

ENFOQUE ESPACIAL PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE ÁREAS DE CULTIVO. CASO DE ESTUDIO: TUNJA, BOYACÁ

Paula Andrea Cardona Velásquez <pcardonav@unal.edu.co> - Ingeniera Catastral y Geodesta

Jorge Esteban Rojas Toro <jorojasto@unal.edu.co> - Ingeniero Ambiental

Paola Andrea Ospina Sanchez <pospinas@unal.edu.co> - Ingeniera Agronómica

Resumen

La evaluación de la aptitud agrícola en el municipio de Tunja, Boyacá, es esencial para el desarrollo sostenible del territorio y el uso eficiente del suelo. Este estudio implementa un enfoque geoespacial utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y programación en Python para identificar áreas aptas para la producción agrícola. Se consideraron restricciones normativas y técnicas, como pendientes superiores a 45°, áreas protegidas, cuerpos de agua e infraestructura vial, además de limitantes y condicionantes como uso potencial del suelo, suelos y áreas forestales productoras. Los resultados muestran que el 17.87% del área rural es ideal para la actividad agrícola sin restricciones, mientras que un 38.42% presenta condicionantes que requieren manejo especial y un 43.70% no es apto para la agricultura. La metodología desarrollada facilita la planificación territorial, permitiendo una gestión informada de los recursos agrícolas en el municipio.

Palabras clave: aptitud agrícola, SIG, Python, análisis espacial, planificación territorial.

Abstract

The assessment of agricultural suitability in the municipality of Tunja, Boyacá, is essential for sustainable territorial development and efficient land use. This study employs a geospatial approach using Geographic Information Systems (GIS) and Python programming to identify suitable areas for agricultural production. Normative and technical restrictions, such as slopes exceeding 45°, protected areas, water bodies, and road infrastructure, were considered, along with limiting and conditioning factors such as potential land use and sensitive ecosystems. The results indicate that 17.87% of the rural area is ideal for unrestricted agricultural activity, 38.42% has constraints requiring special management, and 43.70% is unsuitable for agriculture. The methodology developed facilitates territorial planning, enabling informed management of agricultural resources in the municipality.

Keywords: agricultural suitability, GIS, Python, spatial analysis, territorial planning.

1. INTRODUCCIÓN

La planificación y gestión sostenible de los territorios rurales son fundamentales para garantizar la seguridad alimentaria, promover el desarrollo agrícola y enfrentar los desafíos del cambio climático. Es en este contexto que la evaluación de tierras toma un papel relevante en la planificación de su uso y propone como objetivos sistemas de producción

que sean apropiados a su contexto, es decir, ambientalmente aceptables, socialmente viables y sostenibles en el mediano y largo plazo. (Corrales et al., 2018)

Para la evaluación de tierras se han desarrollado diversas metodologías permitiendo identificar áreas con potencialidades y limitaciones específicas para actividades agropecuarias; las cuales, hacen uso de la integración de criterios biofísicos, socioeconómicos y ambientales. Uno de los primeros modelos multicriterio de evaluación de tierras, fue propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1997 el cual divide la superficie terrestre en unidades más pequeñas con características similares en términos de aptitud de tierras, producción potencial e impacto ambiental. (Food and Agriculture Organization - FAO, 1997)

A nivel nacional, el sector agro tiene una amplia historia, quizás de los mayores esfuerzos por modernizar el agro en Colombia se dio en el año de 1962 con la creación del Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, no obstante, no fue sino hasta muchos años después que la disponibilidad de la información permitió realizar análisis de esta índole a nivel nacional; en cabeza de la Unidad de Planificación Rural - UPRA, quienes en el 2013 en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia, propusieron una metodología a escala 1:100.000 que incluye criterios biofísicos, sociales, económicos y ambientales validando dicha metodología en municipios de los departamentos del Cauca y Tolima, mediante talleres de socialización y ajustes basados en los resultados obtenidos. (Agropecuaria, 2013). Ya en el 2019, la UPRA presentó una segunda versión de esta metodología con base en la información recogida durante el desarrollo del primer ejercicio. (Corrales et al., 2018)

El uso e implementación de estos modelos de evaluación territorial, involucra el manejo e interpretación de información espacial, es por ello, que el manejo de los Sistemas de Información Geográfica - SIG se vuelve un requisito fundamental para la evaluación de tierras, pues todas estas metodologías los involucran en algún punto. (Corrales et al., 2018).

En el uso de los SIG la capacidad de procesamiento y la disponibilidad de datos ha aumentado, de tal manera que el conjunto de habilidades depende cada vez más de la ciencia de datos y la programación. (Bowlick et al., 2020). Autores como Bowling (2020) han adoptado el término GIScientist, expresando esa inmersión del mundo de la ciencia de datos sobre los SIG que hoy día brinda la capacidad de mediante grandes capacidad computacionales y de uso de datos espaciales, crear visualizaciones y simulaciones que permitan representar conceptos y modelos cada vez más complejos y fiables a la hora de realizar análisis espaciales de algún fenómeno. (Bowlick et al., 2020)

Python es uno de los lenguajes más utilizados en el análisis espacial debido a su popularidad y amplia variedad de librerías especializadas (Etherington, 2011). Entre ellas, GeoPandas destaca como una herramienta de código abierto basada en pandas, que facilita el manejo y análisis de datos espaciales (GeoPandas 1.0.1, 2013).

Autores como Conrad et al., (2015); Dixon, (2015); Etherington, (2011) y Muenchow et al., (2019); han explicado ampliamente el funcionamiento e integración de librerías y paquetes de Python en el análisis espacial y generación de datos espaciales.

La integración de herramientas de programación a un análisis para la zonificación y evaluación de tierras es de gran utilidad en un contexto donde el país se encuentra en un

proceso histórico de transformación social del conflicto armado interno, pues la restitución de tierras fértiles a víctimas del conflicto es muy relevante para el fin del conflicto armado en Colombia. (Wiig & García-Reyes, 2020). Una herramienta de este tipo permitiría integrar y procesar grandes volúmenes de datos espaciales, como información climática, edáfica, topográfica, etc., para evaluar la aptitud agrícola de manera precisa y rápida; por otra parte, la implementación de procesos automatizados en Python optimiza el desarrollo de procesos complejos.

El presente proyecto busca implementar un modelo de análisis espacial de código abierto en Python para evaluar las zonas rurales sin restricciones, limitantes y/o condicionantes de la zona rural del municipio de Tunja - Boyacá, utilizando operaciones espaciales con datos del documento de ordenamiento territorial, biofísicos, y ambientales procesados en un entorno SIG.

2. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo un análisis para identificar las zonas sin restricciones, limitantes y/o condicionantes en el área rural del municipio de Tunja, ubicado en el departamento de Boyacá; con el fin de analizar y delimitar aquellas zonas rurales libres de impedimentos para usos agrícolas. Se integraron y procesaron diversas fuentes de datos espaciales en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el lenguaje de programación Python (*figura 1*).

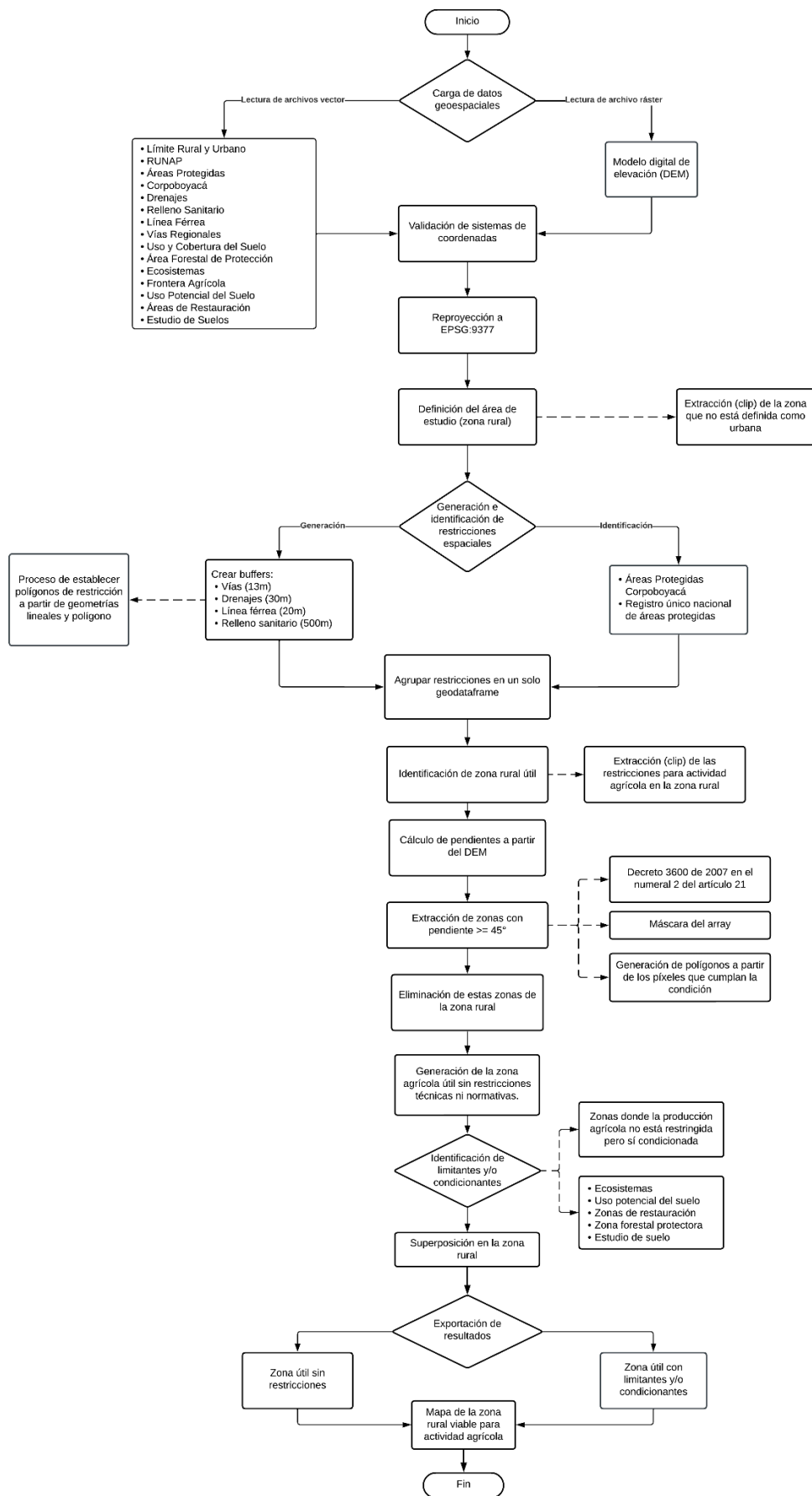


Figura 1. Diagrama de Flujo Metodología

2.1. Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la zona rural del municipio de Tunja, Boyacá, Colombia (**figura 1**). Para definir esta área, se utilizó el límite municipal extraído de los datos abiertos dispuestos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. Posteriormente, se eliminó el área urbana delimitada por el documento de Ordenamiento Territorial disponible en la página de la Alcaldía Municipal de Tunja, estableciendo así el área rural.

Tunja, la capital del departamento de Boyacá, se encuentra ubicada en la Provincia Centro, sobre la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, a unos 130 kilómetros al noreste de Bogotá. Este municipio tiene una extensión total de 121,4 km², de los cuales 19,8 km² corresponden al área urbana y 101,7 km² al área rural. La cabecera municipal está situada a una altitud de 2.782 m.s.n.m. y cuenta con un clima frío moderado, con una temperatura promedio de 13°C.

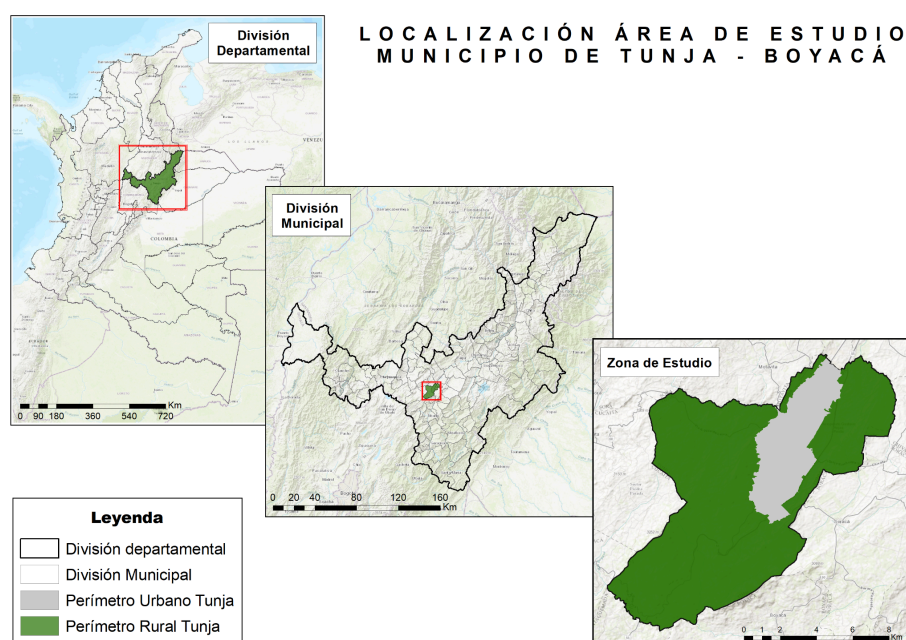


Figura 2. Área de Estudio. Tunja, Boyacá.

2.2. Datos Utilizados

Se emplearon diversas fuentes de información geoespacial, tanto vectoriales como ráster (**tabla 1**). La información recopilada se clasificó en dos categorías principales: restricciones y limitantes y/o condicionantes, como se observa a continuación.

Tabla 1. Datos objeto de análisis y procesamiento

No.	Dato	Fuente	Clasificación
1	Límite Rural - Tunja Boyacá	Colombia en Mapas - IGAC	Límite área de estudio
2	Límite Urbano Tunja - Boyacá	POT Tunja, Boyacá	Restricción

No.	Dato	Fuente	Clasificación
3	Registro Único Nacional de Áreas Protegidas - RUNAP	Parques Nacionales Naturales de Colombia - PNN	Restricción
4	Áreas Protegidas Corpoboyacá	POT Tunja, Boyacá - Corpoboyacá	Restricción
5	Drenajes	POT Tunja, Boyacá	Restricción
6	Relleno Sanitario Parque Ambiental Pírgua	POT Tunja, Boyacá	Restricción
7	Línea Férrea	POT Tunja, Boyacá	Restricción
8	Vías Regionales	POT Tunja, Boyacá	Restricción
9	Uso y Cobertura del Suelo	POT Tunja, Boyacá	Restricción
10	Área Forestal de Protección	POT Tunja, Boyacá	Restricción
11	Modelo Digital de Elevación - DEM	Colombia en Mapas - IGAC	Restricción
12	Ecosistemas	IDEAM	Limitante y/o Condicionante
13	Frontera Agrícola	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA	Limitante y/o Condicionante
14	Uso Potencial del Suelo	POT Tunja, Boyacá	Limitante y/o Condicionante
15	Áreas de Restauración	POT Tunja, Boyacá	Limitante y/o Condicionante
16	Estudio de Suelos (Boyacá)	Colombia en Mapas - IGAC	Limitante y/o Condicionante

2.3. Procesamiento de Datos

El análisis y procesamiento de los datos se llevó a cabo en tres fases principales:

- 2.3.1. **Estandarización de los datos:** Se unificó el sistema de referencia espacial a Origen Único Nacional EPSG:9377 y se adaptaron los datos a formatos compatibles para asegurar una integración adecuada en el entorno SIG.
- 2.3.2. **Clasificación y procesamiento de datos:** Se establecieron diversos “buffers” espaciales alrededor de cuerpos de agua, vías regionales y vías férreas, así como, la incorporación de áreas de protección y de uso especial como el relleno sanitario.
- 2.3.3. **Identificación de Zonas sin Restricciones:** Se procesaron capas adicionales para identificar áreas libres de restricciones, condicionantes y/o limitantes, mediante operaciones de superposición espacial y análisis de exclusión. Las zonas resultantes corresponden a aquellas que no presentan limitaciones para el uso productivo.

2.4. Generación del Mapa Final de Zonas Sin Restricciones

Para la delimitación de las zonas sin restricciones en el área rural seleccionada, se integraron las diferentes capas de datos mediante operaciones algebraicas ráster y análisis de superposición y unión espacial. Este proceso permitió identificar y cartografiar áreas que no presentan restricciones, limitantes o condicionantes significativos.

El producto final de este análisis fue un mapa que representa la distribución espacial de las zonas libres de restricciones en la zona rural del municipio de Tunja. Estas áreas fueron clasificadas según su idoneidad para distintos usos productivos, incluyendo actividades agrícolas, forestales o de conservación.

La visualización de los resultados se realizó a través de la generación de mapas estáticos utilizando *matplotlib* y *geopandas*, y mapas interactivos desarrollados con *folium*. Todo el código fuente, los datos utilizados y los resultados obtenidos se almacenaron en un repositorio en GitHub, garantizando la trazabilidad, replicabilidad y acceso público a la información del proyecto.

METODOLOGÍA

El presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de identificar las zonas rurales sin restricciones, limitantes y/o condicionantes en el municipio de Tunja, Boyacá, con el fin de delimitar áreas viables para actividades agrícolas. Para ello, se realizó un análisis espacial integrando diversas fuentes de datos geoespaciales, aplicando técnicas de procesamiento mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y utilizando el lenguaje de programación Python.

1. Carga de datos geoespaciales

El proceso se inicia con la recopilación y carga de los datos espaciales en formato vectorial y ráster (figura 1). La información utilizada incluye límites territoriales, áreas protegidas, drenajes, infraestructura vial y datos de cobertura del suelo. Para el procesamiento, se emplearon los datos de la tabla 1, utilizando las librerías *geopandas*, *rasterio* y *pandas* en Python.

2. Validación y reproyección de los datos

Antes de realizar cualquier análisis espacial, se validó que todas las capas compartieran el mismo sistema de coordenadas. Se verificó el sistema de referencia espacial (CRS) de cada capa y se realizó la reproyección a **EPSG:9377** (Origen Único Nacional de Colombia) para asegurar una correcta integración en el análisis.

3. Definición del área de estudio (Zona Rural)

Para establecer el área de estudio, se realizó la diferenciación entre zona urbana y zona rural:

- Se extrajo el límite municipal del IGAC y se superpuso con la capa de límite urbano del POT Tunja.
- Se utilizó una operación de diferencia espacial (`overlay(difference)`) para obtener la zona rural excluyendo el área urbana.

4. Generación e identificación de restricciones espaciales

En esta etapa se diferenciaron dos tipos de restricciones:

- **Generadas:** Se crearon mediante procesos espaciales, como buffers.
- **Identificadas:** Se extrajeron de bases de datos existentes.

4.1 Generación de restricciones espaciales

Se establecieron polígonos de restricción a partir de geometrías lineales y poligonales, generando buffers para representar zonas de exclusión alrededor de ciertos elementos:

- **Vías:** Se generó un buffer de **13 metros** para considerar el área de influencia de la infraestructura vial.
- **Drenajes:** Se creó un buffer de **30 metros** basado en la normativa ambiental vigente.
- **Línea férrea:** Se estableció un buffer de **20 metros** para restringir áreas cercanas a la infraestructura ferroviaria.
- **Relleno sanitario:** Se aplicó un buffer de **500 metros** para evitar la proximidad a esta infraestructura.

4.2 Identificación de restricciones espaciales existentes

Se integraron capas con información de restricciones ambientales y territoriales predefinidas, tales como:

- **Áreas protegidas** (RUNAP y Corpoboyacá).
- **Registro Nacional de Áreas Protegidas.**

Todas las restricciones fueron combinadas en un único GeoDataFrame mediante la operación `dissolve()` para facilitar su manejo y análisis.

5. Identificación de la zona rural útil

Se realizó la identificación de la zona rural apta eliminando de la zona rural las áreas restringidas:

- Se aplicó una operación espacial de diferencia (`overlay(difference)`) entre la capa de zona rural y el conjunto de restricciones.
- Se generó un mapa preliminar con las áreas sin restricciones.

6. Cálculo de pendientes y eliminación de zonas con fuerte inclinación

Para evaluar la aptitud del terreno, se calculó la pendiente utilizando el **Modelo Digital de Elevación (DEM)**:

- Se aplicó un análisis de gradiente (`numpy.gradient()`) para obtener las pendientes del terreno en grados.
- Se generó una máscara para identificar áreas con pendientes $\geq 45^\circ$.
- Se extrajeron las zonas afectadas y se convirtieron en polígonos mediante `rasterio.features.shapes()`.
- Se eliminaron estas zonas del área de estudio con una nueva operación de diferencia espacial.

Este criterio se aplicó conforme a la normativa vigente (Decreto 3600 de 2007, numeral 2 del artículo 21), que establece restricciones para terrenos con alta pendiente.

7. Generación de la zona agrícola útil sin restricciones

Se definió la **zona agrícola útil sin restricciones técnicas ni normativas**, eliminando del área rural:

- Restricciones espaciales (vías, drenajes, relleno sanitario, etc.).
- Áreas con pendientes excesivas.

8. Identificación de limitantes y/o condicionantes

Se identificaron zonas donde la producción agrícola no está restringida pero sí condicionada. Estas incluyen:

- **Ecosistemas.**
- **Uso potencial del suelo.**
- **Áreas de restauración.**
- **Zona forestal protectora.**
- **Estudio de suelos.**

Se realizó una superposición espacial de estos elementos con la zona agrícola útil para clasificarlas correctamente.

9. Exportación de resultados y generación del mapa final

Los resultados se exportaron en formato shapefile (**.shp**) y raster (**.tif**), asegurando la replicabilidad del análisis.

Se generaron dos productos cartográficos finales:

1. **Zonas útiles sin restricciones.**
2. **Zonas útiles con limitantes y/o condicionantes.**

Para la visualización de los resultados, se utilizaron **matplotlib**, **geopandas** y **folium**, permitiendo la representación estática e interactiva del mapa final.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio permitieron identificar y delimitar las áreas rurales del municipio de Tunja, Boyacá, que presentan condiciones favorables para la producción agrícola, libres de restricciones, limitantes y/o condicionantes.

3.1. Identificación de Zonas Libres de Restricciones

La delimitación de áreas rurales sin restricciones significativas para la actividad agrícola en Tunja se basó en la exclusión de áreas protegidas, cuerpos de agua, infraestructura vial, rellenos sanitarios y zonas con pendientes superiores al 45%. Este enfoque multicriterio es

coherente con las metodologías propuestas por la FAO (1997) y la UPRA (2013), que enfatizan la importancia de integrar criterios biofísicos, socioeconómicos y ambientales en la evaluación de tierras. Estudios recientes, como el de Zhang et al. (2020), han demostrado que la exclusión de áreas con restricciones normativas y técnicas es fundamental para garantizar la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones montañosas donde la topografía y los ecosistemas sensibles juegan un papel crucial en la planificación del uso del suelo.

En términos de extensión, se encontró que aproximadamente el 17.87% del área total de Tunja es ideal para la producción agrícola sin restricciones técnicas ni normativas, el 38,42% son áreas útiles para la producción agrícola pero pueden presentar condicionantes y el 43,70% restante es área que no es viable para la producción agrícola según los criterios analizados. Este resultado es comparable con estudios realizados en otras regiones de Colombia, como los de Corrales et al. (2018), quienes reportaron que entre el 30% y el 50% de las áreas rurales en los departamentos del Cauca y Tolima presentan condiciones favorables para la agricultura. Estos hallazgos resaltan la importancia de adaptar las metodologías de evaluación de tierras a las condiciones específicas de cada región, teniendo en cuenta factores como la topografía, el clima y la disponibilidad de recursos hídricos.

Además, los resultados coinciden con los hallazgos de Wiig y García-Reyes (2020), quienes destacan que la identificación de zonas libres de restricciones es esencial en contextos donde la restitución de tierras y la planificación agrícola son prioritarias. En Colombia, donde el conflicto armado ha dejado un legado de tierras abandonadas o subutilizadas, la evaluación precisa de la aptitud agrícola es fundamental para promover la paz y el desarrollo rural sostenible.

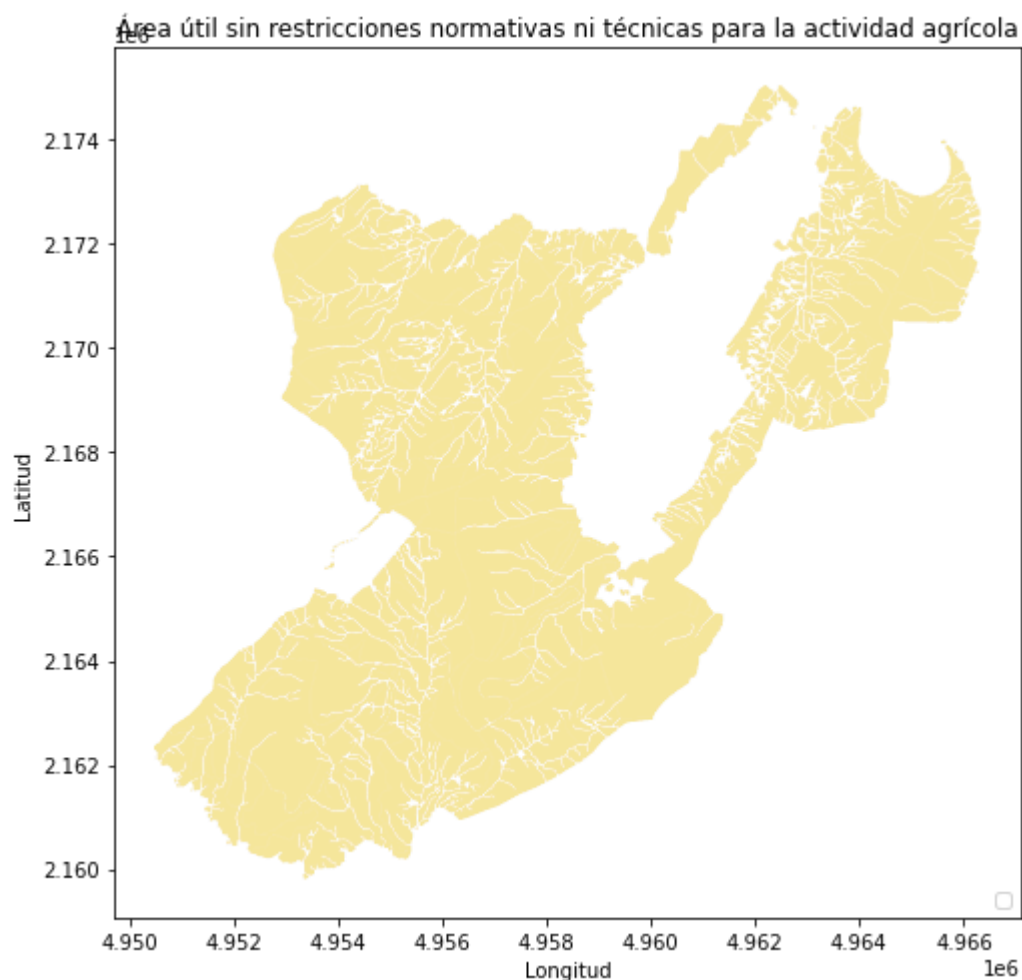


Figura 3. Delimitación del Área Útil sin Restricciones Normativas ni Técnicas para la Actividad Agrícola mediante Análisis SIG en Tunja, Boyacá

3.2. Identificación de Zonas con Limitantes y/o Condicionantes

Además de las áreas libres de restricciones, se identificaron zonas donde la producción agrícola está condicionada por factores como la presencia de ecosistemas sensibles, el uso potencial del suelo, áreas de restauración y estudios de suelos. Estas áreas representan aproximadamente el 38,42% del área rural de Tunja y requieren un manejo especial para garantizar su sostenibilidad a largo plazo. Este enfoque es coherente con las recomendaciones de la UPRA (2013), que sugiere la necesidad de considerar no solo las restricciones absolutas, sino también las condicionantes que pueden afectar la viabilidad agrícola.

La identificación de áreas con limitantes y condicionantes es consistente con los estudios de Muenchow et al. (2019), quienes argumentan que la evaluación de tierras debe incluir no solo factores físicos, sino también aspectos socioeconómicos y ambientales. Por ejemplo, la presencia de ecosistemas sensibles, como humedales o bosques protectores, puede limitar el uso agrícola del suelo, pero también ofrece oportunidades para la conservación y la restauración ecológica. Este enfoque holístico es esencial para promover prácticas

agrícolas sostenibles que equilibren la producción de alimentos con la conservación de los recursos naturales.

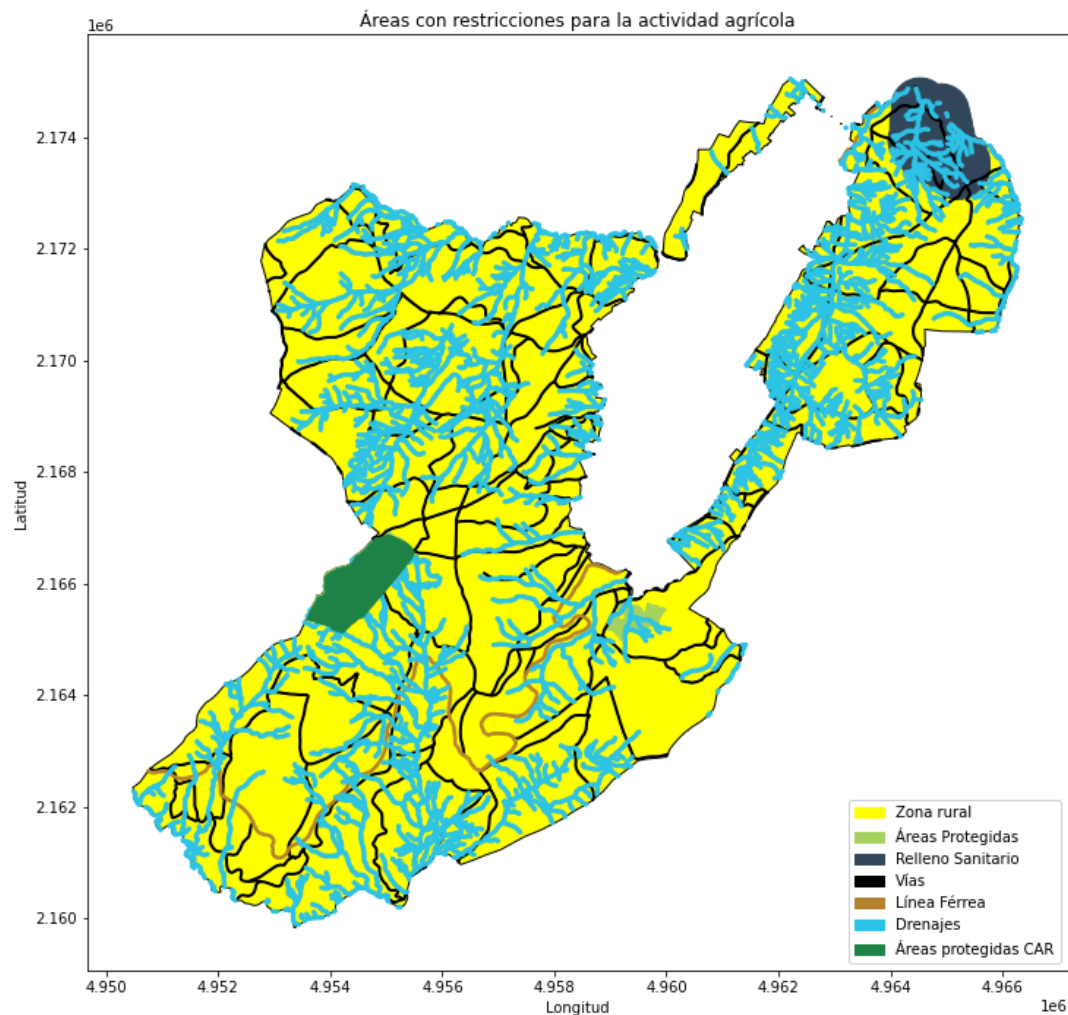


Figura 4. Restricciones Normativas y Técnicas para la Actividad Agrícola en la Zona Rural de Tunja, Boyacá

3.3. Análisis de Pendientes y Su Impacto en la Aptitud Agrícola

El análisis de las pendientes del terreno utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) reveló que aproximadamente el 1.098% del área rural de Tunja presenta pendientes superiores al 45%, lo que representa una limitación significativa para la expansión agrícola. Este resultado es consistente con las normativas colombianas (Decreto 3600 de 2007) y con estudios previos que han demostrado que las pendientes pronunciadas pueden limitar la viabilidad agrícola debido a problemas de erosión y dificultades en el manejo del suelo (Corrales et al., 2018).

Autores como Etherington (2011) han destacado que las pendientes pronunciadas no solo afectan la viabilidad agrícola, sino que también aumentan el riesgo de deslizamientos y erosión, lo que puede tener impactos negativos a largo plazo en la productividad del suelo. Este hallazgo es particularmente relevante en regiones montañosas como Tunja, donde la

topografía es un factor determinante en la planificación del uso del suelo. Estudios recientes, como el de Wang et al. (2019), han utilizado enfoques basados en lógica difusa para evaluar la aptitud agrícola en regiones con pendientes pronunciadas, lo que podría ser una línea de investigación futura para mejorar la precisión de los modelos de evaluación de tierras en contextos similares.

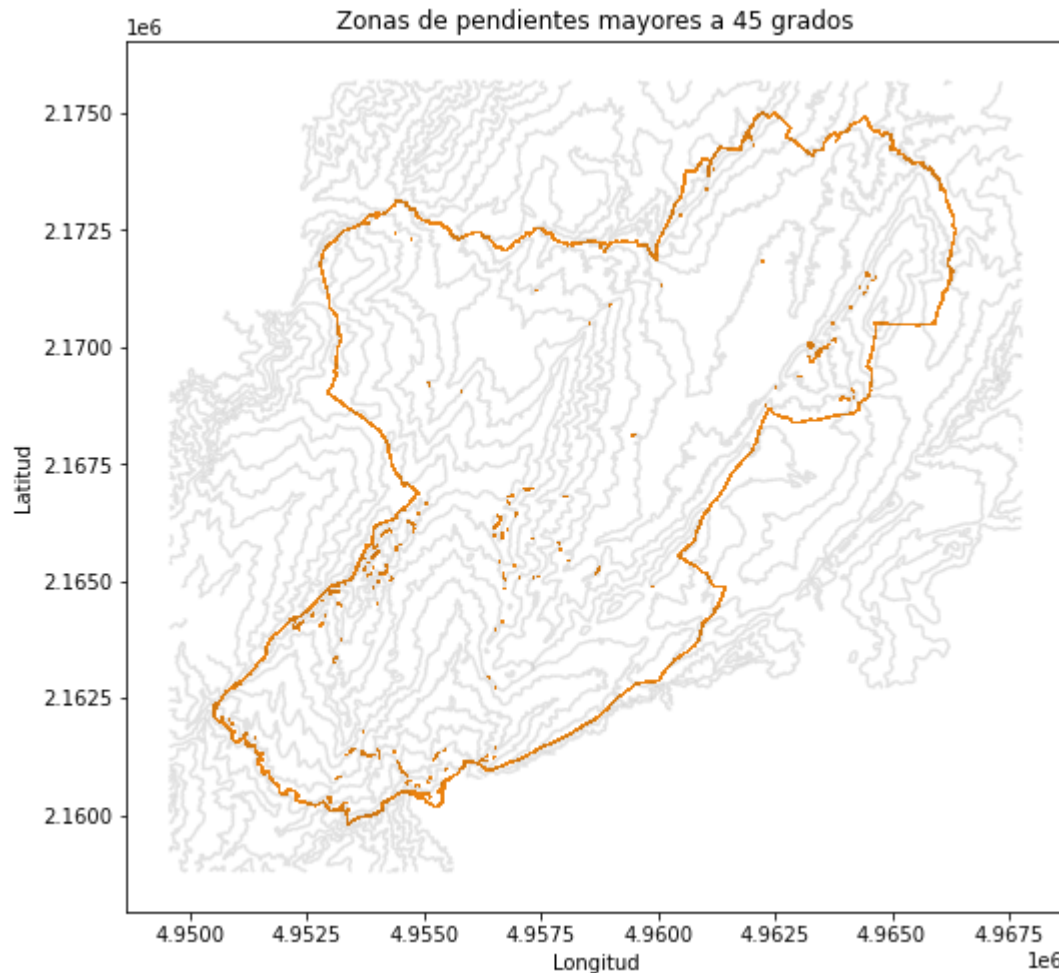


Figura 5. Identificación de Áreas con Pendientes Mayores a 45° como Restricción para la Actividad Agrícola en Tunja, Boyacá

3.4. Evaluación de la Aptitud Agrícola

La evaluación de la aptitud agrícola en la zona rural de Tunja se basó en un análisis integral que consideró múltiples factores biofísicos, socioeconómicos y ambientales. Este enfoque permitió clasificar las áreas en tres categorías principales: zonas con aptitud ideal para la actividad agrícola, zonas útiles pero con condicionantes, y zonas no aptas para la agricultura. Esta clasificación es coherente con las metodologías propuestas por la FAO (1997) y la UPRA (2013), que enfatizan la importancia de integrar criterios multifactoriales en la evaluación de tierras.

3.4.1 Zonas con Aptitud Ideal para la Actividad Agrícola

Las áreas identificadas como ideales para la actividad agrícola representan aproximadamente el 17.87% del área rural de Tunja. Estas zonas se caracterizan por

condiciones óptimas, como suelos fértiles, disponibilidad de agua, y pendientes moderadas que no superan el 45%. Estas características son esenciales para maximizar la productividad agrícola y minimizar los impactos ambientales, tal como lo destacan estudios como los de Altieri y Nicholls (2017). Estas áreas son ideales para cultivos intensivos y extensivos, y su identificación es crucial para la planificación de proyectos agrícolas sostenibles.

3.4.2 Zonas Útiles para la Actividad Agrícola con Condicionantes

Aproximadamente el 38.42% del área rural de Tunja fue clasificada como útil para la actividad agrícola, pero con ciertos condicionantes. Estas áreas pueden presentar limitaciones como suelos menos fértiles, pendientes moderadas, o proximidad a cuerpos de agua y áreas protegidas. Aunque no están completamente restringidas, requieren un manejo especial para garantizar su sostenibilidad. Estudios como los de Pretty et al. (2006) han demostrado que la implementación de prácticas agrícolas adaptativas, como la agroforestería y la conservación de suelos, puede mejorar la viabilidad de estas zonas.

3.4.3 Zonas No Aptas para la Agricultura

El 43.70% restante del área rural de Tunja fue clasificado como no apto para la actividad agrícola. Estas zonas incluyen áreas con pendientes superiores al 45%, áreas protegidas, cuerpos de agua, y zonas con infraestructura vial. La exclusión de estas áreas es fundamental para prevenir prácticas agrícolas que puedan afectar el equilibrio ambiental y la viabilidad productiva del territorio. Este enfoque es consistente con las recomendaciones de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2020), que enfatiza la importancia de proteger áreas sensibles para mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

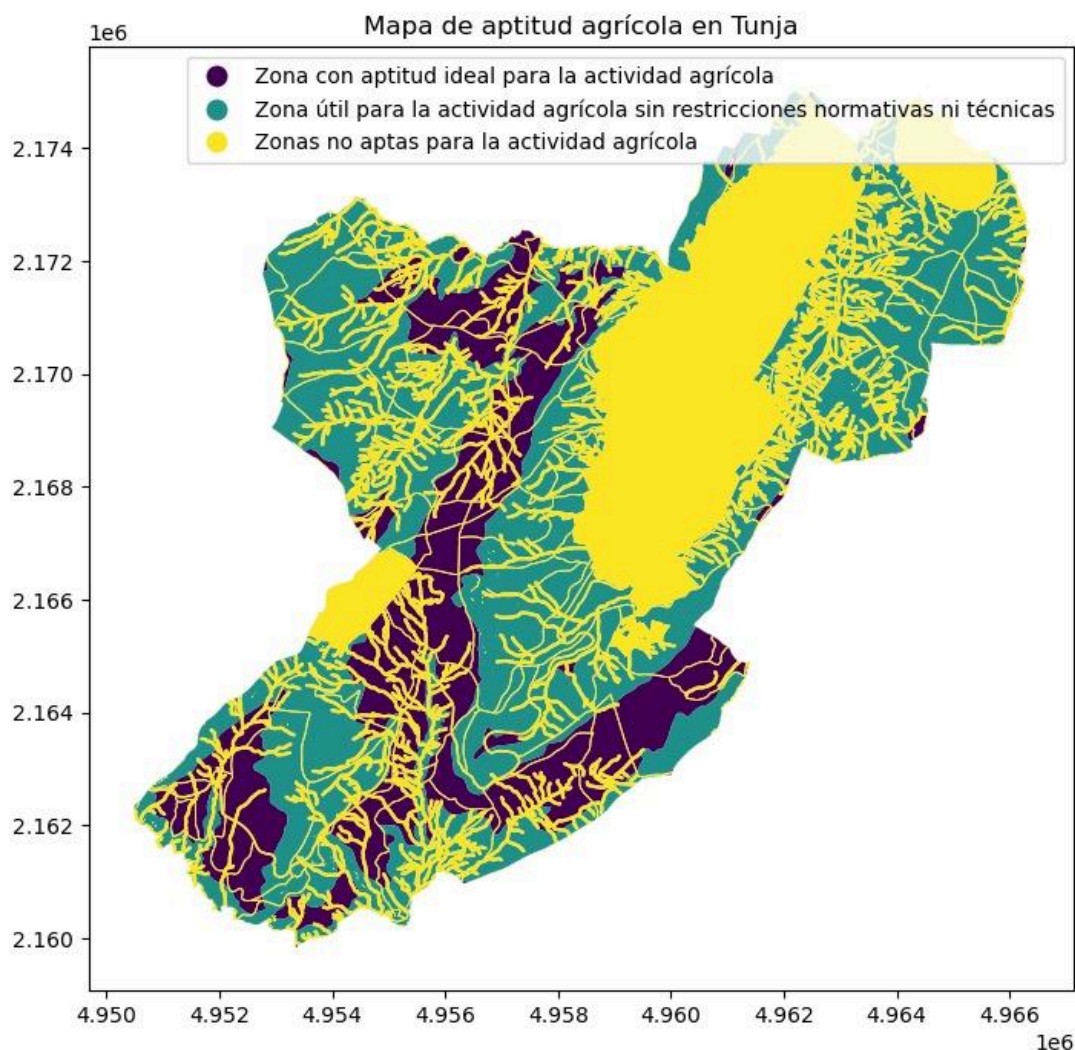


Figura 6. Mapa de Aptitud Agrícola en la Zona Rural de Tunja, Boyacá

3.5. Análisis de la Intersección entre el Predio y las Aptitudes Agrícolas de Tunja

Para este propósito se elaboró una aplicación que permitiera evaluar la aptitud de un predio con base en la capa de aptitud agrícola. Para la app se manejaron funciones del terminal a fin de facilitar su uso.

El análisis de la intersección entre un predio específico y las aptitudes agrícolas de Tunja proporciona información valiosa sobre la viabilidad de la actividad agrícola en esa área particular. Este enfoque permite evaluar si el predio en cuestión se encuentra dentro de las zonas identificadas como aptas para la agricultura.

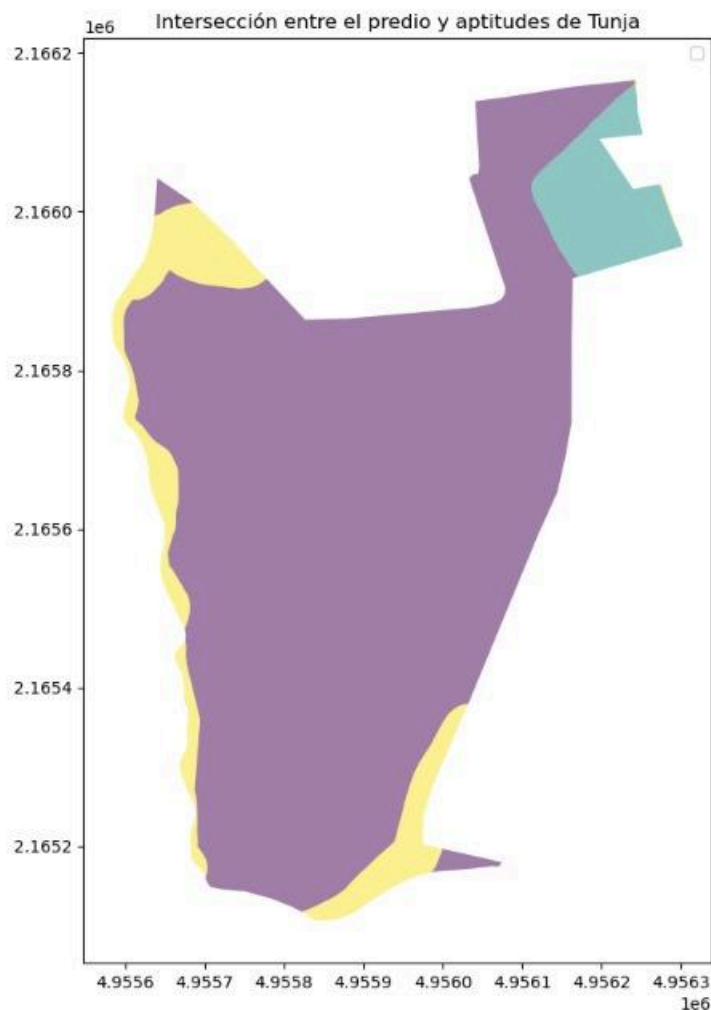
3.5.1 Características del Predio

El predio analizado se encuentra en una elevación que varía entre 2.1652 y 2.1662 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas que oscilan entre 4.9556 y 4.9563. Estas características topográficas son consistentes con las zonas identificadas como aptas para la

actividad agrícola en Tunja, donde las elevaciones y pendientes moderadas son favorables para la producción agrícola.

3.5.2 Evaluación de la Aptitud Agrícola

La intersección del predio con las zonas de aptitud agrícola de Tunja indica que el área en cuestión presenta condiciones favorables para la agricultura. Esto se debe a que las elevaciones y coordenadas del predio caen dentro del rango de las zonas identificadas como ideales o útiles para la actividad agrícola. Estudios como los de Zhang et al. (2020) han demostrado que la identificación de zonas con condiciones óptimas es fundamental para garantizar la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones montañosas donde la topografía y los ecosistemas sensibles juegan un papel crucial en la planificación del uso del suelo.



Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con la literatura existente en el campo de la evaluación de tierras y el análisis espacial. La metodología propuesta, basada en la integración de múltiples fuentes de datos y el uso de herramientas de programación como Python, es similar a la utilizada por autores como Conrad et al. (2015) y Dixon (2015), quienes han destacado la importancia de la automatización y el procesamiento de grandes volúmenes de datos en el análisis espacial.

Además, el enfoque multicriterio utilizado en este estudio es coherente con las recomendaciones de la FAO (1997) y la UPR (2013), que enfatizan la necesidad de considerar una amplia gama de factores en la evaluación de la aptitud agrícola. En particular, la exclusión de áreas con pendientes pronunciadas y la consideración de áreas protegidas y ecosistemas sensibles son prácticas comunes en estudios de evaluación de tierras, como lo han demostrado Corrales et al. (2018) y Wlig y García-Reyes (2020).

3.6. Limitaciones del Estudio

Aunque los resultados obtenidos son prometedores, es importante reconocer algunas limitaciones del estudio. En primer lugar, la disponibilidad de datos espaciales de alta resolución puede variar según la región, lo que puede afectar la precisión del análisis. En segundo lugar, el enfoque en restricciones y limitantes físicas y normativas puede no capturar completamente las dinámicas socioeconómicas que también influyen en la viabilidad agrícola. Futuros estudios podrían incorporar datos socioeconómicos más detallados, como la tenencia de la tierra, el acceso a mercados y la disponibilidad de mano de obra, para mejorar la evaluación de la aptitud agrícola.

Además, como señalan Bowlick et al. (2020), el análisis espacial basado en SIG y programación requiere un alto nivel de expertise técnico, lo que puede limitar su aplicación en regiones con menos recursos técnicos y humanos. Por lo tanto, es importante desarrollar metodologías que sean accesibles y replicables en diferentes contextos, promoviendo así la adopción de herramientas de análisis espacial en la planificación agrícola a nivel local y regional.

3.7. Implicaciones para la Planificación Agrícola Sostenible

Los resultados de este estudio tienen implicaciones significativas para la planificación agrícola sostenible en Tunja y otras regiones con características similares. La identificación de áreas libres de restricciones y aquellas con limitantes y condicionantes proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en la planificación del uso del suelo. Además, la integración de herramientas de programación como Python y librerías especializadas como GeoPandas permite automatizar procesos complejos y mejorar la eficiencia en la evaluación de tierras, lo que es esencial en un contexto de cambio climático y creciente demanda de alimentos.

4. CONCLUSIONES

- Se identificaron las zonas rurales de Tunja con aptitud agrícola mediante un análisis espacial que integró múltiples fuentes de datos. Se establecieron tres categorías: zonas ideales para la agricultura (17.87%), zonas con condicionantes (38.42%) y zonas no aptas (43.70%).
- Se confirmó que las principales restricciones para la agricultura en el municipio son las pendientes superiores a 45°, las áreas protegidas, la infraestructura vial, y los cuerpos de agua. Además, ciertos condicionantes como los ecosistemas sensibles y el uso potencial del suelo influyen en la viabilidad de la actividad agrícola.

- La integración de herramientas SIG y programación en Python permitió desarrollar una metodología de evaluación de tierras que puede aplicarse en otros municipios con características similares, facilitando la planificación agrícola y el ordenamiento territorial.
- La identificación de zonas aptas para la agricultura es fundamental para la gestión eficiente del suelo rural, permitiendo minimizar la degradación ambiental y maximizar la productividad. Este estudio proporciona información clave para la formulación de políticas públicas en materia de planificación territorial y desarrollo agrícola sostenible.
- Los resultados obtenidos pueden ser utilizados por entidades gubernamentales, agricultores y planificadores territoriales para optimizar el uso del suelo, promoviendo prácticas agrícolas adaptadas a las condiciones del territorio y evitando la expansión de la frontera agrícola en áreas no aptas.

Bibliografía

- Agropecuaria, U. de P. R. (2013). Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional metodología a escala general 1:100.000. UPRA. Enlace
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). Agroecology: A brief account of its origins and currents of thought in Latin America. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(3-4), 231-237. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1287147>
- Bowlick, F. J., Bednarz, S. W., & Goldberg, D. W. (2020). Course syllabi in GIS programming: Trends and patterns in the integration of computer science and programming. *Canadian Geographies / Géographies Canadiennes*, 64(4), 495-511. <https://doi.org/10.1111/cag.12544>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Corrales, D. A. A., Andrés Felipe Rodríguez Vásquez, Luz Mery Gómez, Claudia Patricia Acosta Latorre, Claudia Liliana Cortés López, Fabiola Enciso Enciso, Edwin R. García Márquez, Luisa María Lagos Riaño, Alexis Vladimir Maluendas, Lizeth Ortiz Guengue, Mariana Ríos Ortégón, Oscar Romero Guevara, Cindy Elizabeth Rubiano, & Jaime Vergara Hincapié. (2018). Evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a nivel nacional. Metodología a escala general (1:100.000). Unidad de Planificación Rural Agropecuaria - UPRA. Enlace
- Dixon, A. P. (2015). Review of GIS Tutorial for Python Scripting. *Cartographic Perspectives*, 80, 51-52. <https://doi.org/10.14714/CP80.1306>
- Etherington, T. R. (2011). Python based GIS tools for landscape genetics: Visualising genetic relatedness and measuring landscape connectivity. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(1), 52-55. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00048.x>

Food and Agriculture Organization - FAO. (1997). Zonificación agro-ecológica—Guía general. FAO.

GeoPandas 1.0.1. (2013). GeoPandas org. Enlace

Kumar, S., Singh, R., & Singh, A. (2021). Geospatial analysis for agricultural land use planning: A case study in the Indo-Gangetic Plains, India. *Geocarto International*, 36(12), 1375-1392. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1655799>

Li, X., Yu, J., & Gong, P. (2021). Agricultural land suitability analysis based on GIS and machine learning: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127479>

Muenchow, J., Schäfer, S., & Krüger, E. (2019). Reviewing qualitative GIS research—Toward a wider usage of open-source GIS and reproducible research practices. *Geography Compass*, 13(6), e12441. <https://doi.org/10.1111/gec3.12441>

Pretty, J., Noble, A. D., Bossio, D., Dixon, J., Hine, R. E., Penning de Vries, F. W. T., & Morison, J. I. L. (2006). Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries. *Environmental Science & Technology*, 40(4), 1114-1119. <https://doi.org/10.1021/es051670d>

Raimundo Mainar De Medeiros, Romildo Morant De Holanda, Luciano Marcelo Fallé Saboya, Moacyr Cunha Filho, Manoel Vieira De França, & Wagner Rodolfo De Araújo. (2022). Cultural skills for the municipality of Recife—Pernambuco, Brazil. *International Journal of Science and Research Archive*, 6(1), 208-218. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2022.6.1.0116>

Wang, J., Li, X., Christakos, G., & Liu, X. (2019). Assessing agricultural land suitability in arid regions using a GIS-based fuzzy logic approach: A case study in Northwest China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104904. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104904>

Wiig, H., & García-Reyes, P. (2020). *Land Use Policy*, 91, 104380. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104380>

Zhang, X., Zhang, Y., & Li, Y. (2020). A GIS-based approach for agricultural land suitability assessment in mountainous areas: A case study in Yunnan Province, China. *Sustainability*, 12(3), 1025. <https://doi.org/10.3390/su12031025>

Zabel, F., Putzenlechner, B., & Mauser, W. (2019). Global agricultural land resources – A high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions. *PLOS ONE*, 14(7), e0220224. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220224>