



## **Modelado mediante superposición ponderada en SIG para identificar targets auríferos en los municipios de San Roque y Yolombó**

Juan Manuel Benavides Vados

María Alejandra Contreras Robayo

Neizer José Díaz Díaz

Santiago Gil Cardona

Julie Carolina Silva Arévalo

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

Asesor: Eduar Alberto Ríos Guarín, Magíster (MSc) en Tecnologías de la Información Geográfica

Asesores de recursos académicos: María Eugenia Nieto Medina (asesora bibliográfica)

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

<b>Cita</b>	(Benavides et al., 2025)
<b>Referencia</b>	Benavides, Vados, J. M., Contreras, Robayo, M. A., Díaz, Díaz, N. J., Gil, Cardona, S. & Silva, Arévalo, J. C. (2025). <i>Modelado mediante superposición ponderada en SIG para identificar targets auríferos en los municipios de San Roque y Yolombó</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

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

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

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

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

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

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

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

## Tabla de contenido

Tabla de contenido .....	3
Resumen .....	10
Abstract .....	11
Introducción .....	12
1 Planteamiento del problema.....	14
1.1 Descripción del problema.....	14
1.2 Formulación del problema .....	17
1.3 Antecedentes .....	17
2 Justificación .....	21
3 Objetivos .....	23
3.1 Objetivo general .....	23
3.2 Objetivos específicos.....	23
4 Referente contextual .....	24
5 Referente normativo.....	27
6 Marco teórico.....	31
6.1 Conceptos geológicos claves.....	31
6.2 Contexto geológico .....	36
6.2.1 Geología Regional.....	37
6.2.2 Geología estructural .....	40
6.2.3 Metalogenia.....	43
6.2.4 Tipos de depósitos minerales .....	44
6.2.4.1 Depósitos hidrotermales.....	45
6.2.4.2 Depósitos sedimentarios .....	45
6.2.4.3 Depósitos magmáticos .....	45

6.2.4.4	Depósitos residuales y supergénicos.....	46
6.4	Contexto geoquímico .....	46
6.5	Contexto geofísico.....	48
6.6	Sistemas de información geográfica .....	49
6.6.1	Datos vectoriales .....	49
6.6.2	Datos ráster.....	50
6.6.2.1	Imágenes satelitales .....	50
6.6.2.1.1	Sensores remotos y su clasificación .....	51
6.6.2.1.2	Banda.....	51
7	Metodología.....	52
7.1	Procedimiento.....	52
7.1.1	Adquisición de información .....	52
7.1.2	Procesamiento de información de entrada .....	55
7.1.2.1	Litología.....	56
7.1.2.2	Geología estructural .....	59
7.1.2.3	Geoquímica .....	63
7.1.2.4	Magnetometría .....	71
7.1.2.5	Detección de alteraciones hidrotermales .....	76
7.1.3	Integración de variables .....	87
8	Resultados .....	93
9	Discusión.....	100
10	Conclusiones .....	102
11	Recomendaciones.....	103
12	Referencias .....	104

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Información base consultada.....	54
<b>Tabla 2</b> Clasificación de las unidades geológicas de acuerdo con su favorabilidad para albergar depósitos auríferos.....	58
<b>Tabla 3</b> Zona de influencia de las estructuras geológicas de acuerdo con su longitud. ....	61
<b>Tabla 4</b> Calificación de las estructuras geológicas de acuerdo con su favorabilidad para albergar depósitos minerales. ....	62
<b>Tabla 5</b> Valores de anomalía geoquímica con base en el P90 y valores de fondo de los elementos en la corteza terrestre.....	68
<b>Tabla 6</b> Calificación de la favorabilidad para la ocurrencia de depósitos minerales de acuerdo con la información geoquímica. ....	69
<b>Tabla 7</b> Calificación de la favorabilidad para la ocurrencia de depósitos minerales de acuerdo con la información de magnetometría. ....	74
<b>Tabla 8</b> Calificación de la favorabilidad para la ocurrencia de depósitos minerales de acuerdo con la clasificación de dominios gamma espectrométricos. ....	79
<b>Tabla 9</b> Matriz de comparación para las diferentes variables utilizadas, método AHP.....	90
<b>Tabla 10</b> Matriz normalizada y cálculo del peso de ponderación de cada variable. ....	91
<b>Tabla 11</b> Resultado de la ponderación de variables. ....	93
<b>Tabla 12</b> Resultados del procesamiento de las variables a datos ráster con pesos de favorabilidad.....	94
<b>Tabla 13</b> Comparación de los resultados del modelo y las áreas con títulos mineros. ....	98

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Localización del área de estudio.....	25
<b>Figura 2</b> Geología Regional del área de estudio. ....	38
<b>Figura 3</b> Estructuras geológicas identificadas en la cartografía geológica del área de estudio. ...	42
<b>Figura 4</b> Procesamiento de la variable “Litología”. ....	58
<b>Figura 5</b> Resultado final del procesamiento de la variable “Litología”. ....	59
<b>Figura 6</b> Procesamiento de la variable “Geología estructural”. ....	61
<b>Figura 7</b> Resultado final del procesamiento de la variable “Geología Estructural”. ....	63
<b>Figura 8</b> Anomalías geoquímicas de oro identificadas por el SGC. ....	65
<b>Figura 9</b> Información base de la distribución de la concentración de los elementos de interés en el Atlas Geoquímico de Colombia. ....	67
<b>Figura 10</b> Procesamiento de la variable “Geoquímica” ....	70
<b>Figura 11</b> Resultado final del procesamiento de la variable “Geoquímica”. ....	71
<b>Figura 12</b> Dominios magnéticos definidos en el Mapa de anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales. ....	73
<b>Figura 13</b> Procesamiento de la variable “Magnetometría”. ....	75
<b>Figura 14</b> Resultado final del procesamiento de la variable “Magnetometría”. ....	76
<b>Figura 15</b> Dominios gamma espectrométricos definidos en el Mapa de anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales.....	78
<b>Figura 16</b> Procesamiento de la variable “Alteraciones hidrotermales”. ....	80
<b>Figura 17</b> Resultado final del procesamiento de la variable “Alteración hidrotermal”. ....	81
<b>Figura 18</b> Índice NVDI para el área de estudio.....	83
<b>Figura 19</b> Índice de arcillas para el área de estudio. ....	85
<b>Figura 20</b> Índice de óxidos férricos en el área de estudio. ....	86
<b>Figura 21</b> Procedimiento para la integración de las variables a través de una suma ponderada...	92
<b>Figura 22</b> Resultado final de la suma ponderada de variables. ....	96

**Figura 23** Comparación entre el resultado final del modelo y la distribución de títulos mineros de oro en la zona de estudio. ....97

### Siglas, acrónimos y abreviaturas

<b>AHP</b>	Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process)
<b>ANLA</b>	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
<b>ANM</b>	Agencia Nacional de Minería
<b>As</b>	Arsénico
<b>ASTER</b>	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
<b>Au</b>	Oro
<b>Bi</b>	Bismuto
<b>CI</b>	Índice de Consistencia
<b>CORNARE</b>	Corporación Autónoma Regional de los Ríos Negro y Nare
<b>CR (RC)</b>	Razón de Consistencia (Consistency Ratio)
<b>GEE</b>	Google Earth Engine
<b>IGAC</b>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
<b>IMT</b>	Intensidad Magnética Total
<b>IRGD</b>	Intrusion-Related Gold Deposit (Deposito Aurífero Relacionado a Intrusivos)
<b>Mo</b>	Molibdeno
<b>PCA</b>	Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis)
<b>PNN</b>	Parques Nacionales Naturales de Colombia
<b>ppm</b>	Partes Por millón
<b>IA (RI)</b>	Índice Aleatorio (Random Index)
<b>RUNAP</b>	Registro Único Nacional de Áreas Protegidas
<b>Sb</b>	Antimonio
<b>SGC</b>	Servicio Geológico Colombiano
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica(o)
<b>SWIR</b>	Infrarrojo de Onda Corta (Short-Wave Infrared)
<b>Te</b>	Telurio
<b>Th</b>	Torio
<b>TIC</b>	Tecnologías de la Información y la Comunicación
<b>U</b>	Uranio

**VNIR**

Infrarrojo Cercano y Visible (Visible and Near Infrared)

## Resumen

El presente proyecto desarrolló una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar targets geológicos para futuros estudios de exploración en los municipios de San Roque y Yolombó, que hacen parte de la subregión nordeste del departamento de Antioquia, Colombia.

La región enfrenta desafíos significativos debido a la presencia de diferentes actores que participan en la actividad minera cuya articulación resulta clave para el éxito de las estrategias de prospección y formalización. Entre ellos se destacan el Servicio Geológico Colombiano (SGC), encargado de generar la cartografía geocientífica del país; el Ministerio de Minas y Energía, responsable de las políticas de legalización minera; la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), que regula los estudios de impacto ambiental; y las empresas privadas como B2Gold, promotoras del Proyecto Gramalote.

Sin embargo, la diversidad de enfoques, intereses y capacidades institucionales dificulta la articulación de esfuerzos orientados al conocimiento integral de los recursos naturales no renovables. Para ello, se integraron variables geológicas, geoquímicas, geofísicas, de alteración hidrotermal, mediante un modelo de superposición ponderada implementado en un entorno SIG. Este modelo permitió clasificar y ponderar cinco variables clave con base en su influencia sobre la mineralización aurífera, generando una cartografía predictiva que identifica zonas con alta, media y baja favorabilidad para la prospección de oro. Los resultados destacan sectores específicos dentro del área de los municipios de Yolombó y San Roque como prioritarias contribuyendo a orientar procesos de formalización minera, planificación territorial y desarrollo económico sostenible en la región.

*Palabras clave:* Sistemas de información geográfico (SIG), modelo de superposición ponderada, variables geológicas, variables geoquímicas, variables geofísicas, sectorización de áreas.

## **Abstract**

This project developed a methodology based on Geographic Information Systems (GIS) to identify potential gold-bearing zones in the municipalities of San Roque and Yolombó, located in the northeastern subregion of the department of Antioquia, Colombia.

The region faces significant challenges due to the presence of multiple stakeholders involved in mining activities, whose coordination is key to the success of prospecting and formalization strategies. These stakeholders include the Colombian Geological Survey (SGC), responsible for generating national geoscientific mapping; the Ministry of Mines and Energy, which leads mining legalization policies; the National Environmental Licensing Authority (ANLA), which oversees environmental impact assessments; and private companies such as B2Gold, which is promoting the Gramalote Project.

However, the diversity of approaches, interests, and institutional capacities hinders the coordination of efforts aimed at achieving a comprehensive understanding of non-renewable natural resources. To address this, geological, geochemical, geophysical and hydrothermal alteration, variables were integrated through a weighted overlay model implemented in a GIS environment. This model enabled the classification and weighting of five key variables based on their influence on gold mineralization, generating a predictive map that identifies areas with high, medium, and low favorability for gold prospecting. The results highlight specific sectors within the municipalities of Yolombó and San Roque as priority zones, contributing to the guidance of mining formalization processes, land-use planning, and sustainable economic development in the region.

*Keywords:* Geographic Information Systems (GIS), weighted overlay model, geological variables, geochemical variables, geophysical variables, area zoning.

## Introducción

La exploración de recursos minerales constituye un componente estratégico para el desarrollo económico de diversas regiones en Colombia, especialmente en zonas con tradición minera como los municipios de San Roque y Yolombó, ubicados en la subregión nordeste del departamento de Antioquia. Esta zona se ha caracterizado por una intensa actividad minera, tanto formal como informal, que ha generado impactos ambientales, sociales y económicos, al tiempo que plantea retos importantes en términos de planificación, sostenibilidad y legalidad de la actividad extractiva.

En este contexto, la identificación de áreas con potencial aurífero mediante herramientas técnicas y científicas confiables se convierte en una necesidad prioritaria para orientar procesos de ordenamiento minero, formalización y gestión ambiental. Para ello, los SIG ofrecen una plataforma robusta que permite integrar variables geológicas, geoquímicas y geofísicas, junto con información de percepción remota y bases de datos institucionales, facilitando así la construcción de modelos predictivos para la prospección minera.

El presente trabajo tiene como objetivo identificar zonas con favorabilidad aurífera en los municipios de San Roque y Yolombó, a través de un modelo de superposición ponderada que combina criterios técnicos relevantes en el contexto local. En esta línea, se busca responder a interrogantes como: ¿qué zonas presentan mayor potencial geológico para la presencia de oro?, ¿cómo puede la integración de variables temáticas mediante SIG contribuir a la delimitación de áreas estratégicas para la prospección?, y ¿de qué manera estos resultados pueden apoyar procesos de planificación minera sostenible y formalización?

La importancia de este estudio radica en su contribución al conocimiento geoespacial de una zona de interés minero, a partir de una metodología replicable y basada en criterios técnicos y normativos. Además, los resultados obtenidos tienen el potencial de convertirse en insumo estratégico para instituciones como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Ministerio de Minas y Energía y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), así como para

empresas operadoras y comunidades locales que buscan avanzar hacia una minería responsable, legal y articulada territorialmente.

## **1 Planteamiento del problema**

San Roque y Yolombó, localizados en el nordeste de Antioquia, presentan un alto potencial minero, especialmente para la extracción de oro, constituyéndose en un eje clave para el desarrollo económico regional. No obstante, el crecimiento de esta actividad plantea importantes retos en términos de sostenibilidad ambiental, regulación del sector y articulación con las comunidades locales.

La minería en la región opera bajo títulos mineros y subcontratos de formalización, lo que evidencia una participación significativa de pequeños mineros. El avance minero genera conflictos por el uso del suelo con actividades como la agricultura y la conservación ambiental, lo que exige un manejo responsable para evitar afectaciones al territorio, las comunidades, la biodiversidad y el medio ambiente.

### **1.1 Descripción del problema**

San Roque y Yolombó, ubicados en el nordeste de Antioquia, abarcan una superficie de 138700 hectáreas, reconocidos por su alto potencial minero, especialmente para la extracción de oro, siendo un territorio de gran relevancia económica y social.

La Agencia Nacional de Minería (ANM, s.f.) a través del visor geográfico Sistema Integral de Gestión Minera (consultado el 14/03/2025) presenta las capas que permiten realizar consultas geográficas, mediciones y análisis básicos, con relación a temas de interés minero. A partir de esta información, se tiene que la actividad minera en los municipios de Yolombó y San Roque representa un factor clave en el desarrollo económico y en la transformación de su territorio, en el que se cuenta con diferentes figuras mineras como títulos mineros vigentes otorgados, subcontratos de formalización y solicitudes mineras en trámite, donde la región enfrenta desafíos relacionados con la sostenibilidad ambiental, la regulación del sector y el impacto en las comunidades locales.

Para el mes de abril del año 2025, en el municipio de Yolombó existían 24 títulos mineros otorgados y 58 solicitudes mineras en fase de estudio técnico, mientras que, para el municipio de

San Roque, intersecan 12 títulos mineros y 22 solicitudes mineras. Además, entre ambos municipios se tienen otorgados 3 títulos mineros.

Así, esta tendencia sugiere un crecimiento continuo de la industria minera en la zona, lo que podría generar presiones sobre los ecosistemas y conflictos con otras actividades económicas y comunitarias.

Además, es importante mencionar que, en la región la minería también se desarrolla a través de la modalidad de subcontratos de formalización minera, para lo cual, el municipio de Yolombó reportó 3 subcontratos mineros y 20 subcontratos en el municipio de San Roque, lo que indica una mayor participación de comunidades aledañas en la explotación de recursos en la zona y en mayor medida se ve reflejado en el municipio de San Roque.

De modo que, Holland & Knight (2023) los subcontratos de formalización minera se definen como

Acuerdos de voluntad privados, celebrados entre los titulares mineros y los explotadores mineros de pequeña escala o pequeños mineros que estén desarrollando actividades mineras dentro del área de un título minero inscrito en el Registro Minero Nacional desde antes del 15 de julio de 2013, para que continúen con la explotación bajo el amparo de un título minero, sin que por ese efecto se fraccione o divida el título minero. (p. 60)

En cuanto a las áreas ambientales, el Código de Minas en la Ley 685 de (2001), en sus artículos 34 y 35 define las zonas de exclusión y restricción minera, donde el Artículo 34 establece que:

No se podrán realizar actividades mineras en zonas protegidas y delimitadas por la normativa vigente, como parques nacionales, reservas forestales y áreas de interés ambiental. Sin embargo, en casos excepcionales, la autoridad minera podrá autorizar actividades mineras restringidas considerando estudios técnicos y sociales, siempre que no afecten los objetivos de la zona.

Por otro lado, el Artículo 35

regula las zonas de minería restringida, permitiendo actividades mineras bajo ciertas condiciones en áreas urbanas, rurales, arqueológicas, fluviales, públicas y de interés indígena o de comunidades negras, siempre con las autorizaciones correspondientes y bajo restricciones específicas para proteger el entorno y las infraestructuras existentes.

Por consiguiente, la ANM a través del visor geográfico Sistema Integral de Gestión Minera a fecha de febrero de 2025, en los municipios de Yolombó y San Roque presenta la existencia de zonas con restricciones mineras y zonas protegidas de exclusión minera delimitadas por la normatividad vigente como de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente, que buscan mitigar el impacto ambiental y social en la zona. Por lo tanto, las distintas autoridades del orden nacional establecieron para esta zona del país y específicamente para el municipio de Yolombó 3 zonas de restricción minera (1. Ambiental Gobernación de Antioquia Caño Alicante, 2. Anotación Restrictiva Predio La Armenia Lote B, 3. Anotación Restrictiva Predio La Armenia Lote A), mientras que, para el municipio de San Roque, existen 3 zonas de restricción (1. Gobernación de Antioquia Jaguas y Playas, 2. Anotación Restrictiva Predio 2 El Chaquiro, 3. Anotación Restrictiva Predio 1 El Chaquiro), y 2 de exclusión minera (1. Reserva Forestal Protectora Regional la Montaña, 2. Reserva Forestal Protectora Regional San Lorenzo).

Adicionalmente, la coexistencia de la minería con otras actividades, como la agricultura y la ganadería, podría generar conflictos por el uso del suelo. En cuanto a la presencia de Consejos Comunitarios Afrocolombianos en el municipio de Yolombó y áreas de Bosques de Paz en el municipio de San Roque resalta la importancia de considerar los derechos de las comunidades y la protección ambiental de sus territorios frente a la expansión y explotación minera.

Es así, como la Unidad Administrativa Especial denominada Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN) a través del visor geográfico Registro Único Nacional de Áreas Protegida RUNAP a fecha de febrero de 2025, establece 3 reservas naturales protegidas en la región (1 Distritos Regiones De Manejo Integrado Caño del Rio Alicante en el municipio de Yolombó y 2 en el municipio de San Roque (1. Reserva Forestal Protectora Regional La Montaña, 2. Reserva Forestal Protectora Regional San Lorenzo)) consistente con lo reportado por la ANM, lo que

implica la necesidad de un manejo adecuado para evitar que la minería comprometa la biodiversidad y los ecosistemas estratégicos.

Sin embargo, la actividad minera en los municipios de Yolombó y San Roque continúa en expansión, con un determinado número de títulos vigentes y solicitudes en trámite, de modo que, el equilibrio entre el desarrollo minero y la sostenibilidad ambiental sigue siendo un desafío.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo puede la metodología de superposición ponderada en SIG integrando datos geológicos, geoquímicos, geofísicos y sensores remotos para identificar posibles zonas con potencial aurífero en los municipios de Yolombó y San Roque, facilitando la prospección y la planificación minera sostenible?

## **1.3 Antecedentes**

La integración de los SIG en la minería ha abierto nuevas posibilidades en la investigación y el análisis de yacimientos minerales. A través de diversas metodologías, como la interpretación de datos geoespaciales y la modelación tridimensional, se han obtenido importantes avances en la exploración y evaluación de recursos. En consecuencia, en los antecedentes de este trabajo, se revisan varios casos de estudio que muestran cómo el uso de SIG ha mejorado la precisión y sostenibilidad de los proyectos mineros.

De forma global, se han realizado investigaciones, en donde se han aplicado diversas técnicas, como la desarrollada por Tim Ko Oo (2022), que utiliza algoritmos supervisados y no supervisados, para obtener la clasificación de cobertura terrestre en la minería de oro realizando el mapeo mediante softwares SIG como Google Earth Engine (GEE) y ArcGIS Pro, utilizando datos de teledetección Landsat y Aster.

Por otro lado, Ghoneim et al. (2024) y Rigol et al. (2011) presentan un enfoque destacado en la integración de conjuntos de datos de múltiples fuentes, incluidos datos de teledetección y

geofísicos, para identificar zonas con potencial para mineral de oro mediante un WOM. Esta metodología se utiliza ampliamente por los buenos resultados que se obtienen, aunque requiere prudencia en el manejo de los pesos asignados a cada capa. La naturaleza computacional de estas metodologías, basada en funciones básicas presentes en la mayoría de los paquetes SIG y en los datos ráster de las capas de información, es ideal para la producción de mapas con fines de prospección.

De manera complementaria, Changwon Lee (2019) desarrolla un nuevo enfoque de superposición de índices multiclase para la integración de datos tridimensionales (3D) con el fin de crear un modelo regional de prospectividad mineral, utilizando métodos basados en conocimiento. Como resultado, se genera un mapa tridimensional que identifica áreas con potencial de mineralización tipo Skarn, El autor enfatiza la importancia de la búsqueda de nuevos recursos hacia mayores profundidades, ya que la exploración minera ha priorizado tradicionalmente los yacimientos cercanos a la superficie, sin embargo, esta metodología requiere la adquisición de datos a profundidad mediante la exploración directa lo que incrementa los costos asociados a la exploración minera. Esto hace indispensable la optimización de los recursos a través de una planificación ordenada y limita su implementación en zonas con recursos en superficie.

Adicionalmente, análisis como el de Yang et al. (2016) que busca examinar cuantitativamente la relación entre la estructura geológica y los yacimientos minerales en áreas de estudio, combinando datos de teledetección e información geológica, y aplicando técnicas de procesamiento gráfico y análisis espacial en SIG, sirve como referente para la implementación de metodologías de superposición ponderada de diferentes variables para la identificación de yacimientos minerales.

En este contexto, en el noreste Antioqueño, aunque se dispone de abundante información geológica y minera, no existen modelos sistémicos que integren estos datos de manera efectiva para respaldar la toma de decisiones en la fase de exploración.

Sin embargo, Zambrano (2015) propone una metodología basada en el análisis espacial de datos mediante un SIG, utilizando información cartográfica, geoquímica, geofísica y otros datos

relevantes. Su principal innovación es la integración de esta información bajo criterios específicos que permitan identificar áreas potenciales para la exploración aurífera, lo que facilita la toma de decisiones y mejora la eficiencia en la búsqueda de nuevos depósitos. Los resultados preliminares demuestran que la metodología es capaz de generar áreas de interés para la exploración y puede aplicarse en otras regiones de Colombia.

Otro estudio enfocado en la evaluación de la potencialidad de yacimientos de oro y minerales asociados mediante el uso de herramientas SIG, es el trabajo realizado por Correa y Rojas (2017) enfocado en llevar a cabo un “análisis multicriterio con el fin de la determinación de zonas con potencial mineralógico en el departamento de Tolima”.

Este tipo de análisis incluye la evaluación de información geológica, estructural, satelital y geofísica y utiliza metodologías como la sobreposición de índice multiclase y el proceso analítico jerárquico (AHP). Como resultado, se generó un mapa de zonas prospectivas, el cual se validó a través de la comparación con los depósitos y ocurrencias reportados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), obteniendo resultados satisfactorios. A partir de esta evaluación, se recomendó el uso de metodologías de análisis multicriterio y herramientas SIG para apoyar la toma de decisiones sobre la probabilidad de ocurrencia de nuevos yacimientos minerales.

Por otro lado, Bolaños (2022) expone un caso cercano al área de estudio que es el de la empresa Gran Colombia Mining Corp. (GCM Mining), que se dedica a la producción y comercialización de oro y plata a nivel global. Esta compañía desarrolla varios proyectos en Colombia, destacándose el proyecto Segovia - Remedios, ubicado en el Departamento de Antioquia, que incluye las minas El Silencio, Providencia, Sandra K y Carla. Estas minas están en fase de explotación, mientras se realizan trabajos de exploración para prolongar la vida útil del proyecto. Los departamentos de exploración y geología minera son responsables de recolectar y procesar la información geológica, la cual se utiliza para crear mapas, modelos e interpretaciones que permitan categorizar los recursos minerales y planificar la operación, garantizando su sostenibilidad económica a largo plazo.

Esto demuestra que en la región hay un interés continuo en invertir en la investigación del conocimiento de los recursos auríferos en la zona.

De igual forma, AngloGold Ashanti (2015), especifica que las actividades de exploración del proyecto Gramalote, administrado por la empresa B2Gold Corp., inicia un programa de exploración minera que le permitió hacer una estimación preliminar de recursos y que incluyó estudios topográficos detallados, definiendo la mejor opción para la extracción de los recursos minerales disponibles y en realizar los cálculos relacionados con la apertura de la mina, el desarrollo de la infraestructura y la determinación de los costos de operación y de capital, todo a partir de una caracterización directa en el territorio.

Estudios previos han resaltado la importancia de utilizar múltiples fuentes de información, incluyendo datos de imágenes satelitales, geoquímicos y geofísicos, para optimizar la prospección minera. Asimismo, metodologías como el WOM y el AHP han mostrado resultados satisfactorios en la identificación de áreas con potencial mineralógico. La aplicación de técnicas SIG en minería ha demostrado ser una herramienta efectiva para integrar datos espaciales a través de modelos de análisis multicriterio, la implementación de estos métodos en este proyecto permitirá mejorar la precisión y confiabilidad del modelo que se planea desarrollar en los municipios de Yolombó y San Roque. La revisión de casos aplicados en otras regiones de Colombia y el mundo servirá como referencia para la selección y ajuste de criterios en el modelo propuesto, asegurando su viabilidad a la escala de trabajo y su aplicabilidad en el contexto geológico de la zona de estudio

## 2 Justificación

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019) afirma que “desde la época precolombina, la minería ha sido un eje central en el desarrollo cultural y económico de Colombia, con el oro como un recurso fundamental en este proceso” (p. 18). Por su parte, Statista (2024) reporta que en 2023 la producción mundial de oro alcanzó las 4.448,3 toneladas en Colombia; por lo tanto, el Banco de la República (2024) y Garzón (2024) indican que el precio de venta por gramo se sitúa en aproximadamente 350 mil COP, lo que ha generado exportaciones por cerca de 2.500 millones de dólares. En este contexto, la Dirección de Estudios y Políticas Públicas (2022) destaca la necesidad de mejorar las técnicas de beneficio del mineral y de optimizar la identificación de zonas con potencial aurífero en el país.

Por esta razón, para Campuzano (1993) en el nordeste antioqueño, la minería desempeña un papel crucial en la economía local. Sin embargo, AngloGold Ashanti (2015) considera que la región enfrenta desafíos significativos relacionados con la minería ilegal, así como conflictos sociales y ambientales derivados de la competencia por este recurso. Esta situación plantea la necesidad de implementar estrategias para una minería más eficiente y sostenible, que permitan armonizar el aprovechamiento de este recurso no renovable con la protección de los ecosistemas y los derechos comunitarios, especialmente en los municipios de Yolombó y San Roque.

En este sentido, los métodos convencionales de exploración minera requieren inversiones significativas y una gran participación humana, no obstante, no siempre se garantiza la eficiencia, la sostenibilidad y/o rentabilidad del proceso. De forma que, para Mena (2009) la aplicación de metodologías basadas en Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y SIG puede optimizar la recopilación, análisis y representación de datos, facilitando la identificación de zonas con potencial aurífero, por lo tanto, donde, según Harris, et al. (2015) se afirman que:

El uso de SIG y modelos de superposición ponderada de variables ha demostrado ser una herramienta efectiva para integrar múltiples fuentes de información y generar modelos predictivos en exploración minera. Estudios previos han utilizado datos geoquímicos, geofísicos (magnetometría aérea y gravimetría) y teledetección para identificar patrones espaciales asociados a la distribución de yacimientos auríferos. (p. 4).

Estos enfoques han permitido mapear zonas de alteración hidrotermal y localizar sitios con alto potencial mineral mediante análisis de superposición en SIG.

Por esta razón, este proyecto se enfoca en abordar una metodología para la identificación de zonas con posible potencial aurífero en los municipios de Yolombó y San Roque mediante un modelo basado en SIG, utilizando métodos avanzados que incluyen la superposición ponderada de variables geológicas y análisis multicriterio facilitando la prospección aurífera. En consecuencia, el presente proyecto se justifica por su contribución significativa al conocimiento científico, técnico y social, por lo cual permite la integración de datos dispersos en un modelo predictivo de alto valor práctico. Una de las principales novedades de este enfoque es su capacidad para optimizar el proceso, costos y riesgos asociados a la exploración minera. Más aún, este modelo ofrece un marco metodológico replicable en otras regiones del país, favoreciendo la estandarización y mejora de las técnicas de exploración de mineral aurífero en Colombia.

Así pues, este enfoque metodológico tiene el potencial de favorecer los procesos de formalización minera (subcontratos mineros) en el Territorio Nacional, al proporcionar información precisa y objetiva que puede ser utilizada por las autoridades para identificar y regularizar las zonas de explotación minera. De esta forma, el proyecto contribuye no solo a la optimización de la exploración aurífera, sino también a la gestión responsable y sostenible de los recursos minerales, alineándose con las políticas de formalización minera y el desarrollo económico local.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseñar un modelo cartográfico de zonificación del potencial aurífero en los municipios de Yolombó y San Roque, mediante la integración y análisis de información geológica, geofísica, geoquímica e imágenes satelitales, utilizando técnicas de análisis espacial y superposición ponderada en un entorno de SIG.

#### **3.2 Objetivos específicos**

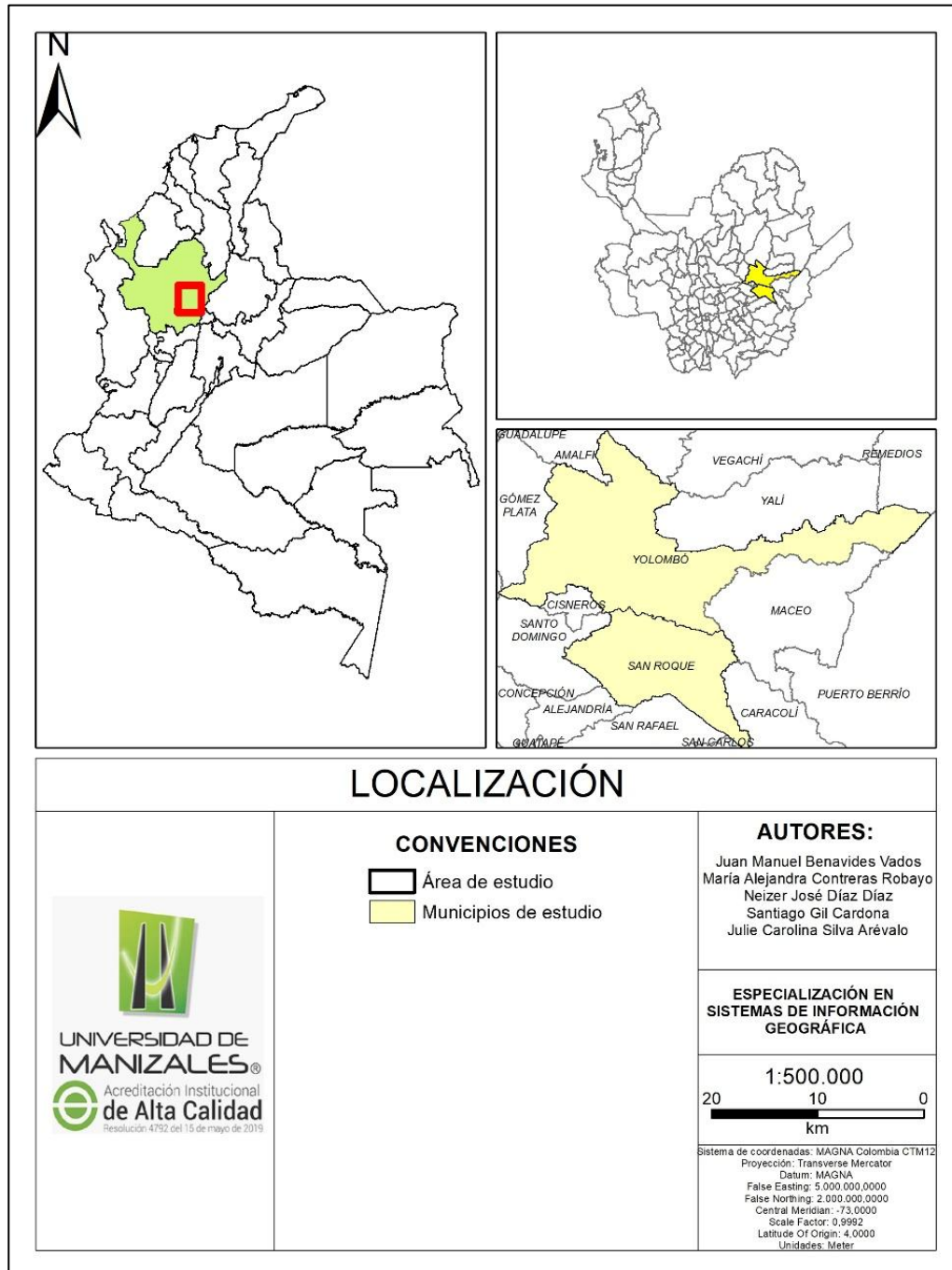
- Recopilar y analizar información geográfica relevante del área de estudio, incluyendo datos geológicos, geofísicos, geoquímicos, imágenes satelitales, e información primaria y secundaria, con el fin de integrar y estructurar los insumos que pueden ser incluidos en un modelo para identificar sectores con indicadores de mineralización aurífera.
- Procesar la información geográfica recopilada con el fin de representar, clasificar y destacar las zonas que presentaran características asociadas a la posible presencia de oro utilizando herramientas de geoprocésamiento incluidas dentro del software ArcGis Pro.
- Aplicar la metodología de superposición ponderada utilizando los datos procesados, con el propósito de generar un modelo cartográfico de zonificación que permita identificar y jerarquizar las zonas de favorabilidad para prospección aurífera en la zona de estudio

#### **4 Referente contextual**

El área de estudio, conformada por los municipios de San Roque y Yolombó, se localiza en la subregión nordeste del departamento de Antioquia, Colombia como se muestra en la Figura 1. Ambos municipios están situados en la Cordillera Central, con altitudes que oscilan entre los 500 y 2200 msnm.

**Figura 1**

*Localización del área de estudio.*



Desde una perspectiva histórica, Carmona y Manco (2021) especifican que ambos municipios poseen una tradición minera de largo aliento, donde Yolombó fue un importante centro de extracción aurífera durante la época colonial, llegando a ser conocida como “Ciudad Ilustre” antes de que sus minas entraran en declive entre

1760 y 1800, mientras que San Roque, cuenta con más de 200 minas documentadas entre 1901 y 1970, configurando desde sus inicios un territorio con vocación minera. (p. 877).

Actualmente, la región continúa siendo foco de exploración y desarrollo de proyectos auríferos, como es el caso del Proyecto Minero Gramalote, adelantado por B2Gold, que se localiza en el corregimiento de Providencia (San Roque) en las márgenes del río Nus y que proyecta una producción anual de oro entre 350.000 y 450.000 onzas de oro sobre una concesión de más de 9000 ha justificado por AngloGold Ashanti (2015).

Desde un punto de vista físico y ambiental, la región presenta un relieve montañoso característico de la Cordillera Central, enmarcado por la presencia de valles profundos como los del río Nus y afluentes menores, configurando una dinámica hídrica, que, en conjunto con los procesos erosivos, generan una distribución de depósitos aluviales importantes como lo menciona Carmona y Manco (2021).

En resumen, el desarrollo histórico y actual de los municipios de San Roque y Yolombó, junto con su vocación minera, su compleja geomorfología y los procesos de formalización en curso, los convierte en un escenario idóneo para aplicar metodologías SIG dirigidas a la identificación de zonas con posible potencial aurífero.

## 5 Referente normativo

Teniendo en cuenta que el mapeo de zonificación o idoneidad mineral que se pretende con este estudio es considerado de prospección, es importante referenciar la siguiente normatividad.

Desde la Constitución Política de Colombia del Congreso de Colombia (1991) de la Asamblea Nacional Constituyente establece que “las bases fundamentales sobre la minería en el país; la cual en su artículo 79, garantiza el derecho a un ambiente sano, prohibiendo actividades mineras en ecosistemas sensibles como los páramos y sus zonas de amortiguamiento” y en su artículo 80 determina que “el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales. Este mandato tiene como objetivo garantizar un desarrollo sostenible, priorizando la conservación, restauración o sustitución de los ecosistemas, en armonía con las necesidades ambientales y sociales”.

El Estado colombiano, tiene la función de generar y/o expedir la normativa pertinente para la prospección y explotación relacionado con la minería.

La ley 685 del 15 de agosto de (2001) "Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones", en su capítulo III Zonas Reservadas, Excluidas y Restringidas, se especifican las zonas que son excluibles para el ejercicio de la minería en su artículo 34 zonas excluibles de la minería

No podrán ejecutarse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en zonas declaradas y delimitadas conforme a la normatividad vigente como de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente y que, de acuerdo con las disposiciones legales sobre la materia, expresamente excluyan dichos trabajos y obras.

Las zonas de exclusión mencionadas serán las que se constituyan conforme a las disposiciones vigentes, como áreas que integran el sistema de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional y zonas de reserva forestales. Estas zonas para producir estos efectos deberán ser delimitadas geográficamente por la autoridad ambiental con base en estudios técnicos, sociales y ambientales con la colaboración de la autoridad minera, en aquellas áreas de interés minero.

Para que puedan excluirse o restringirse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en las zonas de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente, el acto que las declare deberá estar expresamente motivado en estudios que determinen la incompatibilidad o restricción en relación con las actividades mineras.

No obstante, la autoridad minera previo acto administrativo fundamentado de la autoridad ambiental que decreta la sustracción del área requerida, podrá autorizar que, en las zonas mencionadas en el presente artículo, con excepción de los parques, puedan adelantarse actividades mineras en forma restringida o sólo por determinados métodos y sistemas de extracción que no afecten los objetivos de la zona de exclusión. Para tal efecto, el interesado en el Contrato de Concesión deberá presentar los estudios que demuestren la compatibilidad de las actividades mineras con tales objetivos.

Y en su Artículo 35 Zonas de minería restringida

podrán efectuarse trabajos y obras de exploración y de explotación de minas en las siguientes zonas y lugares, con las restricciones que se expresan a continuación:

- a) Dentro del perímetro urbano de las ciudades o poblados, señalado por los acuerdos municipales adoptados de conformidad con las normas legales sobre régimen municipal, salvo en las áreas en las cuales estén prohibidas las actividades mineras;
- b) En las áreas ocupadas por construcciones rurales, incluyendo sus huertas, jardines y solares anexos, siempre y cuando se cuente con el consentimiento de su dueño o poseedor y no haya peligro para la salud e integridad de sus moradores;
- c) En las zonas definidas como de especial interés arqueológico, histórico o cultural siempre y cuando se cuente con la autorización de la autoridad competente;
- d) En las playas, zonas de bajamar y en los trayectos fluviales servidos por empresas públicas de transporte y cuya utilización continua haya sido establecida por la autoridad competente, si esta autoridad, bajo ciertas condiciones técnicas y operativas, que ella misma señale, permite previamente que tales actividades se realicen en dichos trayectos;
- e) En las áreas ocupadas por una obra pública o adscritas a un servicio público siempre y cuando:
  - i. Cuente con el permiso previo de la persona a cuyo cargo estén el uso y gestión de la obra o servicio;

ii. que las normas aplicables a la obra o servicio no sean incompatibles con la actividad minera por ejecutarse y

iii. que el ejercicio de la minería en tales áreas no afecte la estabilidad de las construcciones e instalaciones en uso de la obra o servicio.

f) En las zonas constituidas como zonas mineras indígenas siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias, dentro del plazo que se les señale, no hubieren ejercitado su derecho preferencial a obtener el título minero para explorar y explotar, con arreglo a lo dispuesto por el Capítulo XIV de este Código;

g) En las zonas constituidas como zonas mineras de comunidades negras siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias, dentro del plazo que se les señale, no hubieren ejercitado su derecho preferencial a obtener el título minero para explorar y explotar, con arreglo a lo dispuesto por el Capítulo XIV de este Código;

h) En las zonas constituidas como zonas mineras mixtas siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias, dentro del plazo que se les señale, no hubieren ejercitado su derecho preferencial a obtener el título minero para explorar y explotar, con arreglo a lo dispuesto por el Capítulo XIV de este Código.

Una vez consultadas las entidades a que se refiere este artículo, los funcionarios a quienes se formule la correspondiente solicitud deberán resolverla en el término improrrogable de treinta (30) días, so pena de incurrir en falta disciplinaria. Pasado este término la autoridad competente resolverá lo pertinente.

Además de lo anterior, en su capítulo IV Prospección, se habla sobre la prospección de minas en su Artículo 39 donde

La prospección de minas es libre, excepto en los territorios definidos como zonas mineras para minorías étnicas tal como lo contempla el Capítulo XIV de este Código. Cuando haya de efectuarse en terrenos de propiedad particular, se requerirá dar aviso previo al dueño, poseedor, tenedor o administrador, directamente o a través del alcalde. Cuando haya de efectuarse en bienes de uso público bajo la jurisdicción de la Dirección General Marítima, de conformidad con lo previsto en el artículo 2 del Decreto-ley 2324 de 1984 y demás normas que lo modifiquen, sustituyan o deroguen, se requerirá su concepto técnico favorable.

Así como los medios de prospección en su Artículo 40 especifica que la

La prospección es un proceso para investigar la existencia de minerales delimitando zonas prometedoras y sus métodos consisten, entre otros, en la identificación de afloramientos, la cartografía geológica, los estudios geofísicos y geoquímicos y la investigación superficial, en áreas no sujetas a derecho exclusivos. De la prospección se excluyen los métodos del subsuelo.

Parágrafo. Cuando la prospección se realice en los espacios marítimos y en las áreas delimitadas en los ríos, sobre los cuales tiene competencia la Dirección General Marítima, ésta deberá ser informada para el efecto.

Es importante mencionar que la ley aborda actividades relacionadas con la exclusión de zonas para la minería y prospección de minas en campo. Sin embargo, este proyecto no constituye un trabajo de prospección minera, pero si una investigación para la implementación de una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica para la identificación de targets auríferos para futuros trabajos de exploración minera.

El Estado colombiano no ha establecido ninguna reglamentación, procedimiento o manual claro sobre cómo llevar a cabo las prospecciones para la identificación de minerales, incluyendo el oro. Por ello, en esta investigación se adoptarán los conceptos y procedimientos recopilados en diferentes estudios que respaldan el desarrollo de esta investigación.

## 6 Marco teórico

El presente trabajo tiene como objetivo identificar zonas con posible potencial aurífero en los municipios de San Roque y Yolombó, mediante la implementación de un modelo de superposición ponderada en un entorno SIG.

Para su desarrollo, fue necesario establecer una serie de conceptos clave que fundamentan la metodología aplicada y permiten una mejor comprensión de los resultados obtenidos, los cuales se presentan a continuación.

### 6.1 Conceptos geológicos claves

Para el desarrollo del presente estudio es necesaria la definición de conceptos clave que serán la base fundamental para la aplicación de la metodología y la comprensión de los resultados, los cuales se explican a continuación.

- Target: Área específica identificada durante la prospección geológica que presenta indicios anómalos (químicos, físicos o geofísicos), y que se considera con potencial para contener mineralización, siendo prioritaria para estudios exploratorios más detallados según el Ministerio de Minas y Energía (2003).
- Depósito mineral: “Concentración natural de minerales de interés económico, que puede ser extraído para obtener un beneficio” según el SGC (2024).
- Depósito diseminado: “Mena que contiene pequeñas partículas de minerales valiosos, diseminados en forma más o menos uniforme dentro de material estéril; diferente de la mena, en la que los minerales valiosos ocurren en forma casi sólida con muy poco material estéril incluido” según el SGC (2024).
- Prospección: Corresponde a la investigación a partir de diferentes técnicas de concentraciones minerales que pueden tener o no un interés económico según Dávila (2011).
- Prospección mineral: La prospección mineral es el proceso inicial de exploración minera que combina observaciones geológicas, análisis geoquímicos, estudios geofísicos y otras

herramientas técnicas para detectar señales o anomalías que indiquen la posible presencia de un yacimiento mineral en una región determinada según Oyarzún (2022).

- Sistemas de información geográfica: “Sistema compuesto de hardware, software, datos geográficos y procedimientos que permiten capturar, almacenar, analizar, gestionar y visualizar datos geográficos o espaciales” según el SGC (2024).
- Geoquímica: “Rama de la geología que estudia la composición química de la Tierra y los procesos y reacciones químicas que gobiernan la distribución y concentración de los elementos químicos y sus especies” según el SGC (2024).
- Anomalía: Según el SGC (2024) lo define como una Desviación de los valores teóricos respecto a los reales medidos en un punto concreto. Esto significa que no sólo los valores altos se consideran anómalos, sino también la ausencia o el bajo valor de los parámetros medidos. La existencia de anomalías geoquímicas o geofísicas tiene gran interés en la búsqueda de yacimientos minerales. Estas zonas anómalas son determinadas en los trabajos de prospección y exploración mediante interpretación de resultados de las diferentes técnicas o métodos geofísicos o geoquímicos. (sin P).
- Anomalía geoquímica: De acuerdo con Rose et al. (1979) es es una desviación significativa en la concentración de uno o varios elementos químicos con respecto a los niveles de fondo o valores normales en un área determinada, y puede estar asociada a la presencia de mineralización económica o procesos geológicos particulares” En términos exploratorios, las anomalías geoquímicas son importantes para la identificación de zonas con potencial mineralógico, ya que representan áreas donde los procesos geológicos han concentrado elementos como oro (Au), cobre (Cu), arsénico (As), plomo (Pb), zinc (Zn), entre otros, en niveles superiores a lo habitual. Tal como indica Carranza (2009), “la detección de anomalías geoquímicas permite inferir la presencia de mineralización oculta, especialmente cuando se combinan métodos espaciales y estadísticos en un entorno SIG (p. 21).
- Geofísica: Ciencia que, que utiliza principios y métodos físicos para estudiar la estructura, composición y procesos de la Tierra, particularmente de un territorio con fines como la prospección minera según el SGC (2024).

- Geología estructural: Rama de la geología que estudia las características estructurales de las rocas y sus formas geológicas producto de eventos de deformación de la corteza terrestre según el SGC (2024).
- Litología: El término hace referencia a la rama de la geología que estudia las rocas, incluyendo su composición, textura, estructura y origen. Es decir, se enfoca en las características físicas y químicas de las rocas, cómo se forman y se clasifican según Pérez y Gardey (2022).
- Fases magmáticas: Según el SGC (2024) lo define como una Estados de consolidación del magma que de acuerdo con las condiciones de temperatura y presión dan origen a los diferentes tipos de roca ígneas y depósitos minerales asociados a ellas. Se distinguen las fases ortomagmática (mayor de 500°C), neumatólica (500°C) caracterizada por la cristalización del cuarzo y la ortosa, y la fase hidrotermal (menor de 500°C) donde sólo queda el líquido residual y los componentes volátiles. En esta última fase, la solución acuosa a alta temperatura escapa por las grietas de la roca encajante, disuelve parte de los componentes que encuentra a su paso, hasta que, finalmente cristaliza y forma depósitos minerales, generalmente de gran importancia económica, pues suelen ser menas metálicas. (sin P.).
- Depósitos IRGD: de acuerdo con Lang & Baker, (2001) los depósitos auríferos del tipo intrusion-related (IRGD) son sistemas mineralizados asociados a intrusiones magmáticas de naturaleza reducida, en los que el oro se encuentra acompañado de elementos como bismuto, telurio, arsénico, molibdeno y tungsteno. Se caracterizan por bajas concentraciones de sulfuros, ausencia de magnetita, presencia de fluidos ricos en CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y CH<sub>4</sub> (Metano), y por desarrollarse en profundidades moderadas (1–6 km), con temperaturas entre 290 y 500 °C. La mineralización puede presentarse en formas variadas como vetas, stockworks, brechas o greisens, y suele distribuirse en halos estructurales alrededor del intrusivo.
- Falla: Según el SGC (2024) lo define como una Superficie de contacto entre dos bloques que se desplazan en forma diferencial uno con respecto al otro. Se pueden extender espacialmente por varios cientos de km y en forma temporal por varios millones de años. Una falla activa es aquella en la cual ha ocurrido

desplazamiento en los últimos 2 millones de años o en la cual se observa actividad sísmica. (sin P.).

- **Falla geológica:** Es una ruptura o fractura en la corteza terrestre donde bloques de roca se han desplazado en relación unos con otros debido, generado por movimientos horizontales, verticales o ambos a lo largo del plano de la falla según Fossen, (2010).
- **Mineralización:** Procesos naturales por los cuales los minerales son introducidos en las rocas. Los procesos de mineralización más conocidos son: segregación magmática, diferenciación magmática, hidrotermal, sublimación, metasomatismo de contacto, metamorfismo, sedimentación, evaporación, concentración residual, oxidación y enriquecimiento supergénico, concentración mecánica, eólico según el SGC (2024).
- **Meteorización mineral:** De acuerdo con, Díaz (2023) la meteorización mineral es el proceso mediante el cual las rocas y minerales de la superficie terrestre se descomponen o fragmentan debido a su exposición a condiciones ambientales distintas a las de su formación, especialmente en cuanto a temperatura y presión. Existen dos tipos principales: la física, que fragmenta las rocas por medios mecánicos sin alterar su composición química y la química, que modifica los minerales a través de reacciones con agua, aire u otras sustancias, dado lugar a nuevos compuestos. (sin P.).
- **Proceso hidrotermal:** Proceso geológico que involucra soluciones acuosas calientes que pueden ser de origen ígneo, metamórfico o sedimentario, que tienen la capacidad de disolver, transportar y redepositar minerales. Estos procesos son responsables de grandes yacimientos, de diversos minerales, conocidos en el mundo según el SGC (2024).
- **Alteración:** Según el SGC (2024) lo define como una Cambio en la composición química o mineralógica de una roca, producido generalmente por meteorización o por acción de soluciones hidrotermales. 2. En general, se refiere a cambios físicos o químicos sufridos por rocas y minerales después de su formación, promovidos por procesos exógenos tales como meteorización, o por procesos endógenos tales como magmatismo o fallamiento. (sin P.)
- **Alteración hidrotermal:** Según el SGC (2024) lo define como una La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, es

la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. (sin P.).

- Alteración hidrotermal potásica: Alteración desarrollada en presencia de soluciones casi neutras y a altas temperaturas (400° - 600°C), la cual se caracteriza por la formación de nuevos silicatos de potasio, tales como feldespato potásico secundario o mica (biotita) secundaria con posible presencia de anhidrita según el SGC (2024).
- Batolito: Según el SGC (2024) lo define como una Masa de roca ígnea, de carácter intrusivo, de grandes dimensiones (más de 100 km<sup>2</sup> de área) con la parte superior en forma de bóveda, generalmente de carácter ácido y con gran desarrollo en profundidad. Los batolitos sufren el proceso de enfriamiento o cristalización en profundidad y posteriormente pueden quedar expuestos debido a los procesos tectónicos u orogénicos y a la erosión de las rocas que los cubren. Las masas pequeñas de rocas ígneas se denominan stocks y lacolitos (sin P.).
- Stockwork: Distribución de la mineralización filoniana o vetiforme en enrejado que aparece principalmente en depósitos minerales de origen hidrotermal según el SGC (2024).
- Roca intrusiva: Que penetra en formaciones ya existentes. Se aplica a las rocas magmáticas emplazadas en estado fluido bajo la superficie y a los macizos que constituyen, así como a los diapiros de rocas salinas según el SGC (2024).
- Dique: Según el SGC (2024) lo define como un Cuerpo de roca ígnea intrusiva, relativamente largo y delgado, que rellena una fisura o fractura profunda en rocas más viejas, y las corta discordantemente (que corta a la estratificación de las capas). A veces pueden aparecer varios diques dispuestos paralelamente entre sí. Cuando son afectados por erosión pueden dar lugar a relieves descalzados, al ser los materiales del dique más resistentes que los circundantes, o formar una depresión en forma de fosa en el caso contrario.
- Rocas sedimentarias: pequeña masa más o menos lobulada, formada por la coalescencia de pelotillas (pellets), de granos o de partículas según el SGC (2024).
- Roca metamórfica: Según el SGC (2024) lo define como una

Toda roca que ha sufrido, en estado sólido, cambios de temperatura o de presión, con cristalización de nuevos minerales, estables bajo las condiciones metamórficas, llamados neoformados, con adquisición de texturas y estructuras particulares, bajo la influencia de condiciones físicas o químicas diferentes de las que habían regido durante la formación de la roca original o protolito. Generalmente los procesos metamórficos actúan en profundidades relativamente grandes con respecto a la superficie. Ejemplos de estas rocas son neis, esquistos, pizarras, mármol. Meteorización y diagénesis, es decir, la solidificación de una roca sedimentaria no pertenece al metamorfismo.

- Modelo de superposición ponderada y/o weighted overlay model (WOM): es un método de análisis ráster que permite combinar varias capas de criterios estandarizados mediante una ponderación asignada a cada una. Se utiliza para identificar la adecuación o favorabilidad de un área frente a un objetivo (ESRI, s.f.).
- Sedimentación: De acuerdo con Nichols, G. (2009) es la sedimentación es el proceso natural mediante el cual los materiales sólidos, transportados por agentes como el agua, el viento, el hielo o la gravedad, se depositan en una cuenca o superficie terrestre, generando capas o estratos de sedimentos que con el tiempo pueden consolidarse en rocas sedimentarias (p. 5).

Este proceso implica la erosión, transporte y posterior acumulación de partículas minerales y orgánicas provenientes de la meteorización de las rocas preexistentes.

En el contexto geológico, la sedimentación es importante en la reconstrucción de ambientes del pasado, ya que los tipos de sedimentos, su granulometría, geometría y disposición en el terreno permiten interpretar las condiciones paleoclimáticas, tectónicas y ambientales que los originaron. Según Boggs (2012) “las características sedimentarias de una región reflejan la dinámica de las cuencas de deposición, los sistemas fluviales o marinos asociados, y los episodios de levantamiento y erosión que condicionan la historia geológica de una zona” (p. 33).

## 6.2 Contexto geológico

La comprensión del contexto geológico constituye un elemento fundamental para el análisis de los procesos de prospección mineral, particularmente en zonas con un historial geológico como

lo son los municipios de San Roque y Yolombó. Esta región se ubica en un sector clave del cinturón metalogénico del noroccidente colombiano, caracterizado por una diversidad estructural que ha favorecido la formación de yacimientos auríferos de importancia económica.

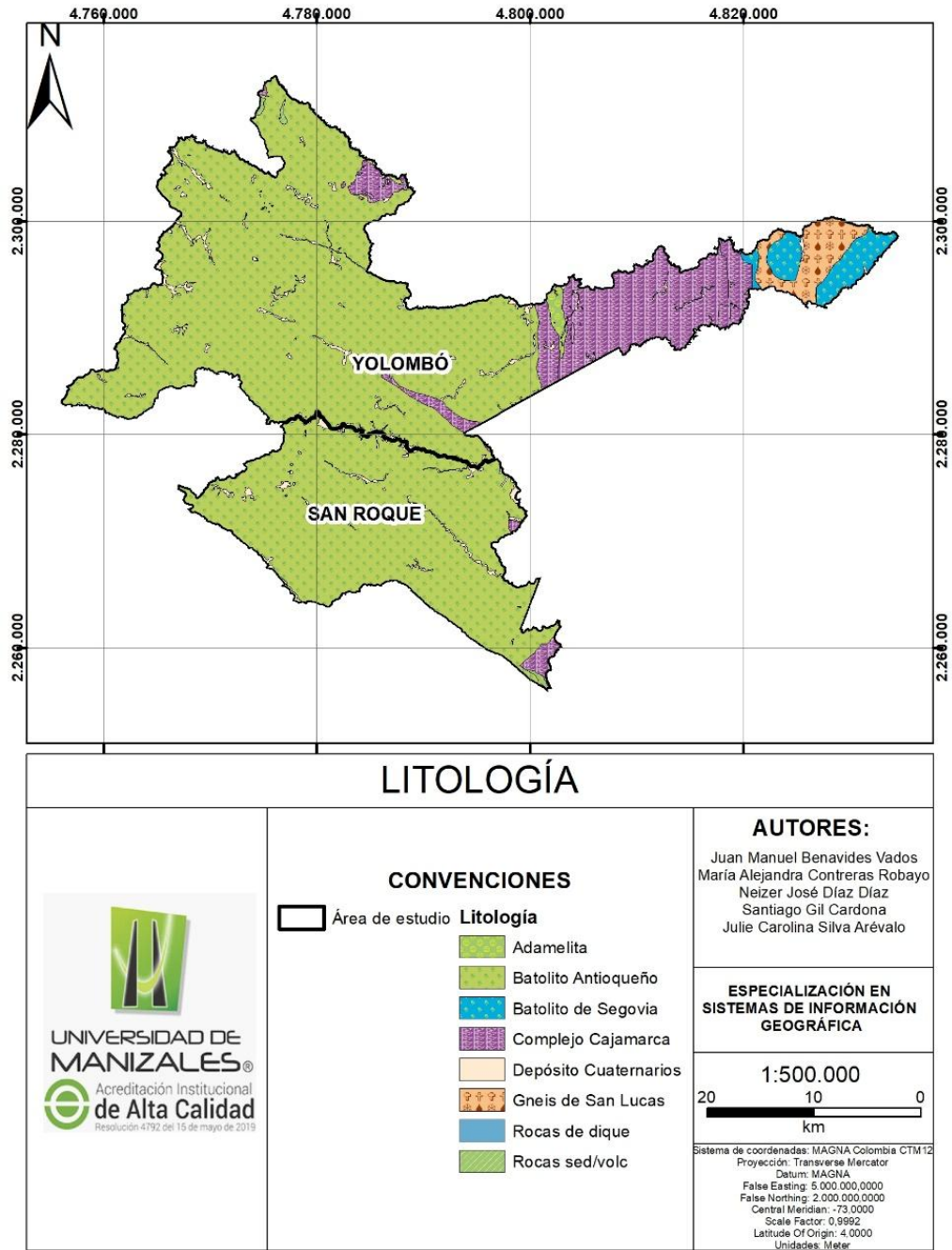
A fin de proporcionar una base técnica que respalde la identificación de retos y oportunidades para la prospección de oro, se presenta una revisión detallada de la geología regional, la evolución geológica del área de estudio, las principales estructuras tectónicas y la metalogenia asociada. De igual manera, se describen los tipos de yacimientos presentes, sus características mineralógicas, alteraciones hidrotermales observadas y eventos geodinámicos responsables de su emplazamiento.

### ***6.2.1 Geología Regional***

La región de estudio, que comprende los municipios de San Roque y Yolombó, se caracteriza por una compleja configuración geológica dominada por unidades ígneas, metamórficas, sedimentarias y depósitos recientes. Dentro de estas unidades se destacan ocho grandes grupos litológicos de relevancia en la prospección de recursos auríferos como se muestran en la Figura 2.

**Figura 2**

*Geología Regional del área de estudio.*



*Nota. Elaborado a partir de la información de SGC (2010).*

En primer lugar, las adamelitas están asociadas a las facies finales de cristalización del Batolito Antioqueño. Estas rocas leucocráticas, de grano fino a medio y generalmente masivas,

forman pequeñas masas o apéndices dentro del batolito, y se encuentran estrechamente relacionadas con zonas de alteración hidrotermal y mineralización aurífera SGC (2010).

A continuación, González (2001) destaca el Batolito Antioqueño como la unidad ígnea más representativa del área. Este cuerpo granítico, ampliamente distribuido, está compuesto principalmente por granodioritas, tonalitas y, en menor proporción, monzodioritas. Su intrusión ocurrió durante el Triásico-Jurásico y ha sido vinculada con la generación de depósitos epitermales de metales preciosos, tanto de tipo filoniano como diseminado.

En el sector oriental del área de estudio aflora el Batolito de Segovia. Este se caracteriza por presentar rocas ígneas intermedias a félsicas, con predominio de granodioritas, granitos y dioritas. Dichas rocas muestran un alto grado de fracturamiento y están atravesadas por diques de cuarzo que favorecen la mineralización con pirita, calcopirita, hematita y oro, siendo por tanto una unidad clave en los modelos de mineralización regional (González, 2001).

Por su parte, González (2001) también establece que el Complejo Cajamarca comprende rocas metasedimentarias y ortogneises que forman parte del basamento precámbrico de la región. Estas rocas presentan texturas bandeadas y foliaciones miloníticas, lo cual es indicativo de varios episodios de deformación y metamorfismo regional.

De manera complementaria, el Gneis de San Lucas corresponde a rocas granoblásticas de composición tonalítica a granítica, con foliación bien desarrollada y zonas de recristalización térmica, particularmente evidentes en los contactos con cuerpos ígneos. Su distribución periférica respecto al Batolito Antioqueño sugiere que estas rocas pudieron haber sido influenciadas por procesos de metamorfismo de contacto y mineralización secundaria (González, 2001).

Adicionalmente, las rocas de dique, según el SGC (2010), corresponden a cuerpos tabulares compuestos por aplitas, pegmatitas y cuarzodioritas, que cortan de forma discordante tanto al batolito como a unidades metamórficas más antiguas. Su relevancia geológica radica en que actúan como vías preferenciales para la migración de fluidos mineralizantes, lo que incrementa su importancia dentro de modelos de prospección minera.

Asimismo, en el área de estudio según González (2001) se encuentran rocas sedimentarias y volcánicas, entre las cuales se incluyen lutitas, areniscas y brechas volcánicas. Estas unidades han sido parcialmente metamorfizadas e intruidas por cuerpos ígneos, y en algunos casos muestran indicios de alteración hidrotermal, lo cual les confiere un valor prospectivo considerable.

Finalmente, los depósitos cuaternarios comprenden aluviones, terrazas y coluviones modernos que se distribuyen en los valles fluviales y piedemontes. Si bien no contienen mineralización primaria, estos depósitos resultan esenciales en los estudios geomorfológicos y en la planificación de actividades mineras, debido a su influencia sobre la dinámica superficial y la estabilidad del terreno según (SGC, 2010).

En síntesis, la evolución geológica de la región refleja una historia compleja y prolongada, marcada por la formación de un basamento metamórfico antiguo, la intrusión de magmas durante el Mesozoico, el levantamiento tectónico del Terciario y una intensa actividad superficial en el Cuaternario. Esta secuencia evidencia la interacción entre procesos profundos y superficiales que han modelado el relieve y la geodinámica actual de la región.

### ***6.2.2 Geología estructural***

La geología estructural del área de Yolombó y San Roque está definida por una red compleja de fallas regionales y locales, producto de múltiples eventos tectónicos desde el Precámbrico hasta el presente. En la plancha 132 Yolombó del SGC (2010), se reconocen “estructuras con orientaciones predominantes N–S, N30°E y N50°W, correspondientes a familias de fallas de diferente orden, controlando tanto el patrón del drenaje como la disposición de unidades litológicas, siendo especialmente visibles en los cursos de quebradas y otros afluentes” (p. 14).

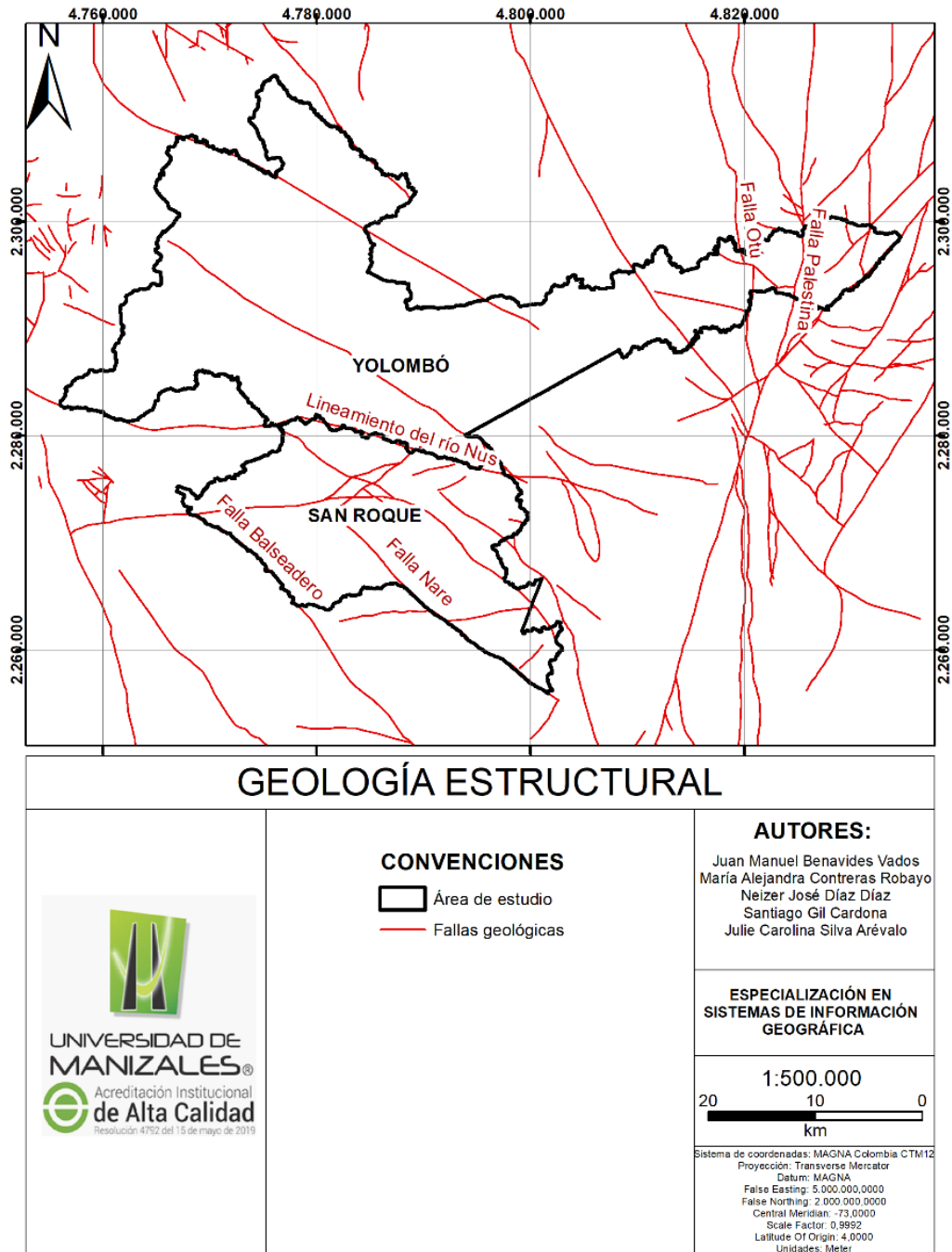
En cuanto a las principales estructuras, la Falla Palestina constituye la falla principal, con una orientación predominante N–S a NNE–SSW. Por su parte, las fallas y lineamientos secundarios, entre ellos las fallas Nare, Bizcocho y Caldera, así como los lineamientos Nus y El Socorro, mostraron direcciones de rumbo que variaron entre NW–SE y E–W.

De acuerdo con el modelo estructural desarrollado para el proyecto Gramalote por AngloGold Ashanti (2018) las principales tendencias de rumbo de las fallas tectónicas se agrupan en cuatro sistemas como se observa en la Figura 3.

- N45°W a N60°W, correspondiente al sistema del río Nus, que controla grandes segmentos del drenaje y define límites estructurales de bloques tectónicos.
- N40°E a N60°E, común en la zona y responsable de estructuras visibles como el tramo inferior de la quebrada Guacas.
- N-S  $\pm 10^\circ$  y E-W  $\pm 10^\circ$ , que representan sistemas de fallas complementarios con funciones de transferencia y acomodación estructural.

**Figura 3**

*Estructuras geológicas identificadas en la cartografía geológica del área de estudio.*



*Nota. Elaborado a partir de la información de SGC (2010)*

Adicionalmente, el SGC (2010) identifica fallas regionales activas o heredadas de gran escala, como la falla de Monteloro, la falla Nare y la falla Balseadero, todas con rumbo general

N50°W, que estructuralmente dominan la región desde una escala regional hasta local. La interacción entre estas fallas genera zonas de cizalla y fracturamiento intensas, que además de controlar la disposición de las unidades litológicas, influyen directamente en la localización de mineralizaciones auríferas asociadas a sistemas hidrotermales alojados en el Batolito Antioqueño.

En términos generales, la evolución estructural del área refleja un prolongado historial tectónico, donde se superponen eventos compresivos y distensivos con intrusiones de cuerpos ígneos. Esta dinámica ha dado origen a una red de fracturas que no solo controlan la morfología del relieve y la disposición de los cuerpos mineralizados. Así, el conocimiento de la estructura geológica resulta fundamental para comprender los procesos geodinámicos locales, evaluar la estabilidad del macizo y orientar los trabajos de prospección minera.

Para la representación espacial de esta variable, se aplicará los lineamientos metodológicos propuestos por Correa y Rojas (2017), quienes argumentan que la extensión de la zona de influencia de una estructura geológica se correlaciona directamente con su longitud y la relación tectónica con la mineralización.

### **6.2.3 *Metagenia***

La región de San Roque y Yolombó, localizada en el flanco oriental de la cordillera Central, se sitúa dentro de una provincia metalogénica reconocida por su potencial aurífero, asociado principalmente a eventos magmáticos y tectónicos del Mesozoico. El Batolito Antioqueño, unidad intrusiva dominante en la zona, constituye el marco geológico donde se alojan las principales mineralizaciones de oro, especialmente en vetas de cuarzo y zonas de alteración hidrotermal.

Según el AngloGold Ashanti (2018)

Las vetas auríferas se asocian a zonas de fracturamiento en rocas ígneas, principalmente tonalitas, granodioritas y cuarzodioritas, las cuales fueron alteradas por soluciones hidrotermales posteriores al emplazamiento magmático. Estas zonas mineralizadas se caracterizan por contener cuarzo lechoso y alteración potásica, acompañadas por minerales accesorios como piritita y, en menor proporción, galena y esfalerita.

Además, se ha identificado que las estructuras de rumbo N50°W y N30°E controlan en gran medida la ubicación de las vetas, actuando como zonas preferenciales para la migración de fluidos mineralizantes. Este control estructural, en combinación con la composición del hospedante y la circulación de fluidos ricos en sílice y metales, ha generado sistemas de vetas múltiples, muchos de los cuales han sido explotados históricamente mediante minería artesanal y socavones subterráneos. (p. 58).

Complementariamente, la plancha 132 del SGC (2010) destaca que “estas mineralizaciones están relacionadas con eventos hidrotermales posteriores a la consolidación del batolito, en ambientes de cizalla o zonas frágil-dúctiles, lo cual es típico de depósitos tipo orogénico aurífero”.

Esta caracterización se ajusta al modelo de yacimientos en zonas de deformación profunda, común en los cinturones metalogénicos de Colombia. De esta manera, la combinación de un basamento ígneo favorable, estructuras regionales activas y eventos hidrotermales sucesivos ha generado una distribución heterogénea pero significativa de mineralización aurífera, que posiciona a esta región como un territorio de alta prospectividad minera dentro del nordeste antioqueño.

#### **6.2.4 Tipos de depósitos minerales**

Los depósitos minerales son concentraciones naturales de minerales en la corteza terrestre que, bajo determinadas condiciones geológicas, pueden presentar un valor económico significativo. Su estudio es esencial en los procesos de prospección y exploración minera, ya que permite entender los mecanismos de formación, los ambientes geológicos favorables, y la localización probable de recursos metálicos, como el oro según Guilbert y Park, (1986) y Evans, (1993).

Desde una perspectiva genética, los depósitos minerales se clasifican según los procesos geológicos que les dieron origen. Se describen los principales tipos, haciendo énfasis en aquellos relevantes para la prospección aurífera en contextos como el de San Roque y Yolombó:

#### 6.2.4.1 Depósitos hidrotermales

Son formaciones minerales originadas por la circulación de fluidos calientes (soluciones hidrotermales) a través de fracturas y porosidades en las rocas. Estos fluidos, al enfriarse, precipitan minerales metálicos en zonas de debilidad estructural. Son los depósitos más importantes en cuanto a la concentración de oro y metales preciosos.

- **Depósitos epitermales:** Formados a bajas profundidades y temperaturas. Se asocian con estructuras volcánicas y presentan minerales como cuarzo, calcita, alunita y sulfuros. En Colombia, el distrito aurífero de Marmato es un ejemplo representativo de acuerdo con Sillitoe (2010).
- **Depósitos mesotermales o vetiformes:** Se desarrollan en zonas de cizalla o fallamiento profundo, con oro frecuentemente alojado en vetas de cuarzo. Son característicos de regiones como Segovia y Remedios, en Antioquia.
- **Depósitos tipo pórfido (Cu-Au):** Son sistemas de gran escala donde el oro aparece diseminado en rocas intrusivas, generalmente asociado con cobre y molibdeno. Ejemplos incluyen La Colosa y Andes según Sillitoe (2010).

#### 6.2.4.2 Depósitos sedimentarios

Estos depósitos se forman por procesos de transporte y sedimentación de minerales, principalmente en ambientes fluviales o marinos. Un tipo relevante para el oro son los depósitos de placer o aluvionales, donde el oro se acumula en sedimentos de ríos debido a su alta densidad. Este tipo de mineralización ha sido ampliamente explotado en zonas del Bajo Cauca y otras cuencas hidrográficas de Antioquia.

#### 6.2.4.3 Depósitos magmáticos

Se forman por la cristalización de minerales desde un magma en enfriamiento. Aunque menos comunes para el oro, sí son relevantes para minerales como el platino, el níquel o el hierro.

Su importancia en el contexto aurífero colombiano es limitada, pero pueden ser indirectamente relevantes en sistemas asociados a complejos máficos o ultramáficos.

#### **6.2.4.4 Depósitos residuales y supergénicos**

Estos se desarrollan por procesos de meteorización química y física en climas tropicales. En ocasiones, el oro puede concentrarse secundariamente en el perfil de alteración, generando enriquecimientos en superficie.

### **6.4 Contexto geoquímico**

La geoquímica es definida por Rollinson (1993) como una rama fundamental de las ciencias de la Tierra que estudia la distribución, abundancia, migración e interacción de los elementos químicos en los diversos compartimentos del planeta: litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera. Esta disciplina permite no solo interpretar procesos geológicos complejos, sino también identificar la presencia de recursos minerales y evaluar el impacto ambiental de distintas actividades, como la minería

En Colombia, el SGC ha desarrollado el Atlas Geoquímico de Colombia (2022), el cual proporciona información sistematizada sobre la distribución de elementos químicos en el territorio nacional. Este atlas emplea técnicas de muestreo geoquímico, como el análisis de sedimentos activos, y presenta información útil para regiones de interés minero como el nordeste antioqueño, donde se encuentran los municipios de Yolombó y San Roque.

Se ha documentado una significativa actividad minera, en los territorios de Yolombó y San Roque, especialmente alrededor de la cuenca del río Nus, tanto formal como informal, principalmente asociada a la extracción de oro y otros metales.

El análisis de sedimentos activos, de acuerdo con el SGC (2022), permite detectar concentraciones anómalas de elementos que podrían estar relacionados con procesos de mineralización o con contaminación derivada de la actividad humana. La metodología utilizada implica la recolección de la fracción fina de sedimentos (inferior a malla 80) en puntos estratégicos

de cuerpos de agua, generalmente en zonas de baja energía, como sobrecargas o trampas naturales. Esta técnica ha sido aplicada por el SGC como parte del muestreo sistemático nacional, y es especialmente útil en regiones montañosas como esta subregión antioqueña, donde las condiciones geológicas favorecen la acumulación de metales pesados en los sedimentos.

Además del análisis de sedimentos activos, otras metodologías geoquímicas pueden ser útiles para caracterizar el entorno geoquímico de Yolombó y San Roque. Por ejemplo, el muestreo de suelos y afloramientos rocosos puede complementar la información obtenida en los ríos y quebradas, especialmente en zonas donde la cobertura vegetal o los suelos profundos dificultan la detección directa de mineralizaciones. Según la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericana (2013), en climas húmedos y suelos bien desarrollados, como los de esta región del nordeste antioqueño, se debe tener en cuenta la movilidad de ciertos elementos para interpretar correctamente los resultados geoquímicos. Estas metodologías integradas permiten obtener una visión más completa del potencial mineral y ambiental del territorio.

En este contexto, las anomalías geoquímicas juegan un papel clave en la prospección mineral. Estas se definen como concentraciones de elementos que se desvían significativamente de los valores de fondo típicos de una región. En la zona de estudio, la identificación de estas anomalías resulta crucial para delimitar zonas de interés geológico. Estos datos pueden ser de gran utilidad para detectar elementos típicamente asociados a depósitos auríferos del tipo intrusion-related gold deposit (IRGD), como el depósito Gramalote. Los IRGD se caracterizan por su vínculo genético con cuerpos intrusivos y una asociación geoquímica con elementos como As, Bi y Sb, los cuales actúan como elementos trazadores en la exploración de oro según Hart (2007) y Baker et al., (2005). Su presencia en concentraciones anómalas puede indicar alteración hidrotermal relacionada con mineralización aurífera, lo cual refuerza la relevancia del análisis geoquímico en esta región.

Estudios previos del SGC han reportado concentraciones anómalas de estos elementos en esta subregión, lo que respalda la selección de Yolombó y San Roque como áreas de interés prioritario para trabajos de prospección geoquímica. El SGC (2022) establece que la correcta interpretación de estas anomalías no solo facilita la identificación de posibles yacimientos, sino

que también contribuye a establecer estrategias de manejo ambiental y ordenamiento del territorio minero

## 6.5 Contexto geofísico

La geofísica es la disciplina que estudia la Tierra en su composición y dinámica a través de la medición de propiedades físicas del subsuelo desde la superficie. Estas mediciones permiten inferir características geológicas mediante parámetros como la velocidad de propagación de ondas mecánicas (sísmica), las variaciones en el campo gravitacional causadas por diferencias de densidad (gravimetría), o la conductividad eléctrica del terreno (geoeléctrica) (RAVE21, s.f.)

En el contexto de la exploración de yacimientos minerales, la geofísica aporta herramientas esenciales para identificar anomalías asociadas a cuerpos mineralizados. La elección del método geofísico más adecuado depende del tipo de depósito y de las condiciones geológicas del área de estudio.

Uno de los métodos más utilizados es la magnetometría, que consiste en la medición de variaciones locales del campo magnético terrestre. Estas variaciones se interpretan como anomalías magnéticas, las cuales pueden indicar la presencia de estructuras geológicas o concentraciones minerales con propiedades magnéticas distintas a las rocas circundantes. Una anomalía positiva corresponde a una intensidad de campo magnético mayor a la prevista por el modelo geofísico regional, mientras que una anomalía negativa refleja una intensidad menor. Este método es especialmente útil en zonas con intrusiones ígneas, alteraciones estructurales o presencia de minerales magnéticos como la magnetita, comúnmente asociada a mineralizaciones auríferas.

En el contexto de Yolombó y San Roque, donde la cobertura vegetal y el relieve dificultan los métodos de prospección directa, la magnetometría representa una herramienta no invasiva y eficiente para orientar la exploración. Mediante la adquisición de datos magnetométricos terrestres y su posterior procesamiento en mapas de anomalías residuales, es posible delimitar zonas de alteración hidrotermal y estructuras favorables para la concentración de oro. Estudios previos en Antioquia han demostrado que la integración de datos magnéticos con cartografía geológica y

geoquímica mejora la identificación de blancos de perforación, optimizando así los recursos invertidos en campañas exploratorias según Restrepo (2015). Por tanto, la aplicación de esta técnica en el área de estudio contribuye significativamente a reducir la incertidumbre geológica en las fases iniciales de la exploración minera.

Además de la magnetometría, según Lee et al., (2024) existen otros métodos geofísicos relevantes en la exploración minera, aunque no todos son aplicables en todos los contextos, como es el caso de la gravimetría, que permite mapear con precisión anomalías relacionadas con la masa y densidad del subsuelo, mediante la medición de variaciones en la aceleración gravitacional. A pesar de su utilidad, su aplicación en este estudio es limitada debido a la resolución espacial de los datos disponibles.

## **6.6 Sistemas de información geográfica**

(ESRI, s.f.) define los SIG como la integración de hardware, software, datos geográficos y personal capacitado, conformando una plataforma robusta para gestionar información espacial útil.

En este contexto, de acuerdo con Domínguez, (2000) y Goodchild, (2009) los SIG no solo son sistemas tecnológicos, sino también conjuntos de métodos y procesos que actúan coordinadamente para manejar datos espaciales y no espaciales, con el objetivo de satisfacer los requerimientos analíticos de diversos sectores.

Por lo tanto, un SIG es una tecnología computacional orientada a gestionar y procesar información espacial y no espacial, lo que permite interpretar patrones geográficos complejos y apoyar la toma de decisiones en diversos ámbitos del conocimiento.

### **6.6.1 Datos vectoriales**

(ESRI, s.f.) describe que un dato vectorial es aquel que representan entidades geográficas como puntos, líneas y polígonos. Cada entidad de puntos se representa como un par de coordenadas simple, mientras que las entidades de línea y de polígonos se representan como listas ordenadas de

vértices. Los atributos se asocian a cada entidad de vector, en contraposición al modelo de datos ráster que asocia los atributos a las celdas de la cuadrícula.

### **6.6.2 Datos ráster**

(ESRI, s.f.) establece que un dato ráster es al que consta de una matriz de celdas de igual tamaño, o píxeles, dispuestas en filas y columnas, y compuestas por una o varias bandas. Cada celda representa una ubicación en la superficie terrestre y contiene un valor numérico que representa un fenómeno o atributo particular. Los grupos de celdas que comparten el mismo valor de coordenadas representan la misma entidad geográfica.

Además, Pucha-Cofrep, et al., (2017) expone que el dato ráster divide el espacio en celdas (teselas), creando una malla de celdas contiguas; donde cada celda almacena un valor que representa una variable espacial continua, como elevación o cobertura del suelo.

#### **6.6.2.1 Imágenes satelitales**

Para el manejo de imágenes satelitales en nuestro proyecto es necesario tener claros algunos conceptos, por tanto, tenemos que la teledetección es una técnica que permite observar y recolectar información sobre la superficie terrestre sin contacto físico directo. Este proceso se basa en la detección de la energía electromagnética que es reflejada o emitida por los objetos, utilizando sensores montados en plataformas como satélites, drones o aviones. De igual manera Vaneros, et al., (2020) afirma que

la teledetección es un conjunto de técnicas que nos ayudan a obtener información a distancia de un determinado objeto situado sobre la superficie terrestre. Esta información va más allá del alcance del ojo humano, y es obtenida mediante la interacción de los principales elementos: sensor, objeto de estudio y flujo energético, este último también denominado Espectro Electromagnético (p. 100).

Así mismo, Qi, et al. (2025) sugiere que

La tecnología de teledetección, con su sólida perspectiva macroscópica, rentabilidad, velocidad, amplia cobertura, rico contenido de información e independencia de las condiciones del terreno, se ha convertido en una tecnología convencional para identificar eficientemente alteraciones mineralizadas (p. 1)

#### **6.6.2.1.1 Sensores remotos y su clasificación**

Es importante definir que es un sensor, así que, Veneros, et al. (2020) establece que un sensor remoto es un dispositivo capaz de detectar, medir y registrar la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos de la superficie terrestre sin necesidad de contacto físico directo.

Estos se clasifican en dos grupos, pasivos los cuales dependen de la radiación solar como El Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) este depende mucho de las condiciones atmosféricas y activos que emiten su propia energía, como Detección y Localización de Imágenes por Láser (LIDAR) y Detección y Localización por Radio (RADAR).

#### **6.6.2.1.2 Banda**

(ESRI, s.f.) define que una banda es un rango de longitudes de onda en el espectro de energía electromagnética (EM) reflejada o radiada a la que un sensor remoto es sensible. Una vez que un sensor recopila datos de una banda, almacena los datos en un archivo o una parte de un archivo dedicado a ese rango, conocido como banda. También se conoce comúnmente como banda espectral.

## 7 Metodología

A través del procesamiento de datos geológicos, estructurales, geoquímicos, geofísicos se construyó un modelo de superposición ponderada que permitió establecer relaciones espaciales entre las variables consideradas y su influencia en la ocurrencia de mineralización aurífera haciendo uso de las herramientas de sistemas de información geográfica.

### 7.1 Procedimiento

#### 7.1.1 *Adquisición de información*

La definición de la metodología y el análisis de las variables se fundamentaron en la comprensión de las características de los depósitos minerales que se han investigado y explotado en el área de estudio considerando su génesis, mineralogía y las estructuras geológicas asociadas. Por ello, la primera fase del estudio consistió en una revisión preliminar y un análisis del entorno geológico, así como de las características de los depósitos presentes en la región. Esta aproximación permitió reconocer los procesos geológicos predominantes y las variables que posteriormente influyeron en la distribución y disponibilidad del oro, así como en las asociaciones espaciales entre las variables geológicas y la ocurrencia del mineral. El conocimiento previo de estos depósitos fue fundamental para orientar la asignación de pesos cuantitativos a las variables, las cuales fueron integradas como criterios temáticos en el modelo espacial desarrollado mediante herramientas de SIG.

Durante la etapa inicial, se recopiló información científica pertinente al área de estudio, principalmente procedente del SGC, en donde se obtuvieron datos geográficos relacionados a la cartografía geológica, datos geoquímicos y geofísicos que sirvieron como información temática base para el desarrollo de este proyecto, además de contar con estudios orientados a conocer el contexto geológico regional y proyectos dirigidos a la prospectividad de recursos minerales, que sirvieron como guía para la interpretación y procesamiento de las diferentes capas temáticas adquiridas. Igualmente, se consultó documentación técnica del Proyecto Minero Gramalote, el cual

constituye el principal prospecto aurífero del área de estudio y sirvió como insumo base para el conocimiento de las características asociadas a los depósitos minerales encontrados en la región.

Adicionalmente, se evaluó la aplicación de técnicas de teledetección, como índices espectrales y análisis de componentes principales (PCA), para la detección de minerales arcillosos y óxidos de hierro en superficie, asociados a alteraciones hidrotermales, mediante el uso de imágenes satelitales del sensor Sentinel-2. No obstante, debido a las características de la zona, como la alta cobertura vegetal, la ausencia de zonas con anomalías detectables de óxidos de hierro en el suelo y la ausencia de alteraciones hidrotermales ampliamente distribuidas con minerales que presenten firmas espectrales detectables, se descartó el uso de estas técnicas lo cual se justifica en el capítulo de detección de alteraciones hidrotermales.

De igual manera, otras entidades que fueron consultadas las cuales, contienen información relevante para el proyecto fueron la ANM y el IGAC. El primero provee información de los títulos mineros presentes en la región y el segundo provee la información cartográfica base y la división política para definir el área de estudio. La información obtenida permitió establecer una línea base sobre la disponibilidad, cantidad y calidad de los datos existentes, lo que constituyó el insumo principal para la elaboración del proyecto (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Información base consultada.*

<b>Nombre</b>	<b>Fuente</b>	<b>Descripción / Utilidad</b>
<p>Mapa Geológico de Colombia Oriente de Antioquia. Cuadrángulo I-9 y parte de los cuadrángulos H-9, H-10, I-10, J-9 y J-10. Planchas 132 Yolombó, Plancha 148 San Carlos, Plancha 168 Argelia (Aquitania), Plancha 188 La Dorada y Plancha 117 Amalfi.</p>	<p>SGC,2010</p>	<p>Base fundamental para caracterizar la litología y las estructuras geológicas regionales. Se utilizó para clasificar unidades litoestratigráficas y estructuras según su favorabilidad aurífera. Aporta información relevante del contexto geológico de la zona. Se eligió por su escala 1:100.000, cobertura del área de estudio y respaldo institucional al ser información oficial del SGC.</p>
<p>Mapa geológico de la plancha 131 Santa Rosa de Osos. Escala 1:100.000</p>	<p>SCG,2011</p>	<p>Complementó la información estructural y litológica en el borde occidental del área. Se integró en el análisis espacial de geología estructural.</p>
<p>Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minero Gramalote TM 14292</p>	<p>AngloGold Ashanti, 2015</p>	<p>Aportó información detallada sobre el modelo estructural, los tipos de depósitos presentes y las características del sistema mineralógico regional. Se usó como referencia para correlacionar estructuras geológicas con mineralización aurífera. Se eligió debido a la ubicación geográfica del proyecto Gramalote dentro el área de estudio.</p>
<p>Mapa de Anomalías Geoquímicas de Colombia. Escala 1:500.000</p>	<p>SGC, 2009</p>	<p>Cuenta con la identificación áreas con presencia de anomalías geoquímicas regionales. Se utilizó como base de comparación con los datos más recientes del atlas geoquímico. Fue seleccionado por su utilidad exploratoria.</p>
<p>Atlas geoquímico de Colombia versión 2022</p>	<p>SGC, 2022</p>	<p>Principal insumo para la evaluación geoquímica en el área. Se uso para clasificar las concentraciones anómalas de elementos como Au, As y Sb. Fue elegido por ser información reciente que permite complementar la información histórica desarrollada por el SGC.</p>

Mapa de anomalías geofísicas de Colombia, versión 2022	SGC, 2023	Base para el análisis de dominios magnéticos y espectrometría gamma. Se procesó para delimitar zonas con anomalías geofísicas relacionadas con mineralización. Elegido por ser un insumo reciente y con cobertura en toda el área de estudio.
--	-----------	---

Como resultado de esta etapa, se identificaron cinco variables claves asociadas a la formación de depósitos minerales auríferos en la región, las cuales corresponden a litología, estructuras geológicas, geoquímica, magnetometría y alteración hidrotermal. Estas variables son importantes porque condicionan el medio propicio para la formación de depósitos minerales, como es el caso de la litología y la geología estructural; representan características particulares de las zonas mineralizadas, como la alteración hidrotermal; o corresponden a técnicas especializadas que permiten detectar ciertas características de los depósitos minerales para inferir así, su ubicación, como es el caso de la geoquímica y magnetometría. La selección se fundamentó no solo en su relevancia científica, sino también en la disponibilidad de información confiable para el área de estudio.

### **7.1.2 *Procesamiento de información de entrada***

Los datos de entrada se obtuvieron como capas geospaciales en formatos vectorial y ráster, los cuales debieron ser procesados con el fin de representar, clasificar y destacar las zonas que presentaran características asociadas a la posible presencia de oro, basándose en la bibliografía consultada. Este proceso implicó, además, la estandarización de los insumos al formato ráster, dado que permite realizar los procesos de reclasificación y superposición ponderada de las variables, la cual se realizó considerando la relación e importancia de cada una de estas en la ocurrencia de mineralización aurífera dentro del área de estudio. Cada variable fue clasificada en una escala de 1 a 5, siguiendo el enfoque metodológico propuesto por Correa y Rojas (2017), en el cual las características que representan mayor favorabilidad para la ocurrencia de depósitos auríferos recibieron una valoración de 5, mientras que aquellas con menor aporte obtuvieron una puntuación de 1. A continuación, se describe en detalle el procedimiento aplicado para el procesamiento y clasificación de las variables seleccionadas para el presente estudio.

### 7.1.2.1 Litología

Los datos correspondientes a la litología fueron obtenidos a partir de la cartografía geológica a escala 1:100.000, desarrollado por el SGC (2010), la cual se presenta en la Figura 2.

En el área de estudio, el Batolito Antioqueño fue identificado por el SGC (2002). como una unidad geológica de alto interés para la exploración aurífera, dado que durante sus fases finales de cristalización se acumularon y liberaron fluidos hidrotermales que favorecieron la formación de depósitos minerales en forma de vetas y diseminados en la roca. Adicionalmente, se identificó como unidad geológica de interés el Batolito de Segovia, un cuerpo ígneo emplazado en la zona este del área de estudio, el cual presenta abundantes diques de geometría tabular asociados a zonas de fracturamiento, a través de las cuales se desarrollaron mineralizaciones con pirita, calcopirita, hematita y, en menor proporción, oro según SGC (2011). Por lo anterior, el Batolito Antioqueño y el Batolito de Segovia se consideran como unidades con alta favorabilidad de presentar mineralizaciones auríferas.

Asimismo, en la cartografía geológica se identificaron otras rocas ígneas intrusivas que no se incluyen dentro del Batolito Antioqueño ni del Batolito de Segovia, estas unidades se consideran de favorabilidad media, debido a que los procesos geológicos que forman estas rocas pueden favorecer la formación de depósitos auríferos, sin embargo, no se cuenta con un registro bibliográfico que refuerce la presencia de mineralizaciones en estas unidades.

Por otra parte, el Servicio Geológico Colombiano (2011) señaló que “los depósitos vetiformes se encuentran tanto en el batolito antioqueño como en las rocas metamórficas aledañas. La ocurrencia de oro en rocas metamórficas suele estar próximas al límite con el batolito antioqueño, en menos de 2 km.”, lo que sugiere una influencia térmica e hidrotermal significativa sobre las unidades geológicas encajantes, incrementando así el potencial mineral en las zonas de borde.

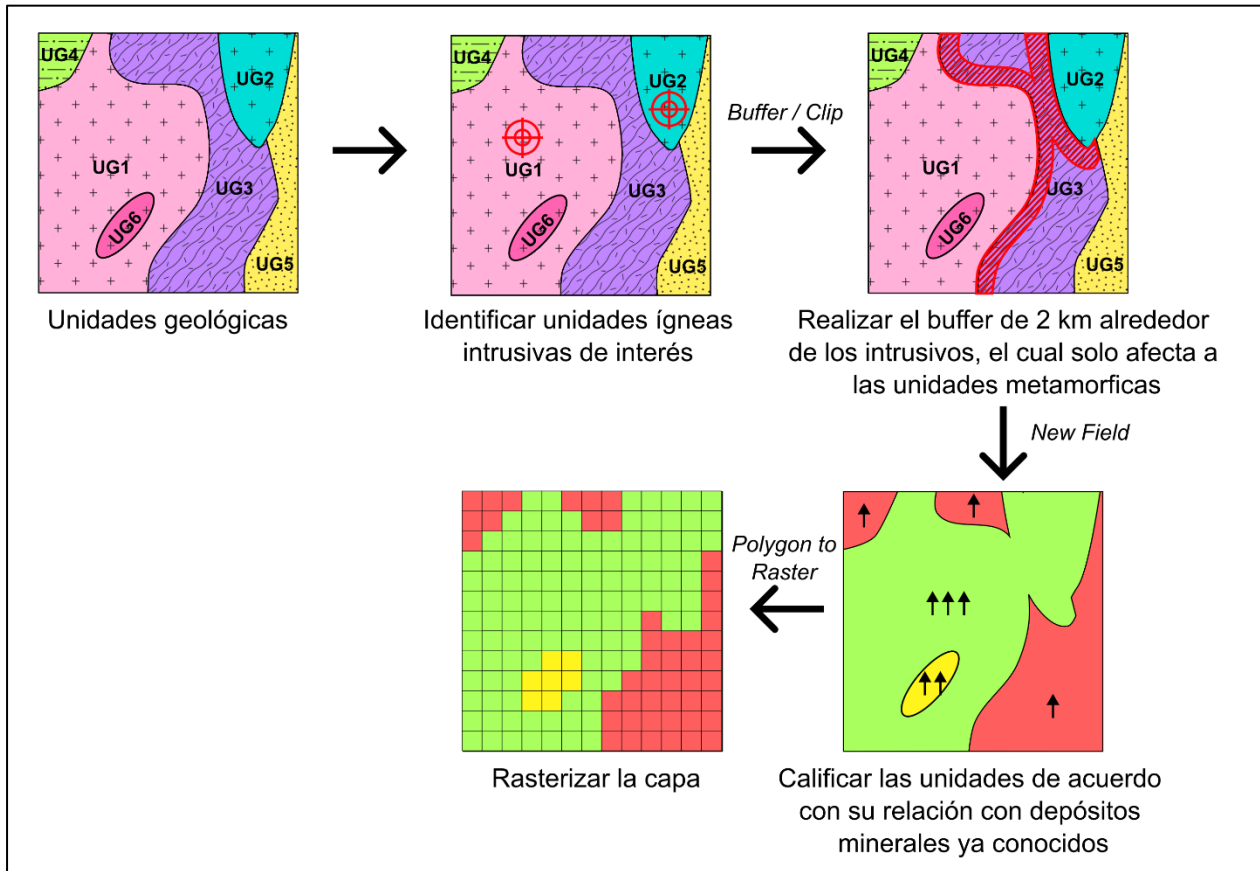
Finalmente, las unidades de rocas y depósitos sedimentarios, así como las regiones ubicadas sobre rocas metamórficas alejadas del borde con los cuerpos ígneos intrusivos, no se consideran

favorables para la presencia de depósitos auríferos alojados en vetas, ya que su evolución geológica no está asociada a los procesos que generan este tipo de depósitos.

Con base en el análisis previo, se procesó la información base. Este procedimiento inició con la identificación de los cuerpos ígneos intrusivos de interés, alrededor de los cuales se aplicó un buffer de 2 km, utilizando el software ArcGIS Pro (ver Figura 4). Este radio afecta principalmente las rocas metamórficas aledañas, más antiguas que los cuerpos ígneos, representando así zonas con potencial para la formación de depósitos minerales en los bordes de dichas intrusiones. Una vez aplicado el buffer, cada unidad geológica fue clasificada según su grado de favorabilidad para la ocurrencia de depósitos auríferos, tal como se presenta en la Tabla 2.

**Figura 4**

*Procesamiento de la variable “Litología”.*



**Tabla 2**

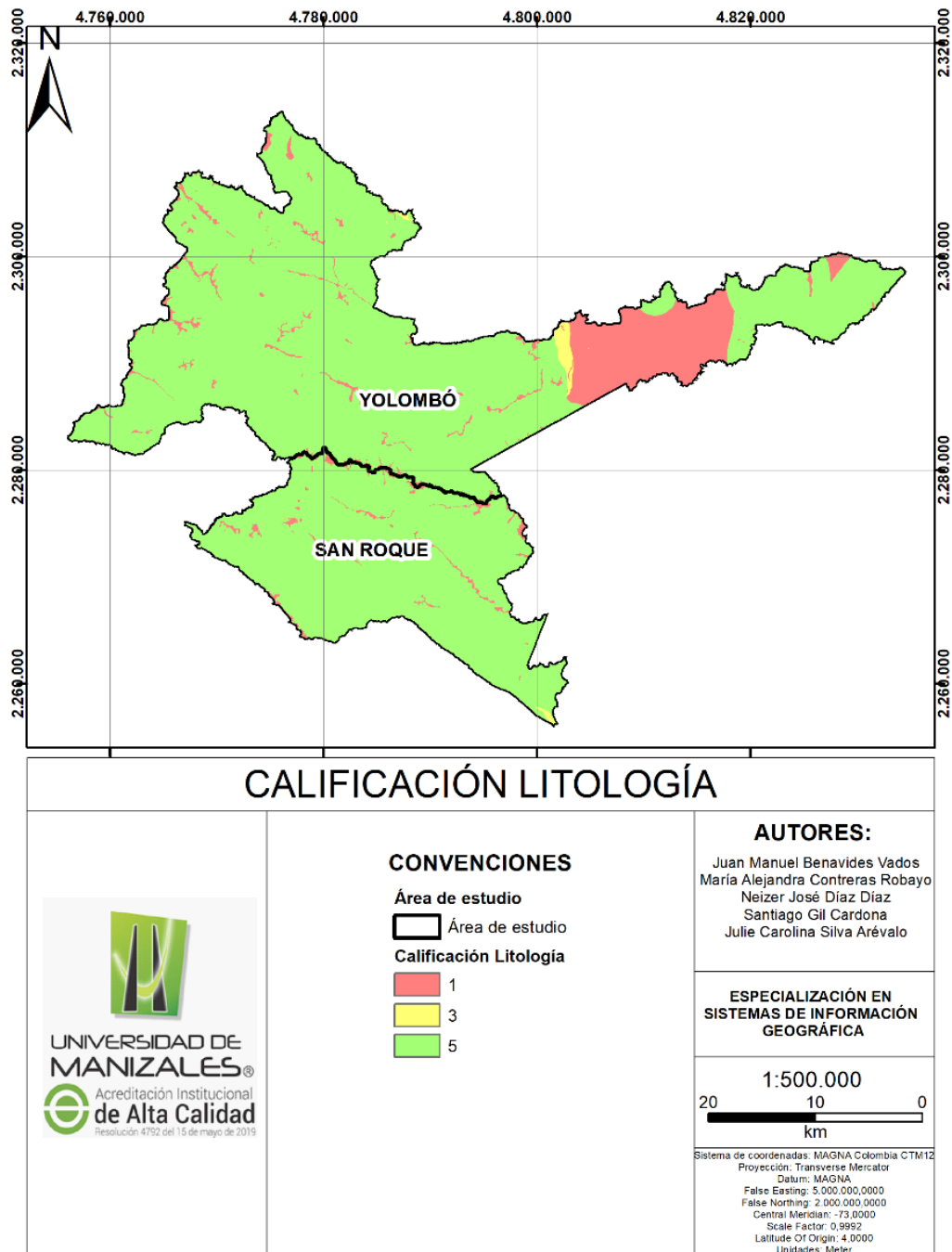
*Clasificación de las unidades geológicas de acuerdo con su favorabilidad para albergar depósitos auríferos.*

Unidades	Calificación
Batolito antioqueño, Batolito de Segovia y rocas metamórficas a distancias menores a 2 km del límite con las unidades ígneas	5
Otras rocas ígneas intrusivas cretácicas y pegmatitas.	3
Depósitos sedimentarios, rocas sedimentarias y rocas metamórficas a una distancia mayor a 2 km de las unidades ígneas.	1

El resultado del procesamiento generó una capa ráster que representa las zonas con características litológicas favorables para la presencia de oro, la cual se muestra en la Figura 5. Esta capa fue incorporada como una de las variables en el modelo de superposición ponderada desarrollado en este proyecto.

**Figura 5**

Resultado final del procesamiento de la variable “Litología”.



### 7.1.2.2 Geología estructural

La información de la geología estructural del área de estudio fue obtenida a partir de la cartografía geológica a escala 1:100.000 desarrollada por el SGC (2010), la cual se presenta en la

Figura 3. La revisión bibliográfica establece que las ocurrencias minerales en el área de estudio se encuentran controladas estructuralmente, es decir, asociada a sistemas de fracturas y fallas que funcionan como canales preferenciales para la circulación de fluidos hidrotermales y la posterior precipitación de minerales.

Particularmente, en el área de estudio se documentó un evento de “movimiento diferencial a lo largo de los lineamientos Nus y El Socorro, que, al parecer, ha generado una zona de apertura tensional notable de dirección NNW, NW y NE, [que pudo haber favorecido el ascenso de fluidos hidrotermales], resultando en un vetilleo de cuarzo y cuarzo carbonato tipo stockwork” según AngloGold Ashanti (2015) (p.2.27). Además, los depósitos vetiformes en el entorno del área se concentran en estas zonas distensivas, asociadas a la dirección conjugada de fallas regionales, según SGC (2011). Este patrón estructural es característico de zonas de apertura tensional dentro de un régimen tectónico compresivo, donde se desarrollan zonas de menor presión que pueden constituir sitios favorables para la precipitación mineral.

A partir del análisis de estos elementos, se estableció que las fallas de segundo orden de las estructuras regionales, con orientaciones dominantes NNW, NW y NE, junto con sus estructuras conjugadas, representan zonas de alta favorabilidad para la mineralización aurífera. Paralelamente, las fallas regionales pudieron representar zonas de debilidad que facilitaron el ascenso de fluidos hidrotermales, especialmente cerca de cuerpos ígneos intrusivos, por lo que fueron clasificadas como de favorabilidad intermedia.

Por otro lado, se identificaron fallas menores con orientaciones diferentes y sin conexión espacial directa con el marco estructural regional, a las cuales se les asignó un potencial bajo, dado que posiblemente se formaron durante fases tectónicas posteriores no relacionadas con procesos de mineralización hidrotermal. Asimismo, se consideraron de baja favorabilidad las zonas ubicadas fuera del área de influencia directa de estructuras geológicas, teniendo en cuenta que la mineralización en esta región ha sido fuertemente controlada por el marco estructural.

El procesamiento de la capa de geología estructural (ver Figura 6) partió de la definición de la zona de influencia de todas las fallas identificadas en el terreno. Este proceso se realizó en el

software ArcGIS Pro a través de un *buffer*, siguiendo los criterios del modelo realizado por Correa y Rojas (2017) los cuales se muestran en la Tabla 3 y se construyen con base en que las estructuras geológicas “presentan una zona de influencia, que está relacionada directamente con su longitud [...] Así, por ejemplo, una falla de gran extensión tendrá una mayor área de influencia que una falla de longitud menor”.

**Tabla 3**

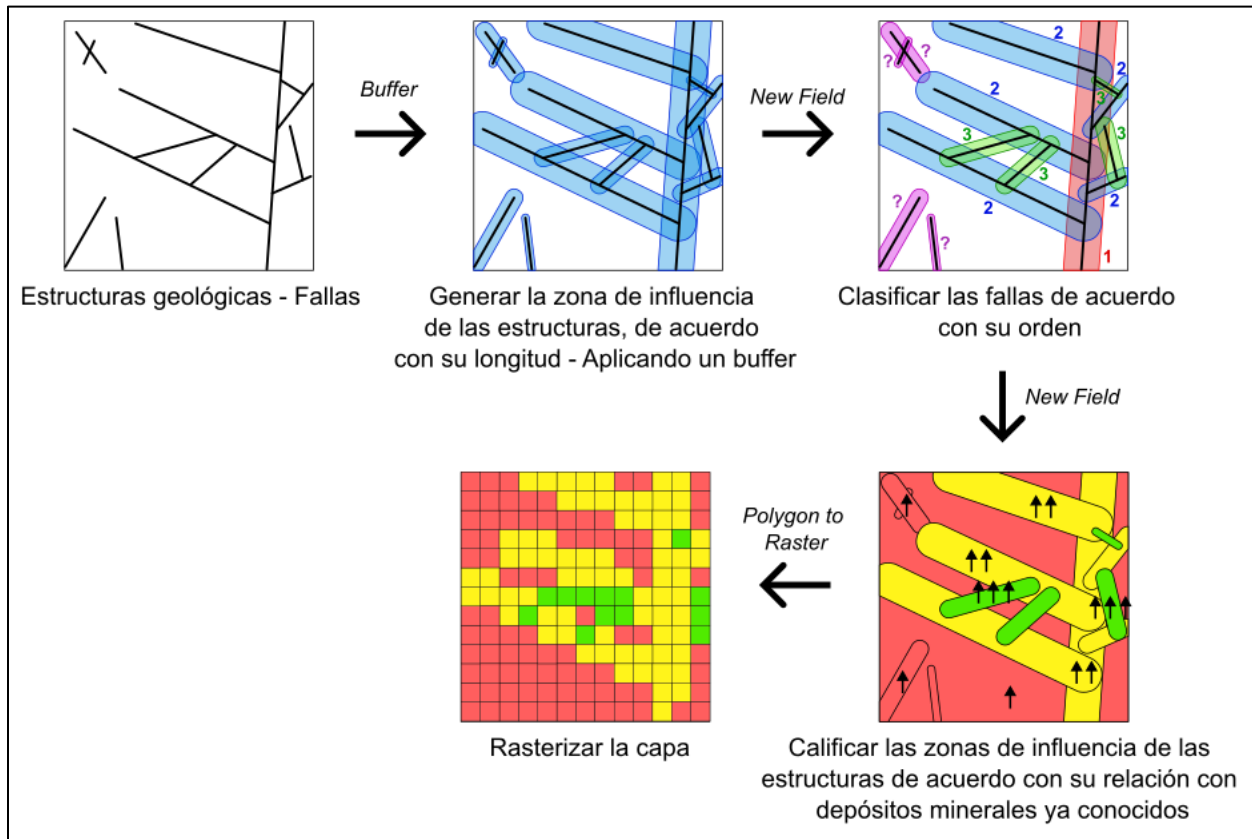
*Zona de influencia de las estructuras geológicas de acuerdo con su longitud.*

Longitud	Zona de influencia
>50 km	5 km
50 km – 10 km	2.5 km
<10 km	0.5 km

*Nota.* Fuente: Correa y Rojas (2017).

**Figura 6**

*Procesamiento de la variable “Geología estructural”.*



Una vez definida la zona de influencia de las estructuras geológicas, se identifican las estructuras principales y las conjugadas, identificando las fallas de primer, segundo y tercer orden, así como estructuras independientes. Finalmente, estas se calificaron en función de su relación con eventos tectónicos asociados a la formación de depósitos minerales en la zona de estudio, de acuerdo con el conocimiento científico de la región. La calificación de las estructuras geológicas se resume en la Tabla 4.

**Tabla 4**

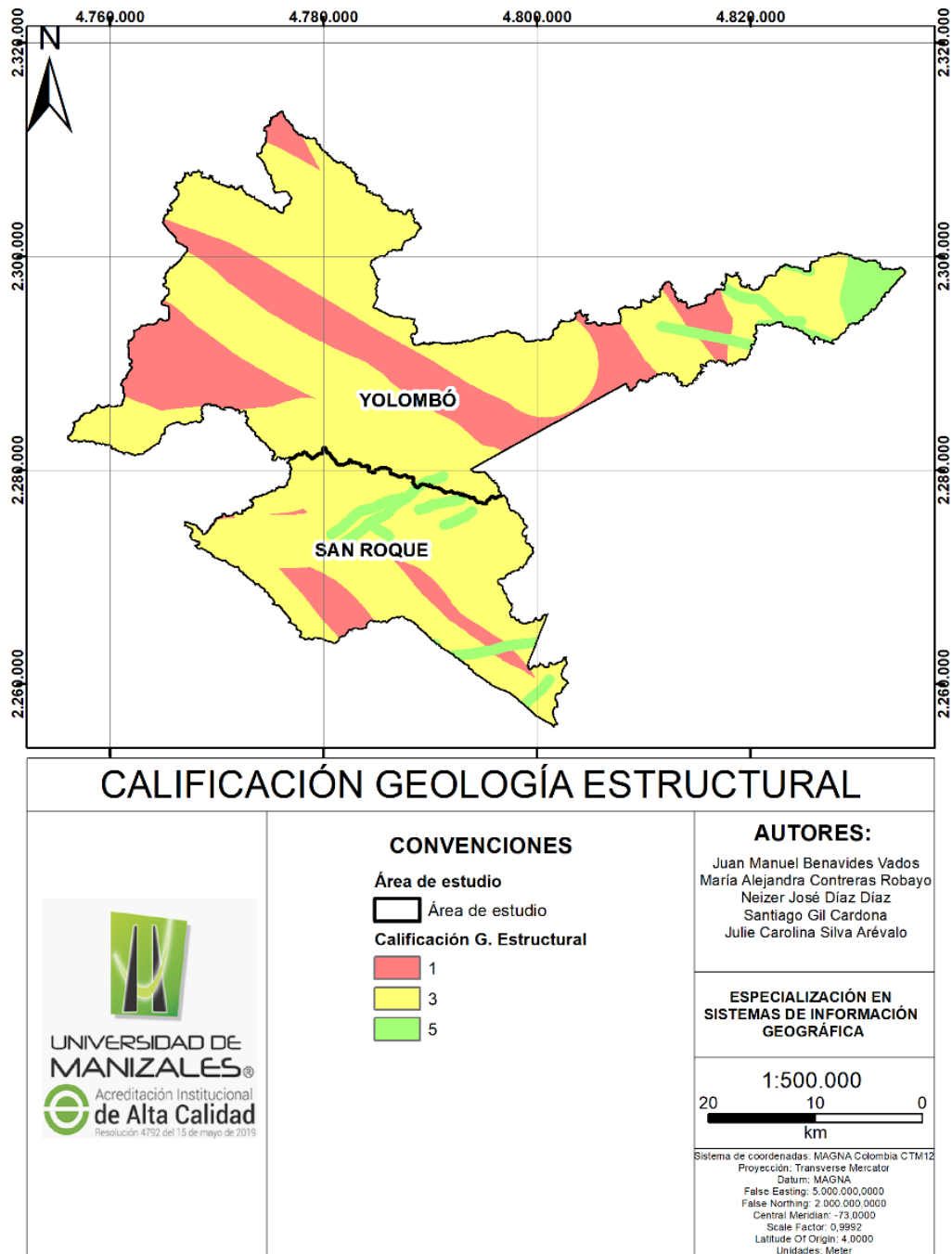
*Calificación de las estructuras geológicas de acuerdo con su favorabilidad para albergar depósitos minerales.*

<b>Unidades</b>	<b>Calificación</b>
Zona de influencia de fallas conjugadas a fallas principales y fallas menores asociadas	5
Zona de influencia de fallas regionales	3
Zona de influencia de fallas con direcciones diferentes y no relacionadas a las fallas regionales	1
Zonas externas a las áreas de influencia de las fallas	1

Finalmente, el resultado del procesamiento de esta variable se muestra en la Figura 7. Este corresponde a una capa ráster que representa las zonas con características favorables para la presencia de mineralizaciones, de acuerdo con la distribución y cercanía a estructuras geológicas asociadas a depósitos ya identificados en la zona de estudio. Esta capa constituye una de las variables incorporadas en el modelo de superposición ponderada desarrollado en este proyecto.

**Figura 7**

Resultado final del procesamiento de la variable “Geología Estructural”.



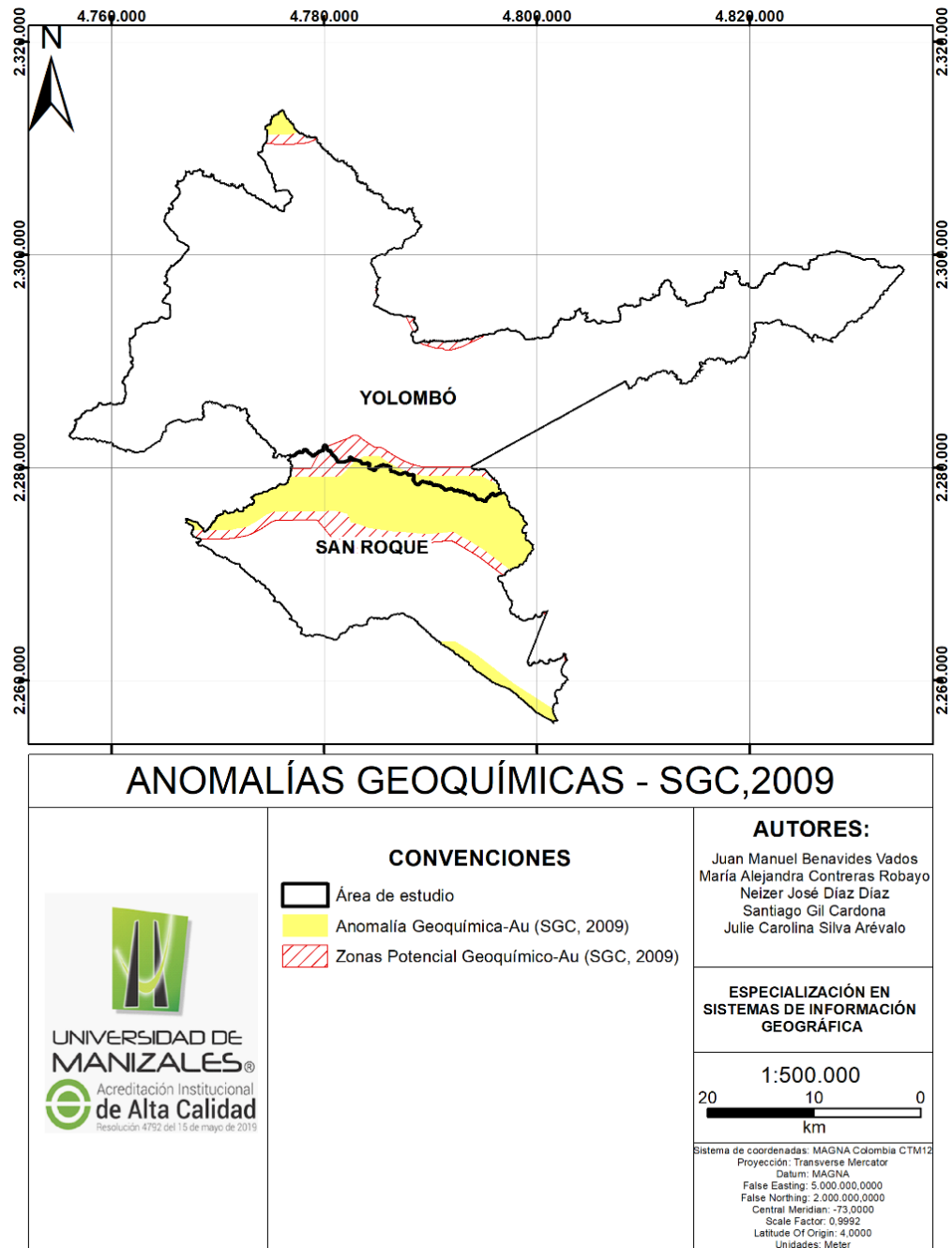
### 7.1.2.3 Geoquímica

El análisis geoquímico se fundamentó en dos estudios principales. En primer lugar, el Mapa de Anomalías Geoquímicas de Colombia, desarrollado por el SGC (2009) (Figura 8), el cual integra

datos de muestreos geoquímicos de aguas, sedimentos, suelos y rocas recolectados desde 1917 hasta 2008. En este estudio, el SGC identificó zonas con potencial geoquímico alto a medio para la ocurrencia de mineralizaciones de oro dentro la zona de interés, las cuales se definieron a partir de la integración de los datos geoquímicos y criterios geológicos, mineros y geográficos según INGEOMINAS (2009).

**Figura 8**

*Anomalías geoquímicas de oro identificadas por el SGC.*



*Nota.* Elaborado a partir de la información de SGC (2009).

En segundo lugar, se consultó el Atlas Geoquímico de Colombia, desarrollado por el SGC (2022). Este documento presenta mapas de distribución y concentración de 57 elementos químicos, los cuales fueron elaborados a partir de muestras de sedimentos finos activos de lecho de corriente

(SGC, 2022). Este atlas permitió identificar patrones regionales de concentración geoquímica, incluidos elementos comúnmente asociados a depósitos auríferos.

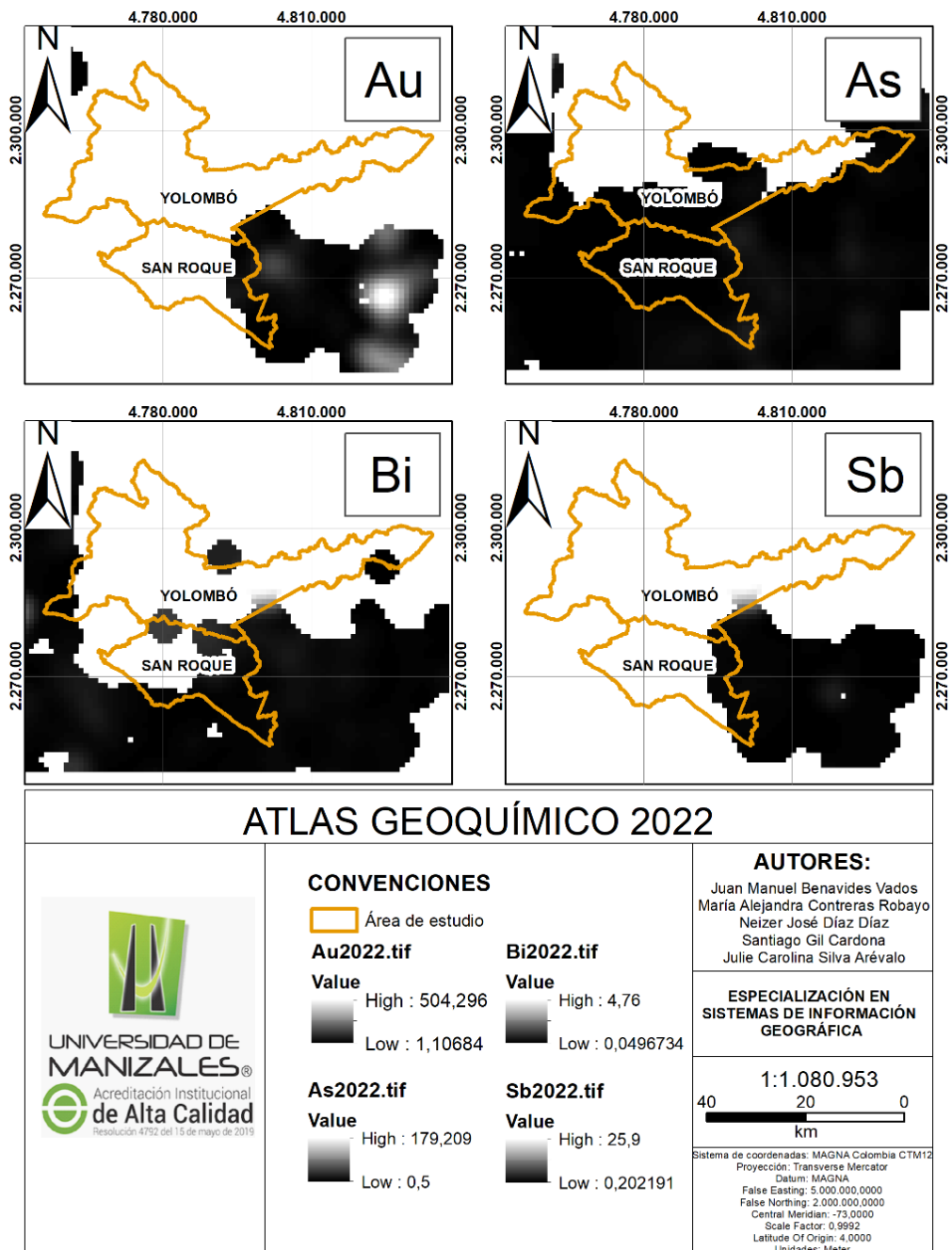
Uno de los depósitos auríferos más representativos en la zona de estudio es el identificado en el proyecto minero de Gramalote, que sirvió como un modelo de referencia para interpretar la configuración geoquímica local. De acuerdo con Leal Mejía y Melgarejo (2008) Gramalote corresponde a un depósito aurífero tipo intrusion-related gold deposit (IRGD), contenido dentro de una red de vetas de cuarzo estructuralmente controladas, en donde los minerales asociados incluyen pirita, molibdenita, calcopirita, esfalerita, galena, sulfuros de bismuto, sulfosales y telururos.

Lang y Baker (2001) definen que los depósitos IRGD son mineralizaciones alojadas dentro o en las inmediaciones de cuerpos ígneos intrusivos de composición félsica a intermedia, los cuales liberan fluidos hidrotermales durante su emplazamiento. Estos depósitos suelen formarse en ambientes tectónicos compresivos o transpresivos, y se caracterizan por contener oro diseminado o en vetillas. Los depósitos tipo IRGD suelen presentar asociaciones metálicas que combinan de forma variable el oro (Au) con concentraciones elevadas de bismuto (Bi), wolframio (W), arsénico (As), telurio (Te) y antimonio (Sb), las cuales varían a medida que se alejan de la fuente hidrotermal.

Para este estudio, se contó con información sobre la distribución de concentración de Au, Bi, As y Sb en formato ráster, proveniente del Atlas Geoquímico de Colombia. Sin embargo, la cobertura espacial varía según el elemento (ver Figura 9). Por ejemplo, los datos de concentración de Au y Sb solo están disponibles en la esquina suroccidental del área de estudio, mientras que el Bi, As presentan una cobertura más amplia, especialmente en la mitad sur del área. Estos datos representan un insumo que permite estimar el potencial mineral de la zona de estudio a través de la identificación de anomalías geoquímicas.

**Figura 9**

*Información base de la distribución de la concentración de los elementos de interés en el Atlas Geoquímico de Colombia.*



*Nota.* Elaborado a partir de la información de SGC (2022).

Para el procesamiento de estos datos se realizó un análisis binario utilizando el software ArcGIS Pro, en el cual los rásteres fueron reclasificados para asignar un valor de 1 a los píxeles

que presentaron concentraciones anómalas del elemento en cuestión; y 0 a los que no lo cumplían. Posteriormente, los rásteres binarios de los distintos elementos fueron sumados entre sí, generando una nueva capa que destacó las zonas donde coinciden anomalías de varios elementos.

Cabe destacar que el umbral que define una anomalía geoquímica depende del contexto geológico local y puede variar según el tipo de elemento y el entorno geológico, según Oyarzún (2022). No obstante, al revisar la literatura se encontró que un criterio ampliamente utilizado es considerar como anomalía alta aquellos valores que se encuentran por encima del percentil 90 (P90) de la distribución de datos analizados, como en el caso del estudio realizado por Cajicá y Sánchez (2024). Esta aproximación permite identificar valores excepcionalmente altos dentro del conjunto muestral. Adicionalmente, los valores de anomalía se compararon con los valores de fondo de la concentración de los elementos químicos analizados en la corteza terrestre. Los valores obtenidos para cada elemento se resumen en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Valores de anomalía geoquímica con base en el P90 y valores de fondo de los elementos en la corteza terrestre*

<b>Elemento</b>	<b>Abundancia en la corteza terrestre (ppm)</b>	<b>P90 (ppm)</b>
Au	0.004	0.21
As	1.5 – 2	48.86
Bi	0.123 – 0.127	0.83
Sb	0.2 – 0.31	24.59

*Nota.* Fuente: Gallard et al., (2009) y Reimann, et al., (1998).

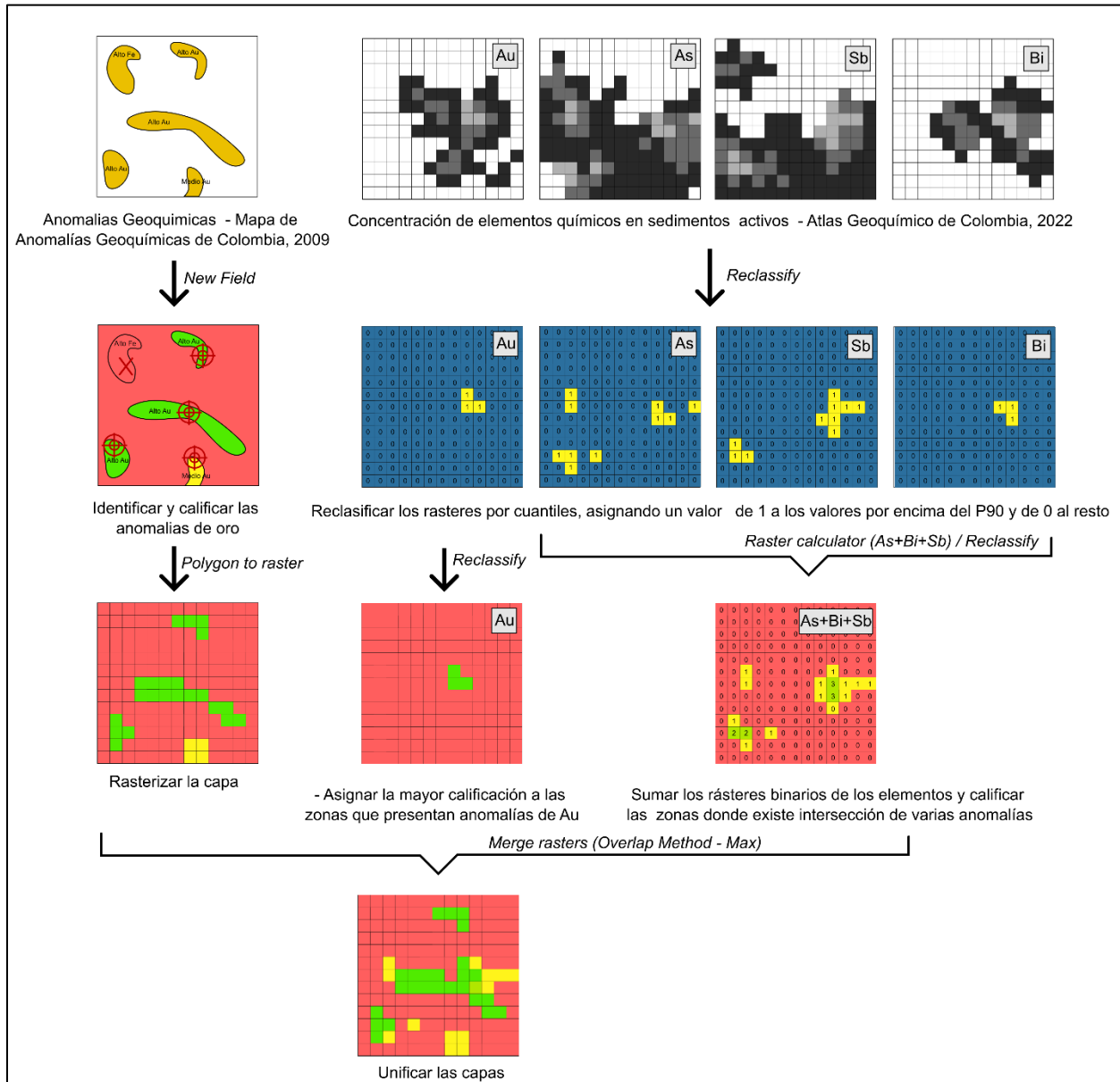
Finalmente, la información derivada de los estudios anteriores fue integrada en una sola capa ráster que representa la favorabilidad geoquímica para la ocurrencia de depósitos minerales en el área de estudio. Esta capa combinó las zonas con potencial geoquímico identificadas en el Mapa de Anomalías Geoquímicas de 2009 y los resultados del análisis binario realizado con los elementos asociados al tipo de mineralización encontrada en los yacimientos identificados en la zona de estudio, como se ilustra en la Figura 10. Los criterios utilizados para clasificar los niveles de favorabilidad en la capa final se resumen en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Calificación de la favorabilidad para la ocurrencia de depósitos minerales de acuerdo con la información geoquímica.*

<b>Criterio</b>	<b>Calificación</b>
Zonas identificadas por el SGC como con potencial geoquímico de Au - y zonas con anomalía geoquímica de oro	5
Zona que cuenten con una presencia de anomalías de As, Bi y Sb, o al menos dos de estos elementos	4
Zona que cuenten con una presencia de anomalías de uno de los elementos asociados al depósito (As, Bi, Mo)	3
Zona que cuenten con ausencia de anomalías geoquímicos de elementos relacionados al depósito o no cuenten con información geoquímica	1

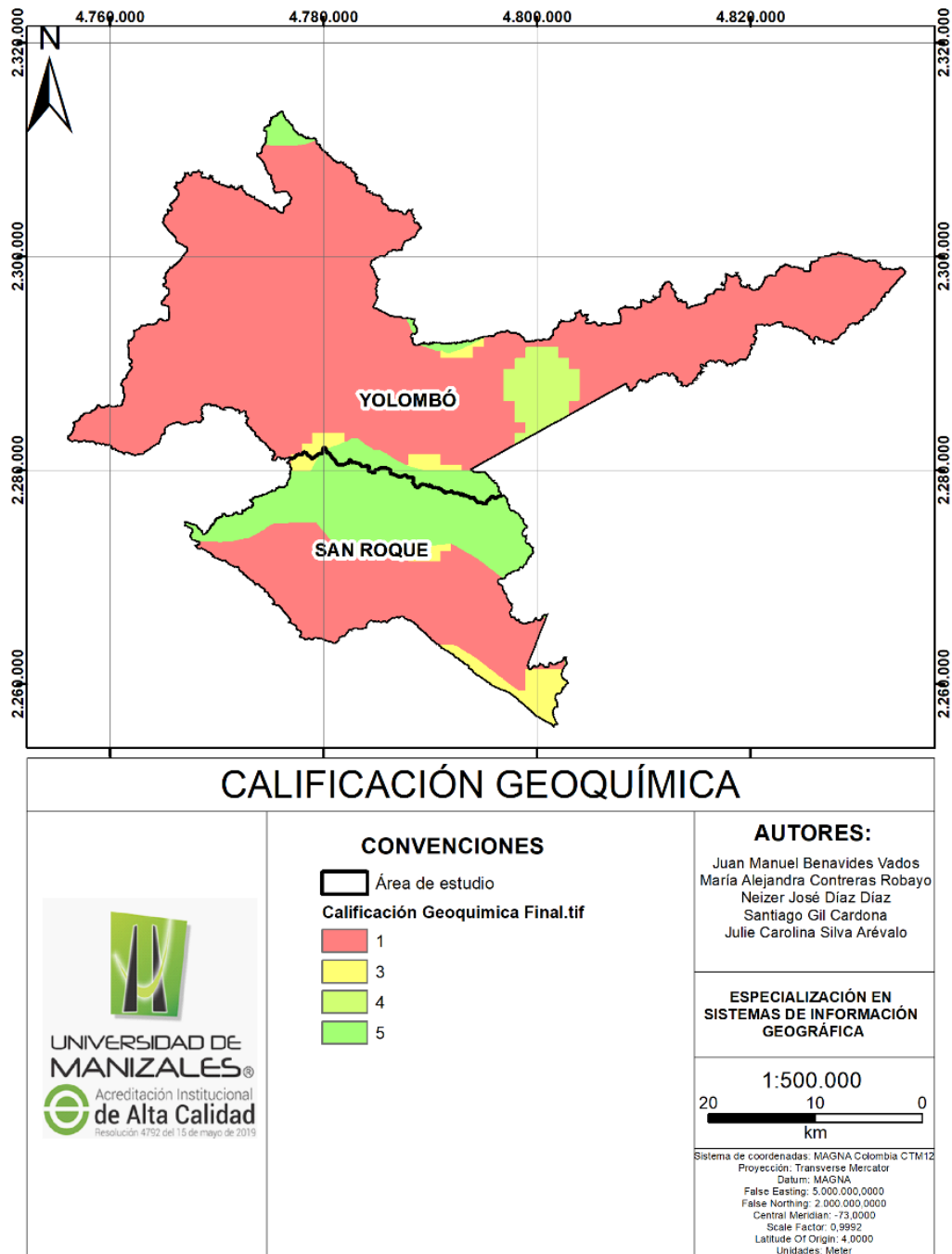
**Figura 10**  
*Procesamiento de la variable “Geoquímica”*



El procesamiento de la información geoquímica generó una capa ráster que representa las zonas con características geoquímicas favorables para la presencia de mineralizaciones auríferas, ya sea por haber sido identificadas históricamente por el SGC como zonas potenciales, o por presentar anomalías geoquímicas de elementos asociados a este tipo de mineralizaciones. El resultado del procesamiento se presenta en la Figura 11 y constituye una de las variables incorporadas en el modelo de superposición ponderada desarrollado en este proyecto.

**Figura 11**

Resultado final del procesamiento de la variable “Geoquímica”.



### 7.1.2.4 Magnetometría

La información geofísica se obtuvo del Mapa de anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales, el cual fue elaborado por el SGC en 2023 (Figura 12) a partir de información

recopilada mediante plataformas aerotransportadas (aviones) utilizando métodos de magnetometría y gamma-espectrometría. Este producto incluye coberturas temáticas como la Intensidad Magnética Total (IMT), la Señal Analítica de la IMT y la distribución ternaria de la concentración relativa de Uranio, Torio y Potasio.

Es importante señalar que, la magnetometría es una técnica que permite la identificación de variaciones en el campo magnético terrestre y que pueden asociarse a la presencia de minerales ferromagnéticos. Haudarian et al. (2009), indican que aunque el oro en sí no es un mineral magnético, frecuentemente se encuentra relacionado con minerales que sí lo son, como la magnetita o la pirrotina, por lo que los métodos magnéticos constituyen una herramienta útil en la exploración aurífera.

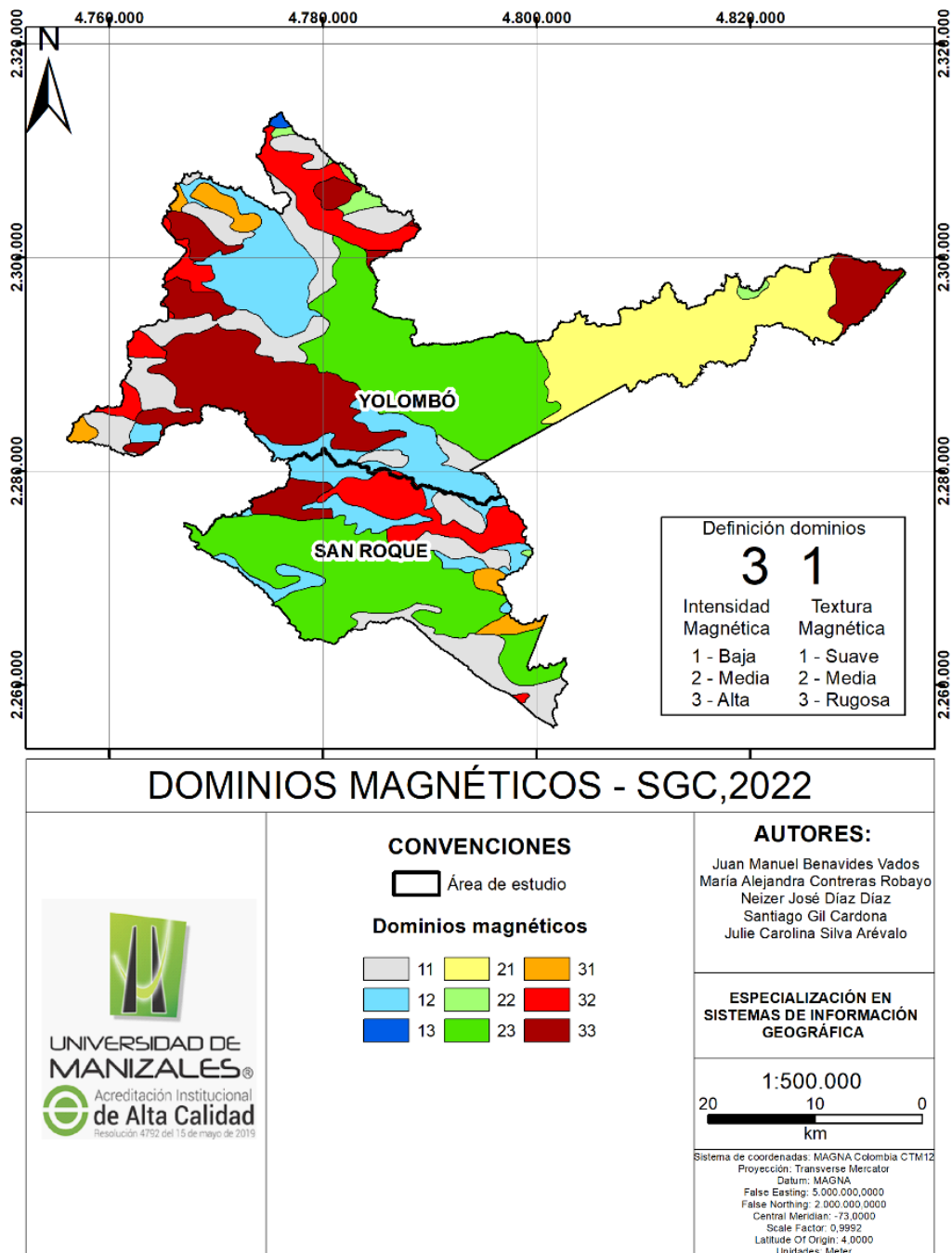
La información geofísica fue incorporada a través del análisis de los dominios magnéticos definidos por el SGC (2023) los cuales son

Unidades magnéticas que están relacionadas entre sí y se delimitan considerando dos características magnéticas: textura e intensidad. Estas características se calculan utilizando el gradiente vertical del campo magnético, conocido como derivada vertical (Dv), el cual realza las fuentes magnéticas cercanas a la superficie. (p 22)

La intensidad magnética representa la amplitud de la señal magnética, y presenta valores altos en zonas con rocas que contienen una elevada concentración de minerales magnéticos. Por su parte, la textura magnética representa la rugosidad espacial de la señal y puede ser alta en zonas con contactos geológicos abruptos, lo cual se puede asociar a la presencia de estructuras geológicas superficiales.

**Figura 12**

*Dominios magnéticos definidos en el Mapa de anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales.*



Nota. Fuente SGC (2023).

Los dominios magnéticos fueron el resultado de la combinación de las diferentes categorías definidas por el SGC para la intensidad magnética (alta, media, baja) y la textura magnética

(rugosa, media, suave), dando un total de nueve combinaciones posibles. El procesamiento de esta información consistió en la asignación de valores de favorabilidad, en una escala de 1 a 5, a cada uno de estos dominios, considerando que una intensidad magnética alta combinada con una textura rugosa representa el mayor potencial para la presencia de depósitos metálicos, ya que estas pueden ser características asociadas a zonas estructurales con mineralización. Los valores asignados a los diferentes dominios magnéticos son presentados en la Tabla 7 y el procesamiento de esta variable se ilustra en la Figura 13

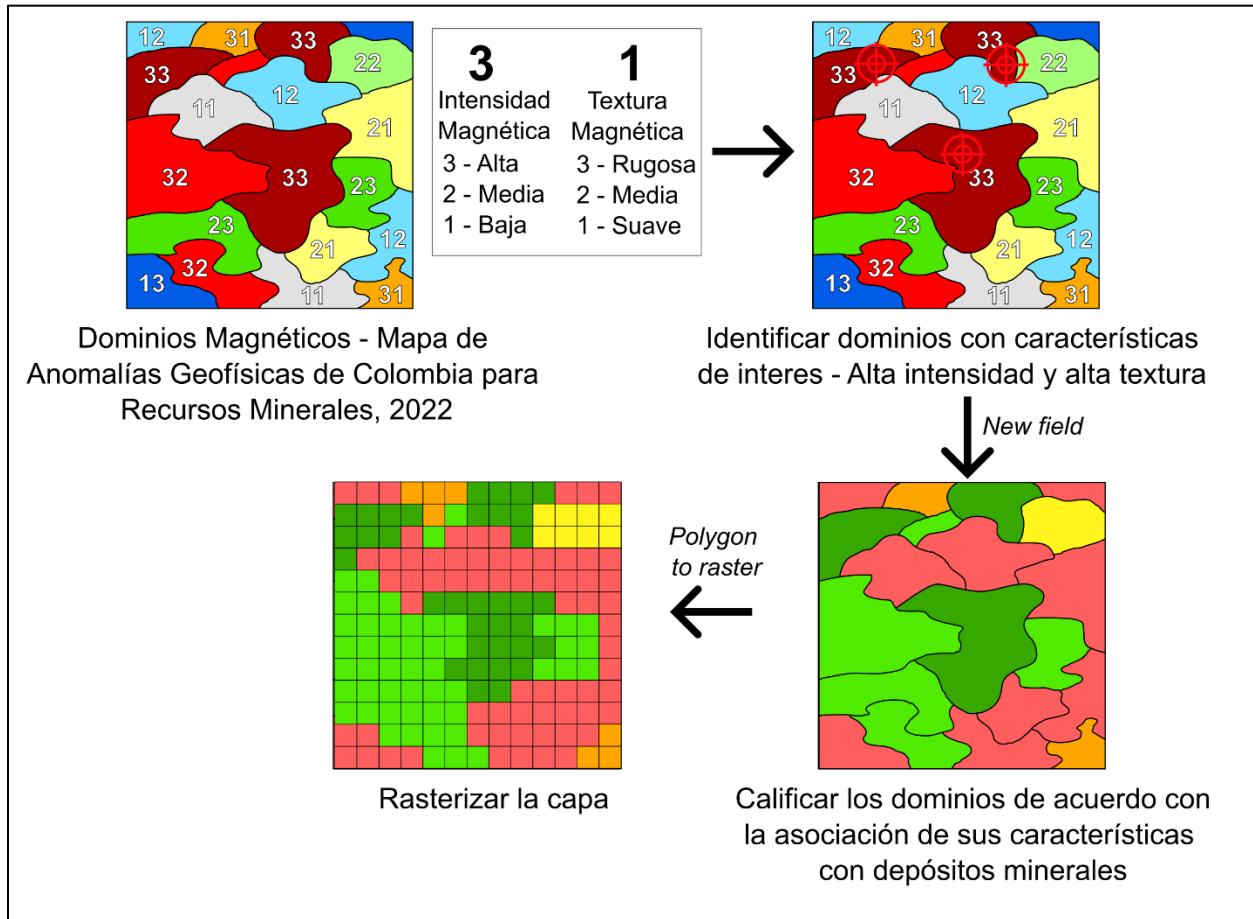
**Tabla 7**

*Calificación de la favorabilidad para la ocurrencia de depósitos minerales de acuerdo con la información de magnetometría.*

<b>Criterio</b>	<b>Calificación</b>
Dominios con intensidad magnética alta y textura magnética rugosa	5
Dominios con intensidad magnética media y textura magnética rugosa o intensidad magnética alta y textura magnética media	4
Dominios con intensidad y rugosidad magnética media	3
Dominios con intensidad magnética alta y rugosidad magnética suave	2
Dominios con intensidad magnética baja	1

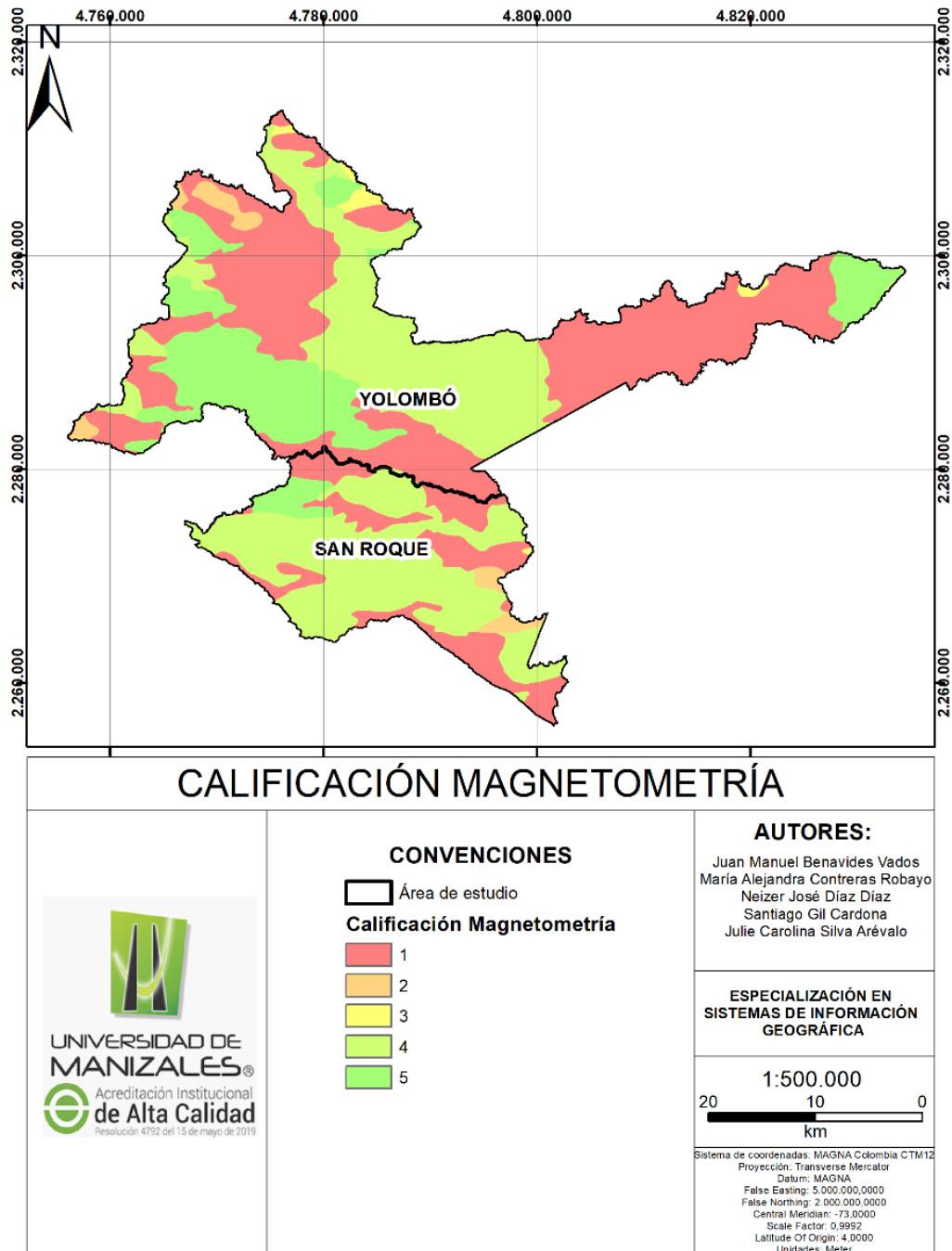
**Figura 13**

*Procesamiento de la variable “Magnetometría”.*



El resultado del procesamiento de la información de magnetometría corresponde a una capa ráster que representa los dominios magnéticos con mayor asociación a características típicas de depósitos auríferos. El resultado del procesamiento se presenta en la Figura 14 y constituye una de las variables integradas en el modelo de superposición ponderada desarrollado en este proyecto.

**Figura 14**  
 Resultado final del procesamiento de la variable “Magnetometría”.



### 7.1.2.5 Detección de alteraciones hidrotermales

Las descripciones del depósito minero de Gramalote, realizadas por AngloGold Ashanti (2015), indicaron que la alteración hidrotermal en la zona de estudio se presenta restringida a halos

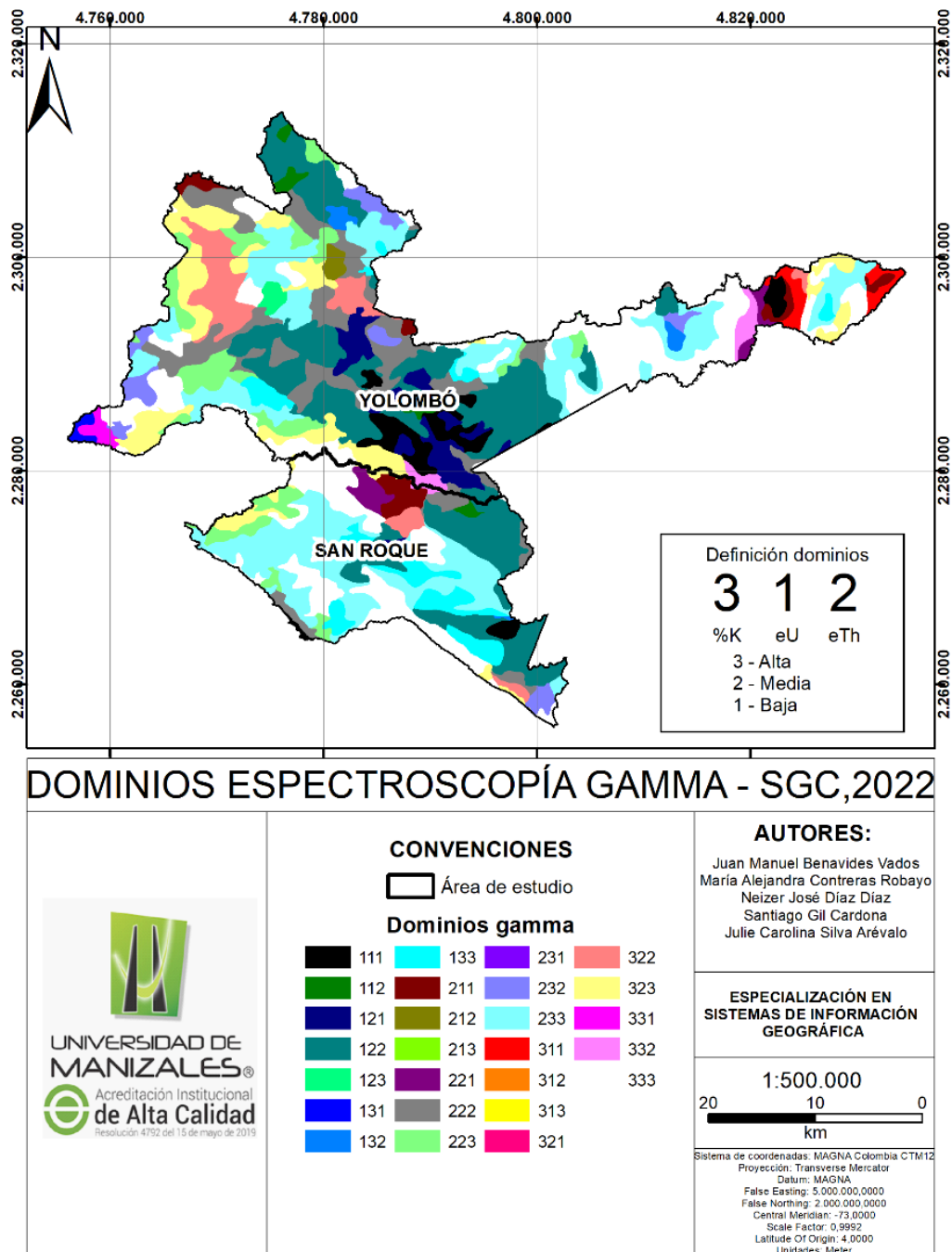
alrededor de vetas. El tipo de alteración hidrotermal predominante corresponde a la alteración potásica, caracterizada por la presencia de feldespatos potásicos y pirita diseminada.

De acuerdo con Shebl et al., (2023) una herramienta eficaz para detectar este tipo de alteración es el análisis de datos aeroradiométricos, los cuales permiten detectar variaciones en las concentraciones de elementos radiactivos como isótopos radiactivos de potasio (K), torio (Th) y uranio (U), mediante espectroscopía de rayos gamma, ya que, en la alteración potásica es característico el enriquecimiento de potasio en relación con el torio, debido a la mayor movilidad relativa de K frente al Th en los fluidos mineralizantes (Sampaio, Dutra, & Flores, 2024). Estos datos aeroradiométricos, al igual que la información magnetométrica, fueron obtenidos a través del Mapa de Anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales, elaborado por el Servicio Geológico Colombiano en 2022.

Para el análisis de la información radiométrica, se utilizó los dominios gamma-espectrométricos (ver Figura 15), definidos por el SGC (2023) esta entidad a través de “técnicas de análisis espacial multivariado, en donde se asignaron tres clases (alto, medio y bajo) a cada elemento radiométrico (K, U y Th), lo que permitió asignar una clase específica a cada celda, resultando en un total de hasta veintisiete combinaciones posibles de clases” (p. 21). El valor asignado a cada celda refleja la concentración relativa de los tres elementos, en ese orden: K, U y Th. Por ejemplo, la combinación 321 indica una celda con alta concentración de potasio, media de uranio y baja de torio.

**Figura 15**

*Dominios gamma espectrométricos definidos en el Mapa de anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales.*



Nota. Fuente: SGC (2023)

El procesamiento de esta variable consistió en la clasificación las celdas definidas por el SGC con el objetivo de asignar mayor valor a aquellas combinaciones que indicaran un

enriquecimiento de K, respecto al Th, calculando la razón entre estas dos variables (K/eTh) (ver Figura 16) ya que esto podría sugerir zonas con presencia de alteración potásica y, por ende, mayor favorabilidad para la mineralización. Los valores asignados a los dominios se consignan en la Tabla 8.

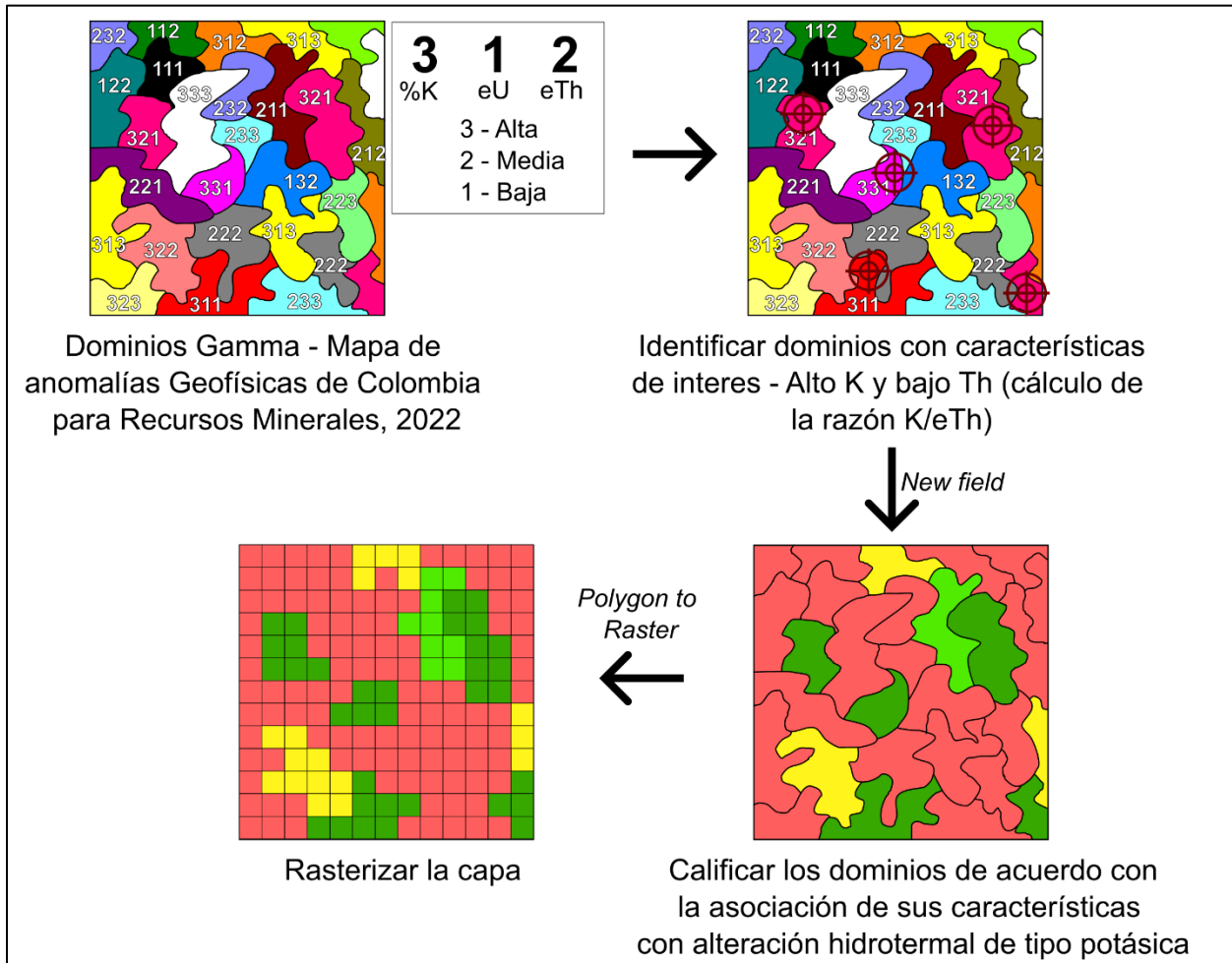
**Tabla 8**

*Calificación de la favorabilidad para la ocurrencia de depósitos minerales de acuerdo con la clasificación de dominios gamma espectrométricos.*

<b>Criterio</b>	<b>Calificación</b>
Celdas con una concentración alta de K y una concentración baja de Th – (relación K/eTh de 3)	5
Celdas con concentración media de K y concentración baja de Th (relación K/eTh de 2)	4
Celdas con concentración alta de K y concentración media de Th (relación K/eTh de 1,5)	3
Celdas con concentración baja de K	1

**Figura 16**

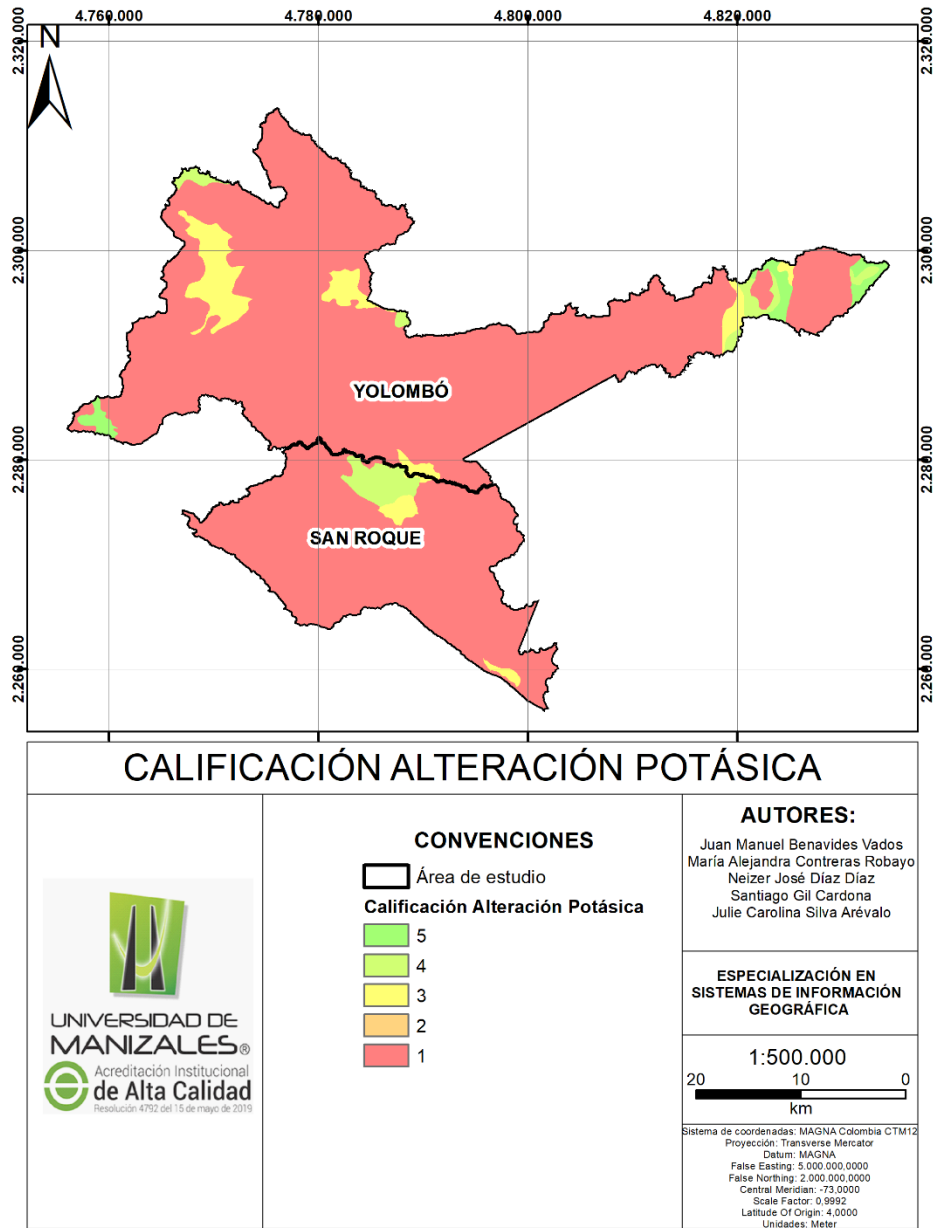
Procesamiento de la variable “Alteraciones hidrotermales”.



Finalmente, el procesamiento de la información de espectroscopia de rayos gamma generó como resultado una capa ráster que representa las zonas con mayor favorabilidad de presentar alteración potásica, asociada a mineralizaciones auríferas, de acuerdo con la proporción relativa de K y Th en los dominios establecidos por el SGC. Este resultado se presenta en la Figura 17 y fue una de las variables incorporadas en el modelo de superposición ponderada desarrollado en este proyecto.

**Figura 17**

*Resultado final del procesamiento de la variable “Alteración hidrotermal”.*

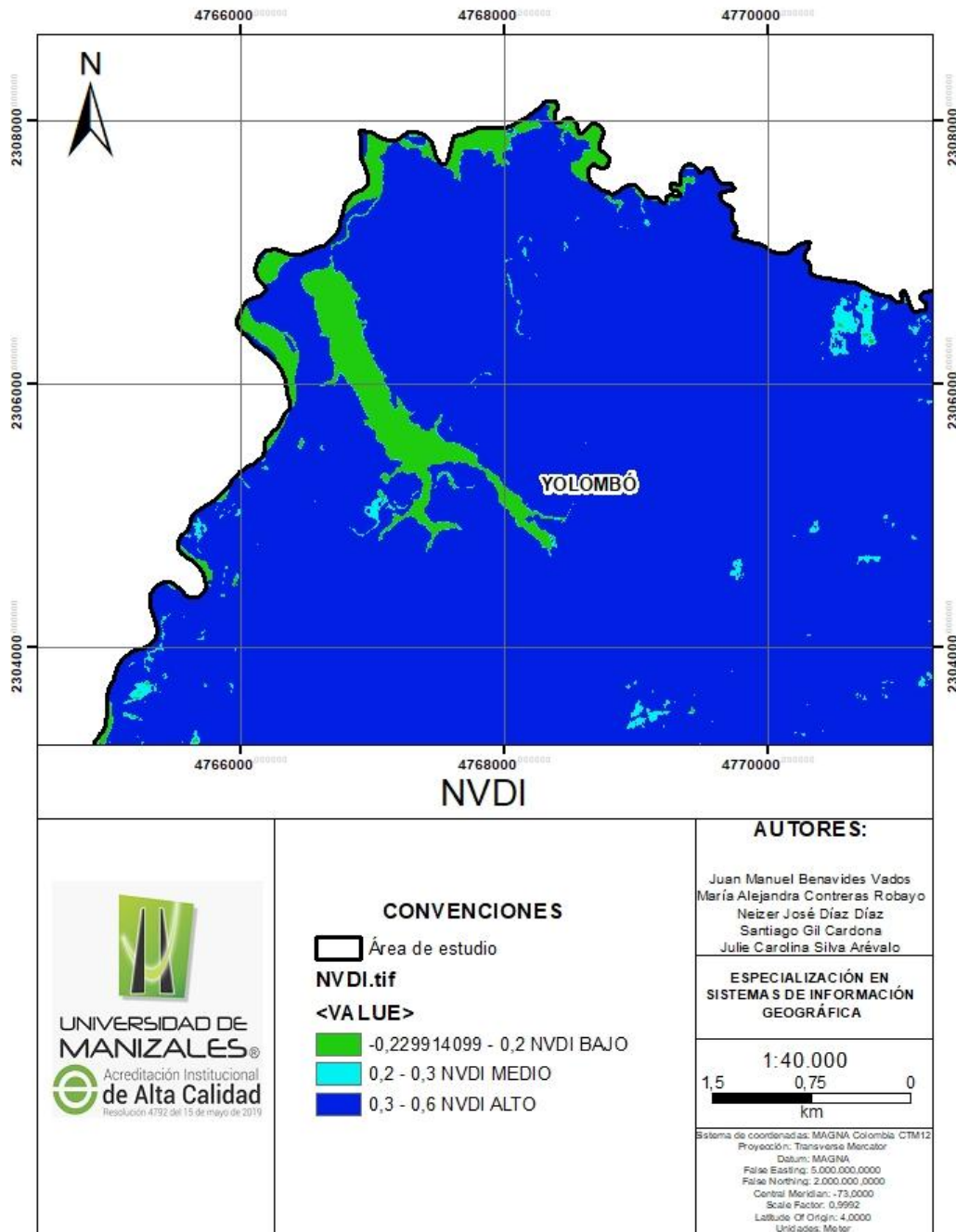


Cabe mencionar que, para el análisis de alteraciones hidrotermales, es útil el análisis de satelitales como ASTER y Sentinel-2 mediante metodologías como índices espectrales y análisis de componentes principales (PCA), con el objetivo de identificar zonas con presencia de minerales arcillosos producto de alteración hidrotermal, así como óxidos de hierro en el suelo.

En ese sentido, se utilizaron imágenes Sentinel-2 recortadas al área de estudio (municipios de San Roque y Yolombó) para calcular tres índices espectrales comúnmente empleados en estudios de prospección remota: NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el Ferric Oxide Index (Índice de óxidos férricos) el Clay Index (Índice de arcillas). Estos se calcularon utilizando la herramienta de *raster calculator* del software ArcGIS Pro. Para lo cual, estos índices proporcionan información complementaria sobre la cobertura vegetal y la posible presencia de minerales de alteración hidrotermal en superficie.

Sin embargo, para el caso particular de este estudio, existieron varios factores que limitaron la aplicabilidad de estos métodos en la zona de interés. En primer lugar, El NDVI, calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano (B8) y el rojo (B4) (ver Figura 18), presento valores en su mayoría cercanos a 0.6, lo cual indica una alta cobertura vegetal en la zona, lo que dificulta o impide la detección efectiva de firmas espectrales de los minerales presentes en el suelo o alteraciones geológicas superficiales.

**Figura 18**  
*Índice NVDI para el área de estudio.*

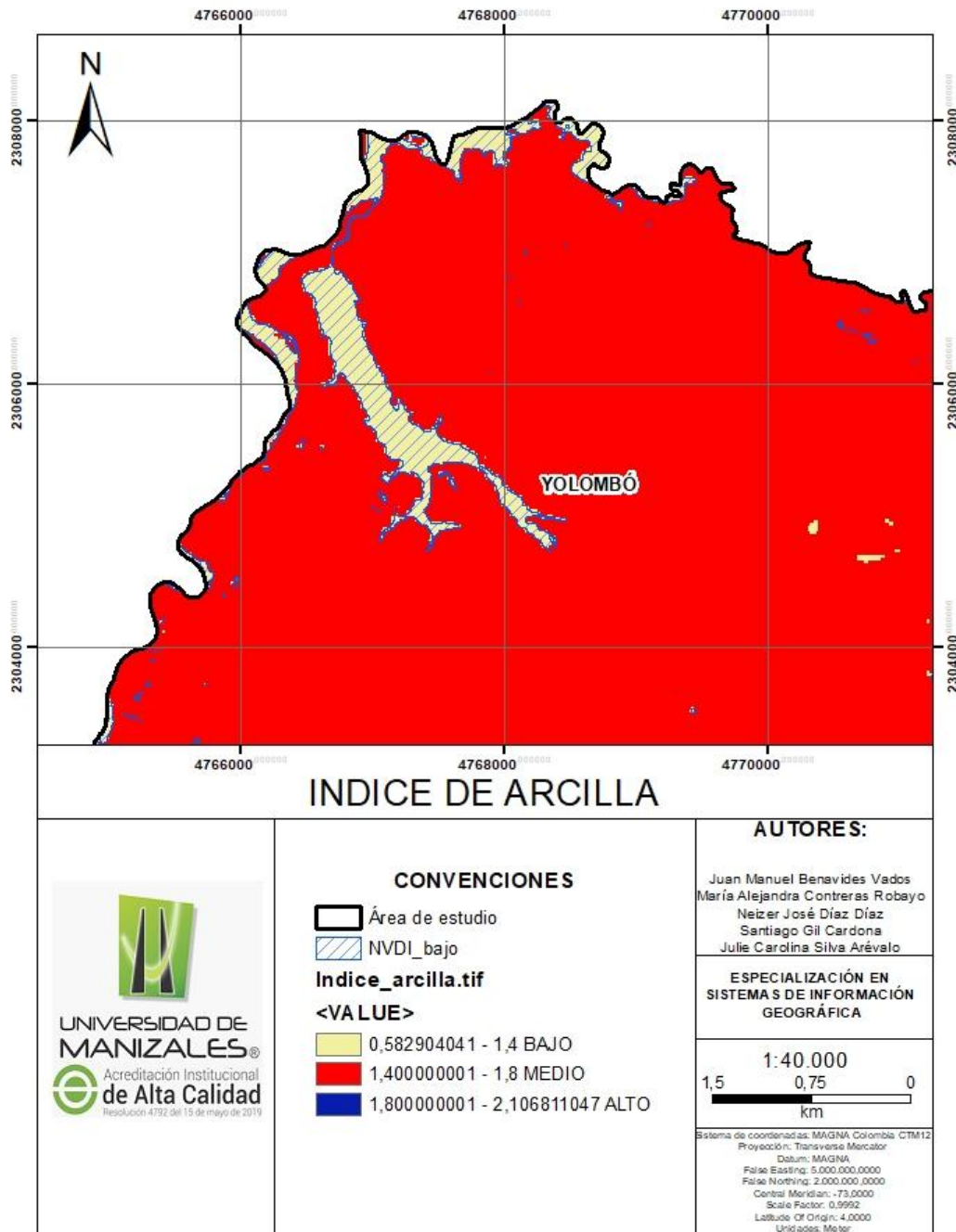


En segundo lugar, la detección de zonas de alteración hidrotermal a través de sensores remotos es posible gracias a la identificación de minerales arcillosos y minerales que contienen hidroxilo (OH), los cuales tienen propiedades diagnosticas de absorción espectral en el espectro visible, NIR y SWIR, como la sericita, ilita, alunita y kaolinita como lo menciona Sojdehee et al.

(2015). Sin embargo, los estudios previos en la zona de estudio indican que los yacimientos identificados no presentan una alteración hidrotermal extensa que favorezca el desarrollo de zonas con minerales arcillosos, como ocurre en los tipos de alteración propilítica, argílica o fílica. En cambio, la alteración predominante en la zona es de tipo potásico, la cual se manifiesta principalmente por la presencia de feldespato potásico y pirita. Estos minerales no presentan firmas espectrales distintivas en el rango de infrarrojo de onda corta (SWIR), según Deyell y Bluemel (2019), lo que dificulta su identificación mediante sensores ópticos y las imágenes satelitales utilizadas para el presente estudio.

Lo anterior se confirma a través del índice de arcillas (Clay Index), calculado como la razón entre las bandas SWIR B11 y B12 ( $B11/B12$ ), en el cual se evidenciaron sectores con valores bajos ( $<1,4$ ), los cuales coinciden espacialmente con las zonas que presentan un menor NDVI, indicadoras de suelos desnudos o con baja cobertura vegetal, como se observa en la Figura 19. Estos valores sugieren una baja presencia de minerales arcillosos asociados a alteración hidrotermal y, por lo tanto, se considera que este índice, en el contexto geológico de la zona de estudio, no permite identificar contrastes geológicos significativos para una prospección aurífera preliminar.

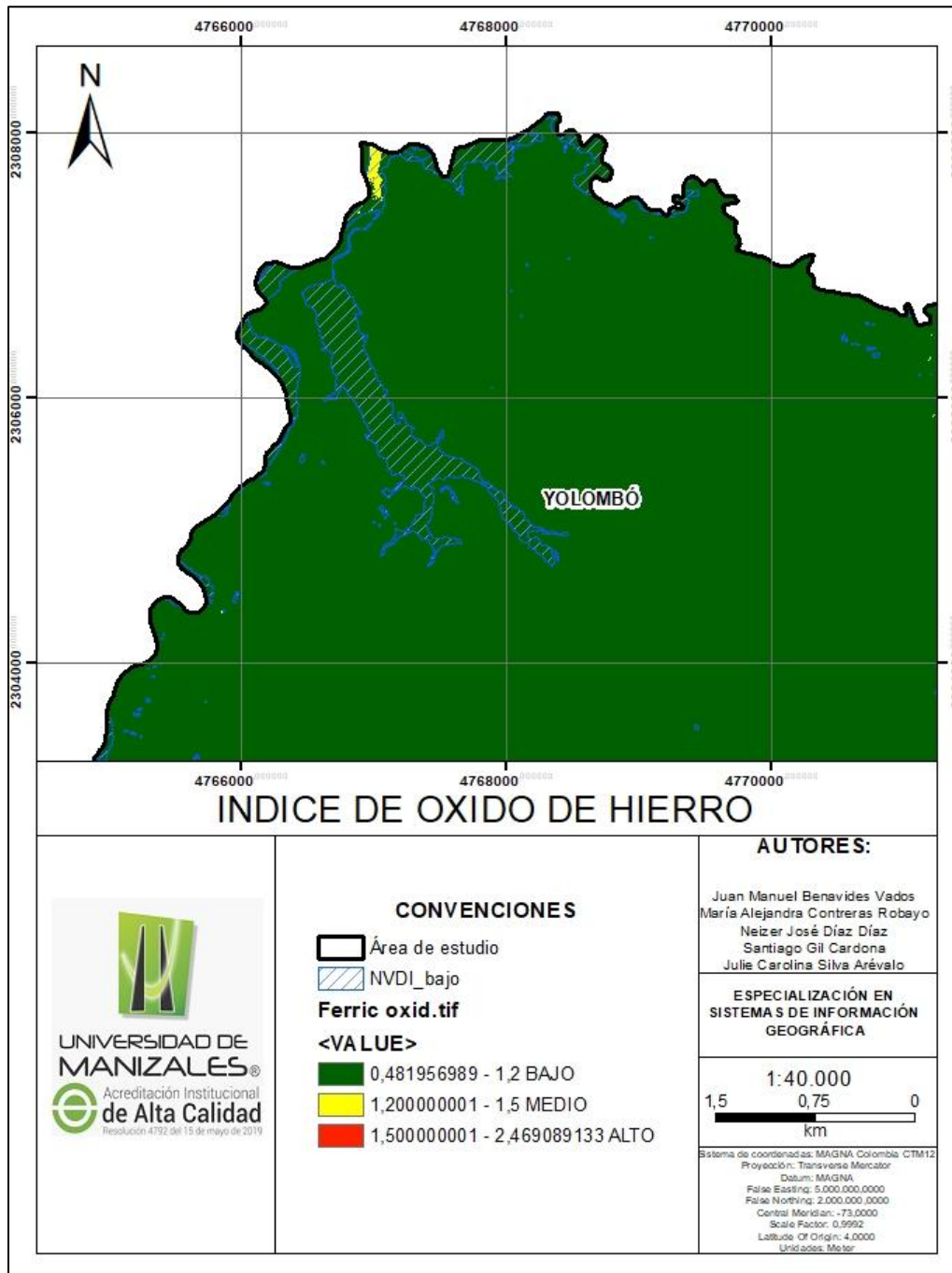
**Figura 19**  
*Índice de arcillas para el área de estudio.*



Finalmente, el índice de óxidos férricos (B4/B2) presentó valores concentrados alrededor de 0.6, sin contrastes significativos en el área de estudio como se observa en la Figura 20. Esto sugiere una ausencia de manifestaciones superficiales detectables de oxidación asociadas a mineralización, o bien una señal espectral atenuada por la densa cobertura vegetal y la resolución

espacial y espectral del sensor. En este contexto, el índice no resulta útil para identificar zonas alteradas en superficie ni establecer zonas prioritarias de interés para prospección aurífera.

**Figura 20**  
Índice de óxidos férricos en el área de estudio.



A partir del análisis de estos tres índices, se concluye que las imágenes Sentinel-2 no ofrecen, en este caso específico, una base confiable para la identificación preliminar de zonas auríferas, principalmente por la alta cobertura vegetal, y condiciones geológicas de la zona.

### **7.1.3 Integración de variables**

En general, los modelos de integración de datos espaciales mediante SIG son el resultado de la combinación de diferentes mapas o capas para generar un mapa de salida. De acuerdo con Bonham-Carter (1994)

estos modelos pueden ser categorizados en tres tipos dependiendo de la relación que expresan. En primer lugar, se encuentran los modelos mecanicistas, basados en teorías y principios físicos y químicos. En segundo lugar, los modelos empíricos, basados en observaciones de datos y que se clasifican a su vez es heurísticos, si se basan en reglas prácticas, o estadísticos, si se basan en análisis matemáticos para establecer la relación entre variables. Y finalmente, los modelos híbridos que mezclan los principios de teoría y empirismo.

Los modelos empleados para predecir recursos geológicos suelen ser de tipo empírico, estadísticos o heurísticos, ya que la complejidad de los factores fisicoquímicos que intervienen en la formación de estos recursos dificulta su predicción mediante teorías matemáticas. Dentro de los modelos empíricos, se distinguen dos tipos: los basados en el conocimiento, donde los parámetros se estiman según la opinión de un experto, y los basados en datos, que se obtienen mediante el análisis de las relaciones espaciales entre distintas capas de información

Por otra parte, Rigol et al., (2011), plantea que

Los modelos basados en el conocimiento emplean funciones como la lógica booleana o la suma ponderada, mientras que los modelos basados en datos utilizan técnicas estadísticas como la regresión múltiple, el análisis discriminante y redes neuronales. Entre estos métodos, la suma ponderada y la regresión múltiple son de los más utilizados debido a sus características.

En este estudio, la integración de variables geográficas se realizó mediante la ponderación simple, donde cada capa representa la favorabilidad a la presencia de oro para cada una de las variables analizadas previamente. Este enfoque se apoya en información secundaria y en el conocimiento adquirido a través de la investigación del contexto geológico y las características de las ocurrencias minerales. Para la determinación de los pesos de ponderación se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) el cual es una herramienta estructurada para la toma de decisiones complejas, que permite descomponer un problema en una jerarquía de elementos (objetivo, criterios, subcriterios y alternativas), y realizar comparaciones pareadas entre ellos para determinar su importancia relativa como lo menciona Maghsoudi et al. (2022). Se emplea principalmente para traducir juicios cualitativos sobre la importancia relativa de los elementos evaluados en una escala cuantitativa.

Maghsoudi et al. (2022) establece que este método utiliza una escala del 1 al 9 para expresar el grado de importancia relativa entre dos variables, en donde un valor de 1 indica igual importancia, mientras que un valor de 9 significa que una variable es extremadamente más importante que la otra. Sin embargo, cuantificar con exactitud la magnitud de la importancia relativa entre variables resulta subjetivo y difícil de justificar con evidencia empírica directa, por lo que el uso de una escala tan amplia podría inducir una falsa sensación de precisión o sobrevalorar juicios que, en realidad, se basan en estimaciones cualitativas.

Por este motivo se optó por una simplificación metodológica, empleando únicamente tres valores: 1, si las variables son igual de importantes; 2, si la primera variable es más importante que la segunda; y 0.5 en caso contrario. El uso de una escala reducida responde a un enfoque de minimización del sesgo en la ponderación, permitiendo que los pesos asignados reflejen de manera más equilibrada la contribución de cada variable sin exagerar diferencias que no están claramente justificadas desde el punto de vista geológico.

En la evaluación por pares se consideró que la variable más importante corresponde a la geoquímica, ya que indica directamente la presencia de oro y de elementos asociados a la mineralización. Por su parte, la detección de alteración potásica a través de la espectroscopía de rayos gamma se consideró como la segunda variable más relevante, debido a que permite

identificar zonas con enriquecimiento en potasio (K), lo cual se asocia al paso de fluidos hidrotermales y a la formación de alteración potásica.

A su vez, las estructuras geológicas se consideraron como la tercera variable más importante, ya que condicionan el emplazamiento del mineral al constituir posibles vías de circulación para los fluidos hidrotermales. Sin embargo, su presencia por sí sola no constituye una zona de interés, y requiere de otras características que indiquen la posibilidad de mineralización.

Las variables menos importantes para el modelo fueron, en primer lugar, la magnetometría, ya que las anomalías magnéticas no se asocian directamente con la presencia de oro, sino con minerales, como la magnetita o la pirrotita que, si bien pueden estar relacionados con los procesos hidrotermales, no siempre están presentes en zonas mineralizadas. No obstante, la aplicación de la textura magnética puede ser útil para identificar estructuras geológicas someras.

Finalmente, la litología se consideró como la variable de menor importancia, ya que es la que menos discrimina espacialmente dentro del área de estudio. Esto se debe a que las unidades geológicas donde se ha reportado la existencia de mineralización cubren gran parte del terreno analizado. Así mismo, la presencia de una unidad geológica particular no constituye por sí sola una zona de interés, aunque puede brindar una aproximación inicial que permita descartar unidades sin aptitud para contener mineralizaciones auríferas.

El método AHP se explica en detalle por Teknomo (2006). A partir de los juicios asignados, se construye una matriz de comparación por pares, la cual se muestra en la Tabla 9. Posteriormente, la matriz se normaliza, dividiendo cada valor por la suma de cada columna. El peso de ponderación se calcula promediando los valores de cada fila en la matriz normalizada (Tabla 10). Finalmente, se evalúa el índice de consistencia (CI) y la razón de consistencia (RC) para asegurar que los juicios emitidos son lógicamente coherentes; los cuales se calculan a partir del mayor valor propio de la matriz ( $\lambda_{max}$ ) siguiendo la Ecuación 1.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Ecuación 1. Ecuaciones de índice de consistencia y razón de consistencia.

Donde:

$\lambda_{max}$  corresponde al mayor valor propio de la matriz original

CI= índice de consistencia

CR=Razón de consistencia

n= número de criterios

RI= índice aleatorio (1,12 para n=5)

Un valor de CR menor a 0,1 indica una consistencia aceptable, lo cual se cumple para la matriz propuesta.

**Tabla 9**

*Matriz de comparación para las diferentes variables utilizadas, método AHP.*

<b>Criterio</b>	<b>Geoquímica</b>	<b>Alteración</b>	<b>Estructuras</b>	<b>Magnetometría</b>	<b>Litología</b>
Geoquímica	1	2	2	2	2
Alteración	0.5	1	2	2	2
Estructuras	0.5	0.5	1	2	2
Magnetometría	0.5	0.5	0.5	1	2
Litología	0.5	0.5	0.5	0.5	1

**Tabla 10**

*Matriz normalizada y cálculo del peso de ponderación de cada variable.*

<b>Criterio</b>	<b>Geoquímica</b>	<b>Alteración</b>	<b>Estructuras</b>	<b>Magnetom.</b>	<b>Litología</b>	<b>Peso Pond.</b>
Geoquímica	0.333	0.444	0.333	0.267	0.222	<b>0.320</b>
Alteración	0.167	0.222	0.333	0.267	0.222	<b>0.242</b>
Estructuras	0.167	0.111	0.167	0.267	0.222	<b>0.187</b>
Magnetom.	0.167	0.111	0.083	0.133	0.222	<b>0.143</b>
Litología	0.167	0.111	0.083	0.067	0.111	<b>0.108</b>

Razón de consistencia: 0.04

Finalmente, se aplicó la metodología de superposición ponderada por medio de la herramienta Raster Calculator de ArcGIS Pro, de acuerdo con los pesos ponderados estimados a través de la metodología AHP, resultando en la siguiente Ecuación 2.

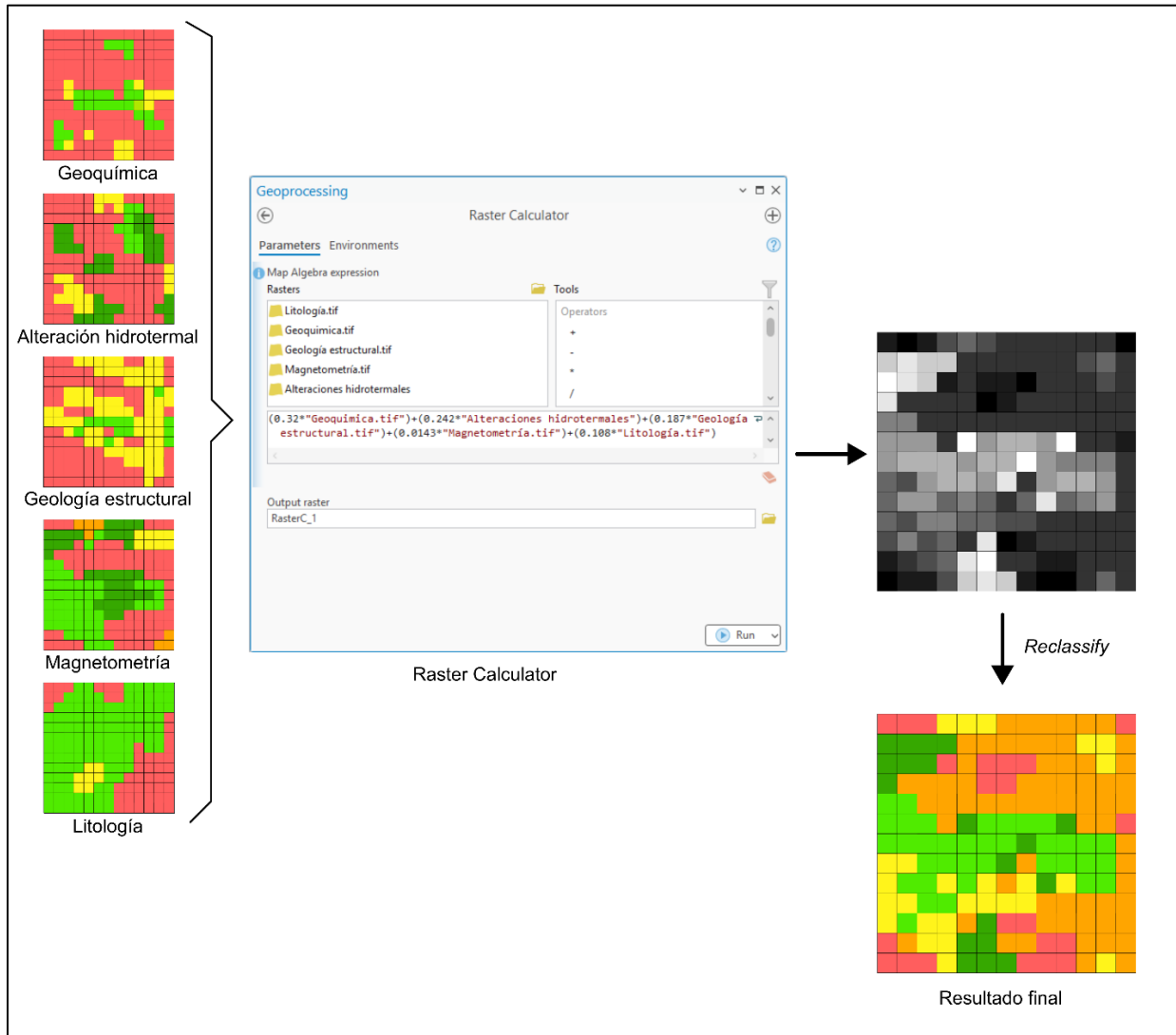
$$Pot_{Au} = 0.32Gq + 0.242Alt + 0.187GEst + 0.143Mag + 0.108Lit$$

Ecuación 2. Ecuación de modelo ponderado

El proceso final consistió en realizar la suma ponderada utilizando la herramienta Raster Calculator, disponible en el software ArcGIS Pro. Para ello, se emplearon los rásteres resultantes del procesamiento de cada una de las variables como datos de entrada en la ecuación presentada en el capítulo anterior (ver Ecuación 2). Este procedimiento se detalla en la Figura 21.

**Figura 21**

*Procedimiento para la integración de las variables a través de una suma ponderada.*



## 8 Resultados

Este capítulo presenta los hallazgos obtenidos a lo largo del desarrollo del proyecto, en el que se cumplió con la búsqueda y análisis de información geográfica y científica, alcanzando el primer objetivo propuesto, en el que se incluyeron capas temáticas en formatos vectoriales y ráster correspondientes a información geológica, geoquímica y geofísica, tales como litología, estructuras geológicas, concentración de elementos en sedimentos activos, magnetometría y espectroscopía gamma, cuyo análisis dio como resultado la identificación de cinco variables claves como se muestra en la Tabla 11, que condicionaron la presencia de mineralizaciones auríferas en la zona de estudio: litología, estructuras geológicas, geoquímica, magnetometría y alteración hidrotermal.

**Tabla 11**

*Resultado de la ponderación de variables.*

<b>Criterio</b>	<b>Peso Ponderado</b>
Geoquímica	<b>0.320</b>
Alteración	<b>0.242</b>
Estructuras	<b>0.187</b>
Magnetometría	<b>0.143</b>
Litología	<b>0.108</b>

Seguidamente, para el cumplimiento del segundo objetivo, las variables nombradas anteriormente en la Tabla 11 fueron procesadas mediante el software ArcGIS Pro cumpliendo con la metodología propuesta de reclasificar, obteniendo como resultado las capas ráster con características y criterios técnicos definidos y basados en información científica que respaldando así a cada una de las capas ráster una escala de favorabilidad de 1 a 5 como se muestra en la siguiente Tabla 12.

**Tabla 12**

*Resultados del procesamiento de las variables a datos ráster con pesos de favorabilidad.*

<b>Criterio</b>	<b>Variables</b>	<b>Peso de favorabilidad</b>
Litología	Batolito antioqueño, Batolito de Segovia y rocas metamórficas a distancias menores a 2 km del límite con las unidades ígneas	<b>5</b>
	Otras rocas ígneas intrusivas cretácicas y pegmatitas.	<b>3</b>
	Depósitos sedimentarios, rocas sedimentarias y rocas metamórficas a una distancia mayor a 2 km de las unidades ígneas.	<b>1</b>
Estructuras	Zona de influencia de fallas conjugadas a fallas principales y fallas menores asociadas	<b>5</b>
	Zona de influencia de fallas regionales	<b>3</b>
	Zona de influencia de fallas con direcciones diferentes y no relacionadas a las fallas regionales	<b>1</b>
	Zonas externas a las áreas de influencia de las fallas	<b>1</b>
Alteración	Dominios con intensidad magnética alta y textura magnética rugosa	<b>5</b>
	Dominios con intensidad magnética media y textura magnética rugosa o intensidad magnética alta y textura magnética media	<b>4</b>
	Dominios con intensidad y rugosidad magnética media	<b>3</b>
	Dominios con intensidad magnética alta y rugosidad magnética suave	<b>2</b>
	Dominios con intensidad magnética baja	<b>1</b>
Magnetometría	Dominios con intensidad magnética alta y textura magnética rugosa	<b>5</b>
	Dominios con intensidad magnética media y textura magnética rugosa o intensidad magnética alta y textura magnética media	<b>4</b>
	Dominios con intensidad y rugosidad magnética media	<b>3</b>
	Dominios con intensidad magnética alta y rugosidad magnética suave	<b>2</b>
	Dominios con intensidad magnética baja	<b>1</b>
Geoquímica	Zonas identificadas por el SGC como con potencial geoquímico de Au - y zonas con anomalía geoquímica de oro	<b>5</b>
	Zona que cuenten con una presencia de anomalías de As, Bi y Sb, o al menos dos de estos elementos	<b>4</b>

Zona que cuenten con una presencia de anomalías de uno de los elementos asociados al depósito (As, Bi, Mo)	<b>3</b>
--	----------

---

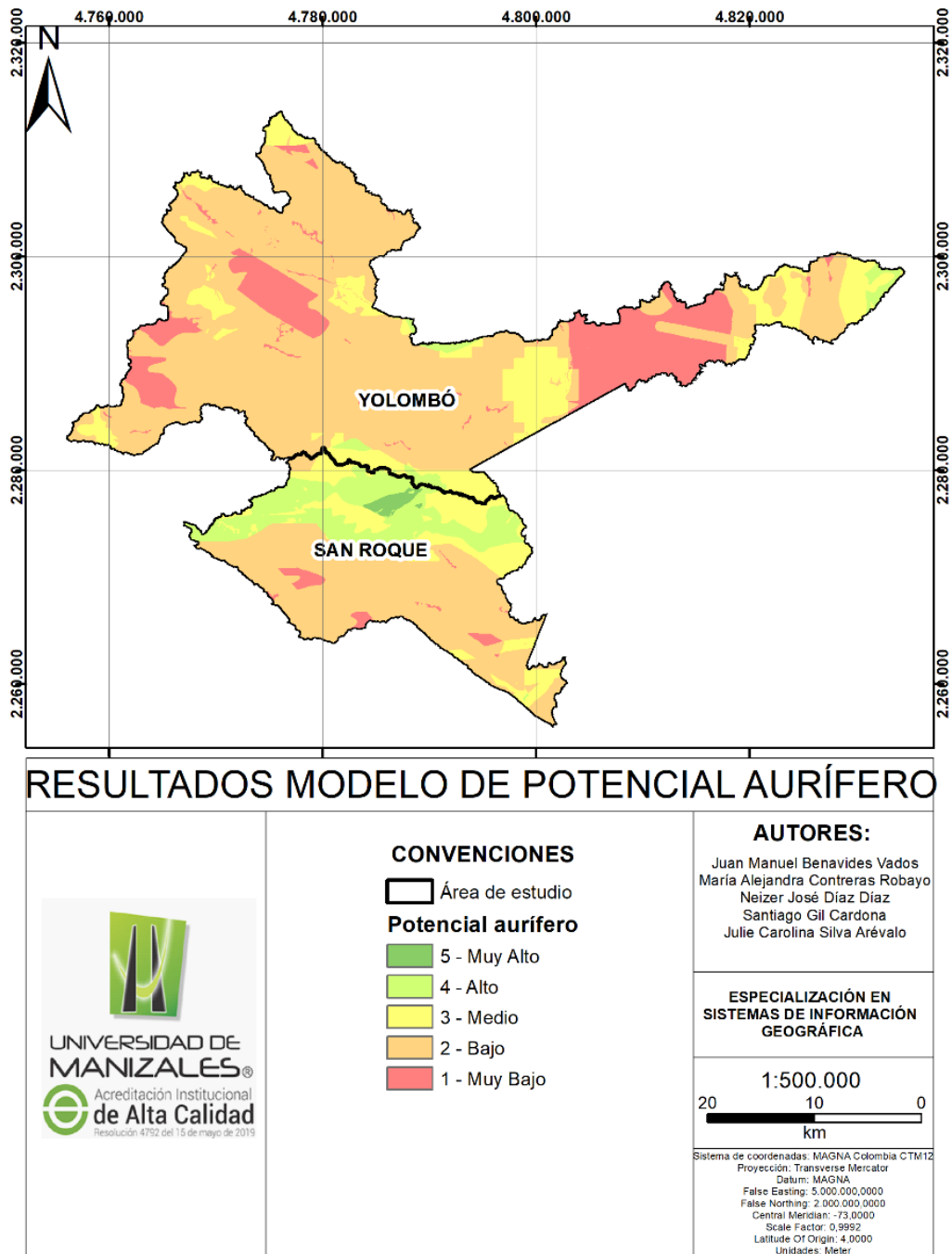
Zona que cuenten con ausencia de anomalías geoquímicas de elementos relacionados al depósito o no cuenten con información geoquímica	<b>1</b>
--	----------

---

Finalmente, en cumplimiento del tercer objetivo, mediante el software ArcGIS Pro, los rasters resultantes fueron integrados mediante una suma ponderada, con pesos asignados según la metodología AHP, con el fin de establecer la importancia relativa de cada variable y delimitar las zonas con mayor favorabilidad minera. Para lo cual se obtuvo como resultado la identificación de sectores con favorabilidad de mineralización aurífera la cual se evidencia en la Figura 22, cuya representación permite localizar para el municipio de San Roque, específicamente en el sector norte centro en límites con el municipio de Yolombó, cuya área destaca la confluencia de litologías y estructuras favorables para la mineralización aurífera.

**Figura 22**

*Resultado final de la suma ponderada de variables.*

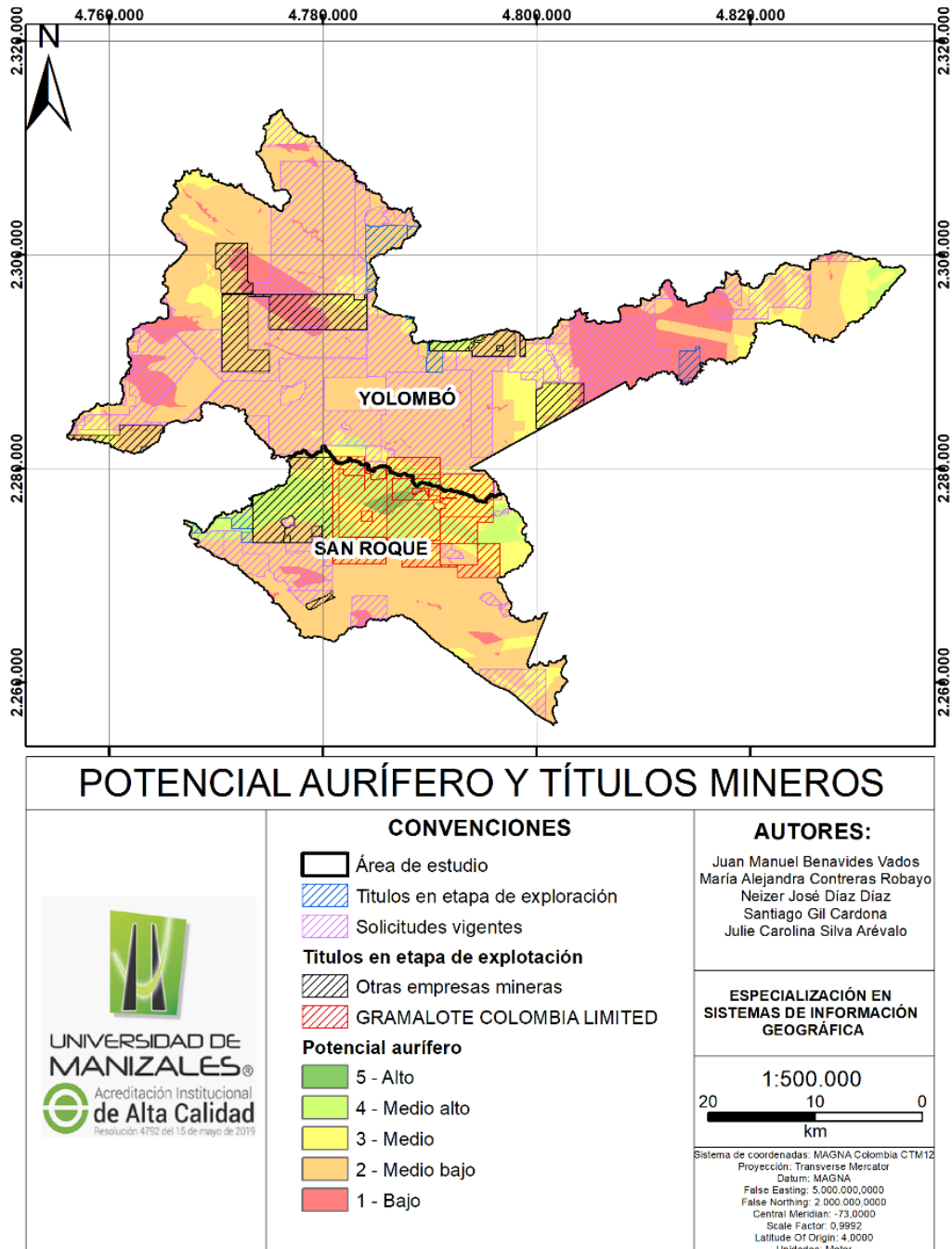


Al comparar el ráster resultante del proceso de superposición ponderada con la distribución actual de los contratos de concesión minera en el área de estudio, cuyo mineral principal de explotación es el oro, ver

Figura 23, se observa una correlación significativa, ya que la mayor concentración de áreas tituladas coincide con las zonas identificadas con mayor potencial, al norte del municipio de San Roque, donde además se ubica el Proyecto Minero Gramalote.

**Figura 23**

*Comparación entre el resultado final del modelo y la distribución de títulos mineros de oro en la zona de estudio.*



**Tabla 13**

*Comparación de los resultados del modelo y las áreas con títulos mineros.*

Municipio	Zonas de Potencial aurífero	Área Total (Km2)	% del área del municipio	Área en títulos vigentes en etapa de explotación y construcción		
				Km2	% de la zona de potencial	# Títulos
San Roque	5 – Muy alto	6,52	1,54	6,46	99,11	1
	4 – Alto	99,2	23,36	76,75	77,38	5
	3 – Medio	78,34	18,45	46,99	59,99	5
	2 – Bajo	229,54	54,07	33,57	14,63	8
	1 – Muy bajo	10,96	2,58	0,05	0,46	2
Yolombó	5 – Muy alto	0	0	0	0	0
	4 – Alto	17,72	1,75	7,45	42,06	2
	3 – Medio	146,25	14,45	31,17	21,31	9
	2 – Bajo	679,46	67,15	66,63	9,81	10
	1 – Muy bajo	168,38	16,64	20,88	12,4	7

Al analizar los resultados obtenidos mediante la comparación entre el modelo de favorabilidad y la distribución de títulos mineros vigentes, se observa una relación clara entre las zonas clasificadas con mayor potencial y las áreas actualmente explotadas.

La Tabla 13 muestra el detalle de esta comparación. Para el municipio de San Roque, se evidencia que las zonas con favorabilidad muy alta (nivel 5) representan un área total de 6,52 km<sup>2</sup>, equivalente al 1,54 % del territorio municipal, de las cuales el 99,11 % ya se encuentra cubierta por títulos mineros vigentes. De manera similar, las zonas con favorabilidad alta (nivel 4) cubren 99,2 km<sup>2</sup>, es decir, el 23,36 % del municipio, y presentan un 77,38 % de su superficie titulada. En contraste, las zonas con favorabilidad media y baja (niveles 3 y 2) abarcan áreas mayores, aunque su porcentaje de cobertura por títulos mineros disminuye progresivamente.

Por su parte, en el municipio de Yolombó se observa una tendencia distinta. No se identificaron áreas con favorabilidad muy alta (nivel 5), mientras que las zonas con favorabilidad alta (nivel 4) representan apenas 1,75 % del municipio, de las cuales el 42,06 % se encuentra titulada. Las zonas con favorabilidad media (nivel 3) abarcan el 14,45 % del municipio, con un 21,31% de cobertura en títulos, lo que evidencia oportunidades potenciales de exploración. Las

zonas clasificadas con favorabilidad baja y muy baja cubren la mayor proporción del territorio, aunque con porcentajes de titulación más reducidos.

En conjunto, estos resultados reflejan la validez del modelo al mostrar una correspondencia notable entre las zonas con mayor favorabilidad y las áreas actualmente tituladas. Además, destacan sectores con potencial medio y alto sin títulos mineros vigentes, lo que abre la posibilidad de orientar futuros esfuerzos de exploración hacia estas áreas estratégicas.

Adicionalmente, los resultados evidencian la existencia de áreas con potencial medio a alto que actualmente no se encuentran tituladas, lo que sugiere que podrían representar nuevas zonas de interés para futuros programas de exploración detallada. Estas áreas podrían constituir oportunidades estratégicas para la expansión de actividades mineras, siempre que se acompañen de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de mayor resolución que confirmen su potencial económico.

## 9 Discusión

El presente estudio demuestra que la integración de variables geológicas, geoquímicas y geofísicas mediante técnicas de análisis espacial en un entorno SIG permite generar una aproximación confiable para identificar zonas con posible potencial aurífero. La metodología aplicada, basada en un modelo de superposición ponderada, logró delimitar áreas favorables en los municipios de San Roque y Yolombó, lo cual valida la aplicabilidad de enfoques multicriterio para la prospección minera. Esto es consistente con el estudio realizado por Alemu et al. (2023) donde se integraron datos de varias variables en un modelo SIG y se aplicó un modelo de superposición ponderada para mapear zonas con prospección minera en Etiopía, generando resultados que fueron validados mediante la verificación en campo.

Uno de los principales aportes de esta investigación es la selección y ponderación de variables clave: unidades geológicas, estructuras geológicas, geoquímica de sedimentos activos, anomalías magnéticas y alteraciones hidrotermales. Estas variables fueron escogidas debido a que se asocian a los procesos geológicos responsables de la mineralización aurífera en la región, y, además, debido su disponibilidad, accesibilidad en el contexto de esta región, alineándose con experiencias similares descritas en la literatura. Tal como lo respalda el estudio realizado por Nólvez-González et al. (2023) en el que se integraron variables geoquímicas, magnéticas y de alteración hidrotermal mediante técnicas multicriterio en entorno SIG y logró delimitar zonas con alta probabilidad aurífera en concordancia con depósitos conocidos.

En particular, la relevancia del Batolito Antioqueño y el Batolito de Segovia como unidades geológicas con alta favorabilidad coincide con observaciones de estudios previos que relacionan las fases finales de cristalización de cuerpos ígneos con procesos de alteración hidrotermal y formación de depósitos auríferos. Asimismo, el control estructural de las mineralizaciones, destaca el papel de zonas distensivas conjugadas como focos de precipitación de minerales. Esto se ratifica en el estudio realizado por Ordóñez-Carmona et al (2005) quienes analizaron el distrito minero Segovia–Remedios y evidenciaron que las vetas auríferas se alojan en zonas de cizalla afectadas por fracturamientos conjugados que facilitaron la circulación de fluidos hidrotermales, promoviendo la precipitación de minerales metálicos. Estas observaciones refuerzan la

interpretación del modelo planteado, donde la interacción entre estructuras favorables y la evolución magmática tardía cumple un papel fundamental en la generación de zonas con alto potencial aurífero.

La aplicación metodológica de superposición ponderada para generar salidas en formato ráster a partir de datos vectoriales cuyas variables fueran clasificadas en rangos de 1 a 5 según su favorabilidad, permitió la estandarización de datos heterogéneos y facilitó su comparación espacial. Esta decisión metodológica, inspirada en Correa y Rojas (2017), mostró ser adecuada para identificar patrones coherentes de distribución de favorabilidad aurífera y para generar un producto cartográfico útil para la toma de decisiones.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del modelo, principalmente relacionadas con la disponibilidad y resolución de la información base. En algunos casos, la información utilizada no cuenta con una cobertura completa del área de estudio o se realizan a una escala poco detallada, como es el caso de los datos geoquímicos y geofísicos. Adicionalmente, no fue posible el análisis de alteraciones hidrotermales a través de imágenes satelitales ópticas debido a condiciones específicas del terreno que limitaban su aplicación, como la alta cobertura vegetal, la ausencia de alteraciones hidrotermales con una distribución amplia y con minerales característicos e identificables; y la ausencia de anomalías detectables de óxido de hierro en el suelo. Así lo ratifica el estudio de Sánchez -Medina et al. (2020) en el estudio realizado para Área Cuprite en Nevada, EEUU, donde se evaluó la utilidad de imágenes sentinel-2 para mapear minerales con hierro y se encontraron limitaciones en la detección de minerales oxidados especialmente en zonas homogéneas o con interferencias atmosféricas y vegetación densa. Sin embargo, la aplicación de los datos de espectroscopia de rayos gamma demostró ser útil para la identificación de la alteración potásica, la cual fue descrita como una alteración característica de los depósitos identificados en la región.

## 10 Conclusiones

El desarrollo de una metodología basada en SIG para la identificación de zonas con potencial aurífero en los municipios de San Roque y Yolombó permitió cumplir con el objetivo general del presente trabajo, al integrar de manera estructurada información geológica, geoquímica y geofísica para construir un modelo predictivo de posible favorabilidad minera.

La clasificación y análisis de la información temática y espacial, obtenida de fuentes oficiales como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Agencia Nacional de Minería (ANM), y datos del Proyecto Minero Gramalote, aportaron insumos claves para el desarrollo del análisis multicriterio. Este conocimiento del contexto geológico y minero de la zona de estudio permitió la identificación final de cinco variables: unidades geológicas, geología estructural, geoquímica de sedimentos activos, anomalías magnéticas y alteración hidrotermal.

El procesamiento y clasificación de estas variables, para la aplicación de un método de superposición ponderada en entorno SIG y del cruce de las cinco variables, se logró identificar zonas con alto nivel de favorabilidad aurífero en los municipios de Yolombo y San Roque. Este producto constituye un insumo estratégico que puede apoyar la toma de decisiones en priorización de zonas para exploración detallada e implementación de políticas de formalización minera.

El enfoque metodológico adoptado demuestra la utilidad de integrar técnicas de análisis espacial con criterios geocientíficos en territorios que se pueden configurar en áreas con potencial minero. La replicabilidad de este modelo en otras regiones del país por parte de las diferentes comunidades u organizaciones ofrece una herramienta valiosa para fortalecer la planificación minera sostenible y la focalización territorial de estrategias de desarrollo.

La correspondencia observada entre las zonas de mayor favorabilidad identificadas por el modelo y las áreas actualmente concesionadas para explotación aurífera respalda la validez del enfoque aplicado. Esto permite concluir que la metodología propuesta logró identificar de manera efectiva zonas con alto potencial aurífero, contribuyendo al avance de estudios de exploración minera basados en SIG.

## 11 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y del análisis metodológico realizado, se derivan diversas recomendaciones orientadas a fortalecer futuras investigaciones, así como a apoyar la toma de decisiones en procesos de planificación minera sostenible.

Se recomienda para este tipo de proyectos incorporar información a una escala detallada (1:25.000) para datos geológicos, geoquímicos y geofísicos, cuyas coberturas permiten refinar el modelo predictivo y reducir la incertidumbre en la delimitación de zonas con potencial aurífero.

Se recomienda validar en campo las áreas clasificadas como altamente favorables mediante estudios directos, como muestreo geoquímico, análisis petrográficos, ensayos geofísicos y muestreos de suelos y perforaciones. Estas acciones contribuirían a comprobar la eficacia del modelo y ajustar los pesos asignados a las variables. Asimismo, es pertinente incorporar nuevas variables, como la gravimetría y la geoelectrónica, las cuales podrían complementar el análisis espacial y mejorar la capacidad predictiva del enfoque utilizado.

Se sugiere la aplicación de esta metodología en el territorio nacional, dado que permite optimizar recursos y tiempo, además de facilitar el análisis en zonas de difícil acceso y/o con restricciones por orden público. Adicionalmente, es un ejercicio que no afecta al medio ambiente y, por el contrario, genera información que contribuye a su preservación.

Pese a las limitaciones identificadas, se considera que el enfoque adoptado es replicable en otros territorios y puede enriquecerse mediante la incorporación de nuevas variables y refinarse a medida que se cuente con información más detallada del área de análisis.

Finalmente, la información generada por el modelo puede servir como insumo para la aplicación de estrategias que fortalezcan los procesos de planificación minera sostenible y para focalizar iniciativas de formalización minera, en concordancia con los lineamientos del Plan Único de Legalización y Formalización Minera.

## 12 Referencias

- Alemu, B., Nigussie, T., & Alebachew, A. (2023). Application of GIS-based multi-criteria decision analysis for gold potential mapping: A case study from Adola gold field, southern Ethiopia. *Heliyon*.
- Anglo Gold Ashanti. (2018). *Modificación de la Licencia Ambiental del Proyecto Gramalote*. Medellín, Colombia.
- AngloGold Ashanti. (2015). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minero Gramalote TM 14292*.
- ANM. (s.f.). *ANNA MInería - Visor Geográfico*. Obtenido de Ministerio de Minas y Energía: <https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt&locale=es-CO&appAcronym=sig>
- ASGMI. (2013). *Asociación de servicios de Geología y Minería Iberoamericanos*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/729131603/Manual-Methodologias-Geoquimicas-ASGMI>
- Baker, T., Pollard, P. J., Mustard, R., Graham, I., & Blevin, P. (2005). Altered intrusions in eastern Australia: Intrusion-related gold systems or not? *Economic Geology*, 1201–1220.
- Banco de la República de Colombia. (01 de 10 de 2024). *Banco de la República*. Obtenido de <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/precios-del-dia-para-el-gramo-oro-plata-y-platino>
- Boggs, S. (2012). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Pearson Education.
- Bolaños, J. A. (2022). *Asistencia practica en SIG y labores mineras para las minas del proyecto Segovia - Remedios, Departamento de Antioquia*. Bogotá.
- Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon, Elsevier Science Ltd., 398p.
- Cajicá, L., & Sánchez, H. (2024). Modelamiento geoestadístico de variables geoquímicas en exploracion de depósitos minerales tipo pórfido de cobre utilizando simulación por bandas rotantes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 42-51.
- Campuzano, R. (1993). *Bibliografía de la historia minera colombiana: balance y perspectiva*.
- Carmona, L. S., & Manco, Y. E. (2021). San Roque - Antioquia (Colombia). Un territorio entre lo privado y lo tradicional. (E. Territoriales, Ed.) *Ciudad y territorio*, 875 - 886. doi:<https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.206.10>

- Carranza, E. J. (2009). *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Elsevier.
- Changwon Lee, H.-J. O.-J.-G. (Abril de 2019). Three-dimensional prospectivity mapping of skarn-type mineralization in the southern Taebaek area, Korea. *Revista árabe de geociencias*, 12:332.
- Colombia, Congreso de Colombia. (1991). *Constitución Política de Colombia*.
- Colombia, Congreso de Colombia. (2001). *Ley 685 de 2001 por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá.
- Correa, C. X., & Rojas, J. E. (2017). *ANÁLISIS MULTICRITERIO EN SIG PARA LA PROSPECCIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES AURÍFEROS*.
- Dávila, J. (2011). *Diccionario geológico*. Lima: Arth Grouting S.A.C.
- Deyell, C., & Bluemel, E. (2019). Mapping potassic alteration in porphyry Cu deposits: An integrated approach using hyperspectral techniques and multi-element analyses. *SEG*.
- Diaz Yam Zul , E. O., & Paco, M. M. (2023). Meteorización de las rocas. Parte 1: Descomposición. *Revista Universitarios Potosinos*, 7-7.
- Dirección de Estudios y Políticas Públicas. (09 de 2022). *Notas del mercado del oro*. Obtenido de Notas del Mercado: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Nota%20del%20mercado%20del%20Ooro.pdf>
- Dominguez Bravo, J. (2000). *Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG)*. Madrid: CIEMAT.
- ESRI. (s.f.). *Diccionario SIG*. Obtenido de ESRI: <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/weighted-overlay>
- Evans, A. M. (1993). *Ore geology and industrial minerals: An introduction (3ª ed.)*. Blackwell Science.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. New York: Cambridge University Press.
- Gallard, M., Urbina, N., & Srouga, P. (2009). Geoquímica prospectiva de superficie del sector sureste del distrito aurífero La Carolina, San Luis, Argentina. *XII Congreso Geológico Chileno*. Santiago.
- Garzón, D. (30 de 03 de 2024). *Infobae*. Obtenido de Vender sus joyas de oro puede ser rentable actualmente: está en uno de sus precios más altos históricos:

- <https://www.infobae.com/colombia/2024/03/31/vender-sus-joyas-de-oro-puede-ser-rentable-actualmente-esta-en-uno-de-sus-precios-mas-altos-historicos/>
- Ghoneim, S. M., Abdelrahman, K., & S. Fnaisy Amir, M. (2024). Integración de datos geofísicos y de teledetección para el mapeo de localidades con potencial mineral de oro en el área de Abu Marawat, desierto oriental central, Egipto. *Scientific reports*.
- González, H. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia: Memoria explicativa (Escala 1:400.000)*. INGEOMINAS.
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow, *Annals of GIS. Taylor & Francis Online*, 15(1), 3-9.
- González, H. (2001). *Mapa geológico del departamento de Antioquia: Memoria explicativa (Escala 1:400.000)*. INGEOMINAS.
- Guilbert, J. M., & Park, C. F. (1986). *The geology of ore deposits* (2<sup>a</sup> ed.). W. H. Freeman.
- Harris, J., Wickert, L., & Grunsky, E. (2015). *Data- and knowledge-driven mineral prospectivity maps for Canada's North*. *Ore Geology Reviews*.
- Hart, C. J. (2007). Reduced intrusion-related gold systems. En W. D. Goodfellow (Ed.), *Mineral Deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada*, 95–112.
- Haudarian, M., Karimpour, M., & Malekzadeh, A. (2009). The exploration of gold by magnetic method in Hired Area, South Khorasan, a case study. *Journal of the Earth & Space Physics. Vol.35, No.4*, 34-44.
- Holland & Knight. (2023). *Conceptos jurídicos de la Agencia Nacional de Minería en Colombia*. INGEOMINAS. (2009). *Mapa de Anomalías Geoquímicas de Colombia. Escala 1:500.000*.
- Lang, J., & Baker, T. (2001). Intrusion Related Gold Systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita*, 477-489.
- Leal Mejía, H., & Melgarejo, J. (2008). Ore Mineral Paragenesis of the Gramalote Gold Deposit, Colombia. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 139-140.
- Lee, K., Oon, F., Maksimova, E., Hufnagel, C., & Shettel, N. (2024). Estudio geofísico basado en gravimetría híbrida utilizando mediciones relativas y un gravímetro atómico como referencia absoluta. *Sci Rep*, 14.

- Maghsoudi, F., Abbaszadeh, A., Van Ruitenbeek, F., Hewson, R., & Van Der Meijde, M. (2022). Evaluation of the modified AHP-VIKOR for mapping and ranking copper mineralized areas, a case study from Jerman metallogenic belt, SE Iran. *Arabian Journal of Geosciences* .
- Mena, N. (2009). Modelo unificado para la gestion de inforamación en una infraestructura nacional de datos espaciales. *Acimed*, 1-14.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, M. d. (octubre de 2019). Documento de investigacion cientifica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera y la explotación ilicita de minerales, en los ecosistemas del territorio colombiano. Bogota D.C., Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario técnico minero*.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Nólvez-González, A., Rivas-González, I., Benavides-Castejón, A., & Duarte-Múnera, A. (2023). Predictive Mapping of Prospectivity for Gold in the Central Portion of the Tapajós Mineral Province, Brazil. *Minerals*, 13.
- Ordóñez-Carmona, O., Valencia-Marín, M., Álvarez, M., & Sánchez, L. (2005). Metalogenia y evolución tectonomagmática del distrito minero Segovia–Remedios, primera aproximación. *En X Congreso Colombiano de Geología*.
- Oyarzún, J. (2022). *Geoquímica Aplicada: Principios Básicos de Geoquímica, Prospeccion Geoquímica, Hidrogeoquímica y Riesgos Ambientales*.
- Pérez, J., & Gardey, A. (17 de 10 de 2022). *Publicado por Julián Pérez Porto y Ana Gardey. Actualizado el 17 de octubre de 2022. Litología - Qué es, tipos, definición y concepto*. Obtenido de <https://definicion.de/litologia/>
- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., & Oñate-Valdivieso, F. (2017). *Fundamentos de SIG*. ResearchGate.
- Qi, C., Dayu, G., Jisheng, X., Min, Z., Haiying, Y., Ruisi, Z., . . . Zhinfang, Z. (2025). Remote sensing identification of hydrothermal alteration minerals in the Doubuza. *ELSEVIER*, 1-8.
- RAVE21. (s.f.). *Geophysical methods for exploring subsurface physical properties*.
- Reimann, C., Äyräs, M., Chekushin, V., Bogatyrev, I., Boyd, R., Caritat, P., . . . Volden, T. (1998). Environmental geochemical atlas of the central Barents region. *Schweizerbart Science Publishers*.

- Restrepo, H. R. (2015). Aplicación de métodos geofísicos en la exploración de depósitos auríferos del norte de Antioquia, Colombia . Antioquia, Colombia: Boletín de Geología.
- Rigol, J., Chica, M., Pardo, E., Rodríguez, V., & Chica, M. (2011). Análisis e integración de datos espaciales en investigación de recursos geológicos mediante Sistemas de Información Geográfica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen 63, núm. 1, p. 61-70.
- Rollinson, H. R. (1993). Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation (1ª ed.). *Longman Scientific & Technical*.
- Rose, W., Hawkes, H., & Webb, J. (1979). Geochemistry in mineral exploration.
- Sampaio, M., Dutra, A., & Flores, O. (2024). Gamma spectrometry data suggest opportunities for mineral research in Alagoas, Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*.
- Sánchez-Medina, J. A., Sanz, E., & San Jose , J. J. (2020). Assessment of the capability of Sentinel-2 imagery for iron-bearing minerals mapping: A case study in the Cuprite area, Nevada. . *Remote Sensing*, 12.
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). *Glosario de términos*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano:  
<https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx>
- SGC. (2002). *Mapa de recursos minerales de Colombia: minerales metálicos, preciosos y energéticos a escalas 1:500.000 y 1:1'500.000*.
- SGC. (2010). *Mapa Geológico de Colombia Oriente de Antioquia. Cuadrángulo I-9 y parte de los cuadrángulos H-9, H-10, I-10, J-9 y J-10. Planchas 132 Yolombó, Plancha 148 San Carlos, Plancha 168 Argelia (Aquitania), Plancha 188 La Dorada y Plancha 117 Amalfi*.
- SGC. (2011). *Cartografía Geológica de la Plancha 133 "Puerto Berrío". Escala 1:100.000*.
- SGC. (2011). *Mapa geológico de la plancha 131 Santa Rosa de Osos. Escala 1:100.000*.
- SGC. (2022). *Atlas geoquímico de Colombia versión 2022*.
- SGC. (2023). *Mapa de anomalías geofísicas de Colombia, versión 2022*.
- Shebl, A., Abdellatif, M., Bada, M., Dawoud , M., Fahil, A., & Csámer, Á. (2023). Towards better delineation of hydrothermal alterations via multi-sensor remote sensing and airborne geophysical data. *Sci Rep*.
- Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 3–41.

Sojdehee, M., Rasa, I., Nezafati, N., & Vosoughi, M. (2015). Application of espectral analysis to discriminate hydrothermal alteration zones at Daralu copper deposit, SE Iran. *Arabian Journal of Geosciences*.

Statista. (01 de 10 de 2024). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/600157/demanda-global-de-oro/#:~:text=Tras%20la%20considerable%20ca%C3%ADda%20de,a%20las%204.500%20toneladas%20m%C3%A9tricas>.

Teknomo, K. (2006). *Analytic Hierachy Process (AHP) Tutorial*.

Tim Ko Oo, N. A. (2022). Comparing Four Machine Learning Algorithms for Land Cover Classification in Gold Mining: A Case Study of Kyaukpahto Gold Mine, Northern Myanmar. *Sustainability MDPI*, 15.

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia*, 99–107.

YANG, W. N.-Y.-Q.-Z. (2016). APPLICATION OF SYNTHETIC ANALYSIS OF RS, GIS AND GEOLOGY IN THE COPPER AND GOLD ORE-FORMING FORECAST IN YIWU AREA, XINJIANG, CHINA. *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH*, 15(3):83-89.

Zambrano, J. J. (2015). Diseño de una infraestructura de datos especiales y su aplicacion a la gestion de proyectos de exploraciòn aurifera en el departamento de Antioquia - Colombia. Quito.