

Zonificación de fuentes contaminantes asociado al sistema acuífero de Yopal, con énfasis  
en el corregimiento de El Taladro

Laura Gabriela Pulido Sánchez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geóloga

Director

Luisa Casadiegos Agudelo

Maestría en Ingeniería Civil con Énfasis en Aguas Subterráneas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por regalarme la sabiduría, la fortaleza y el entendimiento necesarios para alcanzar este logro y culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, Alexander y Ninfa, por su amor y apoyo incondicional, por cada sacrificio realizado y por brindarme la oportunidad de crecer profesional y personalmente. Gracias por guiarme con sus valores y enseñanzas hasta convertirme en la persona que soy hoy.

A mis hermanas, Karen y Salomé, por su compañía constante, por ser mi apoyo emocional y mi refugio en los momentos difíciles a lo largo de esta trayectoria académica.

A Leandro, por su apoyo, paciencia y compañía, y por motivarme siempre a dar lo mejor de mí y a creer en mis capacidades.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de carrera, quienes hicieron de este camino una experiencia más llevadera y significativa, gracias por su amistad, su respaldo y por permanecer incondicionales en cada etapa.

### **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi directora, Luisa Casadiegos, por su paciencia, orientación y constante acompañamiento durante todo el proceso de desarrollo de este trabajo. Su guía fue fundamental para la culminación exitosa de esta investigación.

Al Semillero de Investigación en Sistemas Hidrológicos (SISH), por el apoyo brindado.

A la comunidad del corregimiento El Taladro, por su disposición, colaboración y apertura, elementos esenciales para el desarrollo del trabajo de campo y la consolidación de esta investigación.

A los profesores que hicieron parte de mi formación profesional, por sus enseñanzas, exigencia y compromiso, que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander, por brindarme los conocimientos, herramientas y espacios necesarios para mi formación como geóloga, y por los valiosos momentos vividos a lo largo de mi trayectoria universitaria.

## Tabla de Contenido

		<b>Pág.</b>
Introducción .....		13
1	Objetivos .....	16
1.1	Objetivo General .....	16
1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	Marco de referencia .....	17
2.1	Localización .....	17
2.2	Geología.....	19
2.2.1	Formación Diablo (Td) .....	19
2.2.2	Formación Caja (Tc).....	20
2.2.3	Depósitos Cuaternarios .....	20
Depósitos de Planicie Aluvial (Q1pal) .....		20
Depósitos Aluviales Subactuales (Q1als) .....		21
Depósitos de Abanico (Q2ab).....		21
Depósitos Coluviales (Q2c) .....		21
Depósitos Aluviales Actuales (Q2al).....		21
2.3	Geología estructural .....	22
2.3.1	Falla de Guaicaramo .....	23
2.3.2	Falla de Yopal .....	23
2.4	Hidrogeología .....	24
2.5	Marco conceptual.....	27
2.5.1	Acuífero .....	27

2.5.2	Tipos de captación .....	28
2.5.3	Riesgo .....	30
2.5.4	Amenaza .....	30
2.5.5	Vulnerabilidad.....	30
2.5.6	Contaminantes.....	31
2.5.7	Fuentes de contaminación.....	32
3	Alcance del estudio .....	33
4	Metodología .....	33
4.1	FASE 1. Identificar las fuentes potenciales de contaminación.....	34
4.2	FASE 2. Evaluar las cargas contaminantes aplicando el Método Pollutant Origin Surcharge Hydraulically (POSH) .....	44
4.3	FASE 3. Generar mapas de clasificación de las potenciales fuentes contaminantes del municipio y del corregimiento.....	48
4.4	FASE 4. Investigar acciones para el control de la contaminación, que permitan mitigar los impactos negativos sobre la calidad del acuífero.....	49
5	RESULTADOS.....	50
5.1	FASE 1.....	50
5.1.1	Actividad 1.1.....	50
	Actividad Agrícola.....	54
	Actividad Pecuaria .....	56
	Actividades Industriales.....	59
	Urbanización.....	61
	Peligros relacionados con las fuentes contaminantes identificadas .....	63

5.1.2	Actividad 1.2.....	71
5.1.3	Actividad 1.3.....	76
5.2	FASE 2.....	80
5.2.1	Actividad 2.1.....	80
5.2.2	Actividad 2.2.....	81
5.3	FASE 3.....	82
5.3.1	Actividad 3.1.....	82
5.3.2	Actividad 3.2.....	88
5.4	FASE 4.....	91
5.4.1	Actividad 4.1.....	91
6	Conclusiones.....	94
7	Recomendaciones.....	96
	Referencias Bibliográficas.....	98

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Unidades Hidrogeológicas</i> .....	26
Tabla 2 <i>Base de datos de fuentes de información secundaria</i> .....	34
Tabla 3 <i>Matriz de registro de datos provenientes de los formatos de encuesta aplicados a fincas</i> .....	42
Tabla 4 <i>Estructura de la base de datos para la sistematización de actividades y coberturas del suelo en las zonas de interés.</i> .....	43
Tabla 5 <i>Clasificación de fuentes de contaminación difusas</i> .....	46
Tabla 6 <i>Clasificación de fuentes de contaminación puntuales</i> .....	46
Tabla 7 <i>Matriz de clasificación de actividades según el método POSH y su potencial de carga contaminante</i> .....	47
Tabla 8 <i>Inventario de pozos registrados en Yopal</i> .....	59
Tabla 9 <i>Inventario de estaciones de servicio en el municipio de Yopal.</i> .....	61
Tabla 10 <i>Riesgos asociados a las actividades del sector petrolero</i> .....	68
Tabla 11 <i>Descripción de las fincas y actividades con potencial de contaminación en el corregimiento El Taladro.</i> .....	77
Tabla 12 <i>Actividades y fuentes potenciales de contaminación asociadas a coberturas CLC identificadas en campo</i> .....	78
Tabla 13 <i>Clasificación de actividades por el método POSH</i> .....	80

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Mapa de localización del área de estudio</i> .....	18
Figura 2 <i>Mapa Geológico de Yopal</i> .....	22
Figura 3 <i>Corte representativo de las principales fallas</i> .....	24
Figura 4 <i>Modelo hidrogeológico de Yopal</i> .....	25
Figura 5 <i>Esquema de representación de los tipos de Acuíferos</i> .....	28
Figura 6 <i>Esquema de la estructura de un pozo</i> .....	29
Figura 7 <i>Fuentes de contaminación en zonas urbanas y rurales</i> .....	31
Figura 8 <i>Mapa de base cartográfica del corregimiento El Taladro</i> .....	37
Figura 9 <i>Ejemplo de mapa social elaborado por estudiantes de secundaria</i> .....	38
Figura 10 <i>Diseño de la encuesta para la recolección de información sobre posibles fuentes de contaminación de aguas subterráneas asociadas a actividades Agrícolas</i> .....	39
Figura 11 <i>Diseño de la encuesta para la recolección de información sobre posibles fuentes de contaminación de aguas subterráneas asociadas a actividades pecuarias</i> .....	40
Figura 12 <i>Diseño de la encuesta para la recolección de información sobre posibles fuentes de contaminación de aguas subterráneas asociadas al desarrollo rural</i> .....	40
Figura 13 <i>Formato de registro y descripción de evidencias fotográficas en campo</i> .....	43
Figura 14 <i>Actividades potencialmente contaminantes</i> .....	45
Figura 15 <i>Leyenda del método POSH</i> .....	48
Figura 16 <i>Mapa de suelos de Yopal</i> .....	52
Figura 17 <i>Mapa de vocación de suelos de Yopal</i> .....	53
Figura 18 <i>Matriz Agrícola de Yopal</i> .....	54

Figura 19 <i>Matriz Pecuaria de Yopal</i> .....	57
Figura 20 <i>Mapa de Coberturas Corine Land Cover, obtenido de una clasificación No Supervisada. A escala municipal</i> .....	72
Figura 21 <i>Mapa de Coberturas Corine Land Cover, obtenido de una clasificación No Supervisada. A escala Local</i> .....	73
Figura 22 <i>Mapa de Clasificación Supervisada de Coberturas CLC a Escala Municipal</i> .....	74
Figura 23 <i>Mapa de Clasificación Supervisada de Coberturas CLC a Escala Local</i> .....	75
Figura 24 <i>Mapa social participativo digitalizado del corregimiento El Taladro</i> .....	76
Figura 25 <i>Catálogo Fotográfico de Campo – Cultivo de arroz</i> .....	79
Figura 26 <i>Catálogo Fotográfico de Campo – Predio P</i> .....	79
Figura 27 <i>Mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación según el método POSH, a escala municipal.</i> .....	84
Figura 28 <i>Mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación según el método POSH, a escala local</i> .....	85
Figura 29 <i>Mapa de distribución espacial de coberturas del suelo (CLC) y fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio municipal</i> .....	86
Figura 30 <i>Distribución espacial de coberturas del suelo (CLC) y fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio local</i> .....	87
Figura 31 <i>Zonificación del potencial de contaminación por fuentes antrópicas en el municipio de Yopal</i> .....	89
Figura 32 <i>Zonificación del potencial de contaminación por fuentes antrópicas en el corregimiento El Taladro</i> .....	90

### Lista de Apéndices

“Los apéndices están disponibles en el repositorio institucional”

Apéndice A. Mapa social

Apéndice B. Encuestas

Apéndice C. Tabla de variables registradas a partir de la aplicación de encuestas en fincas del área de estudio local

Apéndice D. Base de datos de campo de actividades con potencial contaminante y coberturas CLC asociadas

Apéndice E. Catalogo fotográfico de campo

Apéndice F. Inventario de fuentes de contaminación potenciales

Apéndice G. Mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación según el método POSH, a escala municipal

Apéndice H. Mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación según el método POSH, a escala local

Apéndice I. Mapa de distribución espacial de coberturas del suelo (CLC) y fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio municipal

Apéndice J. Mapa de distribución espacial de coberturas del suelo (CLC) y fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio local

Apéndice K. Mapa de zonificación del potencial de contaminación por fuentes antrópicas en el municipio de Yopal

Apéndice L. Mapa de zonificación del potencial de contaminación por fuentes antrópicas en el corregimiento El Taladro

## Resumen

**Título:** Zonificación de fuentes contaminantes asociado al sistema acuífero de Yopal, con énfasis en el corregimiento de El Taladro\*

**Autor:** Laura Gabriela Pulido Sánchez\*\*

**Palabras Clave:** Zonificación, inventario de fuentes de contaminación, aguas subterráneas, POSH, Yopal

**Descripción:** En Casanare, la dependencia de las aguas subterráneas ha aumentado tras la falla de la planta de tratamiento de Yopal en 2011, que provocó un mayor uso de estas aguas para el abastecimiento. Este trabajo tuvo como objetivo general identificar y zonificar las actividades antropogénicas con mayor riesgo de contaminar el acuífero de Yopal. Los objetivos específicos incluyeron caracterizar las fuentes de contaminación y proponer acciones de control. Se recopiló información primaria y secundaria para identificar, clasificar y generar mapas de las actividades que afectan el acuífero.

Para la evaluación del riesgo se empleó la metodología de Foster et al. (2002). Esta integra información de distintas fuentes, herramientas de SIG y validación de campo. A partir de imágenes satelitales y la clasificación CORINE Land Cover, se caracterizaron los usos del suelo en el área de estudio, complementados con visitas a la comunidad y recorridos de campo. Las fuentes de contaminación identificadas se sistematizaron en un inventario y se clasificaron según su potencial de contaminación mediante el método POSH (Reducido, Moderado y Elevado), generando un mapa de zonificación del potencial de contaminación del acuífero.

De las 12 actividades detectadas, 8 presentan un potencial elevado de contaminación. La zona sur concentra el mayor riesgo, resultado de la coexistencia de fuentes difusas y puntuales, destacando cultivos de arroz y palma, y la presencia de pozos petroleros. Entre las actividades agrícolas, el arroz emerge como principal fuente por su mecanización y uso intensivo de agroquímicos; en el sector pecuario, la producción porcina en sistemas intensivos y el manejo de residuos destacan por su contribución al deterioro de la calidad del agua subterránea; en lo industrial, los pozos petroleros presentan el mayor potencial contaminante; y en lo urbano, los rellenos sanitarios y centros poblados generan lixiviados que amenazan las aguas subterráneas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Luisa Casadiegos Agudelo. Master en Ingeniería Civil con Énfasis en Aguas Subterráneas.

### Abstract

**Title:** Zonation of Contaminant Sources Associated with the Yopal Aquifer System, with an Emphasis on the El Taladro District\*

**Author:** Author: **Laura Gabriela Pulido Sánchez**\*\*

**Key Words:** Zonation, inventory of contaminant sources, groundwater, POSH, Yopal

**Description:** In Casanare, dependence on groundwater has increased following the Yopal water treatment plant failure in 2011, which led to greater use of these waters for supply. The general objective of this work was to identify and zonate the anthropogenic activities with the highest risk of contaminating the Yopal aquifer. The specific objectives included characterizing contaminant sources and proposing control actions. Primary and secondary information were gathered to identify, classify, and generate maps of the activities affecting the aquifer.

For risk assessment, the Foster et al. (2002) methodology was used. This integrates information from multiple sources, GIS tools, and field validation. Based on satellite images and the CORINE Land Cover classification, land uses in the study area were characterized, complemented by community visits and field surveys. The identified contaminant sources were systematized into an inventory and classified according to their contamination potential using the POSH method (Reduced, Moderate, Elevated), generating a zonation map of the aquifer's contamination potential.

Of the 12 activities detected, 8 show an elevated contamination potential. The southern zone concentrates the greatest risk, resulting from the coexistence of diffuse and point sources, highlighting rice and palm crops and the presence of oil wells. Among agricultural activities, rice stands out as the main source due to mechanization and intensive use of agrochemicals; in the livestock sector, pig production in intensive systems and waste management stand out for their contribution to the deterioration of groundwater quality; industrially, oil wells present the highest contamination potential; and urban areas, landfills and populated centers generate leachates that threaten groundwater.

---

\* Degree Work

\*\* Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Luisa Casadiegos Agudelo. Master en Ingeniería Civil con Énfasis en Aguas Subterráneas.

## Introducción

Las aguas subterráneas constituyen un recurso esencial para la vida y el desarrollo socioeconómico; sin embargo, suelen permanecer invisibles, lo que ha ocasionado que su explotación y gestión no reciban la atención adecuada. De acuerdo con la UNESCO (2022), la contaminación de los acuíferos es prácticamente irreversible, ya que, una vez afectados, los cuerpos de agua subterránea tienden a mantener esta condición durante largos periodos de tiempo.

Las principales fuentes de contaminación antropogénica se originan en la superficie, asociadas principalmente a actividades agrícolas, vertederos, industrias, sistemas de alcantarillado y almacenamiento inadecuado de residuos, mientras que otras fuentes introducen contaminantes directamente en el subsuelo, como la explotación de hidrocarburos, la minería y los vertimientos en profundidad (UNESCO, 2022).

Según el Estudio Nacional del Agua (2022), en Colombia aproximadamente el 78 % del territorio presenta potencial para el aprovechamiento de las aguas subterráneas; sin embargo, solo se conoce el 15 % de los sistemas acuíferos existentes, lo que evidencia un bajo nivel de conocimiento y gestión del recurso. El mismo estudio señala deficiencias en el monitoreo y control por parte de las autoridades ambientales, ya que únicamente diez instituciones reportaron información relacionada con el seguimiento de las aguas subterráneas (IDEAM, 2023).

En el departamento de Casanare, la autoridad ambiental competente es la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia (CORPORINOQUIA), la cual presenta limitaciones en el monitoreo sistemático de las aguas subterráneas, situación que representó una restricción durante el desarrollo de esta investigación. No obstante, entidades como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) e Hidroyopal, en articulación con CORPORINOQUIA, han desarrollado estudios y modelos hidrogeológicos del municipio. Estas investigaciones se intensificaron tras la

falla de la planta de tratamiento de agua potable ubicada al norte de Yopal en el año 2011, ocasionada por una creciente del río Cravo Sur, lo que llevó a que una parte significativa de la población recurra actualmente al uso de aguas subterráneas como principal fuente de abastecimiento (Peña et al., 2014)

En este contexto, la importancia del presente estudio radica en la identificación y zonificación de las actividades antropogénicas que representan un riesgo potencial de contaminación para el acuífero de Yopal. La información generada permitirá fortalecer la planificación territorial, la gestión integral del recurso hídrico subterráneo y la toma de decisiones ambientales, contribuyendo a la prevención y mitigación de los procesos de deterioro de la calidad del agua subterránea (González Herrera et al., 2018). Estudios desarrollados en otros municipios de Colombia han demostrado la necesidad de contar con este tipo de información para la implementación de medidas efectivas de control y protección de los acuíferos (Romero & Urrea, 2021)

Para la estimación de las posibles fuentes de contaminación antrópica del acuífero de Yopal, el presente estudio adopta la metodología propuesta por Foster et al. (2002) en la *Guía para la protección de la calidad del agua subterránea*, la cual integra el análisis de información secundaria, el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la validación en campo. A partir del procesamiento de imágenes satelitales y la aplicación de la metodología CORINE Land Cover, se identificaron y caracterizaron los usos del suelo en el área de estudio, los cuales fueron complementados mediante visitas a la comunidad y recorridos de campo.

Finalmente, las actividades identificadas fueron sistematizadas en un inventario de fuentes potenciales de contaminación y clasificadas según su nivel de riesgo mediante el método POSH,

en las categorías Reducido, Moderado, Elevado, permitiendo la elaboración del mapa de zonificación del potencial de contaminación del acuífero.

De las 12 actividades identificadas, 8 fueron clasificado con un potencial de generación elevado de contaminación. La zona sur del área de estudio concentra el mayor potencial contaminante, asociado a la coexistencia de fuentes difusas y puntuales, entre las que se destacan los cultivos de arroz y palma, así como la presencia de pozos petroleros.

Dentro de las actividades agrícolas, el cultivo de arroz representa la principal fuente de contaminación potencial, debido a su carácter mecanizado y al uso intensivo y continuo de agroquímicos. En el sector pecuario, el sistema de producción porcina sobresale por la alta concentración de individuos en sistemas intensivos y la ausencia de un manejo adecuado de los residuos generados. En cuanto a las actividades industriales, los pozos petroleros presentan el mayor potencial contaminante, mientras que, en el desarrollo urbano, el relleno sanitario y los centros poblados concentran los mayores riesgos, asociados principalmente a la generación de aguas residuales y a la gestión inadecuada de los residuos sólidos que pueden generar lixiviados que llegan a las aguas subterráneas.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Estimar el potencial de generación de contaminantes antropogénicos del sistema acuífero de Yopal, Casanare-Colombia.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Identificar las fuentes potenciales de contaminación antropogénica del área de estudio, generando una base de datos que sirva como insumo para estudios de vulnerabilidad y protección del recurso hídrico.

Evaluar las cargas de los contaminantes relevantes que podrían afectar la calidad del agua subterránea, aplicando el método Pollutant Origin Surcharge Hydraulically (POSH).

Generar un mapa de clasificación de las potenciales fuentes de contaminantes puntuales y difusas a escala 1:25000.

Recomendar acciones para el control de la contaminación, que permitan mitigar los impactos negativos sobre la calidad del acuífero.

## 2 Marco de referencia

### 2.1 Localización

El área de estudio abarca dos escalas, una escala municipal, correspondiente al municipio de Yopal, utilizada para el análisis general de las actividades potencialmente contaminantes, y una escala local, correspondiente al corregimiento El Taladro, en la cual se realiza el trabajo de campo (ver Figura 1).

El área de estudio municipal se encuentra en el oriente de Colombia, en el departamento de Casanare. El municipio de Yopal está ubicado sobre el piedemonte de la Cordillera Oriental, a lo largo del corredor de la Carretera Marginal del Llano, entre los municipios de Villanueva y Paz de Ariporo, ocupando una posición estratégica en su punto medio. abarca las planchas topográficas del IGAC a escala 1:100.000 193, 194, 212, 213, 231 y 232.

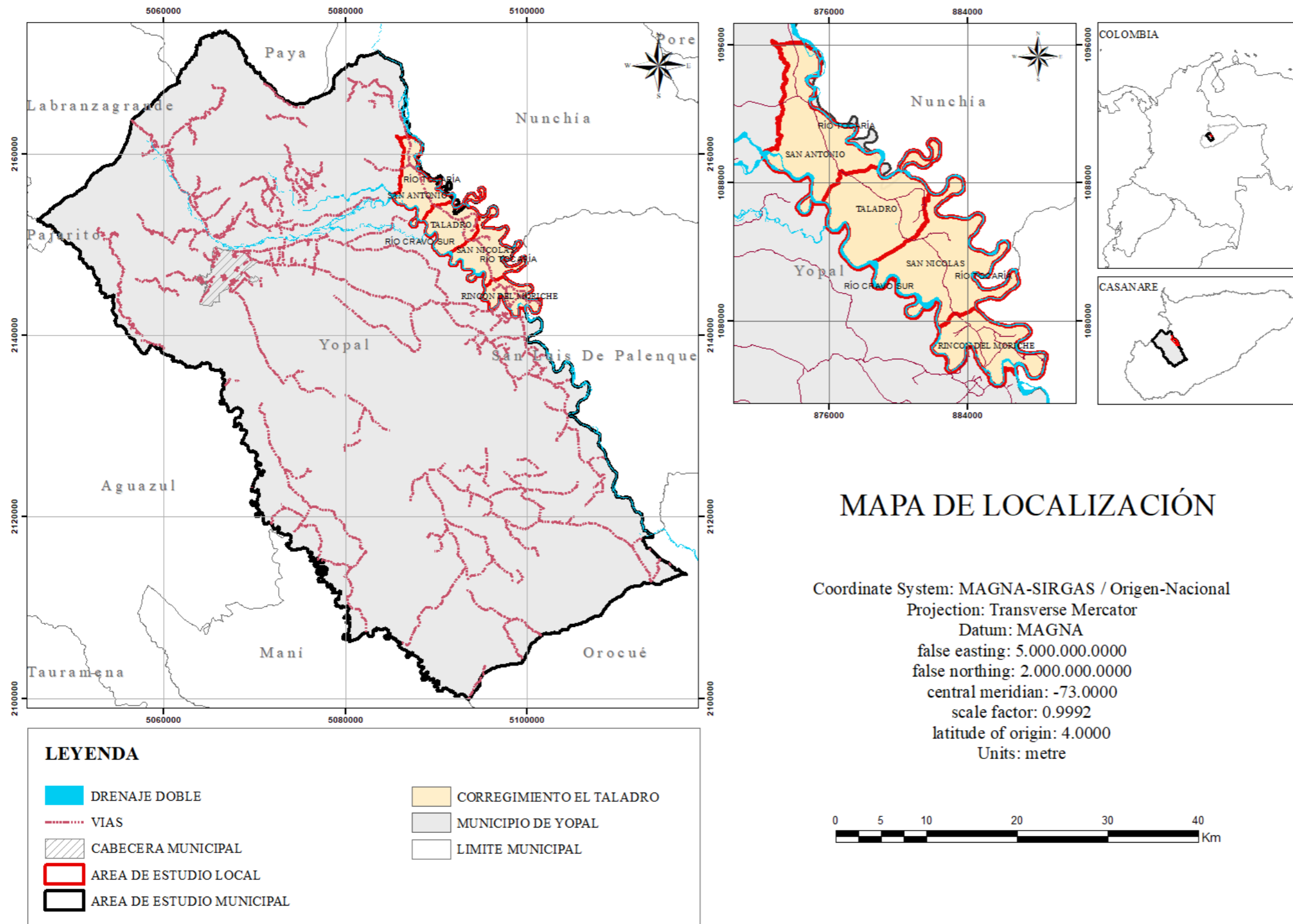
El municipio cuenta con una extensión total de 2.595 km<sup>2</sup>, de los cuales 11,91 km<sup>2</sup> corresponden al área urbana y 2.583 km<sup>2</sup> al área rural. La cabecera municipal se sitúa a una altitud de aproximadamente 350 msnm y presenta una temperatura media anual de 26 °C (Secretaría de Salud Municipal, 2024).

El corregimiento de El Taladro se localiza en el sector nororiental del municipio de Yopal, limitando con los municipios de Nunchía y San Luis de Palenque. Sus límites naturales están definidos por el río Tocaría al oriente y el río Cravo Sur al occidente, como se observa en la Figura 1. El área del corregimiento es de aproximadamente 94.44 km<sup>2</sup> (Alcaldía de Yopal, 2013) y se encuentra representada en las planchas topográficas del IGAC a escala 1:100.000, correspondientes a las hojas 193, 194, 212 y 213.

El corregimiento está conformado por cuatro veredas: San Antonio, San Nicolás, Rincón del Moriche y El Taladro (Alcaldía de Yopal, 2013)

Figura 1

Mapa de localización del área de estudio



Nota. Elaborado a partir de insumos del Servicio Geológico Colombiano (SGC)

## 2.2 Geología

El municipio de Yopal se encuentra dentro de la cuenca de los Llanos Orientales, una región de gran importancia para el sector de hidrocarburos, debido a la presencia de formaciones Mesozoicas y Cenozoicas con alto contenido de materia orgánica. Adicionalmente, su proximidad al sistema de fallas de Guaicaramo le confiere una configuración estructuralmente compleja (Fonseca et al., 2007).

En el área afloran principalmente unidades geológicas de edad Cenozoica, así como depósitos cuaternarios. Desde el punto de vista hidrogeológico, las unidades más relevantes son la Formación Diablo, la Formación Caja y los depósitos fluviales del Cuaternario, los cuales conforman los principales acuíferos del municipio ver Figura 2.

### 2.2.1 Formación Diablo (Td)

Esta formación es una sucesión principalmente arenosa y genera un relieve positivo en contraste a las unidades geológicas que la suprayacen e infrayacen. (Montoya et al., 2013)

Estudios Palinológicos recientes permiten determinar que los sedimentos de la Formación Diablo Inferior se depositaron en ambientes fluviales de alta energía durante el Mioceno Tardío. Las asociaciones Palinológicas provenientes de estos sedimentos también se caracterizan por la presencia común de palinomorfos redepositados provenientes del Mioceno Temprano, Oligoceno-Eoceno Tardío, Paleoceno y varios niveles del Cretáceo. Los sedimentos que conforman la Formación Diablo Inferior son el resultado de un intenso período erosivo en la Cordillera Oriental durante la fase inicial de la Orogenia Andina (Dueñas & Van der Hammen, 2023).

### **2.2.2 Formación Caja (Tc)**

El nombre de Formación Caja fue utilizado por Valencia (1938) en un informe inédito para la Shell, para agrupar areniscas y conglomerados con intercalaciones de gredas y arcillas esquistosas, cuya localidad tipo se ubica en el río Caja, al oeste de Tauramena. (Montoya et al., 2013)

Las rocas se caracterizan por su color rojizo, por la geometría de las capas curvadas no paralelas continuas y en donde es conspicuo las bases que son cicatrices erosivas luego rellenas por depósitos de canal, por la variedad del tamaño de grano desde arcillolitas hasta conglomerados y por ser rocas inmaduras.(Montoya et al., 2013)

La Formación Caja podría estar en sinonimia con el Grupo Guayabo del área de la Concesión Barco, sin embargo, al no existir información suficiente en edad, límites y características litológicas en estas dos áreas, no se podrían definir las condiciones paleográficas que controlaron la sedimentación en este intervalo y no se podría hacer comparaciones entre estas unidades.(Montoya et al., 2013)

### **2.2.3 Depósitos Cuaternarios**

Estas unidades corresponden a depósitos sedimentarios recientes, acumulados posiblemente en el Holoceno y se encuentran cubriendo de manera discordante rocas consolidadas con edades desde el Cretácico (Valanginiano) hasta el Cenozoico (Plioceno)(Montoya et al., 2013).

#### **Depósitos de Planicie Aluvial (Q1pal)**

Superficies planas formadas por una capa de materia orgánica (0.20 - 2 m), seguida de material fino arcilloso (ocres a amarillentos), y en algunas áreas, gravas de areniscas finas y limolitas negras. Estos depósitos se encuentran en la región cerca del río Meta y varían en espesor, siendo más profundos en la sabana y más superficiales cerca del piedemonte (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

**Depósitos Aluviales Subactuales (Q1als)**

Depósitos elevados con respecto al nivel actual de los ríos, posiblemente por actividad neotectónica (5-8 m). Están compuestos por partículas de cantos y quijos en una matriz arcillo-arenosa. Se localizan en el piedemonte, como en la vereda Cagui Milagro y la Loma La Meseta en Yopal (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

**Depósitos de Abanico (Q2ab)**

Depósitos que forman terrazas, compuestos principalmente por gravas de tamaño cantos y material arenoso-limoso. En la parte distal, se presentan acumulaciones de hasta 10 m de material arcilloso-limoso o arenas-lodosas, con características de meteorización. Localizados en Nunchía y áreas cercanas a quebradas (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

**Depósitos Coluviales (Q2c)**

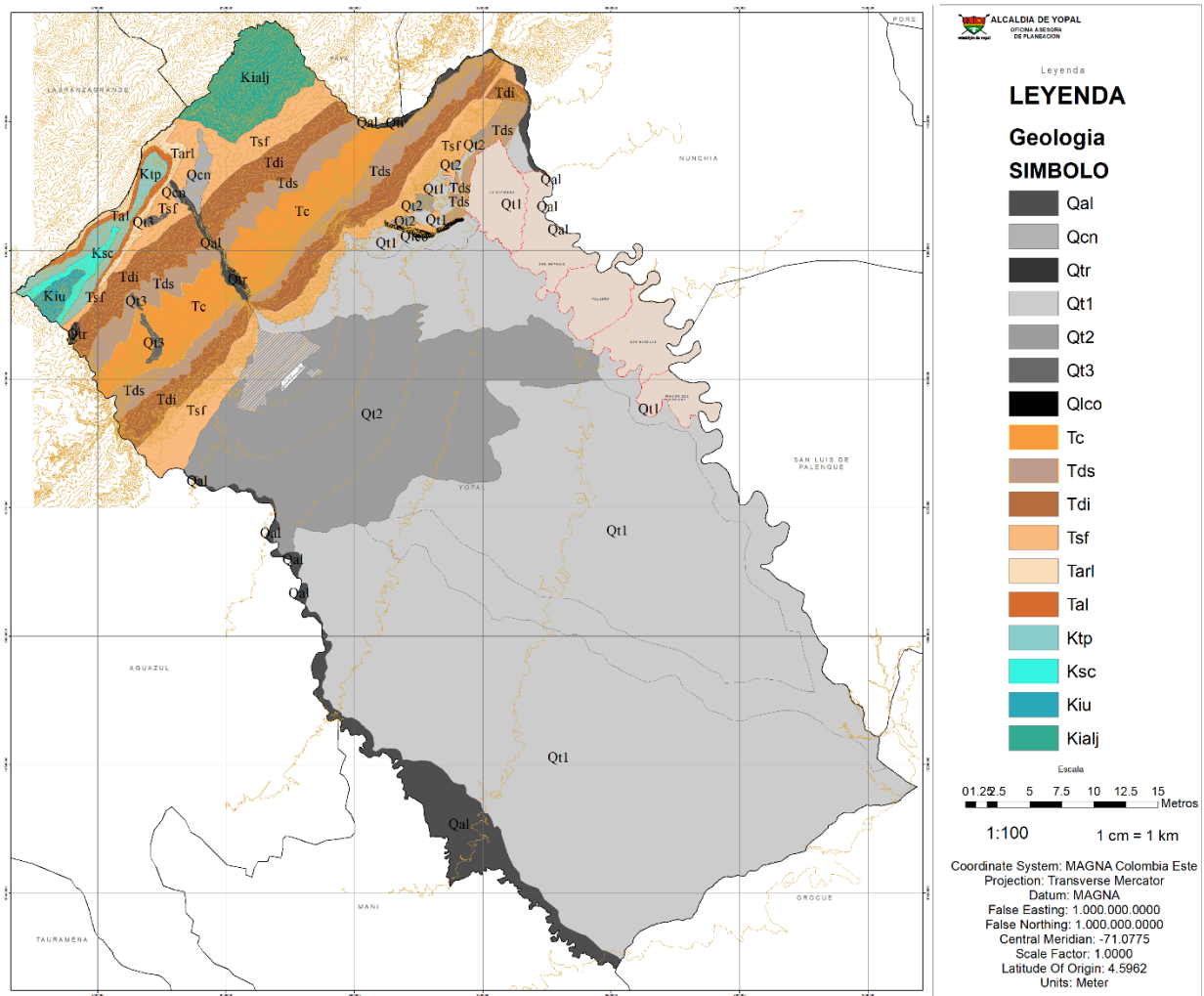
Depósitos no consolidados formados por bloques y guijarros de formaciones competentes y no competentes, ubicados en la región de montaña al norte de Yopal, en sectores como El Morro y la Vereda Marroquín. No presentan afloramientos debido a la cobertura vegetal (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

**Depósitos Aluviales Actuales (Q2al)**

Depósitos fluviales actuales ubicados en los márgenes de los ríos Charte y Cravo Sur, con características variables según el sistema de relieve (montaña, piedemonte y llanura). Están formados por gravas, conglomerados, y arenas. Estos depósitos presentan diferentes grados de granulometría y estratificación, variando desde granos gruesos cerca de las montañas hasta arenas finas en las zonas de llanura (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

**Figura 2**

*Mapa Geológico de Yopal*



*Nota.* Modificado del POT de la alcaldía de Yopal.

**2.3 Geología estructural**

En el piedemonte llanero, las fallas del Borde Llanero, Guaicaramo y Yopal condicionan de manera significativa la configuración estructural de la región, lo cual puede influir directamente en la carga hidráulica de los acuíferos y de las unidades hidrogeológicas. En la Figura 3 se ilustra

la relación entre las estructuras geológica y las unidades hidrogeológicas del municipio de Yopal, evidenciando dos paisajes contrastantes: la zona montañosa al occidente y la amplia llanura al oriente. Esta disposición permite comprender el piedemonte llanero colombiano como el resultado de la interacción entre la Cordillera Oriental y la llanura: la cordillera actuando como área erosional o de disección, y la llanura como área de sedimentación. En este contexto, la tectónica desempeña un papel determinante en la configuración del relieve, dada la marcada discontinuidad estructural entre la montaña y la depresión (bloque hundido), así como en el modelado actual asociado a los depósitos de piedemonte y a los materiales transportados y depositados en la llanura aluvial (Fonseca et al., 2007).

### **2.3.1 *Falla de Guaicaramo***

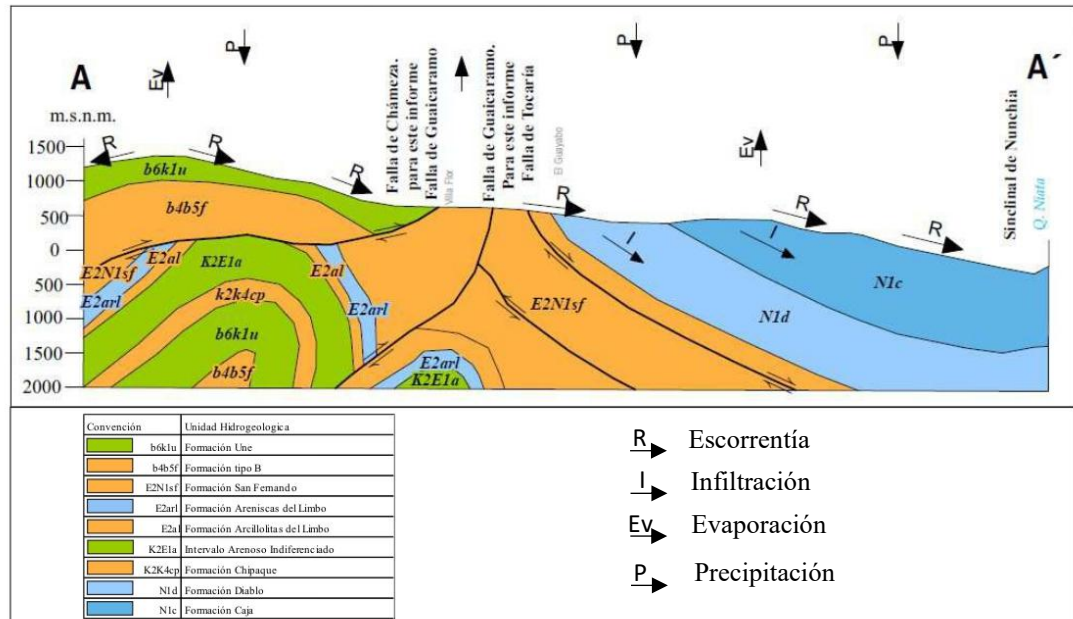
Esta falla regional de cabalgamiento tiene una dirección de N40°E e inclinación oeste que se extiende por más de 100 km, desde Cumaral en el Departamento del Meta, hasta el río Cravo Sur, a la altura del corregimiento de El Morro en el municipio de Yopal (planchas 211, 212, 230, 231). Esta falla mantiene claramente el control estructural de piedemonte en el área de estudio, desde el río Upía al oeste del municipio de Villanueva donde pone en contacto rocas del Grupo Palmichal, al oeste (bloque levantado), con las rocas del Neógeno de la Formación Caja al este (Fonseca et al., 2007).

### **2.3.2 *Falla de Yopal.***

Esta falla de cabalgamiento del Borde Llanero, de rumbo preferencial NE y vergencia al NW, se puede seguir a lo largo de toda la zona de estudio, desde el municipio de Villanueva hasta el municipio de Nunchía, prolongándose por el piedemonte hasta la altura del municipio de Tame, en el Departamento de Arauca (Fonseca et al., 2007).

**Figura 3**

*Corte representativo de las principales fallas*



**Figura 217.** Corte Hidrogeológico A – A’.

*Nota.* Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

## 2.4 Hidrogeología

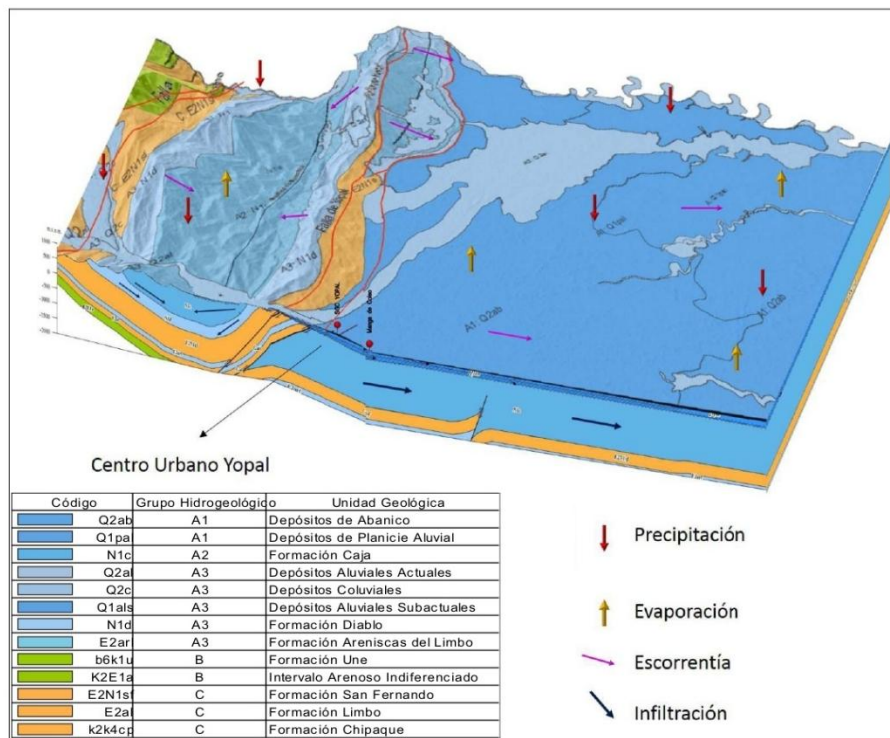
En Colombia, la complejidad geológica, geográfica y climática ha dado lugar a una gran variedad de ambientes hidrogeológicos, los cuales han sido agrupados en 16 provincias hidrogeológicas, que abarcan cerca del 74% del territorio nacional (IDEAM, 2013), estas provincias permiten identificar y caracterizar los sistemas acuíferos, con base en sus condiciones estructurales, litológicas y climáticas.

Dentro de esta zonificación, el municipio de Yopal (Casanare) forma parte de la provincia hidrogeológica de la Orinoquía, caracterizada por acuíferos extensos, libres o localmente confinados, desarrollados sobre abanicos aluviales y planicies fluviales. En esta región, Los

sistemas acuíferos de mayor interés, se encuentran asociados con los sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente aluvial y rocas sedimentarias terciarias semiconsolidadas a consolidadas, cuyas características texturales y composicionales los constituyen principalmente en acuíferos de tipo libre, localmente confinado (Ver Figura 4). Estas unidades han sido clasificadas en unidades hidrogeológicas bajo los estándares de la Guía Metodológica propuesta por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos ver Tabla 1. (Gómez, 2020)

**Figura 4**

*Modelo hidrogeológico de Yopal*



**Figura 219.** Bloque diagrama hidrogeológico.

*Nota.* Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2018)

A1: Sistemas acuíferos continuos, libres o localmente confinados, con alta transmisividad y extensión regional, formados principalmente por sedimentos no consolidados.

A2: Sistemas acuíferos confinados de extensión semiregional, multicapa, con transmisividad media, constituidos por rocas sedimentarias consolidadas.

A3: Sistemas acuíferos discontinuos, libres o confinados, de extensión local, con menor continuidad lateral y transmisividad variable.

B: Sistemas acuíferos donde el flujo ocurre principalmente a través de fracturas o zonas carstificadas en rocas consolidadas.

C: Unidades con bajo interés hidrogeológico debido a su baja porosidad y permeabilidad, con limitada capacidad de almacenamiento y flujo.

**Tabla 1**

*Unidades Hidrogeológicas*

<b>Unidad Geológica</b>	<b>Grupo Hidro geológico</b>	<b>Tipo de Sistema Acuífero</b>	<b>Características Principales</b>	<b>Recarga Potencial Anual (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Depósitos de Abanico (Q2ab)</b>	A1	Acuífero libre a localmente confinado (continuo)	Material no consolidado, gravas cuarzosas y limosas, matriz arenosa conglomerática.	7,154,959
<b>Depósitos de Planicie Aluvial (Q1pal)</b>	A1	Acuífero libre localmente confinado (continuo)	Arenas limpias finas, limo arcilloso, guijos redondeados.	7,045,678
<b>Formación Caja (N1c)</b>	A2	Acuífero multicapa confinado (semiregional)	Areniscas finas a medias, lodolitas, arcillolitas, estructura cuneiforme,	2,178,146
<b>Depósitos Aluviales Actuales (Q2al)</b>	A3	Acuífero libre (discontinuo)	Arenas finas, limo arcilloso, guijos redondeados, flujo preferencial noroeste-sureste	2,598,510
<b>Depósitos Coluviales (Q2c)</b>	A3	Acuífero libre/local (discontinuo)	Material heterométrico, bloques a arcilla, flujo local	469,442
<b>Depósitos Aluviales Subactuales (Q1als)</b>	A3	Acuífero libre/local (discontinuo)	Cantos y guijos en matriz arcillo-arenosa, poca extensión	31,043
<b>Formación Diablo (N1d)</b>	A3	Acuífero multicapa confinado (discontinuo)	Cuarzo-areniscas medias a gruesas, lentes de conglomerados, flujo local	1,176,420
<b>Formación Areniscas del Limbo (E2arl)</b>	A3	Acuífero confinado/local (discontinuo)	Areniscas conglomeráticas, guijos y conglomerados subredondeados	424,762
<b>Formación Une (b6k1u)</b>	B	Acuífero libre a semiconfinado (fracturado)	Arenitas de grano fino a grueso, lodosas, ricos en materia orgánica, flujo local	922,337

<b>Intervalo Arenoso Indiferenciado (K2E1a)</b>	B	Acuífero libre a semiconfinado (fracturado)	Arenitas gruesas, lodolitas, estratificación gradada, presencia de hidrocarburos	534,432
<b>Formación San Fernando (E2N1sf)</b>	C	Bajo interés hidrogeológico	Arcillolitas y cuarzoarenitas, estratificación cruzada, flujo local a intermedio	1,558,776
<b>Formación Limbo (E2a)</b>	C	Bajo interés hidrogeológico	Arcillas grises y verdosas con areniscas cuarzosas	230,099
<b>Formación Chipaque (k2k4cp)</b>	C	Bajo interés hidrogeológico	Arcillolitas grises oscuro con arenitas y calizas fosilíferas	536,106

*Nota.* La tabla presenta la clasificación de las unidades geológicas según sus características hidrogeológicas.

## 2.5 Marco conceptual

### 2.5.1 Acuífero

Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua. El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico. Se han realizado estudios que permiten calcular que aproximadamente el 30 por ciento del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea (Ordoñez, 2011).

Según Ordoñez (2011) Los acuíferos según su localización geológica los podemos clasificar en:

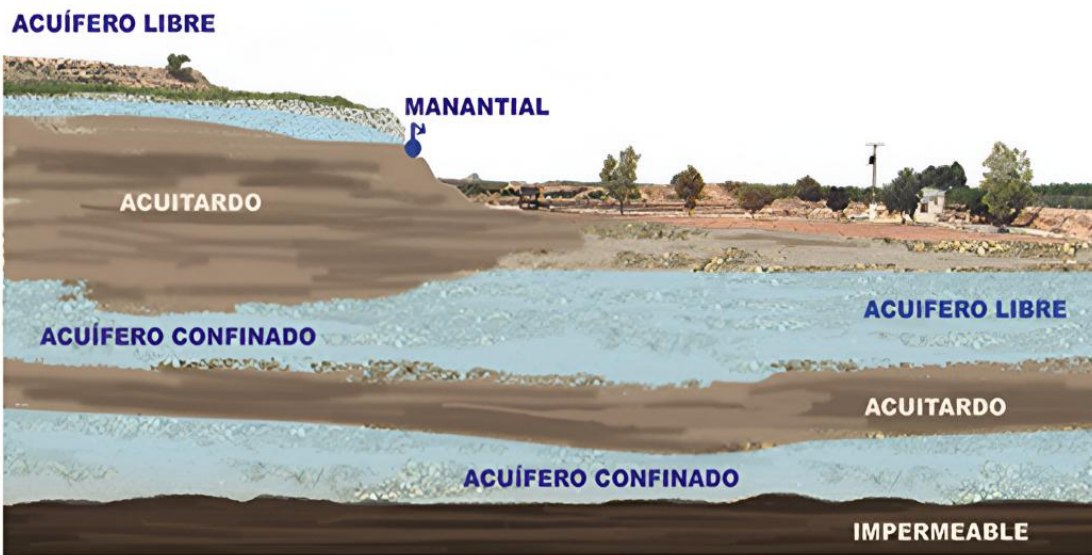
**Acuíferos libres:** Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros (Figura 5).

**Acuíferos confinados:** Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos (Figura 5).

**Acuíferos semiconfinados:** Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua (Figura 5).

**Figura 5**

*Esquema de representación de los tipos de Acuíferos*



*Nota.* Fuente: Ordoñez (2011)

### 2.5.2 Tipos de captación

las captaciones de agua subterránea son todas aquellas instalaciones que permiten poner a disposición del usuario el agua contenida en los acuíferos. (Vélez, 2011)

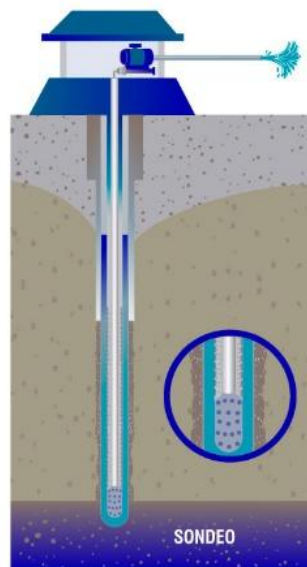
Los diferentes tipos de captaciones se pueden clasificar así:

- **Pozos:** Perforación vertical, generalmente en forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad como se muestra en la Figura 6. El agua penetra a lo largo de las paredes creando un flujo de tipo radial (Vélez, 2011).

- Drenes y galerías: Perforaciones o instalaciones horizontales de sección más o menos circular, con una longitud mayor que el diámetro. Se crea a lo largo un flujo paralelo y horizontal (Vélez, 2011).
- Zanjas: Excavaciones rectilíneas en trinchera, generalmente de poca profundidad, poco usadas como captaciones y con funcionamiento similar a los drenes y galerías (Vélez, 2011).
- Aljibes o cisternas: estructuras utilizadas para la captura y almacenamiento de agua subterránea, a menudo construidas manualmente y con diámetros que pueden llegar a un metro (Vélez, 2011).

### Figura 6

*Esquema de la estructura de un pozo*



Nota. Tomado de (Ordoñez, 2011)

### **2.5.3 Riesgo**

La Ley 1523 de 2012, el Artículo 4, especifica que los riesgos de desastres corresponden a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. De acuerdo con lo mencionado, se entiende que el riesgo abarca la combinación entre la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.)

### **2.5.4 Amenaza**

La Ley 1523 de 2012 (Artículo 4), referencia a la amenaza como un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.).

### **2.5.5 Vulnerabilidad**

La Ley 1523 de 2012 referencia a la vulnerabilidad (Artículo 4) como la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional, que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.).

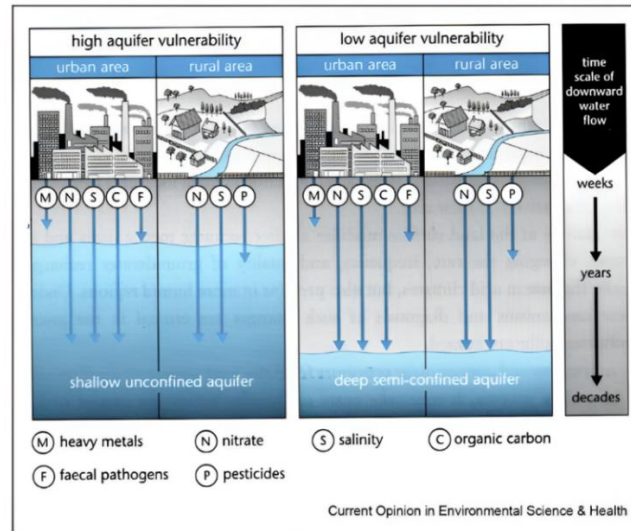
### **2.5.6 Contaminantes**

La contaminación de las aguas subterráneas reduce la idoneidad de las aguas subterráneas extraídas para el consumo y otros usos humanos, al tiempo que puede afectar a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (UNESCO, 2022).

Hay muchas fuentes de contaminación antropogénica de las aguas subterráneas: la mayoría de ellas están situadas en la superficie del terreno o cerca de ella (agricultura, hogares, alcantarillado, vertederos, industrias y otras fuentes urbanas, tanques de almacenamiento, carreteras, canales, tuberías, etc.), pero hay otras fuentes que inyectan contaminantes en el subsuelo a mayor profundidad por debajo de la superficie (pozos, explotación de petróleo y gas, minería, vertidos en el subsuelo y otras actividades humanas del subsuelo). La contaminación agrícola está muy extendida; es una fuente difusa (fuente no puntual) que suele incluir grandes cantidades de nitrato, pesticidas y otros productos agroquímicos (ver Figura 7). En cambio, las industrias y los hogares suelen producir una contaminación puntual. La gama de contaminantes industriales es muy amplia (numerosas sustancias orgánicas e inorgánicas, microorganismos, radionúclidos) y varía según los tipos de productos industriales (UNESCO, 2022).

#### **Figura 7**

*Fuentes de contaminación en zonas urbanas y rurales.*



*Nota.* Tomado de (Foster & Chilton, 2021)

### 2.5.7 Fuentes de contaminación

- **Difusa:** Las fuentes de contaminación difusa no generan plumas de contaminación del agua subterránea claramente definidas, sino que normalmente impactan en un área (y por lo tanto un volumen) mucho mayor del acuífero (Foster et al., 2002).
- **Puntual:** Las fuentes de contaminación puntual normalmente producen plumas claramente definidas y más concentradas, las cuales facilitan su identificación (y en algunos casos el control); sin embargo, cuando estas actividades, que producen fuentes de contaminación puntual, son pequeñas y múltiples, terminan por equivaler a una fuente esencialmente difusa en lo que respecta a su identificación y control (Foster et al., 2002).

### **3 Alcance del estudio**

El alcance de este estudio abarca el inventario de las fuentes de contaminación del sistema acuífero de Yopal, Casanare (Colombia), mediante un análisis geomático que abarcará el área del municipio de Yopal, que se extiende por 2,583 km<sup>2</sup>. Adicionalmente, se llevará a cabo un trabajo de campo en el corregimiento El Taladro, que comprende un área de 128.66 km<sup>2</sup>, con el fin de validar la información obtenida a través de la metodología CORINE Land Cover. Para ello, se realizarán visitas a la comunidad local, permitiendo contrastar y complementar los datos obtenidos por medios satelitales.

Es importante señalar que este estudio no contempla la verificación en campo de toda el área de Yopal, sino únicamente del corregimiento de El Taladro (94.44 km<sup>2</sup>), previamente mencionado.

Los resultados obtenidos servirán como base para futuras investigaciones más detalladas sobre los puntos de contaminación, facilitando la ampliación de las visitas de campo a otros corregimientos e incluso a otros municipios del departamento. Asimismo, estos hallazgos podrán contribuir a la elaboración de un mapa de riesgo de contaminación de aguas subterráneas por actividad antropogénica, permitiendo identificar las zonas más vulnerables y orientando el desarrollo de estrategias de gestión ambiental para la protección de los recursos hídricos.

### **4 Metodología**

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo y descriptivo, orientado al análisis espacial de las coberturas del suelo y su relación con fuentes potenciales de contaminación en el municipio de Yopal, mediante el uso de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica, además de corroboración en campo por medio de actividades sociales y visitas a lugares de mayor relevancia en el corregimiento El Taladro. La metodología aplicada es

similar a la empleada por Romero y Urrea (2021) en el acuífero de la Mesa de los Santos (Santander), adaptándola a las particularidades del área de estudio y los objetivos específicos de este trabajo. La metodología se estructuró en cuatro fases, en cada fase se describen las actividades diseñadas para garantizar el cumplimiento de cada objetivo específico.

#### 4.1 FASE 1. Identificar las fuentes potenciales de contaminación

Esta fase comprende la recopilación y análisis de información primaria y secundaria, con el fin de obtener una base de datos sólida sobre los usos del suelo y actividades particulares que me definan características ambientales y fuentes potenciales de contaminación en la zona de estudio. Para ello, se realiza las siguientes actividades:

##### **Actividad 1.1** Recopilación de información secundaria

**Actividad 1.1.1** Realizar una revisión y consulta de fuentes de información secundaria para la identificación de los usos del suelo y las posibles fuentes de contaminación en la zona de estudio, mediante la recopilación de datos provenientes de entidades oficiales y bases de datos abiertas. Esta información incluye registros sobre uso y cobertura del suelo, actividades industriales, agrícolas y pecuarias, así como informes ambientales, planes de gestión y desarrollo y documentos relacionados con la gestión ambiental, insumos para la construcción de los mapas temáticos, los cuales se detallan en la Tabla 2

**Tabla 2**

*Base de datos de fuentes de información secundaria*

Entidad	Información
Gobernación De Casanare	Plan de Desarrollo Departamental (PDD 2024-2027) Plan Departamental de Extensión Agropecuaria

<b>Contraloría Departamental del Casanare</b>	Informe Sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente
<b>Alcaldía De Yopal</b>	Plan de Ordenamiento Territorial PGIRS- Plan de gestión integral de residuos solidos
<b>Corporación Autónoma De La Orinoquia</b>	Pomca Rio Cravo Sur
<b>Corporación Autónoma De Boyacá</b>	Pomca Rio Cravo Sur
<b>Instituto Geográfico Agustín Codazzi</b>	Base de datos abiertos de cartografía de catastro y usos del suelo.
<b>Servicio Geológico Colombiano</b>	Modelo hidrogeológico conceptual Del municipio de Yopal, Departamento de Casanare Banco de Información petrolera
<b>UPRA-Unidad de planificación rural agropecuaria</b>	Base de datos del inventario de sistemas de producción pecuarios y de agricultura del municipio de Yopal

**Actividad 1.2** Procesar y clasificar imágenes satelitales para la identificación de las coberturas del suelo.

**Actividad 1.2.1** Descargar imágenes satelitales mediante la plataforma gratuita Copernicus Browser, estableciendo filtros de búsqueda correspondientes al satélite Sentinel-2, nivel de procesamiento L2A, debido a que estas imágenes presentan corrección radiométrica y atmosférica. Seleccionar imágenes con un porcentaje máximo de cobertura de nubes del 10 %, y definir un rango temporal correspondiente al año 2025 captando la imagen más reciente posible, con un horario de adquisición comprendido entre las 6:00 a.m. y las 6:00 p.m., con el fin de evitar imágenes con baja iluminación.

**Actividad 1.2.2** Cargar las imágenes seleccionadas en el software QGIS versión 3.40 y generar un ráster virtual mediante la combinación de las bandas 11-8-2, con el propósito de mejorar la discriminación de los tipos de uso y cobertura del suelo. Utilizar esta combinación espectral por su efectividad en la identificación de coberturas asociadas a áreas agrícolas, cuerpos de agua y vegetación.

**Actividad 1.2.3** Instalar el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) en el software QGIS versión 3.40 para llevar a cabo la clasificación supervisada y no supervisada de las imágenes satelitales. Iniciar el proceso con la clasificación no supervisada, utilizando la herramienta Band Processing, en la opción Clustering del menú del SCP, la cual genera de manera autónoma una visualización preliminar de las coberturas potencialmente identificables por el algoritmo.

Con base en los resultados obtenidos en esta etapa exploratoria, realizar la clasificación supervisada, mediante la creación de polígonos de entrenamiento correspondientes a las macro clases previamente identificadas. A través de la herramienta Training Input, asignar un código numérico a cada cobertura a clasificar, de acuerdo con los tipos de coberturas establecidos en la leyenda de la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia (IDEAM, 2010), teniendo en cuenta que la unidad mínima cartografiable para las coberturas es de 1,56 hectáreas para la elaboración de mapas 1:25.000 (IGAC, 2021). Una vez creados los polígonos se usa la herramienta Band Processing, en la opción Classification, generando la clasificación final.

### **Actividad 1.3** Recopilación de información primaria

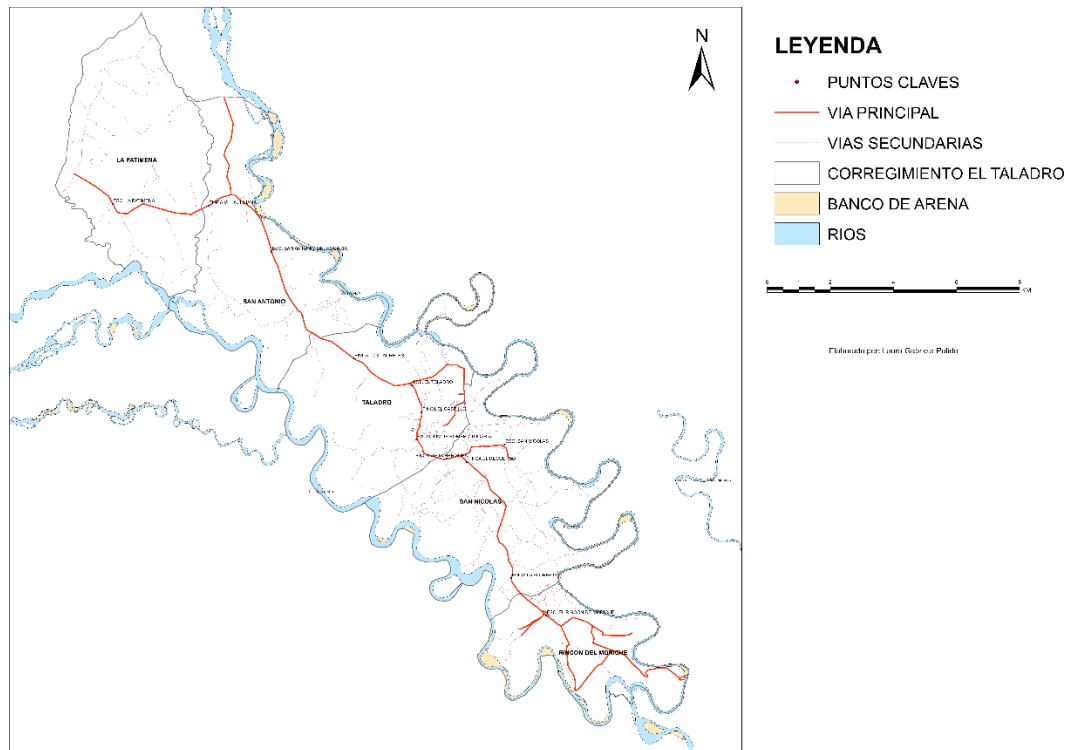
**Actividad 1.3.1** Identificar a los principales líderes comunitarios de las cuatro veredas que conforman el corregimiento de El Taladro. Posteriormente, comunicar a los líderes el objetivo de

las actividades a desarrollar y concertar las fechas para la realización de las visitas de campo y los encuentros participativos con la comunidad.

**Actividad 1.3.2** Elaborar un mapa base a partir de la cartografía obtenida del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio, incluyendo los principales lugares de referencia, cuerpos de agua representativos y las vías principales del corregimiento, como se muestra en la Figura 8.

### Figura 8

*Mapa de base cartográfica del corregimiento El Taladro*



*Nota.* Adaptado del POT del municipio de Yopal.

Una vez impreso el mapa base, realizar una actividad participativa con los líderes comunitarios y habitantes de las veredas, con el fin de identificar los recursos naturales, los usos del suelo y las actividades que puedan generar impactos sobre el acuífero. Esta actividad permite fortalecer la

representación visual de la información geográfica del territorio, como se ilustra en la Figura 9.

Para el desarrollo del ejercicio participativo, aplicar la siguiente metodología:

1. Reunir a los participantes y socializar el objetivo, explicando de manera clara el propósito del ejercicio y el uso de la información generada.
2. Definir de forma conjunta los elementos a representar en el mapa, tales como cuerpos de agua, vías, viviendas, zonas agrícolas y posibles sitios con fuentes de contaminación.
3. Apoyar la elaboración del mapa base, orientando inicialmente la ubicación de los principales puntos de referencia y permitiendo posteriormente que la comunidad continúe de manera autónoma la construcción del mapa.
4. Utilizar símbolos claros y consensuados, definidos por los participantes, para representar los elementos y problemáticas identificadas en el territorio.
5. Socializar y discutir los resultados obtenidos, promoviendo el intercambio de percepciones y observaciones entre los participantes.

### Figura 9

*Ejemplo de mapa social elaborado por estudiantes de secundaria.*



*Nota.* Adaptado de (Bustamante & López, 2024)

**Actividad 1.3.3** Diseñar formatos de entrevistas como instrumentos de recolección de información, estructurados con preguntas cerradas y abiertas, orientadas a caracterizar las fuentes potenciales de contaminación asociadas a la práctica de actividades agrícolas y pecuarias, así como a las fuentes contaminantes derivadas de los sistemas de saneamiento en áreas rurales, como se muestra en la Figura 10, Figura 11, Figura 12.

### Figura 10

*Diseño de la encuesta para la recolección de información sobre posibles fuentes de contaminación de aguas subterráneas asociadas a actividades Agrícolas*

ENCUESTA SOBRE EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA	
<p><b>Objetivo:</b> Completar una investigación educativa sobre fuentes de contaminación en la zona y recomendar acciones para la preservación de las aguas subterráneas. ¿Está de acuerdo con el tratamiento que se le dará a la información proporcionada por usted? Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Sí</p> <p><b>Nota:</b> Los agroquímicos son sustancias químicas utilizadas en la agricultura para mejorar la producción de cultivos. Estos incluyen fertilizantes, que enriquecen el suelo con nutrientes, y pesticidas, que controlan plagas y enfermedades que pueden dañar las plantas.</p>	
Ubicación	
Contacto	
1. Cultivos predominantes (Seleccione todos los que apliquen) <input type="checkbox"/> Arroz <input type="checkbox"/> Plátano <input type="checkbox"/> Yuca <input type="checkbox"/> Otros: _____	2. Período de cosecha <input type="checkbox"/> Todo el año <input type="checkbox"/> Temporadas <input type="checkbox"/> Otro: _____
3. Uso de agroquímicos: <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	4. Si respondió "Sí", ¿cuáles agroquímicos utiliza?
5. Frecuencia de uso de agroquímicos: <input type="checkbox"/> Diariamente <input type="checkbox"/> Semanalmente <input type="checkbox"/> Mensualmente <input type="checkbox"/> No sabe <input type="checkbox"/> Otro: _____	6. Lugar de extracción de agua para riego (Seleccione uno): <input type="checkbox"/> Lagos artificiales <input type="checkbox"/> Ríos <input type="checkbox"/> Pozos <input type="checkbox"/> Otros: _____

*Nota.* Adaptado de (Romero & Urrea, 2021)

**Figura 11**

*Diseño de la encuesta para la recolección de información sobre posibles fuentes de contaminación de aguas subterráneas asociadas a actividades pecuarias.*

ENCUESTA SOBRE EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN PECUARIA	
<p><b>Objetivo:</b> Completar una investigación educativa sobre fuentes de contaminación en la zona y recomendar acciones para la preservación de las aguas subterráneas. ¿Está de acuerdo con el tratamiento que se le dará a la información proporcionada por usted? Si ___ No ___</p> <p><b>Nota:</b> Pecuario es un término que se refiere a la actividad ganadera, es decir, la cría de animales para su aprovechamiento económico.</p>	
Ubicación	
Contacto	
<p>1. Qué tipo de ganadería predominante tiene (Seleccione todos los que apliquen)</p> <p><input type="checkbox"/> Extensivo</p> <p><input type="checkbox"/> Intensivo</p>	<p>2. ¿Hacia dónde se dirigen los desechos generados, como estiércol y restos de comida?</p>
<p>3. ¿Utilizan algún tipo de fibra natural (como aserrín o tambo de arroz) como cama para los animales?:</p> <p><input type="checkbox"/> Sí</p> <p><input type="checkbox"/> No</p>	<p>4. ¿Cada cuanto se cambia?</p>
<p>5. ¿Cuentan con sistemas de gestión para los residuos generados?</p> <p><input type="checkbox"/> Sí</p> <p><input type="checkbox"/> No</p> <p>Si respondió "Sí", especifique el sistema utilizado:</p>	<p>6. ¿Cuál es el destino final de los residuos generados? (Puede seleccionar más de una opción):</p> <p><input type="checkbox"/> Abono de cultivos</p> <p><input type="checkbox"/> Composta</p> <p><input type="checkbox"/> Venta</p> <p><input type="checkbox"/> Otros:</p>
<p>7. ¿Poseen sistemas de tratamiento para las aguas residuales?</p> <p><input type="checkbox"/> Sí</p> <p><input type="checkbox"/> No</p>	<p>8. ¿A dónde se dirigen las aguas utilizadas para el abastecimiento y mantenimiento de los establos o corrales?</p>
<p>9. Lugar de extracción de agua para riego (Seleccione uno):</p> <p><input type="checkbox"/> Lagos artificiales</p> <p><input type="checkbox"/> Ríos</p> <p><input type="checkbox"/> Pozos</p> <p><input type="checkbox"/> Otros:</p>	<p>10. ¿Cree usted que la ganadería intensiva puede afectar la calidad del agua subterránea?</p> <p><input type="checkbox"/> Sí</p> <p><input type="checkbox"/> No</p>

*Nota.* Adaptado de (Romero & Urrea, 2021)

**Figura 12**

*Diseño de la encuesta para la recolección de información sobre posibles fuentes de contaminación de aguas subterráneas asociadas al desarrollo rural.*

ENCUESTA SOBRE ENCUESTA SOBRE DESARROLLO RURAL	
<p><b>Objetivo:</b> Completar una investigación educativa sobre fuentes de contaminación en la zona y recomendar acciones para la preservación de las aguas subterráneas. ¿Está de acuerdo con el tratamiento que se le dará a la información proporcionada por usted? Si _____ No _____</p> <p><b>Nota:</b> Alcantarillado: Sistema de tuberías que transporta aguas residuales.  Aguas negras: Aguas residuales que contienen desechos humanos.  Pozos sépticos: Tanques que tratan las aguas residuales en lugares sin alcantarillado.</p>	
Ubicación	
Contacto	
1. ¿Existe sistema de alcantarillado? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	2. Si existe, ¿es accesible? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
3. ¿Qué sistemas de drenaje se usan para deshacerse de las aguas negras?	4. ¿Qué tipo de pozos sépticos predominan en su zona? Concreto Poliétileno Fibra de Vidrio Otros:
5. ¿Realizan mantenimiento a las fosas sépticas? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	Si es afirmativo, ¿cada cuánto se realiza el mantenimiento?
6. ¿Cuentan con sistemas de gestión para los residuos? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	7. ¿Cuál es el manejo de los residuos sólidos y hacia dónde se dirigen?
8. ¿Cada cuanto se realiza? <input type="checkbox"/> Diariamente <input type="checkbox"/> Semanalmente <input type="checkbox"/> Mensualmente <input type="checkbox"/> Otro:	9. ¿De dónde se extrae el agua para su abastecimiento? <input type="checkbox"/> Pozos <input type="checkbox"/> Cisternas <input type="checkbox"/> Fuentes de agua superficial <input type="checkbox"/> Otros:

Nota. Adaptado de (Romero & Urrea, 2021)

**Actividad 1.3.4** Realizar visitas a las fincas representativas, previamente identificadas a partir de los mapas sociales, con el fin de aplicar las encuestas utilizando los formatos diseñados de acuerdo con la actividad desarrollada en cada predio.

Una vez recopilada la información, elaborar una tabla en la que se consigne la información más relevante para la identificación de fuentes potenciales de contaminación, considerando el tipo de contaminante que puede generarse a partir de las actividades desarrolladas. Entre las variables registradas se incluyen aspectos relacionados con el manejo de residuos sólidos, la gestión de aguas

residuales y, en el caso de actividades agrícolas, el uso y la frecuencia de aplicación de agroquímicos, entre otros.

La estructura de la matriz de registro de datos se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Matriz de registro de datos provenientes de los formatos de encuesta aplicados a fincas*

FINCA	CORDENAS	ACTIVIDAD	TIPO DE CONTAMINACIÓN	TIPO DE GANADERÍA	TIPO DE CULTIVO	AGROQUÍMICOS	FRECUENCIA DE AGROQUÍMICOS	ALCANTARILLADO	SISTEMA DE DRENAJE	MATERIALES	MANTENIMIENTO	MANEJO DE RESIDUOS	FRECUENCIA	ABASTECIMIENTO
	X Y													

Nota. Tabla diseñada para identificar las fuentes potenciales de contaminación en función de las actividades o prácticas realizadas en cada finca.

**Actividad 1.3.5** Realizar la verificación en campo de las coberturas de uso del suelo y actividades que pueden generar fuentes potenciales de contaminación, presentes en el corregimiento.

Georreferenciar los puntos obtenidos durante la verificación en campo mediante el uso de la aplicación Avenza Maps, y realizar un registro fotográfico que permita evidenciar las coberturas del suelo y las posibles fuentes de contaminación identificadas en la zona de estudio.

A partir de la información recopilada en el recorrido, elaborar una tabla que consolide los datos obtenidos, tal como se presenta en la Tabla 4.

Adicionalmente, construir un catálogo fotográfico siguiendo el formato presentado en la Figura 13, el cual incluye la ubicación del punto, una breve descripción de las coberturas identificadas y el tipo de actividad desarrollada en cada sitio.

**Tabla 4**

*Estructura de la base de datos para la sistematización de actividades y coberturas del suelo en las zonas de interés.*

Estación	Coordenadas			Nombre de referencia	Localización	Actividad	Observaciones	Cobertura etc	Fotografía
	x	y	z						

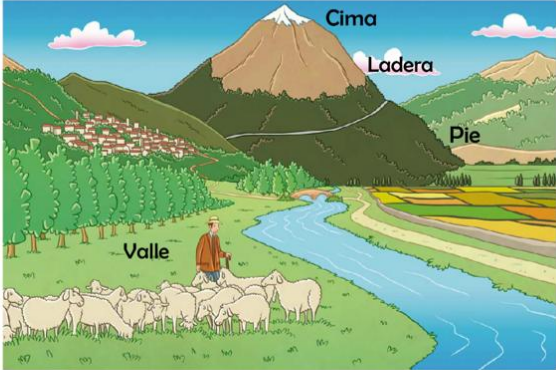
*Nota.* Adaptado de (Romero & Urrea, 2021)

**Figura 13**

*Formato de registro y descripción de evidencias fotográficas en campo*

**Fotografía 000**

- **UBICACIÓN:**  
X:  
Y:  
Z:
- **TIPO DE ACTIVIDAD:**
- **TIPO DE COBERTURA:**
- **DESCRIPCIÓN:**



**Nota.** Adaptado de (Romero & Urrea, 2021)

#### **4.2 FASE 2. Evaluar las cargas contaminantes aplicando el Método Pollutant Origin Surcharge Hydraulically (POSH)**

El objetivo de esta fase es clasificar las fuentes contaminantes en el área de estudio utilizando el Método (POSH) (Foster et al., 2002). Esta clasificación se centra en evaluar el potencial de contaminación de diferentes fuentes y establecer un inventario que resuma sus características y la carga contaminante que pueden generar. Para lograr esta fase se realizan las siguientes actividades:

##### **Actividad 2.1** Clasificación de fuentes contaminantes por el método POSH

**Actividad 2.1.1** Elaborar un inventario de fuentes potenciales de contaminación mediante la aplicación del método POSH, el cual se fundamenta en dos criterios principales: la posibilidad de presencia de contaminantes y la existencia de una carga hidráulica asociada al transporte de contaminantes hacia el acuífero (Foster et al., 2002).

El inventario se genera de manera hipotética, evaluando la carga contaminante que pueden llegar a tener las actividades identificadas, según los parámetros establecidos para el análisis de la carga contaminante en las actividades potencialmente generadoras de contaminación propuestas por Foster et al. (2002), presentadas en la Figura 14.

Figura 14

Actividades potencialmente contaminantes

Tabla 3.1 Resumen de las actividades potencialmente generadoras de una carga contaminante al subsuelo

TIPO DE ACTIVIDAD	categoría de distribución	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA CONTAMINANTE			
		principales tipos de contaminante	sobrecarga hidráulica	aplicada debajo de la capa de suelo (* indica que aumenta la importancia)	
<b>Desarrollo Urbano</b>					
saneamiento sin red cloacal	u/r P-D	n f o t	+	+	
cloacas con fugas (a)	u P-L	o f n t	+		
lagunas de oxidación de aguas residuales (a)	u/r P	o f n t	++	+	
descarga de aguas residuales en el suelo (a)	u/r P-D	n s o f t	+		
aguas residuales en ríos influentes (a)	u/r P-L	n o f t	++	++	
lixiviación de rellenos/volcaderos de basura	u/r P	o s h t		+	
tanques de almacenamiento de combustible	u/r P-D	t			
sumideros de drenaje de las carreteras	u/r P-D	s t	+	++	
<b>Producción Industrial</b>					
tanques/tuberías con fugas (b)	u P-D	t h			
derrames accidentales	u P-D	t h	+		
aguas de proceso/lagunas de efluentes	u P	r o h s	++	+	
descarga de efluentes en el suelo	u P-D	r o h s	+		
descargas hacia ríos influentes	u P-L	r o h s	++	++	
volcaderos de residuos con lixiviación	u/r P	o h s t			
sumideros de drenaje	u/r P	t h	++	++	
precipitación aérea de sustancias	u/r D	s t			
<b>Producción Agrícola (c)</b>					
a) cultivo					
- con agroquímicos	r D	n t			
- y con irrigación	r D	n t s	+		
- con lodo/lodo proveniente de agua residual	r D	n t s o			
- bajo riego con aguas residuales	r D	n t o s f	+		
b) cría de ganado/procesos de cosecha					
- lagunas de efluentes	r P	f o n t	++	+	
- descarga de efluentes en el suelo	r P-D	n s o f t			
- descarga hacia ríos influentes	r P-L	o n f t	++	++	
<b>Extracción Minera</b>					
alteración del régimen hidráulico	r/ta P-D	s h			
descarga de aguas de drenaje	r/ta P-D	h s	++	++	
aguas de proceso/lagunas de lodos	r/ta P	h s	+	+	
volcaderos de residuos con lixiviación	r/ta P	s h			
(a) puede incluir componentes industriales		n	compuestos de nutrientes	t	micro-organismos tóxicos
(b) puede ocurrir también en áreas no industriales		f	patógenos fecales	+	incrementa la importancia
(c) la intensificación representa el principal riesgo de contaminación		o	carga orgánica general		
u/r	urbana/rural	s	salinidad		
P/D	puntual/lineal/difusa	h	metales pesados		

Nota. Adaptado de (Foster et al., 2002).

**Actividad 2.1.2** Una vez elaborado el inventario, evaluar la carga contaminante potencial de cada fuente mediante la aplicación del método POSH. Este análisis considera el potencial de contaminación asociado a cada fuente, en función del tipo de actividad desarrollada, así como el aporte que podría generar al acuífero, ya sea a través de fuentes de contaminación difusas (ver Tabla 5) o de fuentes puntuales (ver Tabla 6).

El método POSH genera tres niveles cualitativos de potencial de generación de una carga contaminante al subsuelo:

**Reducido:** Fuentes con un bajo potencial de causar contaminación al acuífero, generalmente asociadas a prácticas sostenibles o de bajo impacto ambiental.

**Moderado:** Fuentes que poseen un potencial medio de contaminación, relacionadas con actividades que pueden tener efectos negativos bajo ciertas condiciones, como el uso de ciertos agroquímicos o manejo inadecuado de residuos.

**Elevado:** Fuentes con un alto potencial de contaminación, típicamente relacionadas con industrias, usos intensivos de agroquímicos, o actividades que generan residuos peligrosos.

## Tabla 5

### *Clasificación de fuentes de contaminación difusas*

**Tabla 3.3. Clasificación y categorización de fuentes de contaminación difusa de acuerdo al método POSH**

Potencial de carga contaminante al subsuelo	Fuente de contaminación – Saneamiento in situ	Fuente de contaminación – Prácticas agrícolas
<b>Elevado</b>	Cobertura del servicio de cloacas menor que 25 % y densidad poblacional superior a 100 personas/ha	Cultivos comerciales intensivos y la mayoría de los monocultivos en suelos bien drenados en climas húmedos o con baja eficiencia de riego; pastoreo intensivo sobre praderas altamente fertilizadas
<b>Moderado</b>	Intermedio entre elevado y reducido	Intermedio entre elevado y reducido
<b>Reducido</b>	Cobertura del servicio de cloacas mayor que 75 % y densidad poblacional inferior a 50 personas/ha	Rotación de cultivos tradicionales, pastoreo extensivo, sistemas de granjas ecológicas, cultivos bajo riego de alta eficiencia en áreas áridas

*Nota.* Adaptado de (Foster et al., 2002)

## Tabla 6

### *Clasificación de fuentes de contaminación puntuales*

**Tabla 3.4. Clasificación y categorización de fuentes puntuales de contaminación de acuerdo al método POSH**

Potencial por generación de carga contaminante al subsuelo	Disposición de residuos sólidos	Sitios industriales*	Lagunas de efluentes	Urbanas varias	Exploración minera y petrolera
<b>Elevado</b>	Residuos de industrias tipo 3; residuos de origen desconocido	Industrias tipo 3; cualquier actividad que maneje >100 kg/d de sustancias químicas	Todas las industrias tipo 3; cualquier efluente (excepto aguas residuales residenciales) si el área >5 ha	—	Operación de campos de petróleo; minas metalíferas
<b>Moderado</b>	Precipitación >500 mm/año con residuos residenciales, industriales tipo 1 o agroindustriales; todos los otros casos	Industrias tipo 2	Agua residual residencial si el área >5 ha; otros casos que no figuran arriba o abajo	Gasolineras; rutas con tráfico regular de sustancias químicas peligrosas	Algunas minas; canteras de materiales inertes
<b>Reducido</b>	Precipitación <500 mm/año con residuos residenciales, industriales tipo 1 o agroindustriales	Industrias tipo 1	Efluente residencial, urbano mezclado, agroindustrial y minero no metalífero si el área <1 ha	Cementerios	—

*Nota.* Adaptado de (Foster et al., 2002)

**Actividad 2.1.3** tabular las actividades previamente clasificadas según el método POSH con su potencial de generación, adicionalmente tener en cuenta características como: Ocurrencia espacial y temporal, Categoría de distribución, Principales tipos de contaminantes y localización, como el formato que se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Matriz de clasificación de actividades según el método POSH y su potencial de carga contaminante*

Lugar de referencia	CORDENADAS		Tipo de actividad	Categoría de Distribución	Principales tipos de contaminante	Potencial de carga contaminante al subsuelo	Ocurrencia Temporal
	X	Y					

*Nota.* Las variables utilizadas en la tabla se encuentran definidas en la guía metodológica propuesta por (Foster et al., 2002).

**Actividad 2.2** Elaborar un mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación identificadas en la actividad anterior, mediante la aplicación de la leyenda y los criterios establecidos por Foster et al. (2002), representados en la Figura 15.

**Figura 15**

*Leyenda del método POSH*

Figura 3.6 Leyenda para el mapeo de la carga contaminante al subsuelo

ACTIVIDAD GENERADORA DE CONTAMINANTES	REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA		
	reducida	moderada	elevada
<b>Fuentes Difusas</b>			
área residencial urbana			
uso agrícola del territorio		≡≡≡	≡≡≡
<b>Fuentes Puntuales</b>			
actividad industrial	□	◻	◼
laguna de efluentes	◐	◑	◒
disposición de residuos sólidos	◓	◔	◕
curso de agua superficial contaminada	—	△	▽
rutas de transporte	- - -	△	▽

*Nota.* Adaptado de (Foster et al., 2002)

**4.3 FASE 3. Generar mapas de clasificación de las potenciales fuentes contaminantes del municipio y del corregimiento.**

El objetivo de esta fase es elaborar un mapa de zonificación del grado de contaminación antrópica, a partir de la clasificación de fuentes contaminantes obtenida en la fase anterior mediante el método POSH (Foster et al., 2002). Para ello, la información del inventario y de la categorización de fuentes (reducido, moderado, elevado) será integrada en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permitirá representar espacialmente la distribución del

potencial contaminante en el área de estudio. Esta fase se realizará por medio de las siguientes actividades:

**Actividad 3.1** Integrar los datos obtenidos a partir de la recolección de información primaria y secundaria, con el fin de generar los insumos cartográficos necesarios para la elaboración de un mapa general que consolide el inventario de todas las fuentes con potencial de contaminación identificadas en el área de estudio, así como las coberturas de uso del suelo generadas a partir del procesamiento de imágenes satelitales.

**Actividad 3.2** Elaborar el mapa general de fuentes potenciales de contaminación a partir de los insumos generados en la actividad anterior y, con base en este, clasificar las fuentes identificadas según su nivel de potencial contaminante, asignando una simbología diferenciada: color rojo para actividades con alto potencial de contaminación, color amarillo para nivel moderado, y color verde para fuentes con potencial reducido.

Incorporar fuentes puntuales de contaminación, mediante la aplicación de un buffer aplicando el área según la actividad, para los puntos de los pozos petroleros aplicar 300 m, y para las gasolineras 200 m. Representar las coberturas naturales (Bosques y superficies de agua) como áreas sin potencial de contaminación.

#### **4.4 FASE 4. Investigar acciones para el control de la contaminación, que permitan mitigar los impactos negativos sobre la calidad del acuífero.**

Esta fase se orientó a la identificación y análisis de acciones para el control de la contaminación del acuífero, a partir de la revisión de información secundaria y normatividad ambiental vigente. Las acciones propuestas fueron organizadas y priorizadas según su aplicabilidad en el contexto local, con el fin de aportar medidas de prevención, control y mitigación de los impactos sobre la calidad del agua subterránea.

**Actividad 4.1** Realizar una investigación de información secundaria orientada a la identificación de acciones que permitan mitigar los impactos negativos generados por las fuentes de contaminación identificadas en las fases anteriores. Para ello, se llevó a cabo la búsqueda y revisión de guías metodológicas para la gestión de residuos contaminantes, informes de cumplimiento ambiental, estudios de impacto y normatividad ambiental vigente relacionada con la protección del recurso hídrico subterráneo, así como otros documentos técnicos y normativos relacionados.

Finalmente, las acciones propuestas fueron organizadas y priorizadas de acuerdo con su aplicabilidad en el contexto local del corregimiento El Taladro y el municipio de Yopal, teniendo en cuenta criterios técnicos, ambientales y normativos, con el propósito de aportar soluciones orientadas a la prevención, control y mitigación de la contaminación del acuífero.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 FASE 1.

Mediante la recopilación de información secundaria, el procesamiento de imágenes satelitales y las visitas de campo, se identificaron las principales fuentes de contaminación presentes en el área de estudio. Estas fueron clasificadas en cuatro actividades principales: la actividad agrícola y pecuaria, consideradas fuentes de contaminación difusa, y las actividades industriales y de urbanización, como fuentes de contaminación puntual.

#### 5.1.1 *Actividad 1.1*

El municipio de Yopal, ubicado en el piedemonte llanero, presenta una marcada diferenciación paisajística como se observa en la Figura 16. En la zona norte predominan los paisajes montañosos, que representan el 21,21% del territorio, donde la geología favorece

principalmente las actividades de extracción de hidrocarburos. Hacia el centro se extiende el piedemonte, que ocupa el 15,42% del área municipal, mientras que hacia el sur se encuentra la zona de planicie, la cual concentra el mayor porcentaje de superficie con un 43,78% (IGAC, 2017).

De acuerdo con los insumos obtenidos a partir de los Mapas de Clasificación de las Tierras por su Vocación de Uso a escala 1:100.000 (ver Figura 16), la mayor proporción del territorio corresponde a suelos con vocación ganadera, los cuales representan el 45,10 %, predominando el pastoreo extensivo en zonas de clima cálido. En segundo lugar, se identifican los suelos con vocación agrícola, que abarcan el 20,54 % del área municipal, conformados principalmente por cultivos transitorios semi intensivos en clima cálido.

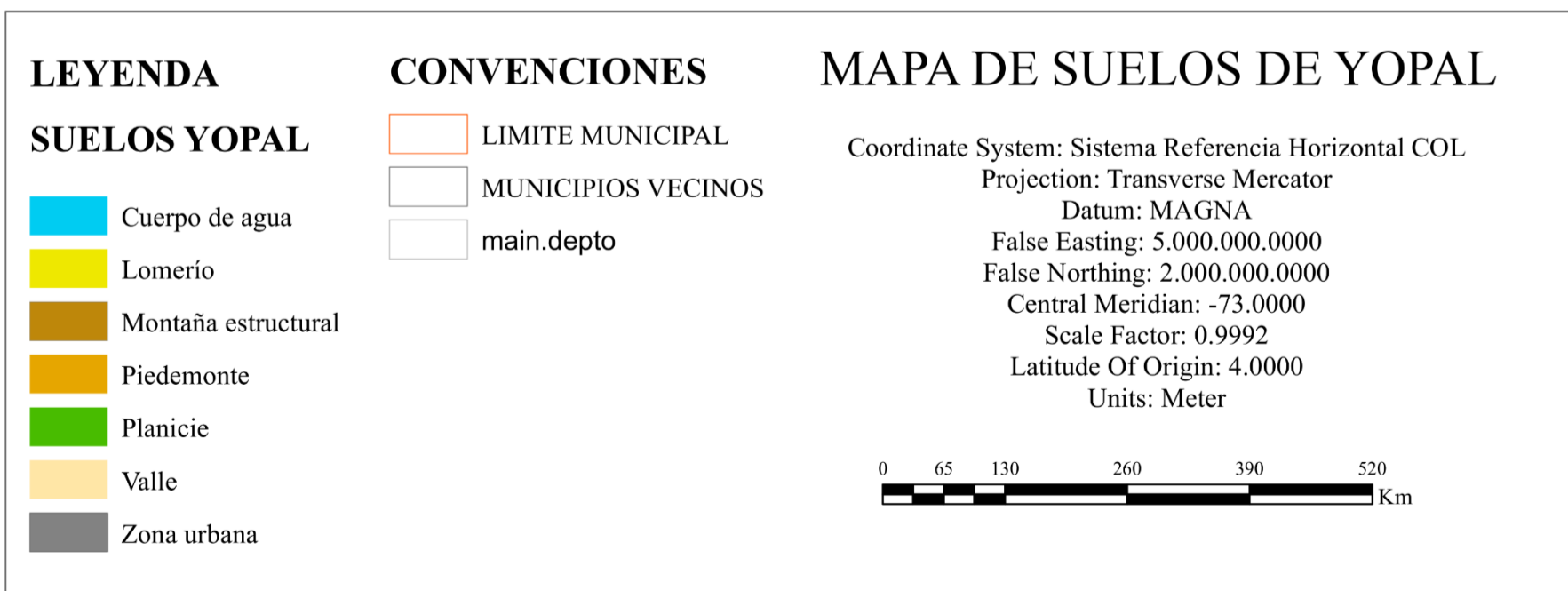
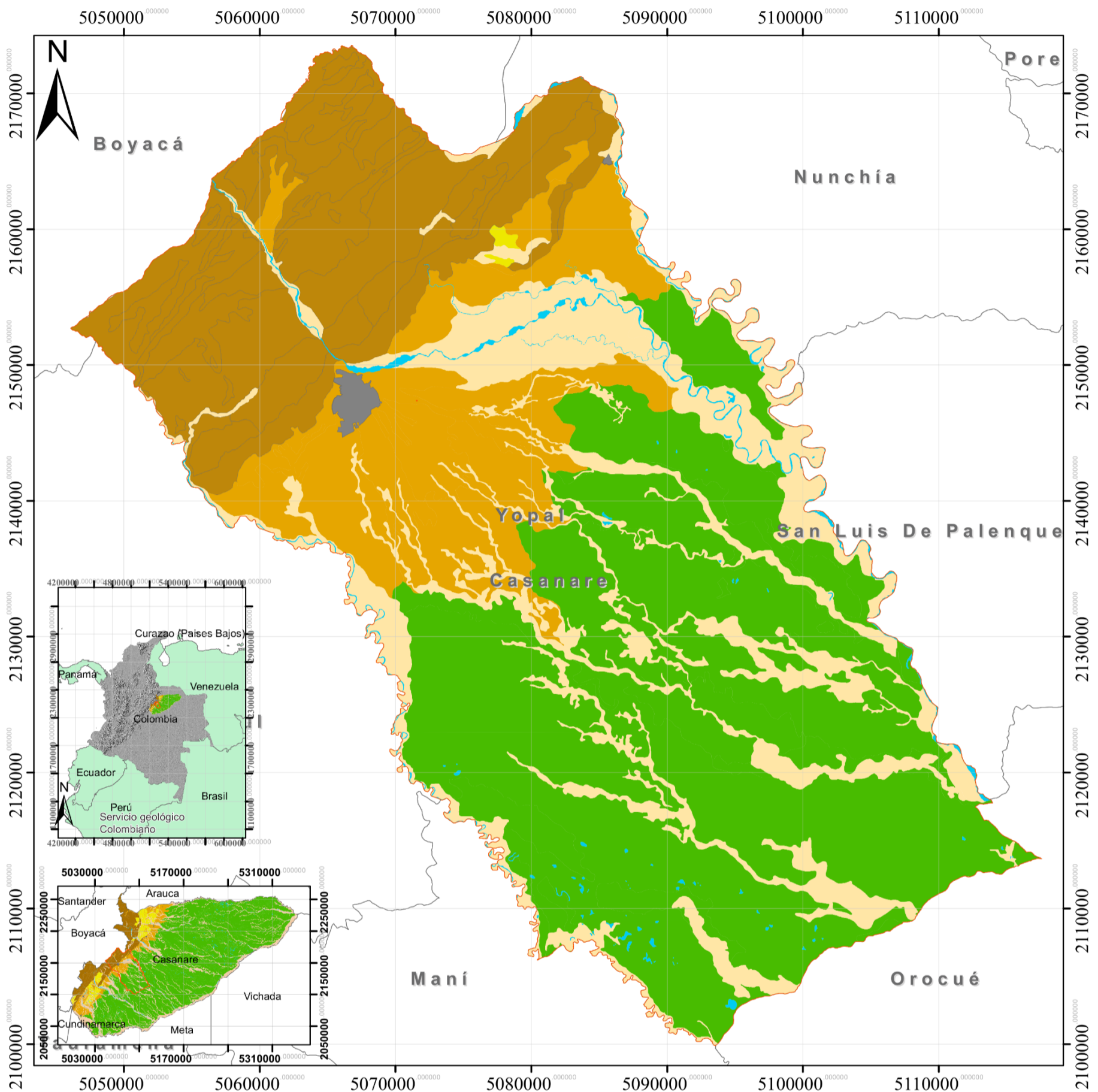
Estos resultados evidencian que el municipio cuenta con una amplia aptitud para el desarrollo de actividades ganaderas y agrícolas, las cuales constituyen usos predominantes del suelo en la zona de estudio.

Actualmente sobresale el cultivo de arroz, dado que Casanare es uno de los principales departamentos productores de este cereal en Colombia, según la Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM) para el segundo periodo de 2024. También se desarrollan cultivos de maíz y, en menor proporción, cacao y palma de aceite (Gobernacion de Casanare, 2024b).

Además de estas actividades productivas, se identifican infraestructuras como estaciones de servicio en varias veredas, que junto con los caseríos de las áreas pobladas pueden constituir fuentes puntuales de generación de residuos contaminantes.

Figura 16

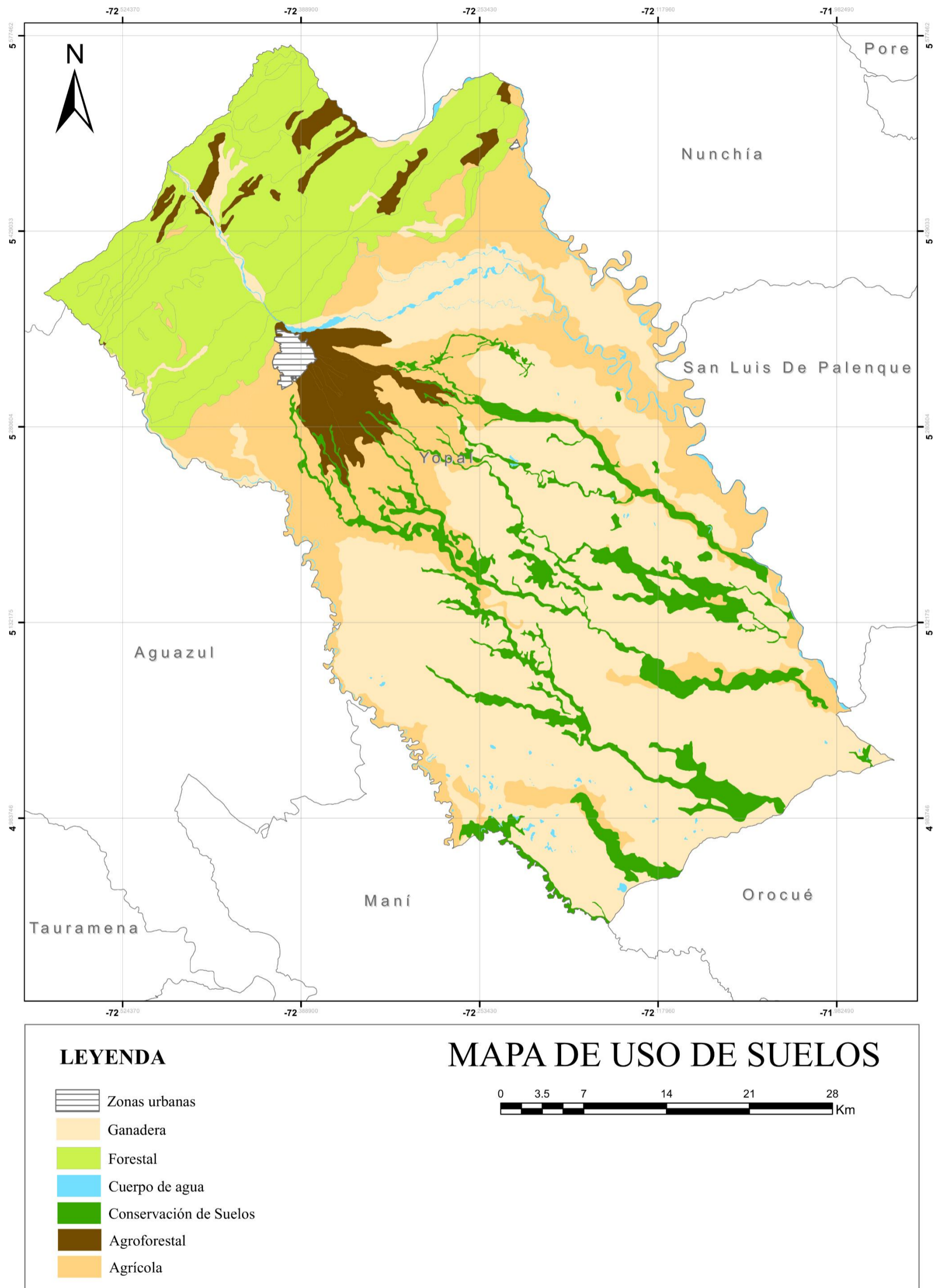
Mapa de suelos de Yopal



Nota. Adaptado de Mapas de Capacidad de Uso de las Tierras del Territorio Colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Casanare. IGAC, 2017.

Figura 17

Mapa de vocación de suelos de Yopal



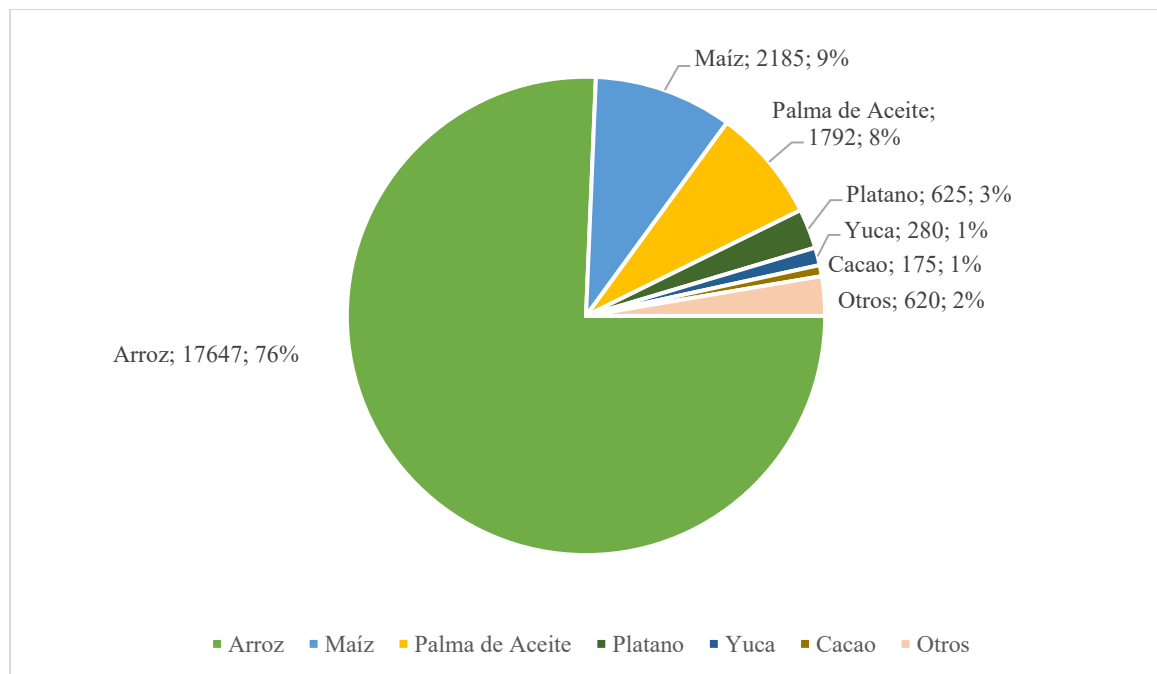
Nota. Adaptado de Mapas de Clasificación de las Tierras por su Vocación de Uso a escala 1:100.000. IGAC, 2017

### Actividad Agrícola

Según las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) para el año 2024, Yopal presentó un total de 23.324 hectáreas sembradas, siendo el cultivo de arroz el principal (17.647 ha), seguido por el maíz y la palma de aceite. Otros cultivos que complementan la matriz agrícola son el plátano, la yuca y el cacao, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A continuación, se describen los sistemas de producción agrícola identificados mediante fuentes secundarias y visitas de campo (UPRA, 2024).

### Figura 18

#### *Matriz Agrícola de Yopal*



*Nota.* En la gráfica se muestra el número de hectáreas por cultivo y el porcentaje que representa en la matriz Agrícola del municipio de Yopal.

#### ***Sistema de producción de Arroz***

En Yopal, la siembra de arroz como cultivo transitorio, se practica bajo dos modalidades, el secano mecanizado donde el agua requerida para el cultivo se obtiene de las lluvias y se emplea

maquinaria agrícola (tractores, combinadas y aviones) para labores como el proceso productivo del cultivo, entre otros, preparación del suelo, siembra, control fitosanitario, fertilización y recolección. Y la modalidad de arroz de riego en la cual el agua que requiere el cultivo es provista por el hombre en el momento que lo requiera (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Estas dos modalidades registraron en 2024 un total de 17.647 hectáreas sembradas y cosechadas, lo que confirma su predominio en la matriz agrícola municipal (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Este cultivo se concentra principalmente en veredas como La Chaparrera, La Defensa, La Mapora, La Unión, Picón-Arenal, El Amparo, San José de Caño Seco, La Manga, Tacarimena, La Patimena, San Antonio, Gaviotas Agua Verde, Mate Palma, Rincón del Moriche, Taladro, Alemania, Guacharacal, Playón Recuerdo, El Garzón, El Milagro, Yopitos, El Tiestal, Manantiales, El Arenal, El Mango, Tilodirán, Mata Negra, Quebrada Seca, San Nicolás, Nocuito, La Arenosa, La Argelia, La Porfía, Barbillal y La Calceta.

#### ***Sistema de producción de Maíz***

El maíz, como cultivo transitorio en sus variedades amarillo y blanco, se maneja bajo un sistema tecnificado que incluye mecanización para la preparación del suelo y la siembra, uso de semillas mejoradas, fertilizantes y plaguicidas químicos (Salgar, 2005). En 2024, registró 2.185 hectáreas sembradas y 2.285 hectáreas cosechadas, con una producción de 12.560 toneladas, lo que lo posiciona como el segundo cultivo más importante del municipio (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Este cultivo se concentra principalmente en veredas como Mata Negra, Quebrada Seca, San Nicolás, Nocuito y La Arenosa.

#### ***Sistema de producción de Palma de aceite***

La palma de aceite corresponde a un cultivo permanente, el cual registró en 2024 un total de 1.792 hectáreas sembradas y 1.292 hectáreas cosechadas, con una producción de 4.186,08

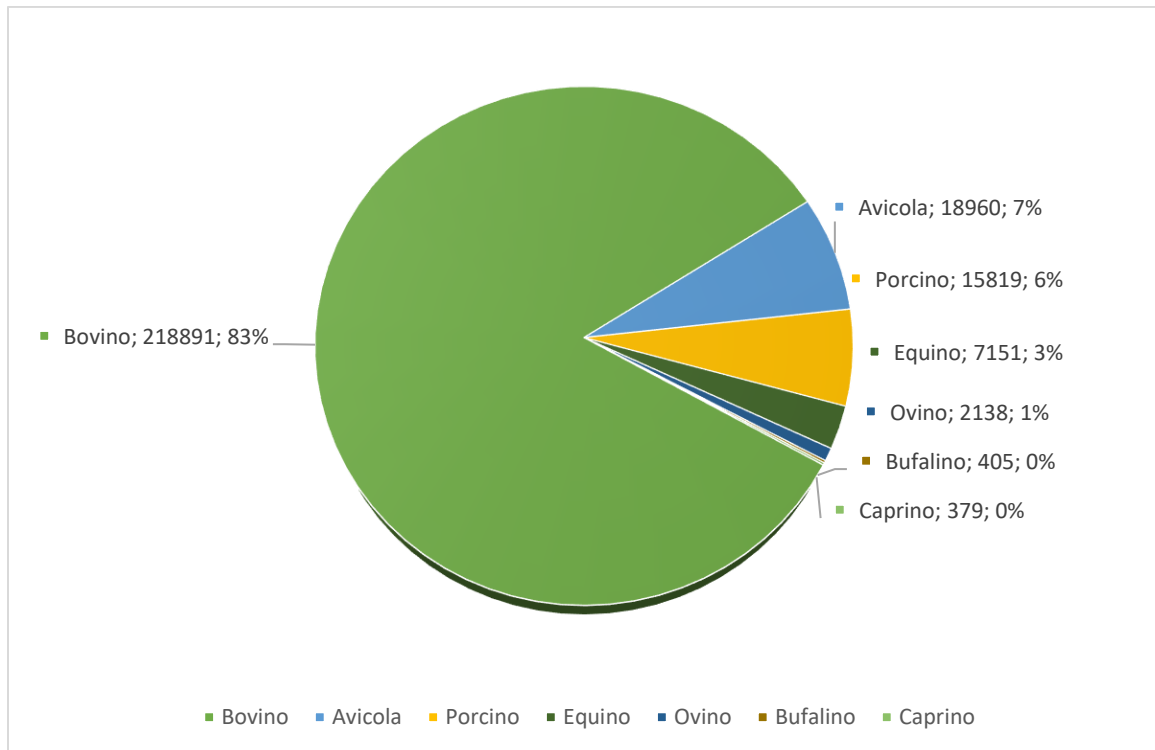
toneladas, lo que la posiciona como uno de los cultivos más relevantes en la zona de sabana (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Este cultivo se concentra principalmente en veredas como La Argelia, La Porfía, Barbillal, La Calceta, Palomas Agua Verde y Punto Nuevo.

### ***Sistema de producción de Cacao***

En Yopal, la producción de cacao como cultivo permanente ha mostrado un crecimiento progresivo en los últimos años, aunque no en la misma magnitud que el arroz. Este incremento se refleja en la presencia cada vez mayor de cultivos en diferentes veredas del municipio en comparación con periodos anteriores. En 2024, el cacao, registró 175 hectáreas sembradas y 153 hectáreas cosechadas, con una producción de 91,8 toneladas, lo que evidencia su participación moderada en la matriz agrícola municipal (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024). Este cultivo se concentra principalmente en veredas como Rincón del Moriche, Taladro y Alemania.

### **Actividad Pecuaria**

Según los datos publicados por la UPRA, El departamento de Casanare se considera, a corte del año 2024, como el tercer hato ganadero del país, con un inventario total de 2.304.387 bovinos, superado únicamente por Antioquia y Meta. La ganadería bovina constituye la principal actividad pecuaria, pero también se desarrollan sistemas de producción avícola y porcino, así como en menor escala sistemas equinos, ovinos, caprinos y bufalinos, que complementan la matriz pecuaria del territorio. La composición porcentual de estos sistemas se observa en la Figura 19. A continuación, se describen los principales sistemas pecuarios presentes en el municipio.

**Figura 19***Matriz Pecuaria de Yopal*

*Nota.* La grafica representa el número de especies y el porcentaje que representan en la matriz pecuaria del municipio de Yopal.

***Sistema de producción Bovina***

Existen dos tipos principales de ganadería, La extensiva, caracterizada por una baja densidad de animales por unidad de superficie. Este sistema se basa principalmente en el uso de pastos y recursos naturales para la alimentación, con mínima utilización de insumos externos y una fuerte vinculación con el territorio(Durántez Ibarrola & Zapatero González, 2021).

Por otro lado, la ganadería intensiva se distingue por la concentración de un gran número de animales en espacios reducidos, con alimentación controlada, uso significativo de insumos

externos y un manejo técnico e infraestructural orientado a incrementar la producción por área (Durántez Ibarrola & Zapatero González, 2021).

En Yopal como parte del piedemonte, la ganadería de ceba desempeña un papel fundamental en esta zona de transición hacia la sabana. Medianos y grandes ganaderos han tecnificado amplias extensiones de tierra mediante la implementación de potreros, sistemas de riego, comederos y saleros, con el objetivo de engordar lotes de ganado de levante provenientes de las sabanas del departamento. Este proceso permite preparar los animales para su comercialización en el centro del país (Gobernacion de Casanare, 2024a)

En Yopal existen 2262 previos registrados como fincas ganaderas Yopal ocupa el tercer lugar en el departamento con 218.891 cabezas de ganado, lo que representa aproximadamente el 9,5 % del hato departamental, solo por debajo de Paz de Ariporo y Hato Corozal (UPRA, 2024).

#### ***Sistema de producción Avícola***

El sistema de producción avícola constituye la segunda actividad pecuaria con mayor inventario registrado en el municipio. Según cifras del EVA (2024), el inventario total es de 18.960 aves, de las cuales el 86% corresponde al sistema de traspatio, con 15.400 aves distribuidas en 2.460 predios. Este predominio indica que la producción avícola está orientada principalmente al consumo local, reforzada por prácticas familiares y de pequeña escala. En segundo lugar se encuentra el sistema de postura, enfocado en la producción de huevos, que representa el 12% del total, con 2.100 aves en 8 predios. Finalmente, el sistema de engorde, destinado a la producción de carne, aporta el 8% del inventario, con 1.460 aves distribuidas en 2 predios (UPRA, 2024).

#### ***Sistema de producción Porcina***

El sistema de producción porcina en el municipio de Yopal presenta un inventario total de 15.819 animales distribuidos en diferentes modalidades. El sistema comercial industrial concentra

la mayor participación, con 6.776 porcinos en 18 granjas, reflejando un mayor nivel de tecnificación y producción orientada al mercado. Le sigue el sistema comercial familiar, con 6.642 animales en 170 granjas, asociado a una escala intermedia y al abastecimiento local. Por último, el sistema de traspatio registra 2.401 porcinos distribuidos en 305 granjas, caracterizado por prácticas familiares y baja tecnificación (UPRA, 2024).

## Actividades Industriales

### *Sector de hidrocarburos*

El departamento de Casanare se caracteriza por ser el principal productor de gas en Colombia, con campos petroleros como Cupiagua. El municipio de Yopal cuenta con un inventario de 186 pozos registrados en el Banco de Información Petrolera. En la Tabla 8 se puede observar que el corregimiento con mayor número de pozos es el morro.

**Tabla 8**

*Inventario de pozos registrados en Yopal*

CORREGIMIENTO	Nº	VEREDA	POZOS
			<b>POZOS</b>
CHARTE	17	CAGUI CHARTE	DELE B-1, DELE B-1 ST1, DELE B-1Z, DELE B-1Z ST1Y, DELE B-1Z ST1Z, DELE B1-ZT1, VOLCANERA A-1, VOLCANERA C-2, VOLCANERA C-2Z
		RINCON DEL SOLDADO	PAUTO J-6, PAUTO J-6Z, PAUTO J-7, PAUTO J-7 X, PAUTO J-7 Y, PAUTO J-7 Z, PAUTO JP-12, PAUTO JP-12Z
EL MORRO	72	ARACAL	FLORENA-19, FLORENA C-3, FFLORENA C-3F ST, FLORENA C-6, FLORENA IF-14, FLORENA IP10, FLORENA IP10Z, FLORENA IP15, FLORENA IP15W, FLORENA IP15X, FLORENA IP15Y, FLORENA IP15Z, FLORENA UP-11, FLORENA UP-11Z
		CRAVO	EL MORRO-1
		EL MORRO	FLORENA N-2, FFLORENA N-2F U, FLORENA N-2F U ST 2, FLORENA N-2F U ST U, FLORENA N-2F U ST W, FLORENA N-4, FLORENA N-4 F WO1, FLORENA N-4 ST, FLORENA N-4 ST1 PY, FLORENA N-4F, FLORENA N-BF
		GUAMALERA	PAUTO-1, PAUTO SUR B-1, PAUTO SUR B-1X, PAUTO SUR B-1Y, PAUTO SUR B-1Z

		LA CABAÑA	PAUTO SUR C-2, PAUTO SUR C2 F2, PAUTO SUR C-2F, PAUTO SUR C-2FW, PAUTO SUR C-2FX, PAUTO SUR C-2FZ, PAUTO SUR C-3, PAUTO SUR C-3M, PAUTO SUR C-3MZ, PAUTO SUR C-3MZ ST, PAUTO SUR C8, PAUTO SUR C-DM, PAUTO SUR CP10, PAUTO SUR CP-10W, PAUTO SUR CP-10X, PAUTO SUR CP-10Y, PAUTOSUR CP-11, PAUTO SUR CP-10Z
		LA COLORADA	PAUTO M4, PAUTO M-5, PAUTO MP-9
		MARROQUIN	FLORENA A-1 ST1, FLORENA A-1(FLORENA-1), FLORENA A-1XFLORENA A-1X ST1, FLORENA A-1X ST1 Z, FLORENA A-1Z, FLORENA A-5, FLORENA A-5P, FLORENA A-5P ST X, FLORENA A-5P ST Y, FLORENA A-5P ST Z, FLORENA A-5PW
		PLANADAS	FLORENA-T8, FLORENA AP-13, FLORENA C-3F ST1Z, FLORENA T-7, FLORENA TP-12, FLORENA_TP-12-L1, FLORENA_TP-12-L2, FLORENA_TP-12-L3, FLORENA_TP-12-L4
<b>MATA DE LIMON</b>	5	EL PALMAR	HURON-3, AHURON-3Z, PAYERO E-1, PAYERO E-1 ST1, PAYERO E-1Z
<b>MORICHAL</b>	4	LA ARENOSA	RUMI-1
		LA ARGELIA	CHIRIGUARO-1
		LA UNION	CRYPTO-1, PROSPERIDAD-1
		LA UNION	CRYPTO-1, PROSPERIDAD-1
<b>PUNTO NUEVO</b>	3	EL AMPARO	LANGUR NORTE-1X
		PALOMAS	MACARENAS-1, TIESTAL-1
		AGUA VERDE	
<b>QUEBRADASECA</b>	9	QUEBRADA SECA	RANCHO HERMOSO-1, RANCHO HERMOSO-11, RANCHO HERMOSO-12, RANCHO HERMOSO-2P, RANCHO HERMOSO-3, RANCHO HERMOSO-3 ST, RANCHO HERMOSO-4, RANCHO HERMOSO-7, RANCHO HERMOSO-7 ST
<b>TACARIMENA</b>	17	EL TIESTAL	TORMENTO-1
		MANANTIALES	MORICHAL-1, MORICHAL-2, MORICHAL-3, MORICHAL-3D, MORICHAL-4, MORICHAL-5, MORICHAL-6, MORICHAL-7, MORICHAL-8, MORICHAL-9
		NOCUITO	LANGUR OESTE-1X, LANGUR-1, LANGUR-2, LANGUR-1X, TIERRA BLANCA SUR-1
		TACARIMENA BAJA	LA TOTUMA-1
<b>TALADRO</b>	15	TALADRO	TOCARIA-1, TOCARIA-10, TOCARIA-10A, TOCARIA-11, TOCARIA-11 ST, TOCARIA-12, TOCARIA-2, TOCARIA-2D, TOCARIA-3, TOCARIA-4, TOCARIA-5, TOCARIA-6, TOCARIA-7, TOCARIA-8, TOCARIA-9
		TALADRO	TOCARIA-1, TOCARIA-10, TOCARIA-10A, TOCARIA-11, TOCARIA-11 ST, TOCARIA-12, TOCARIA-2, TOCARIA-2D, TOCARIA-3, TOCARIA-4, TOCARIA-5, TOCARIA-6, TOCARIA-7, TOCARIA-8, TOCARIA-9
<b>TILODIRAN</b>	42	ALEMANIA	LA GLORIA NORTE-1, LA GLORIA NORTE-2, LA GLORIA NORTE-2PI, LA GLORIA NORTE-3, LA GLORIA NORTE-4, LA GLORIA NORTE-4 ST, LA GLORIA NORTE-5, LA GLORIA NORTE-6
		EL MANGO	CIMARRON-1
		GAVIOTAS	CENTAURO NORTE-1, LAS ACACIAS-1, LAS ACACIAS-2, LAS ACACIAS-3, VIGIA-1, VIGIA-1 ST, VIGIA-2, VIGIA-2 ST1, VIGIA-3, VIGIA-4, VIGIA-4 ST, VIGIA-5, VIGIA-6, VIGIA-7, VIGIA-8
		AGUA VERDE	

	TILODIRAN	BORAL-1, BORAL-2, LOS POTROS-1, LOS POTROS-3, LOS POTROS-3ST, MARSUPIAL-1, RIO VERDE-1, RIO VERDE-2, TILODIRAN-1, TILODIRAN-1 ST, TILODIRAN-11, TILODIRAN-12, TILODIRAN-2, TILODIRAN-3, TILODIRAN-4, TILODIRAN-5, TILODIRAN-6, TILODIRAN-7
--	-----------	--

*Nota.* Adaptado de del Banco de Información Petrolera (BIP)

Por otro lado, en el municipio se cuentan con un total de 29 estaciones de servicio. 24 en la zona urbana, y 5 distribuidas por las veredas registradas en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Inventario de estaciones de servicio en el municipio de Yopal.*

VEREDA	CANTIDAD
ZONA URBANA	24
CHARTE	1
MORICHAL	1
TILODIRAN	1
LA NIATA	1
LA CHAPARRERA	1

*Nota.* Adaptado de Google Earth.

## Urbanización

En el municipio de Yopal, el 89,86 % de la población se concentra en la zona urbana, mientras que el 10,14 % reside en la zona rural (PDEA, 2024). La zona rural está conformada por nueve centros poblados: El Charte, La Guafilla, La Niata, La Chaparrera, El Morro, Morichal, Tilodirán, Quebradaseca y Punto Nuevo. Adicionalmente, el relleno sanitario del municipio de Yopal, destinado a la disposición final de los residuos sólidos, se localiza en la vereda La Niata, perteneciente al corregimiento Alcaraván – La Niata.

### ***Residuos Sólidos***

Según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del municipio de Yopal, Casanare, para el periodo 2025-2036, el 55 % de las veredas están afiliadas al servicio de aseo para la gestión de residuos sólidos, prestado por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Yopal (EAAAY). Entre ellas se encuentran La Chaparrera, Morichal, la Niata y La Guafilla. el Morro no está afiliado al servicio de aseo, pero se le apoya con brigadas de recolección 1 vez por semana. El resto de los centros poblados realizan campañas sociales para gestionar estos residuos una vez al mes. o gestionan los residuos mediante prácticas como el enterramiento o la quema (Alcaldía de Yopal, 2025).

### ***Relleno Sanitario***

El Relleno Sanitario Cascajar se encuentra Ubicado en el kilómetro 17.5 vía la marginal de la selva, por el corredor que conduce hacia el Municipio de Paz de Ariporo, allí se tratan los residuos domiciliarios y ordinarios del Municipio de Yopal y nueve (09) Municipios del departamento de Casanare y tres (03) Municipios del Departamento de Boyacá (Contraloría Departamental de Casanare, 2022).

De acuerdo con reportes divulgados en medios de comunicación regionales, en el año 2025 la comunidad de la vereda La Niata alertó sobre deficiencias en el manejo de los lixiviados del relleno sanitario, las cuales habrían generado la contaminación de fuentes hídricas cercanas. Según esta información, los líquidos residuales se estarían desbordando hacia una cañada que posteriormente conecta con la quebrada La Niata (CasanareOnline, 2025).

### ***Aguas residuales***

El municipio de Yopal dispone de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que atiende principalmente la zona urbana. Actualmente, se adelantan proyectos orientados a la

ampliación del sistema de alcantarillado hacia algunas veredas cercanas al área urbana. No obstante, en la mayor parte del territorio rural la disposición de las aguas residuales se realiza mediante pozos sépticos, cuya frecuencia de mantenimiento oscila entre uno y tres años; sin embargo, en numerosos casos no se registra la realización de labores de mantenimiento.

De acuerdo con la Contraloría Departamental de Casanare (2024), no se dispone de información pública que permita evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de la PTAR del municipio de Yopal ni su cumplimiento frente a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 631 de 2015, lo cual dificulta la valoración del impacto real de los vertimientos sobre los cuerpos de agua receptores.

### **Peligros relacionados con las fuentes contaminantes identificadas**

Tras la identificación de las fuentes potenciales de contaminación que pueden afectar la calidad de las aguas subterráneas, a continuación, se describen los peligros asociados a cada una de las actividades identificadas.

#### **Actividad agrícola**

Las actividades agrícolas requieren el uso de agroquímicos, como fertilizantes, para optimizar la producción. Además, los cultivos demandan la aplicación de plaguicidas para garantizar su desarrollo y protección contra plagas. En Colombia el crecimiento económico ha impulsado una mayor producción agrícola en el país, lo que se traduce en un uso masivo de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas). Estas sustancias, aunque esenciales para la productividad, son potencialmente nocivas para los ecosistemas tropicales. (Lina Maria Cabrales Villalba<sup>1</sup>, 2019).

### ***Sistema de producción de Arroz***

El cultivo de arroz en Yopal, por ser de carácter transitorio, implica la realización de varias siembras al año, lo que conlleva un uso intensivo de fertilizantes nitrogenados y representa un riesgo significativo para las aguas subterráneas. De acuerdo con las encuestas realizadas a la comunidad, las plantaciones de mayor producción aplicaban agroquímicos cada 15 días durante la época de cultivo. El exceso de nitrógeno se infiltra con facilidad en suelos permeables, alcanzando los acuíferos y elevando las concentraciones de nitratos en el agua. Esta contaminación es persistente, ya que las aguas subterráneas carecen de procesos naturales de depuración rápida, prolongando el impacto ambiental (Acosta, A. F. (2021).

### ***Sistema de producción de Maíz***

Al igual que el arroz, el maíz es un cultivo transitorio que requiere varias fertilizaciones para su desarrollo. En Yopal, este cultivo no ocupa grandes extensiones, por lo que su producción se realiza principalmente de manera tradicional. Al no estar tecnificado, se incrementa el riesgo de malas prácticas en el uso de agroquímicos, lo que puede generar una mayor contaminación ambiental (Rivas, J. A. & Patiño, G. 2021).

### ***Sistema de producción de Palma de aceite***

El cultivo de palma de aceite africana puede generar contaminación por infiltración, principalmente asociada al uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos, así como a la disposición inadecuada de residuos agrícolas e industriales. Esta contaminación representa un riesgo potencial para las aguas subterráneas, especialmente en zonas con suelos permeables y acuíferos poco profundos (Lopez E.K, 2024).

### **Actividad Pecuaria**

En Yopal, los sistemas de producción pecuaria se desarrollan principalmente bajo prácticas de traspatio, lo que incrementa el riesgo de contaminación ambiental. Esto se debe a la ausencia de control y a la falta de instalaciones tecnificadas que permitan una adecuada gestión de los residuos generados por los animales.

#### ***Sistemas de producción Bovina***

En el municipio de Yopal predomina la ganadería extensiva, la cual presenta ventajas frente a la ganadería intensiva, ya que utiliza menos agroquímicos y genera una menor concentración de excretas en áreas específicas del terreno. Esto permite que el suelo disponga de más tiempo para absorber los desechos y transformarlos en nutrientes. En contraste, la ganadería intensiva, al buscar satisfacer la creciente demanda del mercado, se desarrolla en espacios reducidos y recurre con frecuencia a agroquímicos. Estos compuestos, presentes en el excremento, junto con la alta concentración de residuos en áreas pequeñas, favorecen la formación de lixiviados que pueden infiltrarse en el suelo y contaminar las aguas subterráneas (Durántez Ibarrola & Zapatero González, 2021).

#### ***Sistemas de producción Avícola***

En el municipio, los sistemas de producción avícola tecnificados presentan una baja utilización de su capacidad instalada. En el caso de las aves de postura, de una capacidad total de 13.000 aves distribuidas en ocho predios registrados, solo se aprovecha el 16,15 %, mientras que el sistema de engorde alcanza el 78,92 % de su capacidad. En contraste, la producción avícola de traspatio concentra el mayor porcentaje del total de aves, a pesar de no contar con infraestructura ni con sistemas de manejo y tratamiento de residuos. Esta disparidad evidencia que, aunque existen instalaciones con potencial para una producción más controlada y tecnificada, la mayor carga de

residuos avícolas proviene de sistemas no regulados, lo que incrementa el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por infiltración de excretas y lixiviados ricos en nutrientes y microorganismos patógenos (UPRA, 2024).

### ***Sistema de producción Porcino***

La problemática ambiental asociada a las explotaciones porcinas se ha desarrollado de manera paralela al crecimiento del sector. En un periodo relativamente corto, y en respuesta a presiones económicas, se ha pasado de sistemas extensivos a sistemas de producción intensivos, lo que ha permitido incrementar el número de animales, pero también ha generado un aumento significativo en el volumen de residuos producidos (CORMACARENA, 2015).

De acuerdo con los datos de la EVA para el año 2024, se identifican cuatro tipos de sistemas de producción porcina: comercial familiar, comercial industrial, tecnificada y de traspatio. Los sistemas de producción comercial se encuentran regulados ambientalmente por entidades estatales. En el sistema comercial industrial, las granjas disponen de sistemas para el tratamiento de los residuos generados; sin embargo, en el sistema comercial familiar el manejo de los desechos suele ser más básico o empírico. No obstante, este control no garantiza un tratamiento ambientalmente adecuado, por lo que persiste el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, especialmente en escenarios de alta carga orgánica o deficiencias en la impermeabilización y gestión de los sistemas de almacenamiento (Asociación Colombiana de Porcicultores, 2019)

En contraste, los sistemas de producción de traspatio registran un total de 2.401 ejemplares distribuidos en 305 granjas, lo que genera una alta dispersión espacial y limita la capacidad de control y seguimiento para un manejo adecuado de los residuos, dado que generalmente no cuentan con infraestructura ni instalaciones técnicas para su tratamiento (UPRA, 2024).

El principal peligro asociado al manejo inadecuado de los residuos porcinos es la lixiviación de compuestos nitrogenados hacia el subsuelo. Debido a su alta solubilidad, estos compuestos pueden ser transportados por el agua de lluvia, incrementando el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (CORMACARENA, 2015)

### **Actividades industriales**

Las actividades con induales identificadas son de la industria de hidrocarburos, por su alto impacto en el sector de gas colombiano, en total se identificaron en el municipio 187 pozos petroleros y un total de 29 estaciones de servicio.

#### ***Sector de Hidrocarburos***

##### *Pozos Petroleros*

El principal peligro asociado a las fuentes industriales de hidrocarburos es la presencia de crudo y fluidos de producción en los cuerpos de agua. Estos fluidos contienen agua y otras sustancias con altos niveles de cloruros, además de trazas de hidrocarburos y otros contaminantes, lo que representa un riesgo significativo para el recurso hídrico (Engler, como se cita en Virguez, 2018)

La contaminación del agua puede originarse por derrames de lodo de perforación, fugas o accidentes en la superficie, fugas a través de la estructura geológica, ya sea de forma natural o artificial a través de grietas o vías y fugas provocadas por una inadecuada cementación del pozo(Calin & Castellet, 2016).

En el estudio realizado por Virguez (2016) se incluye un cuadro comparativo que relaciona las actividades de la industria de los hidrocarburos con los cuerpos de agua potencialmente afectados, identificando impactos sobre aguas superficiales, subterráneas o ambos sistemas. En

este contexto, a continuación, en la Tabla 10 se presentan aquellas actividades que afectan únicamente a las aguas subterráneas:

**Tabla 10**

*Riesgos asociados a las actividades del sector petrolero*

<b>Actividad</b>	<b>Riesgo</b>
<b>Circulación de fluidos</b>	cambión en la oferta y demanda del recurso
	cambios en las características fisicoquímicas del recurso por contaminación
<b>Proceso de inyección y reinyección de fluidos</b>	posible contaminación por migración de fluidos
	cambios en las características fisicoquímicas del recurso por contaminación
<b>Fracturamiento Hidráulico</b>	disminución del caudal
	Cambios en las características fisicoquímicas del recurso por contaminación

*Nota.* Adaptado de (Virguez, 2018)

#### *Estaciones de servicio*

Las estaciones de servicio representan una fuente significativa de contaminación de las aguas subterráneas, principalmente por la liberación de hidrocarburos derivados del petróleo. Los tanques subterráneos de almacenamiento de combustible presentan una vida útil estimada entre 15 y 25 años, aumentando la probabilidad de fugas a medida que envejecen. En caso de presentarse fugas, el combustible se infiltra a través del suelo y puede alcanzar el acuífero, afectando la calidad del agua subterránea. Incluso tasas de fuga aparentemente pequeñas, de dos gotas por segundo, pueden provocar que grandes volúmenes de agua se vuelvan no aptos para el consumo humano, debido a alteraciones en el olor y sabor (Fei-Baffoe et al., 2024).

### **Urbanización**

El aumento de los centros poblados en el municipio de Yopal ha generado una mayor producción de residuos sólidos y aguas residuales, superando la capacidad actual de los sistemas de saneamiento. Según el PGIRS, la falta de cobertura permanente en la recolección de residuos en algunos sectores ha derivado en prácticas inadecuadas de disposición, como el enterramiento de residuos, lo que representa un riesgo potencial para el suelo y las aguas subterráneas.

### ***Residuos sólidos***

Según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), en el municipio de Yopal cinco de los nueve centros poblados no cuentan con un servicio formal de gestión de residuos sólidos. Ante esta situación, las comunidades recurren a prácticas inadecuadas de disposición final, como el enterramiento de residuos. Veredas como Tilodirán, Punto Nuevo y Quebrada Seca registraron en conjunto el enterramiento de aproximadamente 30 toneladas al mes de residuos sólidos durante el año 2021. Adicionalmente, existen veredas para las cuales no se dispone de información cuantitativa sobre la generación de residuos, debido a que, según lo establecido en el PGIRS, estas manejan lo que se denomina “soluciones individuales”(Alcaldía de Yopal, 2025).

Prácticas de disposición de residuos inadecuadas como botaderos y áreas sin control ambiental alguno, se convierten en puntos de contaminación ya que los niveles piezométricos del municipio son bajos (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía & Hidroyopal, 2013).

### ***Relleno sanitario***

El relleno sanitario del municipio de Yopal ha sido objeto de observaciones por parte de la comunidad de la vereda La Niata, debido a deficiencias en la gestión de los lixiviados, las cuales han generado afectaciones en los cuerpos de agua aledaños al sitio de disposición final, impactando los recursos hídricos del sector y el ecosistema en general.

Este tipo de problemáticas no es un hecho aislado, ya que las descargas de lixiviados generadas por los rellenos sanitarios representan una de las principales fuentes de contaminación del recurso hídrico en Colombia, afectando su sostenibilidad y constituyendo un riesgo para la salud pública. Estos lixiviados se caracterizan por su alta carga contaminante, resultado de la percolación del agua a través de los residuos en proceso de degradación (Cristancho Montenegro et al., 2020)

### *Aguas residuales*

En las zonas rurales del municipio de Yopal, el manejo de las aguas residuales domésticas se realiza predominantemente mediante tanques sépticos, los cuales en su mayoría no cuentan con control ni mantenimiento adecuado. Estos sistemas suelen presentar profundidades menores a 3 m y se localizan a escasa distancia de las fuentes de abastecimiento de agua, como pozos y aljibes, muchos de los cuales son someros (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía & Hidroyopal, 2013).

De acuerdo con el *Informe sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente en el Departamento de Casanare* (Contraloría Departamental de Casanare, 2024), La PTAR del municipio de Yopal presenta limitaciones operativas asociadas a la colmatación de lagunas por acumulación de lodos y falta de mantenimiento prolongado. Su capacidad efectiva de tratamiento es inferior al caudal requerido, lo que reduce la eficiencia del sistema, especialmente en temporada de invierno. Adicionalmente, se identifican deficiencias en los filtros percoladores y en el sistema de secado de lodos, así como restricciones financieras que limitan las labores de mantenimiento e inversión.

Dadas las características hidrogeológicas del sistema acuífero de Yopal y la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas, estos vertimientos representan un peligro potencial de

contaminación de las aguas subterráneas. (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía & Hidroyopal, 2013).

### **5.1.2 Actividad 1.2**

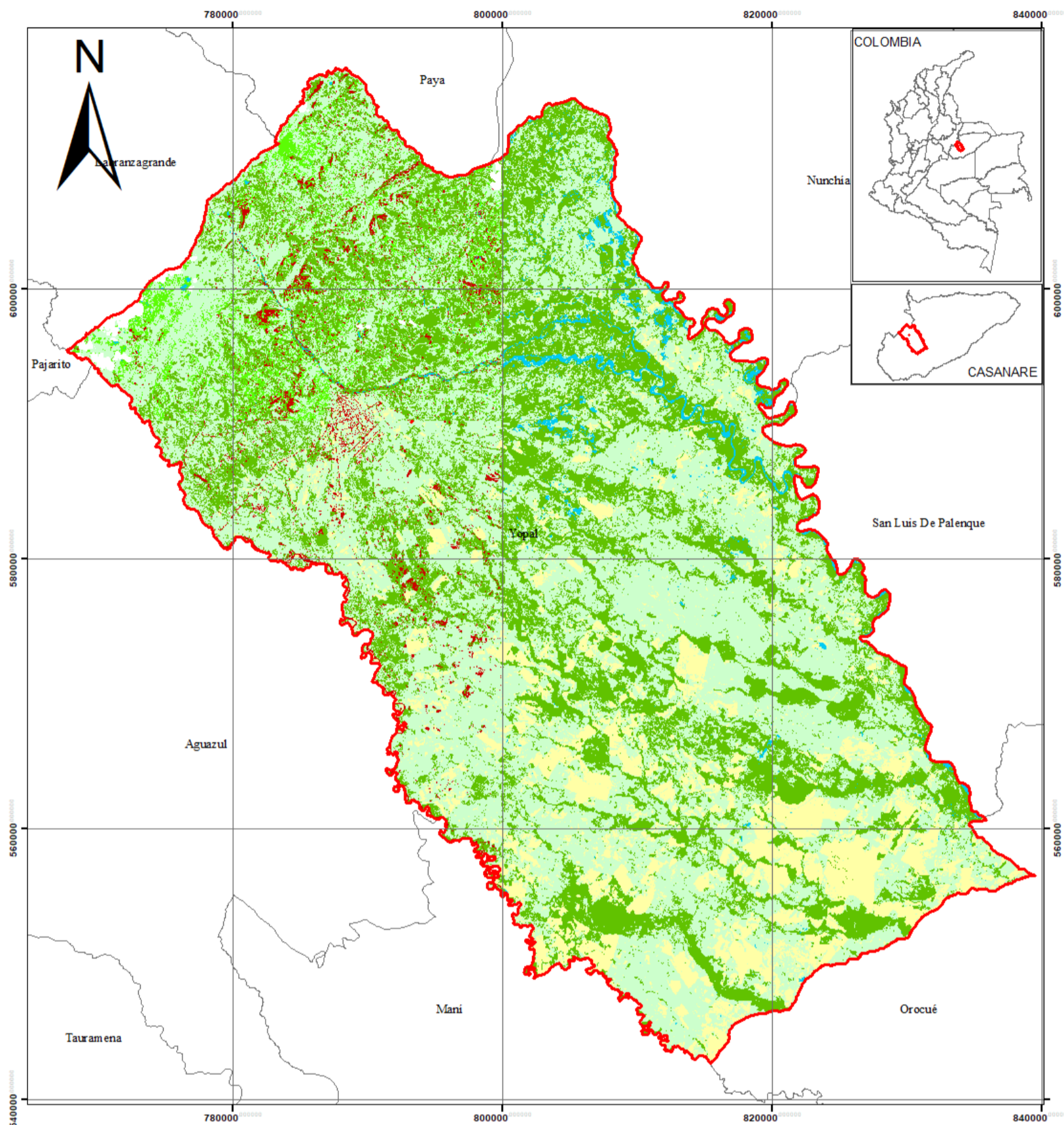
En la Figura 20 y Figura 21 se presentan los resultados de la clasificación no supervisada a escala municipal y local respectivamente, la cual permitió identificar seis macro clases de coberturas de acuerdo con la leyenda CORINE Land Cover (CLC). No obstante, esta clasificación evidenció errores en la identificación de las firmas espectrales, como la confusión de cuerpos de agua con áreas urbanas.

A partir de la identificación inicial de las macroclases en la clasificación no supervisada, se definieron los polígonos de entrenamiento utilizados en la clasificación supervisada, cuyos resultados se presentan en la Figura 22 y Figura 23 correspondientes al mismo resultado de clasificación, representado a escala municipal y a escala local, respectivamente. En estas se observa una mejora significativa en la delimitación de las coberturas y en la discriminación de las firmas espectrales, lo que permitió alcanzar un mayor nivel de diferenciación de coberturas en la clasificación.

Sin embargo, la disponibilidad limitada de imágenes satelitales de acceso gratuito constituyó una restricción para el análisis, por lo que únicamente fue posible generar coberturas hasta el nivel III de la metodología CORINE Land Cover, tanto en la clasificación supervisada como en la no supervisada. En ambas clasificaciones se identificaron coberturas correspondientes a bosques densos, bosques de galería y riparios, ríos, pastos, zonas urbanas y territorios agrícolas.










Figura 20

Mapa de Coberturas Corine Land Cover, obtenido de una clasificación No Supervisada. A escala municipal



MAPA DE CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

**LEYENDA**

 1.1 ZONAS ARTIFICIALIZADAS	 LIMITE DEL MUNICIPIO DE YOPAL
 2.1 CULTIVOS TRANSITORIOS	 LIMITE MUNICIPAL
 2.3 PASTOS	
 3.1 BOSQUES	
 3.1.4 BOSQUES DE GALERÍA Y RIPARIOS	
 5.1.1 RIOS	
 NUBES	

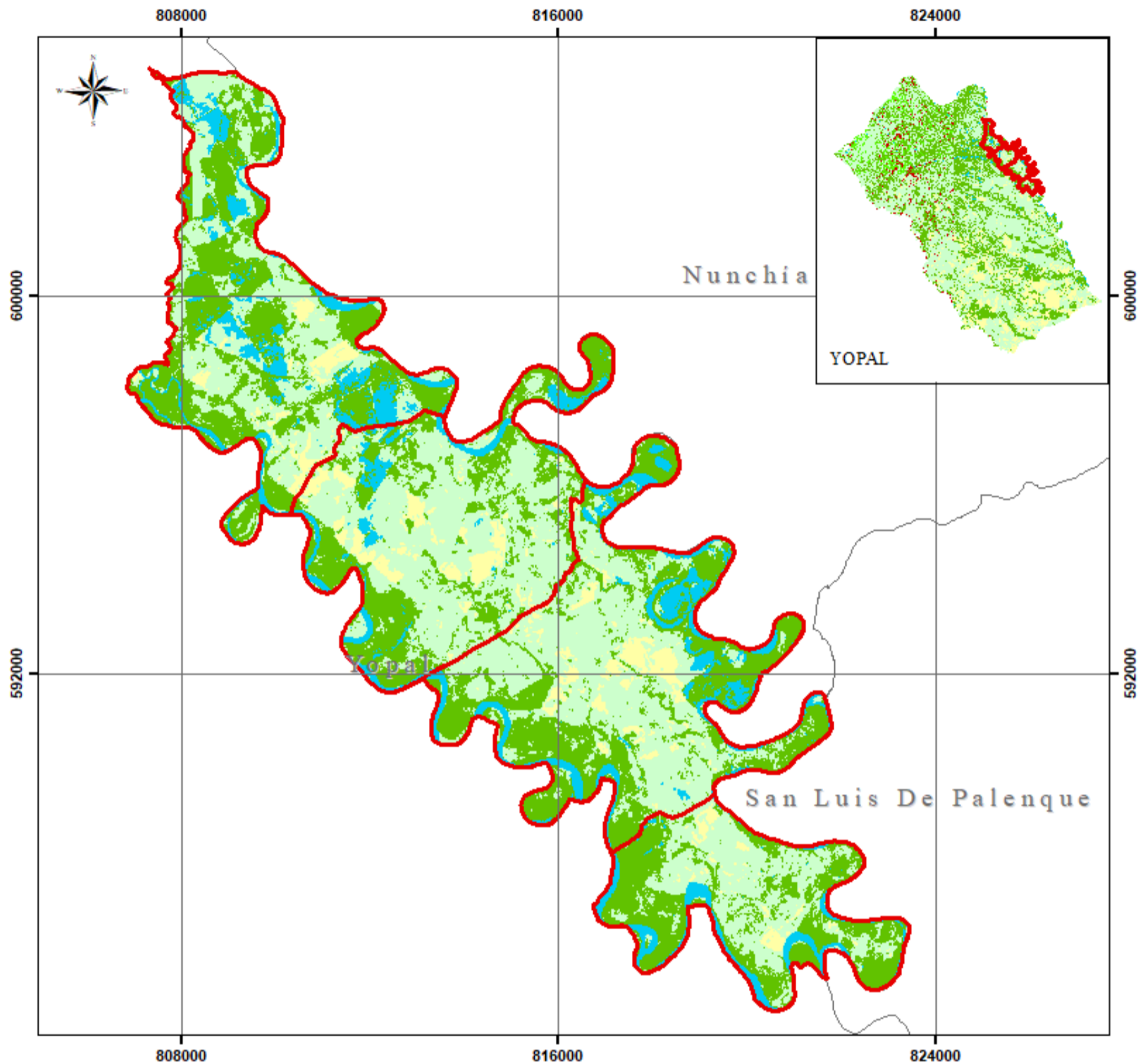
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500.000.0000  
 False Northing: 0.0000  
 Central Meridian: -75.0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter



Nota. La clasificación de coberturas se obtuvo a partir de imágenes satelitales mediante un proceso de clasificación no supervisada, usando el complemento SCP en QGIS.

Figura 21

Mapa de Coberturas Corine Land Cover, obtenido de una clasificación No Supervisada. A escala Local



MAPA DE CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

LEYENDA

- LIMITE CORREGIMIENTO EL TALADRO
- LIMITE MUNICIPAL
- 2.1 CULTIVOS TRANSITORIOS
- 2.3 PASTOS
- 3.1.4 BOSQUES DE GALERÍA Y RIPARIOS
- 5.1.1 RIOS

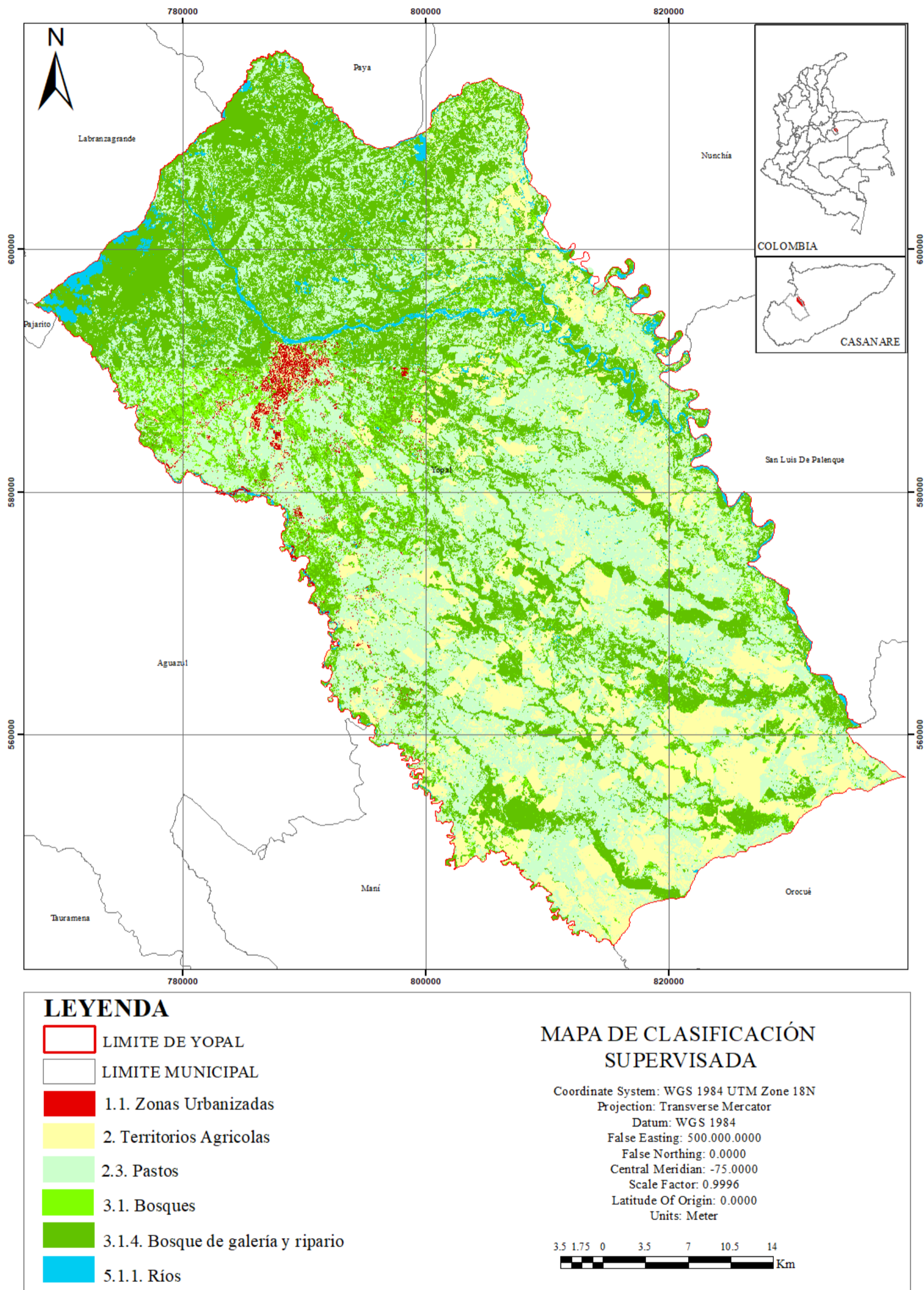
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 500.000.0000  
 False Northing: 0.0000  
 Central Meridian: -75.0000  
 Scale Factor: 0.9996  
 Latitude Of Origin: 0.0000  
 Units: Meter



Nota. La clasificación de coberturas se obtuvo a partir de imágenes satelitales mediante un proceso de clasificación no supervisada, usando el complemento SCP en QGIS.

Figura 22

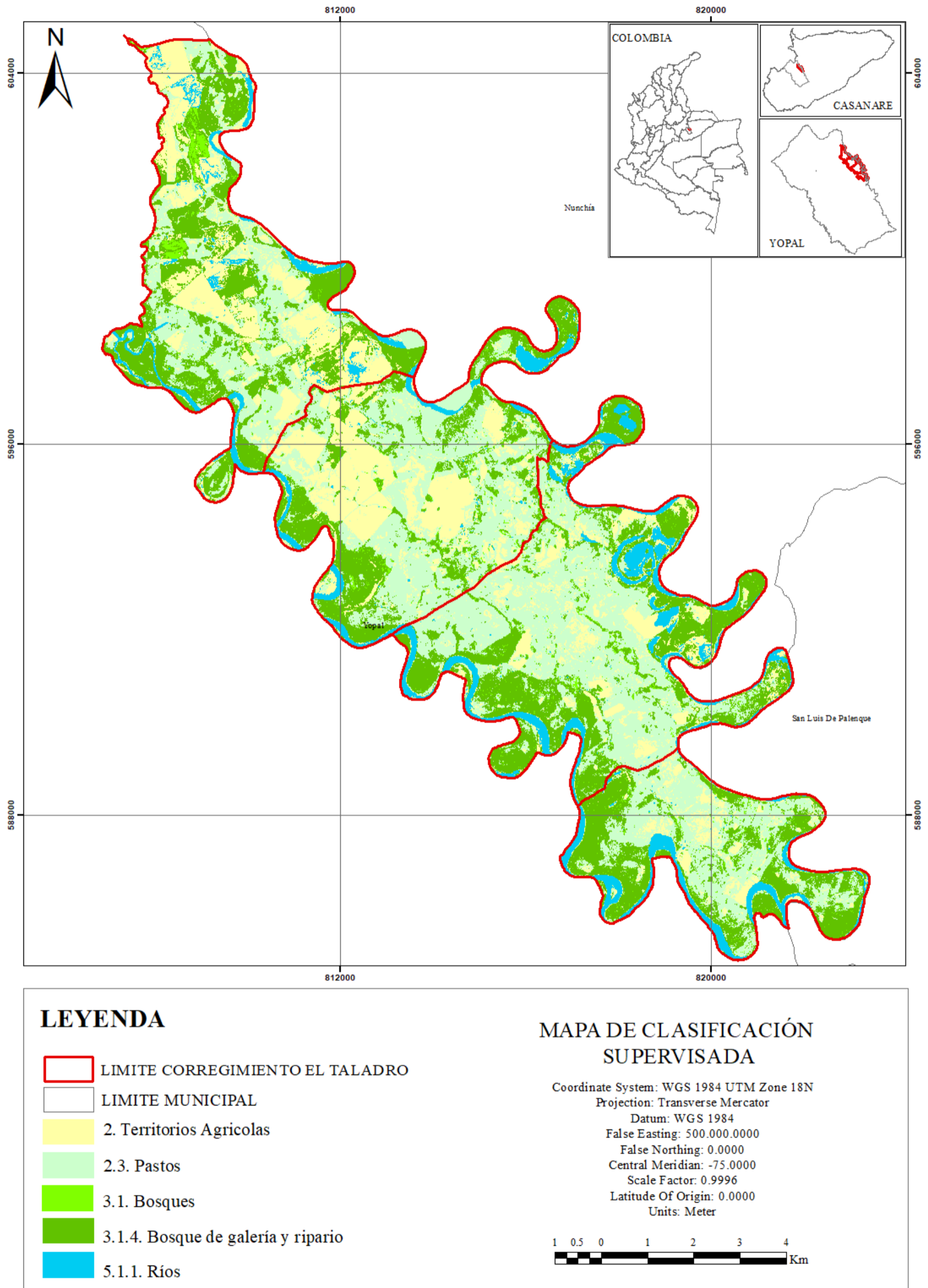
Mapa de Clasificación Supervisada de Coberturas CLC a Escala Municipal



Nota. Mapa elaborado a partir de una clasificación supervisada de coberturas del suelo, utilizando polígonos de entrenamiento definidos con base en la clasificación no supervisada.

Figura 23

Mapa de Clasificación Supervisada de Coberturas CLC a Escala Local



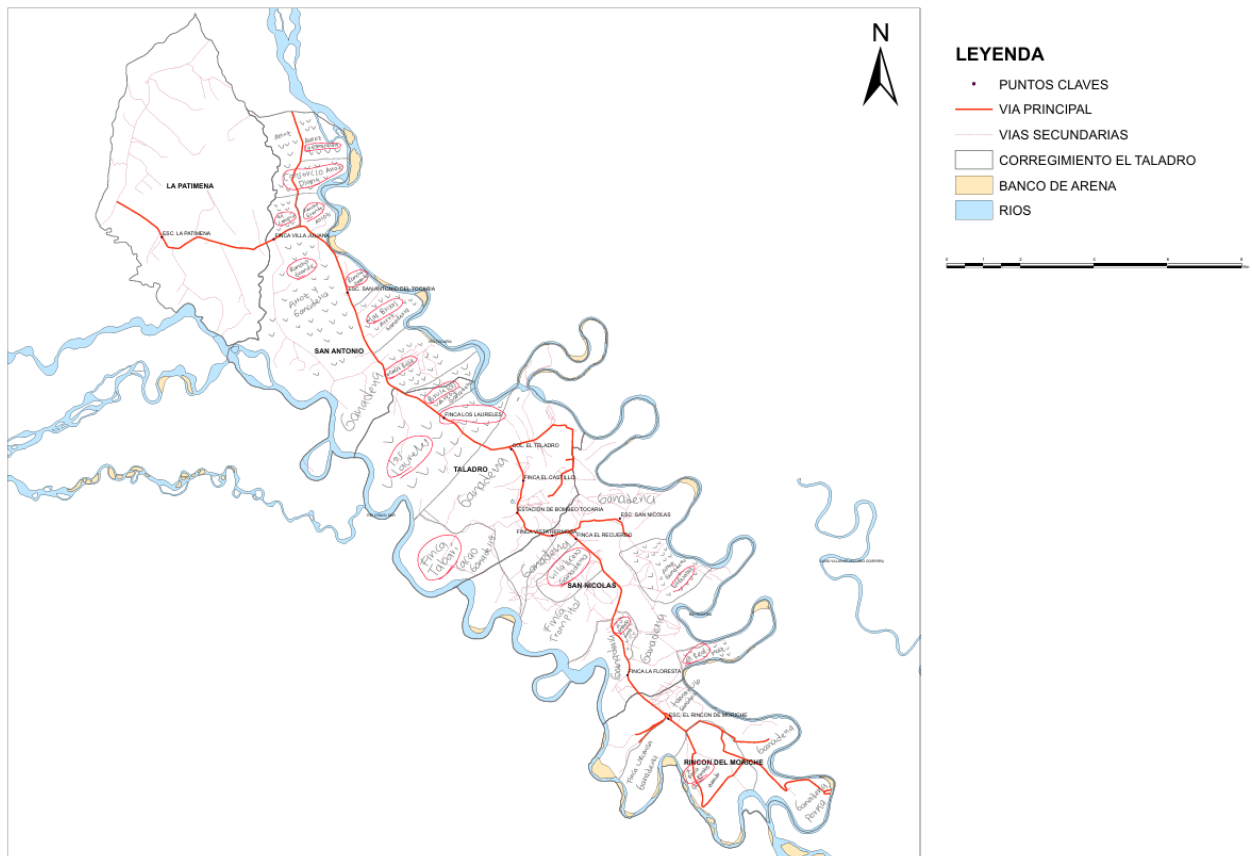
Nota. Mapa elaborado a partir de una clasificación supervisada de coberturas del suelo, utilizando polígonos de entrenamiento definidos con base en la clasificación no supervisada

### 5.1.3 Actividad 1.3

A partir del proceso de participación comunitaria desarrollado en el corregimiento El Taladro, se identificaron 14 fincas con potencial de contaminación, asociadas principalmente a actividades agrícolas, pecuarias y al manejo de residuos. Estas fincas se distribuyen en las cuatro veredas del corregimiento y se representan en el mapa social de la Figura 24 delimitadas en color rojo. El mapa social detallado se presenta en el Apéndice A.

#### Figura 24

*Mapa social participativo digitalizado del corregimiento El Taladro*



**Nota.** Mapa elaborado a partir de un ejercicio de cartografía social participativa con la comunidad del corregimiento El Taladro y posteriormente digitalizado.

El análisis de la información recopilada permitió reconocer que las fincas La Esmeralda, Consorcio Diana y Casa Roja presentan el mayor potencial de contaminación, debido a la alta frecuencia en el uso de agroquímicos y a que concentran las mayores áreas cultivadas del corregimiento (ver Tabla 11). Estas fincas se dedican principalmente al cultivo de arroz mecanizado, actividad que implica un riesgo elevado de contaminación, dado que sus ciclos de producción se desarrollan de manera continua a lo largo del año.

Adicionalmente, la finca El Campín fue identificada como una fuente potencial crítica, no solo por su actividad agrícola, sino porque es la única finca que se abastece de agua mediante un aljibe, lo cual representa una amenaza significativa para el sistema acuífero, al tratarse de aguas subterráneas expuestas a posibles fuentes de contaminación.

La información detallada correspondiente a las demás fincas identificadas se presenta en el Apéndice C, mientras que los formatos de encuesta utilizados para la caracterización de las actividades se incluyen en el Apéndice B.

**Tabla 11**

*Descripción de las fincas y actividades con potencial de contaminación en el corregimiento El Taladro.*

Fincas	Cordenadas		Acti vida d	Tipo De Contam inación	Tipo De Ganade ria	Tipo De Cultivo	Agroqu imicos	Frecuencia De Agroquimi cos	Alcanta rillado	Sistema De Drenaje De Aguas Negras	Mater ial	Manteni miento	Manejo De Residuos	Frecue ncia	Abasteci miento
	X	Y													
<b>PREDIO B</b>	602895	808572	Arro z	Difusa	N/A	Arroz	Si	Semanal	No	Pozo Septico	Polieti leno	Cada Año	Entierro/Que ma	Seman al	Pozo
<b>PREDIO E</b>	597765	811167	Arro z	Difusa	N/A	Arroz	Si	15 Dias	No	Pozo Septico	Concr eto	Cada Año	Entierro/Que ma	3 Dias	Pozo
<b>PREDIO A</b>	603787	808999	Arro z	Difusa	N/A	Arroz	Si	Semanal	No	Pozo Septico	Polieti leno	Cada Año	Entierro/Que ma	Seman al	Pozo
<b>PREDIO C</b>	601448	809206	Arro z	Difusa	N/A	Arroz	Si	2 Meses	No	Pozo Septico	Concr eto	No	Entierro/Que ma	Seman al	Aljibe

Nota. La tabla presenta las variables más relevantes para la identificación de fuentes potenciales de contaminación; la información completa de las encuestas se encuentra en el Apéndice B.

Durante el recorrido de campo se identificaron dos tipos de cobertura que no se encontraban definidos en la clasificación inicial según la metodología CORINE Land Cover (CLC): 2.3.2 Pastos arbolados y 1.2.1 Zonas industriales o comerciales. En la Tabla 12 se presentan los diferentes tipos de cobertura registrados a lo largo del recorrido, junto con la localización de los puntos de observación y la finca de referencia a la cual se asocian dichas coberturas.

La información detallada de todos los puntos levantados para la identificación y seguimiento de coberturas y actividades potenciales de contaminación se presenta en el Apéndice D. Adicionalmente, la tabla incluye una referencia fotográfica que puede ser consultada en el Apéndice E, donde se presenta el catálogo fotográfico que evidencia las coberturas identificadas y las principales fuentes de contaminación asociadas, tales como los cultivos agrícolas (ver Figura 25) y las zonas industriales o comerciales (ver Figura 26).

**Tabla 12**

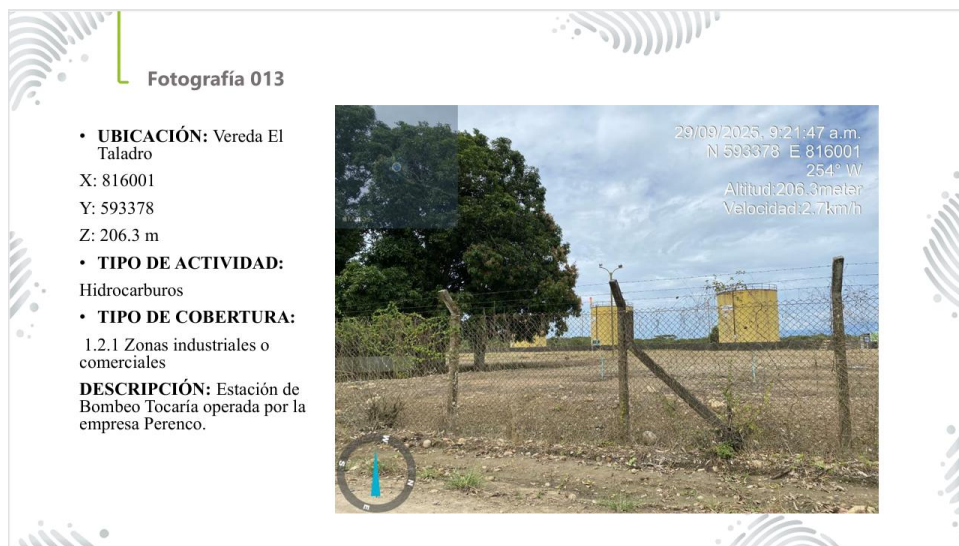
*Actividades y fuentes potenciales de contaminación asociadas a coberturas CLC identificadas en campo*

ESTACION	COORDENADAS			NOMBRE DE REFERENCIA	LOCALIZACIÓN	ACTIVIDAD	OBSERVACIONES	COBERTURA CLC	FOTOGRAFIA
	X	Y	Z						
LGP-01	808804	601799	222.54 m	PREDIO A	Via patimena-rincon del moriche margen Izquierda	CULTIVO/GANADERIA	Cultivo de Arroz mecanizado de grandes extensiones. Con uso de agroquímicos frecuente	2.1.2.1. Arroz 3.1.4. Bosque de galería y ripario	Fotografía 001
LGP-03	809523	602456	220.7 m	PREDIO F	Via patimena-rincon del moriche margen derecha	GANADERIA	Pradera de pastos limpios con ganadería extensiva, también se logra identificar un bosque de galería y ripario aledaño a una quebrada.	2.3.1. Pastos limpios 3.1.4. Bosque de galería y ripario	Fotografía 003
LGP-13	816001	593378	206.3 m	PREDIO P	Via patimena-rincon del moriche margen derecha	HIDROCARBUROS	Pozo petrolero operado por la empresa PERENCO	1.2.1 Zonas industriales o comerciales	Fotografía 013
LGP-14	816001	593378	205.6 m	PREDIO Q	Via patimena-rincon del moriche margen Izquierda	GANADERIA	Pradera de pastos arbolados con presencia de ganadería de tipo extensiva	2.3.2 Pastos arbolados	Fotografía 014

*Nota.* Esta tabla resume únicamente las estaciones que aportan variabilidad en los tipos de cobertura identificados en campo.

**Figura 25***Catálogo Fotográfico de Campo – Cultivo de arroz*

*Nota.* registro fotográfico de cultivo de arroz, donde se identifica la cobertura 2.1.2.1 Arroz, asociada a actividades Agrícolas.

**Figura 26***Catálogo Fotográfico de Campo – Predio P*

*Nota.* registro fotográfico del predio P, donde se identifica cobertura 1.2.1 (Zonas industriales o comerciales), asociada a actividades de hidrocarburos.

## 5.2 FASE 2

En esta fase se identificaron y clasificaron las actividades potencialmente contaminantes del subsuelo mediante la aplicación del método POSH, integrando información primaria y secundaria. Los resultados se consolidaron en un inventario y se representaron espacialmente mediante mapas temáticos a escala municipal y local.

### 5.2.1 Actividad 2.1

El método POSH permite evaluar el origen de los contaminantes y la sobrecarga hidráulica asociada a diversas actividades antrópicas, estimando el potencial de contaminación del subsuelo en tres niveles: reducido, moderado y elevado.

Las actividades identificadas se clasificaron según los principios del método y el tipo de contaminación que cada una puede generar. Además, se incorporó el criterio temporal de Foster et al. (2002), diferenciando fuentes pasadas, activas y potenciales futuras, de acuerdo con su estado y permanencia en el territorio.

La Tabla 13 presenta un resumen del inventario obtenido con información primaria y secundaria a escala municipal y local. Para consultar el detalle de cada fuente de contaminación, se remite al Apéndice F.

**Tabla 13**

*Clasificación de actividades por el método POSH*

	<b>Tipo de actividad</b>	<b>Potencial por generación de carga contaminante al subsuelo</b>	<b>Ocurrencia temporal</b>	<b>N° de unidades identificadas</b>
<b>Agrícola</b>	Sistema de Producción de Arroz	Elevado	FE	21
	Sistema de producción de Maíz	Elevado	FE	10
	Sistema de producción de Palma de aceite	Elevado	FE	3
	Sistema de producción de Cacao	Moderado	FE	2
<b>Pecuaría</b>	Sistema de producción Bovino	Reducido	FE	2262

	Sistema de producción avícola	Reducido	FE	2470
	Sistema de producción Porcino	Elevado	FE	493
<b>Industrial</b>	Pozos petroleros	Elevado	FE-FF	187
	Estaciones de servicio	Moderado	FE-FF	29
<b>Urbanización</b>	Residuos Sólidos	Elevado	FE-FF	9
	Relleno Sanitario	Elevado	FE-FF	1
	Aguas residuales	Elevado	FE-FF	9

*Nota.* La ocurrencia temporal de las actividades se clasificó como fuente pasada (FP), fuente existente (FE) o fuente futura (FF), de acuerdo con la metodología propuesta por Foster et al. (2002).

En la Tabla 13 se muestra el potencial de contaminación asociado a cada actividad, identificado a partir de información proveniente de fuentes secundarias, visitas de campo y aportes de la comunidad. Con base en esta clasificación, se elaboraron los mapas de la Figura 27 y Figura 28, en los cuales se representan las actividades de distribución puntual y difusa, así como su potencial de generación de carga contaminante, mediante la simbología y la leyenda propuestas por (Foster et al., 2002).

### 5.2.2 Actividad 2.2

En la Figura 27 se presenta el mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación elaborado mediante la metodología POSH a escala municipal, mientras que la Figura 28 muestra el área de estudio a escala local.

A escala municipal, se observa que las fuentes contaminantes con mayor predominancia corresponden a aquellas clasificadas con elevado potencial de contaminación, entre ellas el relleno sanitario EL Cascajar. en comparación con las de potencial moderado, representadas principalmente por actividades como estaciones de servicio y cultivos de menor impacto ambiental. Para una mejor visualización del mapa a mayor resolución, ver Apéndice G.

A escala local, en el corregimiento, esta tendencia se evidencia con mayor claridad, lo cual se asocia principalmente a la predominancia de actividades agrícolas y a la presencia de actividades industriales, como los pozos petroleros, identificadas en la zona de estudio. Para una mejor visualización del mapa a mayor resolución, ver Apéndice H.

### 5.3 FASE 3

En esta fase se integraron los resultados del inventario de fuentes potenciales de contaminación con la clasificación de coberturas del suelo CORINE Land Cover (CLC), con el fin de analizar su distribución espacial y su relación con los diferentes niveles de potencial de contaminación del subsuelo. A partir de esta integración, se elaboraron mapas temáticos a escala municipal y local, incorporando la validación en campo y la información secundaria.

#### 5.3.1 *Actividad 3.1*

En la *Figura 29* se presenta el mapa de coberturas CLC integrado con el inventario de fuentes potenciales de contaminación a escala municipal, mientras que la *Figura 30* muestra el área de estudio a escala local con mayor nivel de detalle en las coberturas del suelo y la localización de las fuentes identificadas, resultado de la validación en campo y la incorporación de información secundaria, lo que permitió mejorar la precisión espacial de la clasificación.

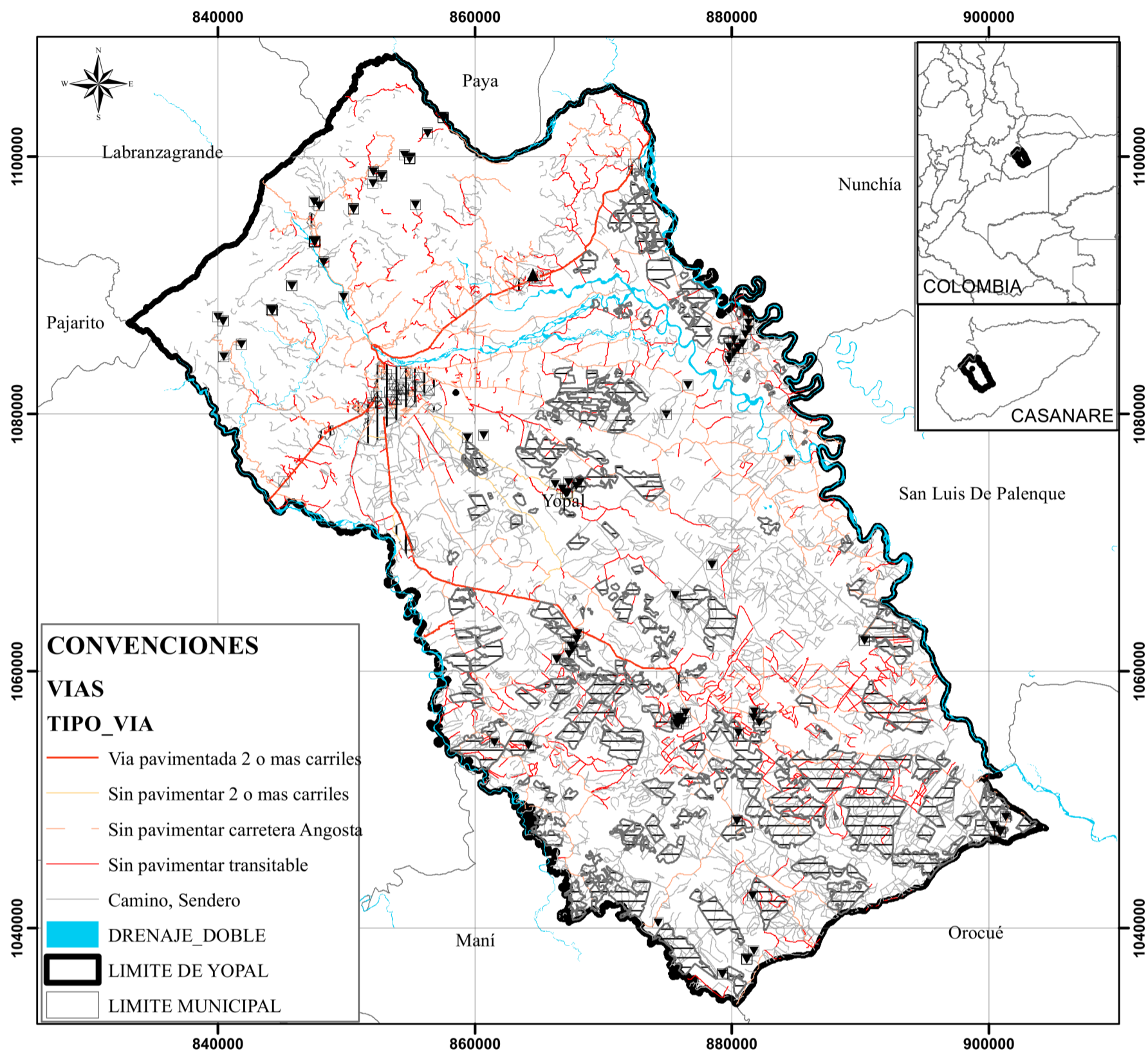
A escala municipal (*Figura 29*), se identifican principalmente fuentes contaminantes asociadas a actividades agrícolas, industriales y de desarrollo urbano. Predominan los cultivos transitorios, principalmente arroz y, en menor proporción, maíz, los cuales se concentran en el sector suroccidental del municipio de Yopal. En esta misma zona se registra una alta densidad de pozos petroleros. Hacia el norte del municipio, se observa la presencia de actividades industriales, principalmente pozos petroleros, así como áreas

de desarrollo urbano correspondientes al centro poblado El Morro. Para una mejor visualización del mapa a escala de detalle 1:25.000, ver Apéndice I.

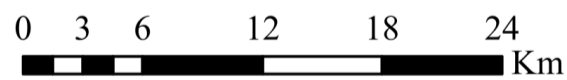
A escala local, en el corregimiento (Figura 30), las actividades con potencial de contaminación corresponden a las de tipo industrial, asociadas a los pozos del campo Tocaría, y a las actividades agrícolas, con predominio del cultivo de arroz. En esta área no se identifican centros poblados; sin embargo, se localizaron fincas visitadas durante el trabajo de campo que presentan potencial de contaminación. Para una mejor visualización del mapa a escala de detalle 1:25.000, ver Apéndice J.

Figura 27

Mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación según el método POSH, a escala municipal.



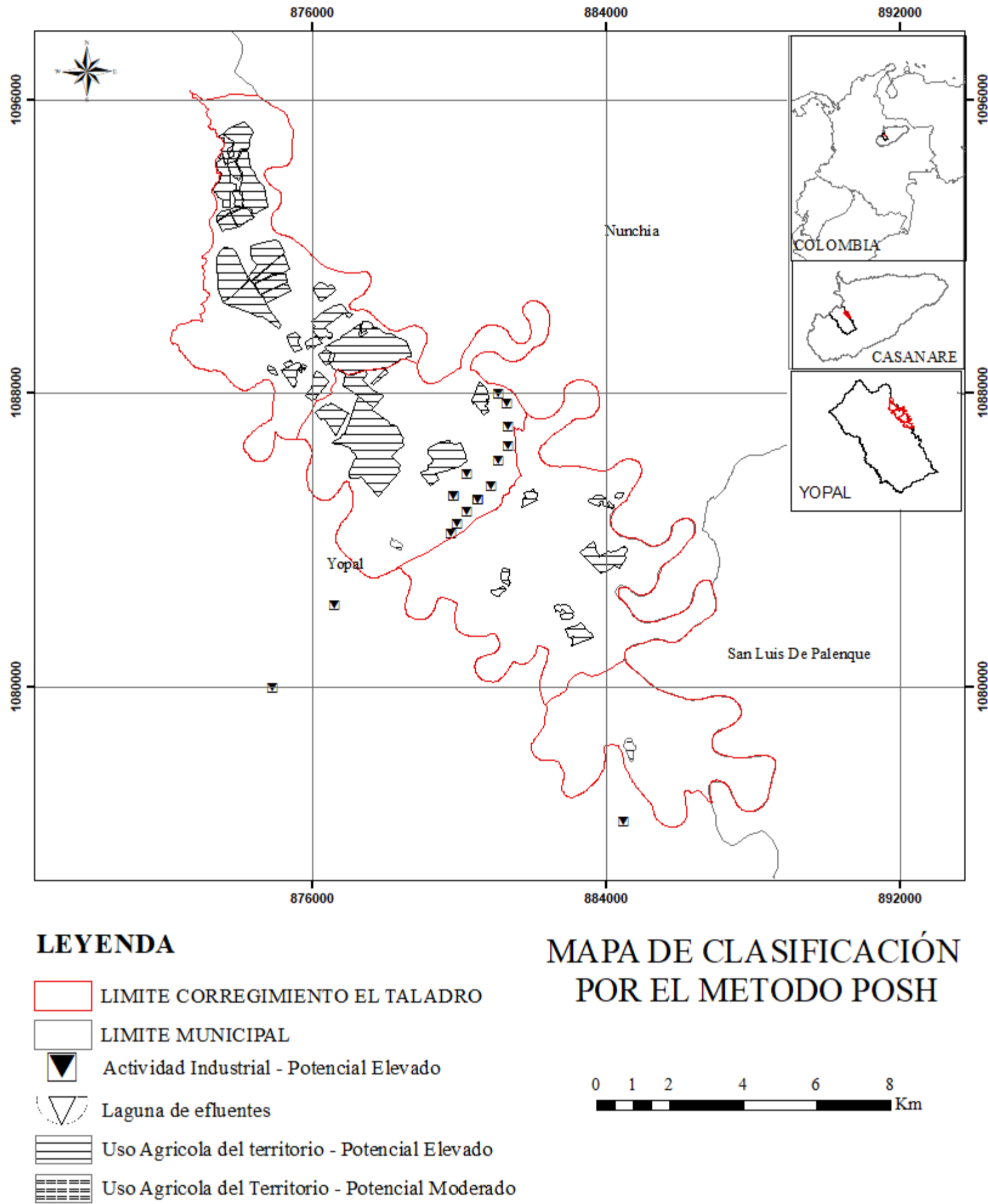
MAPA DE CLASIFICACION POR EL METODO POSH



Nota. El mapa fue elaborado de acuerdo con la leyenda para el mapeo de la carga contaminante al subsuelo propuesta por Foster (2002).

Figura 28

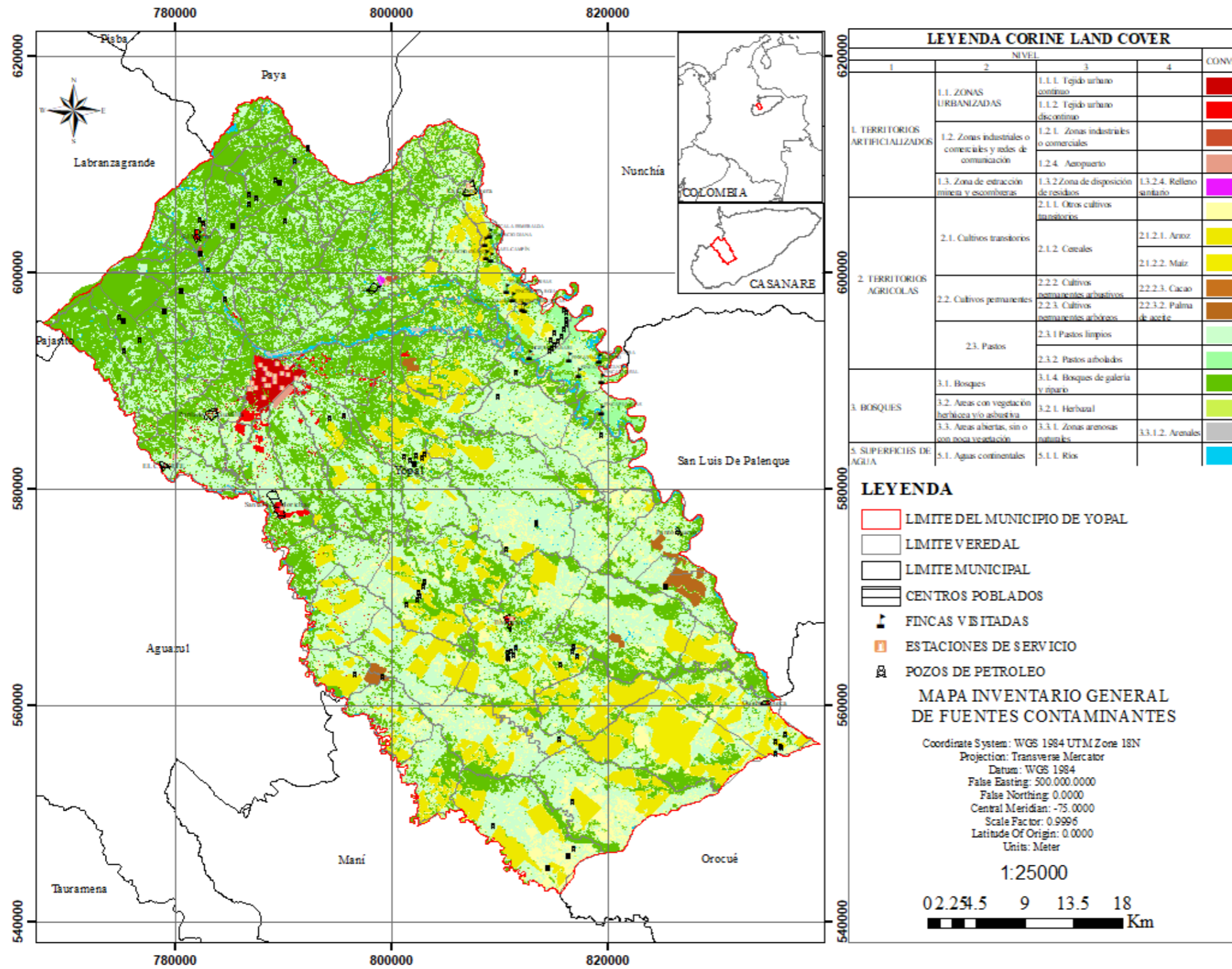
Mapa de clasificación de las fuentes potenciales de contaminación según el método POSH, a escala local



Nota. El mapa fue elaborado de acuerdo con la leyenda para el mapeo de la carga contaminante al subsuelo propuesta por Foster (2002)

Figura 29

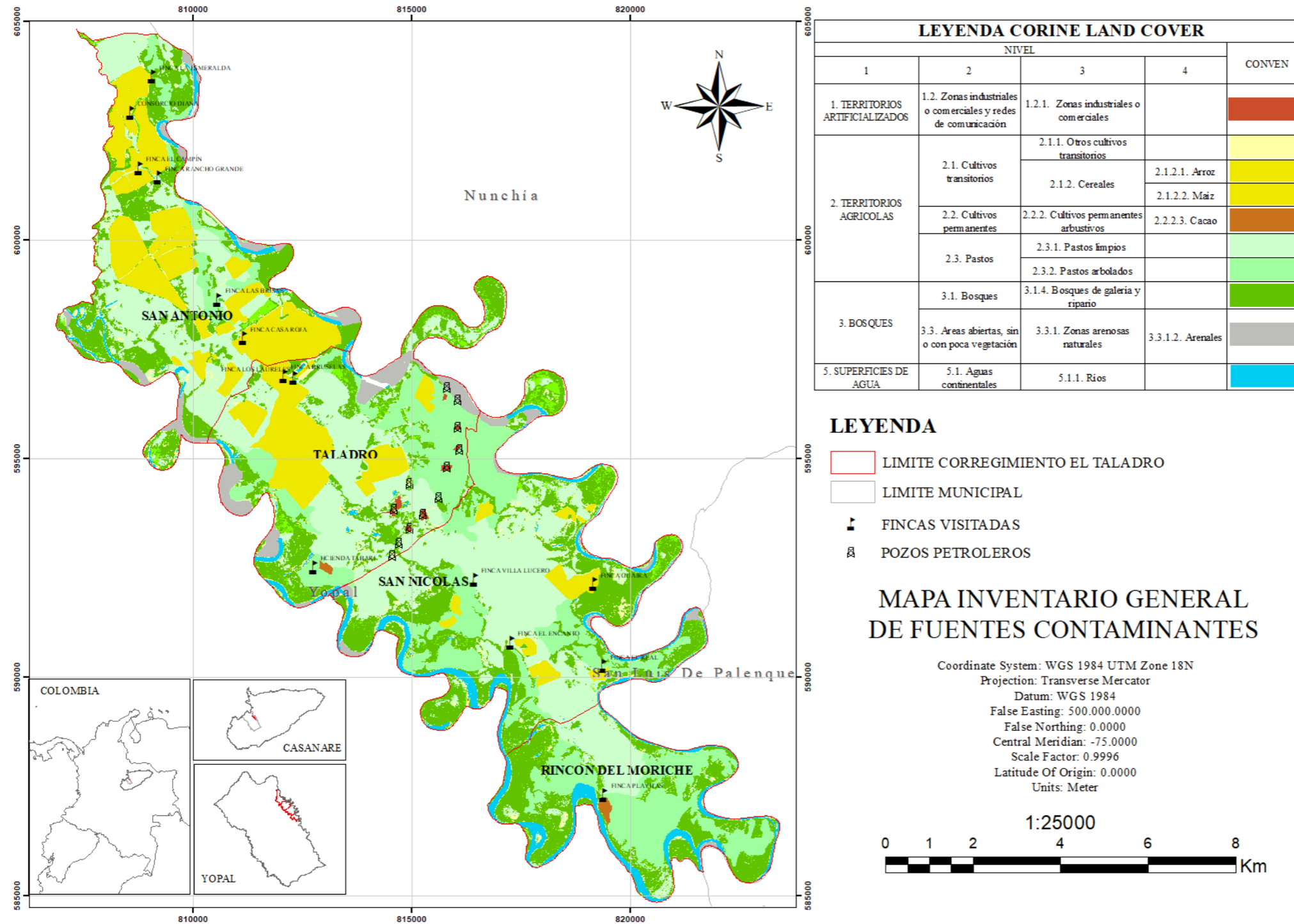
Mapa de distribución espacial de coberturas del suelo (CLC) y fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio municipal



Nota. Insumos elaborados a partir de la integración de información secundaria derivada de la clasificación de coberturas del suelo e información primaria obtenida mediante visitas de campo.

Figura 30

Distribución espacial de coberturas del suelo (CLC) y fuentes potenciales de contaminación en el área de estudio local



Nota. Insumos elaborados a partir de la integración de información secundaria derivada de la clasificación de coberturas del suelo e información primaria obtenida mediante visitas de campo.

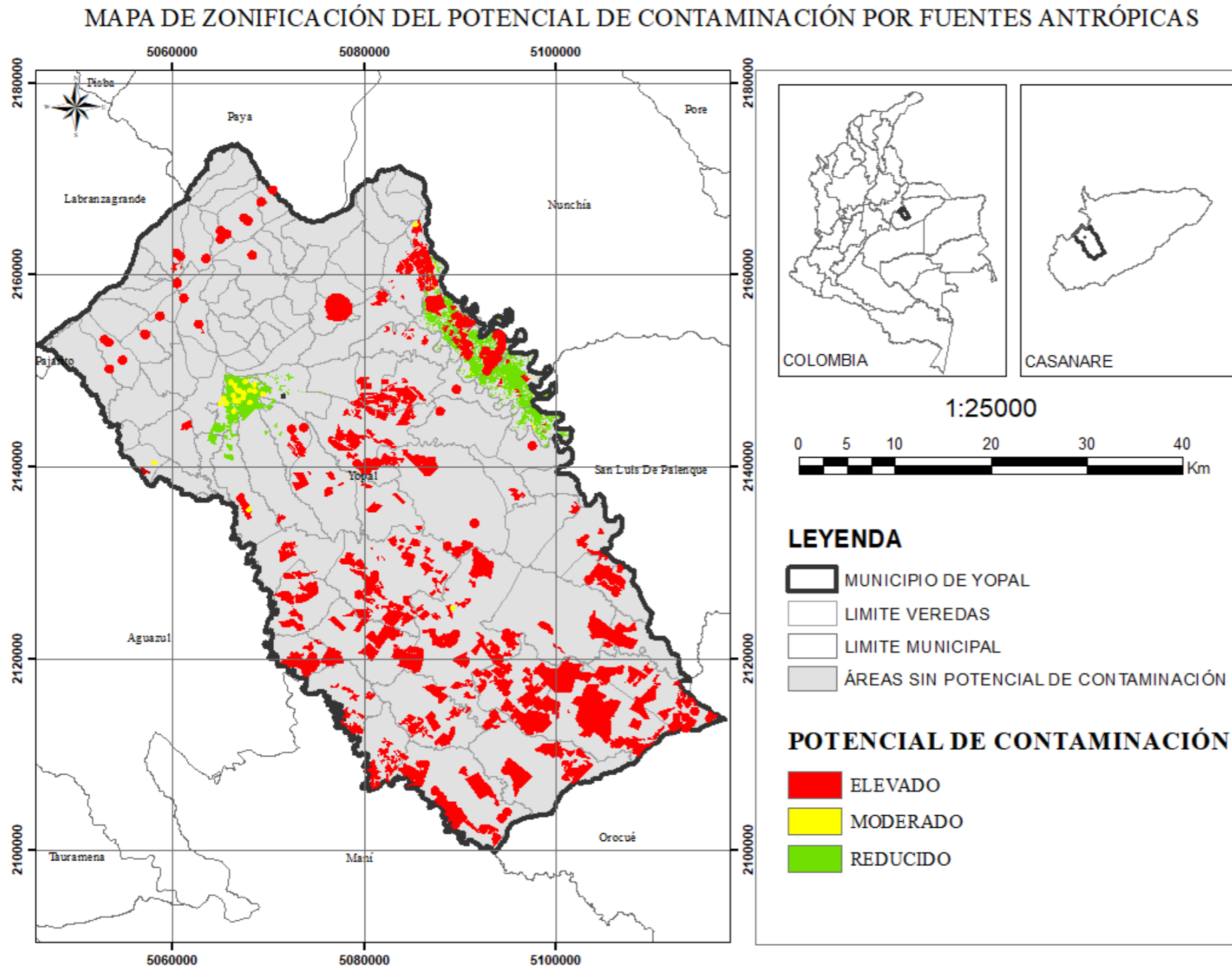
### 5.3.2 *Actividad 3.2*

En la Figura 31 se presenta el área de estudio a escala municipal, donde se evidencia que la mayor concentración de fuentes de contaminación con potencial elevado se localiza en el sector suroccidental del municipio, correspondiente a zonas de sabana cuyo paisaje favorece el desarrollo de actividades agrícolas. Las actividades asociadas a un potencial moderado de contaminación se concentran principalmente en el área urbana, donde se localiza la mayoría de las estaciones de servicio, así como parte de las actividades clasificadas con potencial reducido, correspondientes a zonas urbanas con un desarrollo intermedio del sistema de gestión de residuos sólidos y aguas residuales. Para una visualización detallada del mapa a escala 1:25 000, se remite al Apéndice K.

Por su parte, el área de estudio local del corregimiento El Taladro se representa en la Figura 32, donde se observa una distribución espacial heterogénea de los diferentes niveles de potencial de contaminación. Las actividades con potencial elevado corresponden principalmente a la siembra de arroz mecanizado, la cual ocupa la mayor extensión del corregimiento, así como a la presencia de pozos petroleros y fincas con deficiente gestión de residuos sólidos y sistemas inadecuados de tratamiento de aguas residuales. El potencial moderado se asocia a los cultivos de Cacao, los cuales presentan un sistema de producción tradicional con un uso limitado de agroquímicos. Finalmente, a partir de las visitas de campo y los recorridos realizados en el corregimiento, la cobertura de la leyenda CLC 2.3.1 Pastos limpios fue clasificada como actividad de potencial reducido, debido a su uso en actividades de ganadería extensiva. Para una visualización detallada del mapa a escala 1:25 000, se remite al Apéndice L.

Figura 31

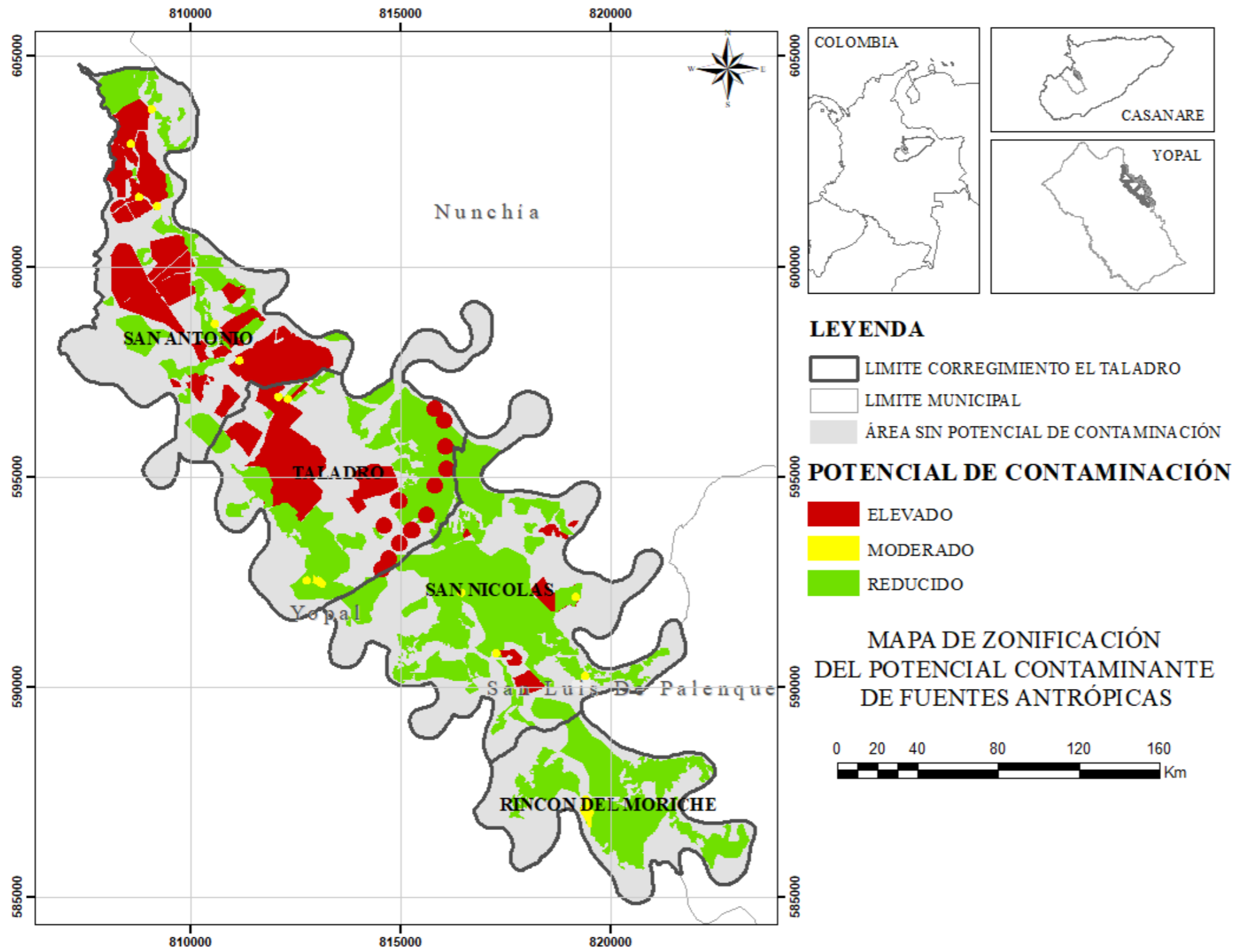
Zonificación del potencial de contaminación por fuentes antrópicas en el municipio de Yopal



Nota. El mapa representa el potencial de contaminación y no una medición directa del riesgo ambiental

Figura 32

Zonificación del potencial de contaminación por fuentes antrópicas en el corregimiento El Taladro



Nota. El mapa representa el potencial de contaminación y no una medición directa del riesgo ambiental.

## 5.4 FASE 4

Una vez identificadas y clasificadas las fuentes antrópicas potencialmente contaminantes del sistema acuífero de Yopal, se hace necesario plantear recomendaciones orientadas al control y mitigación de la contaminación. Dada la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, el grado de afectación puede variar en función del tipo de actividad y de la carga contaminante asociada. En este sentido, a continuación, se presentan recomendaciones específicas para cada una de las actividades identificadas y clasificadas previamente.

### 5.4.1 *Actividad 4.1*

#### **Recomendaciones para el sector Agrícola**

De acuerdo con el Estudio Hidrogeológico de Yopal (2018), la contaminación asociada a las áreas de cultivo está influenciada principalmente por la extensión de los cultivos y por la cantidad de insumos agrícolas aplicados, los cuales, en algunos casos, son incorporados directamente al suelo. El uso excesivo de estas sustancias se presenta con mayor frecuencia en cultivos extensivos como el arroz mecanizado y la palma de aceite, los cuales presentan un potencial elevado de contaminación en comparación con otros tipos de cultivos.

En este contexto, Foster et al. (2002) proponen como medidas de control el manejo adecuado de nutrientes y pesticidas de acuerdo con las necesidades reales de los cultivos, el control de la tasa y el momento de aplicación, la prohibición del uso de pesticidas seleccionados y la regulación de la disposición final de los envases y contenedores.

### **Recomendaciones para el sector Pecuario**

Para el manejo de los residuos generados en la porcicultura, se recomienda la implementación de sistemas de tratamiento que permitan la separación y aprovechamiento de la porcínaza, especialmente en función de la localización de las granjas y la disponibilidad de áreas agrícolas cercanas. Entre las alternativas se incluyen los sistemas de separación mecánica, los tratamientos fisicoquímicos, los sistemas de evaporación y los procesos biológicos (Asociación Colombiana de Porcicultores, 2019).

Para los sistemas de producción pecuaria se recomienda fortalecer el control y seguimiento por parte de las instituciones públicas, mediante procesos de capacitación dirigidos a las granjas de tipo familiar, orientados a una adecuada gestión de los residuos generados. Asimismo, se sugiere promover el apoyo a la tecnificación de los sistemas productivos, de manera que la implementación de infraestructura y prácticas adecuadas permita un manejo más eficiente y controlado de los residuos, reduciendo el riesgo de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas.

### **Recomendaciones para el Sector Industrial**

En la industria de los hidrocarburos, uno de los principales peligros para el recurso hídrico corresponde a la posible contaminación de las aguas subterráneas por hidrocarburos, asociada a fallas en el cierre del pozo o a deficiencias en el diseño e integridad de las estructuras de perforación (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2024). En este sentido, se recomienda implementar medidas de protección del suelo en las áreas operativas, mediante el uso de pavimentos o membranas impermeables, así como una adecuada gestión de sustancias químicas, fluidos de perforación y escorrentías generadas en la locación (Foster et al., 2002).

Una de las principales preocupaciones en las estaciones de servicio de gasolina es la presencia de fugas, asociadas al deterioro o mal estado de los tanques de almacenamiento subterráneos. Estas fugas pueden generar infiltraciones al subsuelo y dar lugar a la formación de plumas de contaminación que afecten las aguas subterráneas. Por ello, se recomienda la implementación de tanques de doble pared o, alternativamente, la instalación de sistemas de almacenamiento sobre el nivel del suelo, que permitan la detección temprana de fugas y la prevención de impactos ambientales (Foster et al., 2002).

### **Recomendaciones para el Sector de Urbanización**

El estudio hidrogeológico de Yopal (Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía & Hidroyopal, 2013), recomienda que, en el sector rural que depende de pozos sépticos para el manejo de aguas residuales, estos sean construidos con un sello sanitario que elimine el riesgo de infiltración de contaminantes provenientes de letrinas, pozos sépticos u otras fuentes, y que se ubiquen a más de 50 metros de cualquier posible fuente de contaminación por aguas residuales domésticas.

Foster et al. (2002) recomiendan, para el tratamiento de aguas negras o residuales, optar por tanques sépticos cuando el consumo de agua sea elevado, siguiendo los estándares de diseño establecidos para estos sistemas. Como alternativa, sugiere el uso de redes de alcantarillado, ya que generan una contaminación menos profunda que los pozos sépticos.

Para el tratamiento de residuos sólidos, es necesaria la intervención de las autoridades ambientales, debido a la deficiente gestión del relleno sanitario del departamento. Es importante realizar revisiones frecuentes para evitar que los lixiviados contaminantes lleguen a profundidades cercanas al nivel freático.

En las veredas que no cuentan con servicio de recolección y gestión de residuos sólidos, se debe implementar un plan adecuado para su manejo. Foster et al., (2002) recomienda la impermeabilización del colector de lixiviados, tanto en la base como en la superficie, junto con el monitoreo del tratamiento o reciclaje y la disposición de los residuos a distancia segura. Además, enfatiza la necesidad de control y seguimiento por parte de las autoridades ambientales.

## 6 Conclusiones

Se estimó el potencial de generación de contaminantes antropogénicos del sistema acuífero de Yopal, a partir de la identificación y evaluación de doce (12) actividades antrópicas. Los resultados indican que el 66,67 % de las actividades evaluadas presentan un potencial elevado de contaminación, mientras que los potenciales moderado y reducido representan cada uno el 16,67 %, lo que evidencia una alta presión antrópica sobre la calidad del agua subterránea.

Se identificaron las fuentes potenciales de contaminación antropogénica del área de estudio, consolidando una base de datos que constituye un insumo para estudios de vulnerabilidad y protección del recurso hídrico. En total, se registraron 482 fuentes potenciales asociadas a actividades agrícolas, pecuarias, industriales y urbanas.

Se evaluaron las cargas de los contaminantes relevantes que podrían afectar la calidad del agua subterránea mediante la aplicación del método Pollutant Origin Surcharge Hydraulically (POSH). A partir de esta evaluación, las actividades identificadas fueron clasificadas en tres niveles de potencial contaminante: Reducido, Moderado y Elevado. El 88.22% de las fuentes identificadas son de potencial elevado, el 9.7% de potencial moderado y 2.07% de potencial reducido. La mayor concentración de fuentes con potencial elevado está en el corregimiento de

Tilodirán con un total de 105 fuentes. El área de estudio local presenta un total de 15 fuentes con potencial elevado y 2 con potencial moderado.

A partir de los resultados obtenidos, se identificó que los cultivos de arroz representan la principal fuente difusa con potencial elevado de contaminación, debido a su carácter mecanizado y al uso intensivo de agroquímicos, mientras que los pozos petroleros constituyen la fuente puntual predominante. Las zonas con mayor concentración de potencial elevado se localizan principalmente en el piedemonte y la zona de sabana, donde coinciden actividades agrícolas intensivas, como los cultivos de arroz y maíz, junto con fuentes puntuales asociadas a la actividad petrolera.

Una de las principales limitaciones del estudio fue la resolución espacial de las imágenes satelitales obtenidas de plataformas gratuitas, utilizadas para la clasificación de los usos del suelo, lo que restringió el nivel de detalle alcanzado en la aplicación de la metodología CORINE Land Cover. No obstante, la integración de información secundaria, herramientas SIG y validación en campo permitió obtener resultados consistentes.

El trabajo de campo permitió corroborar la presencia de diversas actividades con potencial contaminante, tales como cultivos agrícolas (arroz, maíz y cacao), pozos petroleros y prácticas inadecuadas de disposición de residuos sólidos mediante enterramiento. Asimismo, se evidenció que la mayoría de las fincas cuentan con pozos sépticos para el almacenamiento de aguas residuales, con frecuencias de mantenimiento variables, e incluso ausencia de registros en algunos casos. Se observó además que la práctica pecuaria predominante en el área de estudio corresponde a la ganadería extensiva bovina.

Las visitas de campo resultaron fundamentales para la estimación del potencial de contaminación, al permitir la verificación directa de las prácticas agrícolas y pecuarias, muchas de

ellas de carácter mecanizado y desarrolladas sobre extensas áreas. De igual manera, los estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano y CORPORINOQUIA contribuyeron a la comprensión del modelo hidrogeológico del acuífero de Yopal y de su vulnerabilidad frente a la contaminación, particularmente debido a la escasa profundidad de los niveles freáticos, lo que incrementa el riesgo de afectación por agroquímicos y lixiviados.

Finalmente, este trabajo constituye una línea base para la identificación de zonas y actividades con mayor riesgo potencial de contaminación, y resalta la necesidad de fortalecer el monitoreo sistemático de las aguas subterráneas en el municipio de Yopal, considerando que desde el año 2018 no se registran estudios publicados sobre la química del agua subterránea, a pesar de ser actualmente la principal fuente de abastecimiento para la población.

## **7 Recomendaciones**

Garantizar la calidad de las aguas subterráneas mediante la implementación de políticas de protección dirigidas a las zonas de recarga cercanas a los puntos con elevado potencial de contaminación. Estas políticas deben priorizar la conservación de acuíferos vulnerables y la mitigación de riesgos en áreas clave.

Transitar hacia prácticas agrícolas más respetuosas con el uso del suelo, con énfasis en la reducción de la contaminación por nitrógeno. Esto implica disminuir el uso excesivo de agroquímicos y promover un manejo del suelo más adecuado, a fin de disminuir la lixiviación y la escorrentía que favorecen la intrusión de contaminantes.

Es importante que las entidades gubernamentales y ambientales impulsen políticas orientadas a promover estudios sobre la protección y la calidad de los recursos hídricos subterráneos, y facilitar la difusión de estos resultados a la comunidad. Asimismo, instar a las

autoridades de gestión de residuos sólidos a ampliar campañas de educación y gestión de residuos para alcanzar más zonas del municipio, no solo las inmediatas al área urbana.

Desarrollar campañas de concientización sobre las aguas subterráneas y capacitar a la comunidad para adoptar prácticas ambientales más responsables, especialmente en relación con este recurso. Es fundamental socializar con la comunidad qué prácticas o actividades pueden contribuir a contaminar el agua que consumen.

Llevar a cabo un estudio detallado que contemple las propiedades fisicoquímicas de las aguas subterráneas y evalúe las fuentes antrópicas de contaminación con mayor potencial. Este análisis permitirá una regulación más robusta por parte de las entidades competentes, orientada a controlar las actividades y zonas que impactan de forma significativa este recurso

### Referencias Bibliográficas

- Alcaldía de Yopal. (2013). *Plan de Ordenamiento Territorial POT Yopal TOMO II*.
- Alcaldía de Yopal. (2025). *PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL MUNICIPIO DE YOPAL CASANARE 2025*.
- Asociación Colombiana de Porcicultores, P. (2019). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector porcícola en Colombia*.
- Bustamante, C., & López, C. (2024). The Social Cartography in Key of Environmental Education to Understand the School-Territory. *Territorios*, (50).  
<https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.11660>
- Calin, G. D., & Castellet, J. S. (2016). Análisis crítico de la viabilidad del fracking. *Dyna (Spain)*, 91(1), 29–33. <https://doi.org/10.6036/7520>
- Contraloría Departamental de Casanare. (2022). *INFORME DE RECURSOS NATURALES DEL DEPARTAMENTO DE CASANARE VIGENCIA 2021*. [www.contraloriacasanare.gov.co](http://www.contraloriacasanare.gov.co)
- Contraloría Departamental de Casanare. (2024). *INFORME SOBRE EL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE EN EL DEPARTAMENTO DE CASANARE*. [www.contraloriacasanare.gov.co](http://www.contraloriacasanare.gov.co)
- CORMACARENA. (2015). *GUIA AMBIENTAL PARA SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PORCICOLAS DEL META*.
- Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía, C., & Hidroyopal. (2013). *ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO MUNICIPIO DE YOPAL-CASANARE*.

- Cristancho Montenegro, D. L., Torres Mejía, A. S., & Lobatón Orduz, J. F. (2020). Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia. *Revista Mutis*, *10*(1), 25–45. <https://doi.org/10.21789/22561498.1601>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2024). *Encuesta de arroz mecanizado*. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-arroz-mecanizado>
- Dueñas, H., & Van der Hammen, T. (2023). *SIGNIFICADO GEOLÓGICO Y ASOCIACIONES PALINOLÓGICAS DE LAS FORMACIONES DIABLO INFERIOR (MIOCENO TARDÍO) Y SAN FERNANDO SUPERIOR (MIOCENO MEDIO), PIEDEMONTE CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, COLOMBIA*.
- Durántez Ibarrola, B., & Zapatero González, A. (2021). *ANÁLISIS DEL SECTOR VACUNO EXTENSIVO Y SU EFECTOS MEDIOAMBIENTALES EN ESPAÑA*.
- Fei-Baffoe, B., Badu, E., Miezah, K., Adjiri Sackey, L. N., Sulemana, A., & Yahans Amuah, E. E. (2024). Contamination of groundwater by petroleum hydrocarbons: Impact of fuel stations in residential areas. *Heliyon*, *10*(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25924>
- Fonseca, H., Mendivelso, D., Cardozo, R., & Ceballos, A. (2007). *INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA EN EL SUROESTE DEL DEPARTAMENTO DE CASANARE*.
- Foster, S., & Chilton, J. (2021). Policy experience with groundwater protection from diffuse pollution – a review. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 23). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100288>

- Foster, S., Hirata, R., & Paris, M. (2002). *Proteccion de la Calidad del Agua Subterranea guia para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*.  
[www.mundiprensa.com](http://www.mundiprensa.com)
- Gobernacion de Casanare. (2024a). *Plan de Desarrollo Departamental 2024-2027*.
- Gobernacion de Casanare. (2024b). *PLAN DEPARTAMENTAL DE EXTENSIÓN AGROPECUARIA*.  
[www.casanare.gov.co-agricultura@casanare.gov.co-desarrollorural@casanare.gov.co](http://www.casanare.gov.co-agricultura@casanare.gov.co-desarrollorural@casanare.gov.co)
- Gómez, H. I. (2020). Análisis de niveles piezométricos y patrones de captación de agua subterránea en el acuífero cuaternario de Yopal, Casanare, Colombia. *Boletín de Geología*, 42(2), 89–103. <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020005>
- González Herrera, R. A., Albornoz Euán, B. S. I., Sánchez Y Pinto, I. A., & Osorio Rodríguez, J. H. (2018). The yucatán aquifer. Analysis of the risk of contamination with support of a geographic information system. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(4), 667–683. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.09>
- IDEAM. (2010). *Legenda nacional de coberturas de la tierra : metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia : escala 1:100.00*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2013). *ZONIFICACIÓN Y CODIFICACIÓN DE UNIDADES HIDROGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE COLOMBIA*. [www.imprenta.gov.co](http://www.imprenta.gov.co)
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2017). *Datos abiertos de agrología: Mapas de clasificación de las tierras por su vocación de uso (escala 1:100.000)*. IGAC.  
<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2017). *Mapas de suelos del territorio colombiano a escala 1:100.000: Departamento de Casanare*. IGAC. <https://geoportal.igac.gov.co>
- IGAC. (2021). *ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA ESCALA 1:25.000*.
- Lina Maria Cabrales Villalba<sup>1</sup>. (2019). *Contaminación de las aguas subterráneas por actividades agrícolas y su regulación en Colombia*. 2.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, (MADR). (2019). *Cultivo comercial de arroz seco mecanizado. Identificación de zonas aptas en Colombia, escala 1:100.000*. UPRA.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *Estadísticas agrícolas: Información municipal*. Agronet. <https://agronet.gov.co/estadisticas/agricola>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Riesgo y los Conceptos que lo Componen*.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2024). *GUIA DE MANEJO AMBIENTAL PARA PERFORACIÓN DE POZOS DE PETROLEO Y GAS*.
- Montoya, D. M., Numpaque, A., Martín, C., & Alcárcel, F. (2013). *REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO SUBDIRECCIÓN GEOLOGÍA BÁSICA GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 193 YOPAL*.
- Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos*.
- Peña, S., Rosas, V., & Pedraza, Y. (2014). *Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en la ciudad de Yopal, Casanare*. *Scientia et Technica Año XIX, 19(1)*.
- Romero, I. Y., & Urrea, C. A. (2021). *Inventario de fuentes de contaminación en el acuífero superior de la Mesa de los Santos (Santander)*.

Salgar, L. M. (2005, 19 de enero). *El cultivo de maíz en Colombia*. Semillas.

<https://www.semillas.org.co/es/el-cultivo-de-maz-en-colombia>

Secretaría de Salud Municipal. (2024). *Análisis Situacional de Salud Participativo*.

Servicio Geológico Colombiano, S. (2018). *MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL MUNICIPIO DE YOPAL DEPARTAMENTO DE CASANARE*.

UNESCO. (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. <http://www.unesco>.

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2024). *EVA: Evaluador agropecuario*.

UPRA. <https://upra.gov.co/es-co/eva>

Vélez, M. (2011). *HIDRÁULICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS*.

Virguez, P. (2018). *EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS AMBIENTALES ORIGINADOS EN POZOS PETROLEROS: CON ÉNFASIS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES*.