del uso de suelo en agricultura a partir de series temporales de imágenes LANDSAT.*SEDICI* 64-73  
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/41984>

- Perea-A., Vaquiro, J., Rodríguez, J.(s.f.). Determinación de la cobertura y uso del suelo utilizando RapidEye en el Parque Nacional Natural Los Nevados y su zona amortiguadora en Colombia. *Revista de ciencias ambientales* (52)2 <http://dx.doi.org/10.15359/rca.56/2.8>
- Poveda-Y., Bermúdez, M., Gil, P.(2022). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de geología* (44)2, 51-72 <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>
- Portela, D., Pedroza, P., Villamil, J., & Cardona, M. (2020). Cobertura del suelo bajo metodología Corine Land Cover para el bosque de Galilea y su área de influencia, Tolima, Colombia. *UD y la geomática*, (15). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/UDGeo/article/view/15256/15549>
- Ramírez, J. A. (2018). Territorio y gestión pública. A propósito del ordenamiento territorial en Colombia. *Ágora U.S.B.*, 18(2), 426–442. <https://www.scielo.org.co/pdf/agor/v18n2/1657-8031-agor-18-02-426.pdf>
- Resolución 2090 de 2014 -. (2021, 29 octubre). Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-2090-de-2014/>
- Richards, J. (2013). Remote sensing digital image analysis: An introduction (5th ed.). *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- Rico, M. (2008). Ley 388 de 1997: una década de fortalecimiento legal del ordenamiento ilegal. *ACE Arquitectura Ciudad Y Entorno*. <https://doi.org/10.5821/ace.v3i7.2454>
- Rösch, M., Sonnenschein, R., Buchelt, S., & Ullmann, T. (2022). *Comparing PlanetScope and Sentinel-2 imagery for mapping mountain pines in the Sarntal Alps, Italy*. Remote

Sensing. *Universidad Politecnica de Catalunya* 14(13),

3190. <https://pdfs.semanticscholar.org/68fd/e9bb71d9fcfeec6d673e7297b31a33eedd1b.pdf>

Rodríguez, C. y Benavides, H. (2014). Proyecto AXILIUM cambios en la cobertura del suelo en la cuenca del rio Combeima Tolima-Colombia. *Ridum Universidad de Manizales* <https://ridum.umanizales.edu.co/items/fed0b9c8-2279-479b-b527-c6dc75980e44>

Román, Y., & Farelo, J. (2018). Retos ambientales para los planes de ordenamiento territorial modernos o de segunda generación: el caso de los municipios intermedios de Colombia. *Revista NODO*, 18(2), 426–443. <https://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/795>

Romero, F. (2005). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Civilizar Universidad Sergio Arboleda* 5 (9),1-35. <http://dx.doi.org/10.22518/16578953.701>

Rujoiu, M., & Mihai, B. (2016). Mapping land cover using remote sensing data and GIS techniques: A case study of Prahova Subcarpathians. *Procedia Environmental Sciences* 32, 244-255. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616001626>

Rujoiu M., & Mihai, B (2020). Land cover classification accuracy assessment using Maximum Likelihood and Support Vector Machine classifiers in a semi-urban area. *Journal of Environmental Geography*, 13(1–2), 11–20. <https://doi.org/10.2478/jengeo-2020-0002>

Sanchez, B.(2018). La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión. *Revista científica Universidad Distrital Francisco José de Caldas* 1(33),243-253. <https://doi.org/10.14483/23448350.13370>

Supervised classification. (2015). En ScienceDirect Topics: Earth and Planetary Sciences.

*Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/supervised-classification>

Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Shahfahad, N., Pal, S., Liou, Y., & Rahman, A. (2020).

Land-Use Land-Cover Classification by Machine Learning Classifiers for Satellite Observations—A review. *Remote Sensing*, 12(7), 1135. <https://doi.org/10.3390/rs12071135>

Tobar, R., Gao, Y., Mas, J., & Cambrón, V. (2023). Classification of land use and land cover through machine learning algorithms: a literature review. *Revista de Teledetección*, (62), 1–19. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19014>

Ulbricht, K., Teotia, H. & Civco, D.(1993). Supervised classification to land cover mapping in semi-arid environment of NE-Brazil using Landsat-TM and SPOT data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(B3), 821–821.

[https://isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part7/821\\_XXIX-part7.pdf](https://isprs.org/proceedings/XXIX/congress/part7/821_XXIX-part7.pdf)

Urquia, J. E. (2018). Comparación de métodos de clasificación supervisada y no supervisada entre paquetes de procesamiento digital de imágenes. *Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE)*.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57416068/CLASIFICACION\\_SUPERVISADA\\_Y\\_NO\\_SUPERVISADA\\_ENTRE\\_SOFTWARES-libre.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57416068/CLASIFICACION_SUPERVISADA_Y_NO_SUPERVISADA_ENTRE_SOFTWARES-libre.pdf)

Vargas, D., Bernal, P., Leal, J., & Quimbayo, M.(2020). Cobertura del suelo bajo metodología Corine Land Cover para el bosque de Galilea y su área de influencia, Tolima. *Colombia. UD y la Geomática*, (15), 16–24.

[https://www.researchgate.net/publication/344260569\\_Cobertura\\_del\\_suelo\\_bajo\\_metodol](https://www.researchgate.net/publication/344260569_Cobertura_del_suelo_bajo_metodol)

ogia\_Corine\_Land\_Cover\_para\_el\_bosque\_de\_Galilea\_y\_su\_area\_de\_influencia\_Tolima  
\_Colombia

Zhang, X., Zhou, T., Zhang, Z., Gong, J., & Zhu, Z. (2020). A new approach for multi-sensor image fusion based on convolutional neural networks. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS XLIII-B3-2020, 983–988. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-983-2020>