

**Análisis SIG del Potencial Mineral para Oro y
Elementos Asociados en un Área Ubicada entre los
Municipios de Pensilvania, Samaná y Victoria (Caldas)**

Jhon Fredy García Ramírez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2023

Resumen

La investigación abordó un área de 15.000 ha distribuidas entre los municipios de Samaná (93%), Victoria (6%) y Pensilvania (1%) en el Departamento de Caldas, Colombia. Su propósito principal fue evaluar el potencial mineral para oro y elementos asociados a escala 1:25.000.

El análisis se realizó a través de herramientas SIG que permitieron la construcción e integración de mapas temáticos de geología, geodinámica, geoquímica, metalogenia y geofísica. Los mapas temáticos se generaron con información técnico-científica secundaria y sus capas fueron rasterizadas y reclasificadas según criterios de favorabilidad mineral en una escala de 1 al 10, siendo 10 la probabilidad más alta de hallar depósitos minerales.

La superposición ponderada de las capas de los mapas temáticos resultó en seis categorías de favorabilidad, posteriormente reclasificadas en tres niveles de potencial mineral: bajo (3-4), medio (5-6) y alto (7-8).

Potencial Alto (3.3% del área), corresponde a la mayor probabilidad de encontrar depósitos auríferos, asociado principalmente a rocas metamórficas e ígneas y a las confluencias de diversas estructuras geológicas. Estas áreas presentan muestras anómalas con altos valores de oro y se relacionan con productores minerales históricos y anomalías magnéticas.

Potencial Medio (60% del área), se asocia a una posibilidad razonable de encontrar oro y elementos asociados. Predominan rocas ígneas y metamórficas, estructuras geológicas y anomalías

geoquímicas. Esta categoría abarca minas abandonadas, prospectos y ocurrencias, además de fuentes magnéticas de interés exploratorio.

Potencial Bajo (36.7% del área), pese a presentar alguna mineralización, la probabilidad de encontrar metales preciosos es limitada. Esta zona se caracteriza por rocas sedimentarias y metamórficas, sin estructuras geológicas relevantes o anomalías geoquímicas.

Abstract

The research covered an area of 15,000 ha distributed between the municipalities of Samaná (93%), Victoria (6%) and Pensilvania (1%) in the Department of Caldas, Colombia. Its main purpose was to evaluate the mineral potential for gold and associated elements at a scale of 1:25,000.

The analysis was carried out using GIS tools that allowed the construction and integration of thematic maps of geology, geodynamics, geochemistry, metallogeny and geophysics. The thematic maps were generated with secondary technical-scientific information and their layers were rasterized and reclassified according to mineral favorability criteria on a scale of 1 to 10, with 10 being the highest probability of finding mineral deposits.

The weighted overlay of the thematic map layers resulted in six favorability categories, subsequently reclassified into three levels of mineral potential: low (3-4), medium (5-6) and high (7-8).

High Potential (3.3% of the area), corresponds to the highest probability of finding gold-bearing deposits, mainly associated with metamorphic and igneous rocks and confluences of various geological structures. These areas present anomalous samples with high gold values and are related to historical mineral producers and magnetic anomalies.

Medium Potential (60% of the area), is associated with a reasonable possibility of finding gold and associated elements. Igneous and metamorphic rocks, geological structures and geochemical anomalies predominate. This category includes abandoned mines, prospects and occurrences, as well as magnetic sources of exploratory interest.

Low Potential (36.7% of the area), despite having some mineralization, the probability of finding precious metals is limited. This area is characterized by sedimentary and metamorphic rocks, without relevant geological structures or geochemical anomalies.

Contenido

	Pag.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	12
1.1 Descripción del área problemática	13
1.2 Formulación del problema	15
1.3 Justificación	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo general.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. ANTECEDENTES.....	19
3.1 Antecedentes en el contexto histórico.....	19
3.2 Antecedentes en el contexto metodológico	20
3.3 Antecedentes en el contexto técnicos y científicos	21
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	24
5. REFERENTE TEÓRICO	25
6. METODOLOGÍA	27
6.1 Enfoque metodológico	27
6.2 Tipo de estudio	29
6.3 Procedimiento.....	29
6.3.1 Escala de trabajo.....	30
6.3.2 Sistema de coordenadas.....	32
6.3.3 Área de estudio.....	33
6.3.4 Base Topográfica.....	34
6.3.5 Identificación, recopilación y descripción de mapas temáticos.....	35
6.3.6 Ajustes, ediciones y rasterizaciones de capas de los mapas temáticos.....	58
6.3.7 Criterios de favorabilidad mineral y reclasificación.....	67
6.3.8 Superposición ponderada y reclasificación cualitativa del potencial mineral. .	86
7. RESULTADOS	97

7.1	Potencial Mineral Bajo.....	98
7.2	Potencial Mineral Medio.....	100
7.3	Potencial Mineral Alto.....	102
8.	CONCLUSIONES.....	105
9.	RECOMENDACIONES.....	111
10.	REFERENCIAS.....	112

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ejemplos de Escalas de trabajo.	31
Figura 2. Parámetros de proyección del nuevo origen nacional.	32
Figura 3. Mapas de localización del área de estudio.	33
Figura 4. Base Topográfica del área de estudio.	35
Figura 5. Mapa Temático de Geología.	37
Figura 6. Mapa Temático de Geodinámica.	46
Figura 7. Mapa Temático de Geoquímica.	51
Figura 8. Mapa Temático de Metalogenia.	53
Figura 9. Mapa Temático de Geofísica.	57
Figura 10. Geoproceso de rasterización de la geología.	59
Figura 11. Salida gráfica de la rasterización de la geología.	60
Figura 12. Configuración del entorno de trabajo, antes de rasterizar archivos vectoriales.	61
Figura 13. Proceso y salida gráfica de la rasterización de la geodinámica.	62
Figura 14. Proceso y salida gráfica de la rasterización de la geoquímica.	63
Figura 15. Proceso y salida gráfica de la rasterización de la metalogenia.	65
Figura 16. Interpretación geofísica de las anomalías de intensidad magnética total.	67
Figura 17. Categorías de favorabilidad mineral.	68
Figura 18. Mapa de geología y depósitos minerales.	70
Figura 19. Procesos y salida gráfica de la reclasificación de la geología rasterizada.	75
Figura 20. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la capa Falla Palestina y Contactos litológicos de la geodinámica rasterizada.	76

Figura 21. Clasificación de la distancia establecida como posible zona de influencia de los lineamientos y estructuras circulares (300m).	77
Figura 22. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la geoquímica rasterizada.	79
Figura 23. Clasificación de rangos de valores de oro, ponderados con la herramienta IDW.	79
Figura 24. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la capa de productores minerales de la metalogénia	82
Figura 25. Clasificación de la distancia establecida de los productores minerales (500).	82
Figura 26. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de las capas de geofísica	85
Figura 27. Procedimiento de aplicación de la herramienta de superposición ponderada.	90
Figura 28. Ponderación o porcentaje de influencia de los mapas ráster reclasificados.	91
Figura 29. Salida gráfica de la Superposición Ponderada.....	95
Figura 30. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la superposición ponderada.....	96
Figura 31. Mapa de potencial mineral para oro y elementos asociados en un área ubicada entre los municipios de Pensilvania, Samaná y Victoria en el Departamento de Caldas.	97

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Descripción geológica de las ocurrencias, prospectos y productores minerales del área de estudio.	54
Tabla 2. Asignación de criterios de favorabilidad de la geología de acuerdo con los códigos numéricos (value #) determinados automáticamente por el sistema.	74
Tabla 3. Asignación de criterios de favorabilidad de la geodinámica de acuerdo con rangos de valor de.....	77
Tabla 4. Asignación de criterios de favorabilidad de la geoquímica de acuerdo con rangos de valor de oro en gr/ton.	81
Tabla 5. Asignación de criterios de favorabilidad de la metalogénia de acuerdo con rangos de valor de las distancias (m) a los productores, ocurrencias y prospectos minerales.	84
Tabla 6. Asignación de criterios de favorabilidad de la geofísica de acuerdo con rangos de valor (nT) de intensidad magnética total.....	85
Tabla 7. Resumen del proceso de preparación de los datos para superposición ponderada.	88
Tabla 8. Ponderación o porcentaje de influencia de los mapas temáticos finales reclasificados.	90

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>A</i>	Área	m ²	$\iint dx dy$
<i>m</i>	Metro	m	$\iint [dx dy]$
<i>cm</i>	Centímetro	cm	
<i>ha</i>	Hectáreas	10.000 m ²	

1. Planteamiento del problema de investigación y justificación

Los municipios de Samaná y Pensilvania ubicados en el Oriente del Departamento de Caldas presentan mineralizaciones de oro y plata con contenidos marginales de plomo, zinc y cobre (J. H. López, 1971). Estos minerales fueron extraídos con diferentes grados de tecnicismo a través de minas subterráneas y aluviales, desde tiempos inmemoriales hasta mediados del Siglo XIX; las explotaciones mineras trajeron un auge económico regional, aumento de población y movimiento intensivo del comercio (Alzate, 2001). Pese al contexto histórico minero, la región tiene limitados e insuficientes estudios técnico-geológicos que permitan evaluar y definir la cantidad y calidad de sus recursos minerales como base de posibles encadenamientos productivos.

El desconocimiento técnico del potencial mineral de la región, restringe la base prospectiva o diagnóstica de zonas de interés para la exploración de yacimientos minerales, esto limita las posibilidades u ofertas de desarrollo económico y social de las comunidades, ya que ignoran los posibles recursos de sustancias minerales disponibles en su territorio.

La investigación del potencial mineral para oro y elementos asociados proporciona datos técnicos geo-espaciales de interés para la toma de decisiones en el marco del ordenamiento territorial y la planeación de la exploración mineral, debido a la identificación de zonas promisorias para el hallazgo de metales; esto atrae la inversión local o extranjera con posibilidades de dinamizar la economía y el empleo formal.

El potencial mineral se investiga por medio del estudio, superposición y ponderación de mapas de favorabilidad mineral según la geología, geoquímica, geofísica y metalogenia de la región. La recopilación, ajuste y análisis de datos se realiza por medio de sensores remotos, imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (SIG).

En general, la investigación reviste importancia para el posible desarrollo y diversificación económica de la región con la eventual reducción de la dependencia de sectores productivos específicos y la estabilidad financiera a largo plazo; además, podría promover las inversiones y desarrollo de infraestructura y la sostenibilidad ambiental por los compromisos inherentes al desarrollo minero.

1.1 Descripción del área problemática

En los municipios de Samaná y Pensilvania, situados en el Departamento de Caldas, existen indicios de explotaciones auríferas y se han identificado manifestaciones minerales de relevancia económica (J. López et al., 2018). No obstante, en esta región prevalece una insuficiente comprensión técnica del potencial mineral del oro y de los elementos relacionados. Esto limita el interés inversor en la exploración mineral, a pesar de la creciente demanda de metales preciosos, valorados como refugio financiero debido a su capacidad para mantener su valor en períodos de inestabilidad económica (Chiluiza, 2022); Además, el oro es altamente valorado por sus propiedades electrónicas en tecnologías emergentes, incluyendo las nanopartículas de oro que potencian la eficiencia de las células solares (Cabrera & del Carmen, 2022).

La carencia de información sobre el potencial mineral de una región restringe las oportunidades de diversificación económica, que podrían generar beneficios fiscales para las administraciones públicas, tanto locales como nacionales. La falta de datos geológicos recientes, la insuficiente inversión en tecnologías de prospección y la limitada colaboración entre entidades gubernamentales, empresas mineras y comunidades locales han derivado en una insuficiente información técnica confiable. Estos factores han mermado los incentivos para la exploración y han ampliado este vacío de conocimiento.

A escala internacional, la exploración de recursos minerales, en particular de metales preciosos como el oro, tiene un impacto crucial en la economía mundial (World Gold Council, 2003). La carencia de información técnica sobre estos recursos en las zonas de Samaná y Pensilvania constituye un vacío considerable en el entendimiento geológico-mineral de la región. Esta situación no solo restringe las oportunidades económicas para las comunidades locales, sino que también impide un análisis holístico de un posible desarrollo socio-ambiental.

La falta de caracterización del potencial mineral de una región, conduce a improvisaciones en las actividades de exploración geológico-minera y especulaciones de mercado. Estos factores, entre otros, resultan en errores al identificar áreas propicias para el desarrollo de proyectos que requieren inversiones de alto riesgo. A menudo, se generan falsas expectativas sobre zonas sin evaluación previa de su viabilidad mineral, provocando así impactos económicos negativos y desgastes administrativos, tanto en el sector público como en el privado.

1.2 Formulación del problema

Dada la importancia económica y tecnológica del oro y elementos asociados en la actualidad, es esencial contar con un conocimiento detallado y preciso del potencial mineral en zonas de interés. En el área comprendida entre los municipios de Samaná, Pensilvania y Victoria, en el Departamento de Caldas, Colombia, se presenta una carencia significativa en este conocimiento. A pesar de los indicios históricos y manifestaciones minerales identificadas, existe una brecha en la integración y aplicación de técnicas avanzadas, como el análisis SIG mediante la superposición ponderada de mapas de favorabilidad mineral basados información geología, geoquímica, geofísica y metalogénica.

1.3 Justificación

La planificación y ejecución de campañas de exploración mineral eficientes y exitosas, dependen intrínsecamente del entendimiento del potencial mineral de una región. Esto implica una comprensión de las condiciones geológicas, geofísicas, geoquímicas y metalogénicas que favorecen la presencia de depósitos minerales con valor económico; este entendimiento se obtiene mediante análisis técnicos de información base disponible, procesada a través de mapas temáticos especializados (Muñoz, 2021). Estos últimos proporcionan una estructura objetiva y práctica para la organización de los trabajos de campo, en particular, el uso de mapas prospectivos se vuelve esencial, pues orientan y potencian la búsqueda de minerales de interés. Los mapas de potencial mineral son guías para futuras exploraciones (Díaz-Martínez et al., 2020).

La exploración mineral representa uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico y tecnológico de muchas regiones; específicamente para Colombia, el oro y sus elementos asociados han sido históricamente una fuente primordial de ingresos y empleo (Cárdenas & Reina, 2008). El Análisis SIG del Potencial Mineral para Oro y Elementos Asociados en un Área Ubicada entre los Municipios de Pensilvania, Samaná y Victoria en el departamento de Caldas, Colombia, busca consolidar una metodología que, mediante herramientas SIG, permita una exploración mineral más eficiente, orientada y consciente.

La principal motivación de la presente investigación es incorporar aportes geocientíficos que permitan una mejor comprensión de áreas con alta probabilidad de contener depósitos minerales; es una herramienta que combina las geociencias con las tecnologías SIG. Los resultados de la investigación permitirán a las empresas y geólogos de exploración, focalizar mejor sus esfuerzos en la región, con la consecuente reducción de costos y mejora del proceso.

La investigación se piensa de interés para compañías mineras, geólogos, académicos de las geociencias, universidades nacionales y locales, corporaciones ambientales, Ministerio de Minas y Energía (MME) y sus entidades adscritas como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Agencia Nacional de Minería (ANM) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Gobernación de Caldas, Alcaldías Locales y comunidades en general ubicada en el área de influencia de la investigación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general.

Establecer el potencial mineral para oro y elementos asociados a través de herramientas SIG aplicadas a un área ubicada entre los municipios de Pensilvania, Samaná y Victoria (Caldas).

2.2 Objetivos específicos.

Definir la escala de trabajo, sistema de coordenadas, área de estudio y topografía base.

Identificar, recopilar, ajustar y editar mapas temáticos empleados en prospección mineral como los mapas geológicos, geodinámicos, geoquímicos, metalogénicos y geofísicos.

Estudiar y definir criterios técnicos de favorabilidad mineral de las capas que conforman los mapas temáticos.

Valorar y reclasificar las capas de los mapas temáticos en rangos unificados que permitan cuantificar sus grados de probabilidad o favorabilidad para el hallazgo de oro y elementos asociados.

Superponer de manera ponderada las capas de los mapas temáticos reclasificados con criterios cualitativos de potencial mineral para identificar blancos u objetivos de exploración.

3. Antecedentes

Los antecedentes de la investigación se relacionan a continuación en tres (3) contextos:

1. Históricos. Relacionados con el oro en la región y su importancia global.
2. Metodológicos. Asociados a las herramientas SIG empleadas para la prospección de minerales.
3. Técnicos y científicos. Vinculados con la información base de la investigación encontrada para el área de estudio.

3.1 Antecedentes en el contexto histórico

Los municipios de Samaná y Pensilvania históricamente han reportado explotaciones de oro y plata con contenidos marginales de plomo, zinc y cobre; estos minerales fueron extraídos por los indios Pantágoras desde tiempos inmemoriales a través de minas subterráneas y aluviales; posteriormente, se tiene reportes de significativas cantidades de oro comercializado desde el año 1840 (J. H. López, 1971). Según el Libro “Samaná en la Historia”, estas explotaciones auríferas trajeron riquezas, reflejada en un crecimiento inusitado de población y movimiento intenso del comercio regional (Alzate, 2001); sin embargo, el precio del oro tuvo una serie de altibajos entre 1930 y 1970 debido a una estabilización de precios, esto produjo el cierre y abandono de labores mineras frente al encarecimiento de costos de producción (Jacome, 1978).

En el presente siglo, el interés por el oro y en general por los metales base se ha incrementado exponencialmente. El metal precioso pasó de un mínimo de 1.160 dólares (USD) la Onza Troy en el año 2018 a un máximo histórico de 2.073 USD en el año 2020, siendo uno de los activos financieros más atractivos del planeta por ser cobertura contra la volatilidad de los

mercados de renta variable y los tipos de interés negativos (Gallego, 2023). El aumento del precio del oro ha sido significativamente constante y la tendencia alcista continúa (LiteFinance, 2022).

3.2 Antecedentes en el contexto metodológico

Los primeros intentos de realizar análisis prospectivos por medio de datos digitales se dieron en los años 80; esto a través de un software llamado Prospector, desarrollado por un equipo del Instituto de Investigación de Stanford (G. Hart & Yao, 1977). Prospector analizó datos geológicos, geofísicos y geoquímicos de una investigación previa realizada en Monte Tolman - Washington - y, sugirió que una zona en particular, previamente inexplorada, tenía un gran potencial de contener un yacimiento de tipo Pórfido de Molibdeno; más tarde, tras una investigación de campo, se confirmó que ese yacimiento existía en realidad, convirtiendo a Prospector en el primer sistema experto en conseguir un éxito comercial importante. De hecho, el único fallo que Prospector cometió fue el no reconocer la gran magnitud del yacimiento que acababa de descubrir (López-Gómez et al., 2021).

Los mapas de favorabilidad mineral, también llamados mapas de prospectividad, potencialidad o idoneidad, presentan sus primeros antecedentes en los modelos probabilísticos de ocurrencias minerales, desarrollados por (Cox & Singer, 1986). Para definir cualidades de favorabilidad asociada al descubrimiento de diferentes depósitos minerales, tradicionalmente se han empleado dos (2) métodos; el primero, se ha basado en el procesamiento y definición de datos técnicos espacialmente, relacionados a una génesis mineral específica (An et al., 1994) y; el segundo, se ha basado en criterios de expertos, análisis e interpretaciones que dependen del conocimiento y experiencia de profesionales de las geo-ciencias (Harris et al., 2008).

La cuantificación, integración y modelamiento de los resultados del procesamiento de información primaria, ha sido una labor compleja que ha vinculado a múltiples disciplinas geocientíficas para definir sistemas de análisis sincrónicos para datos geológicos, geoquímicos, geofísicos y mineros, generalmente desiguales en el contexto técnico, pero geo-espacialmente relacionados (Díaz et al., 2008).

La aplicación de la geología económica de Colombia no ha contado con desarrollos SIG relevantes para la cartografía predictiva en formatos digitales; sin embargo, el Servicio Geológico Colombiano ha realizado aplicaciones de superposición ponderada en algunos trabajos de investigación, como el denominado “*Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del estado*” de Bernal et al. (2012).

Actualmente están empezando a surgir métodos mucho más vanguardistas de investigación minera, como el análisis de grandes volúmenes de datos con el empleo técnicas de Machine Learning (ML) o Aprendizaje Automático (López-Gómez et al., 2021).

3.3 Antecedentes en el contexto técnicos y científicos

A continuación, se relacionan los principales antecedentes de la zona de estudio en el campo de la geología, geodinámica, geofísica, geoquímica y metalogenia como base para la construcción de criterios técnicos que permiten establecer el potencial mineral de un área.

Geología y geodinámica

Feininger et al., (1972) realizaron la geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (SUB-ZONA II-B), Cuadrángulos K-9 Armero y J-9 La Dorada. Estudio acogido oficialmente como base preliminar de litologías expuestas en parte de la Cordillera Central de los Andes Colombianos. Describe los principales rasgos de la Falla de Palestina, estructura que atraviesa la zona de estudio.

Barrero & Vesga, (1976) compilaron parte de la Geología del Cuadrángulo J-9 en la Plancha 188 (La Dorada) a escala 1:100.000 y, utilizaron una nomenclatura formal para las unidades geológicas de la Sub-Zona IIB; sin embargo, este mapa no presenta memoria explicativa.

González, (1993) compiló el Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Caldas a escala 1:250.000. La reseña explicativa que acompaña el mapa amplía las descripciones litoestratigráficas, tectónicas y económicas del área de estudio.

Geoquímica

Pérez & Lozano, 1975 adelantaron trabajos de prospección geoquímica al norte del distrito Manzanares en los municipios de Samaná y Pensilvania con el fin de investigar mineralizaciones de tipo filoniano.

Pérez Ávila et al., (2020) realizaron “El Atlas Geoquímico de Colombia” como un producto que contiene los estudios adelantados desde 1988 en desarrollo del Proyecto sobre Mapeo Geoquímico Internacional; sirve como guía para la selección de sitios de muestreo, recolección y preparación de muestras para la realización de un proyecto de exploración.

Metalogénia

J. H. López, (1971) describe los recursos minerales del Departamento Caldas, estudiados durante el período 1969-1971; investigó mineralizaciones de oro, plata, plomo, antimonio, hierro, entre otros. En ninguna de estas ocurrencias minerales se ha realizado suficiente exploración en detalle para intentar evaluaciones precisas en cuanto a magnitud, forma y tenor promedio de los eventuales yacimientos.

Prieto Gómez, (2010)elaboró el Mapa de Metales y Minerales Preciosos de Colombia Grupo I (Au, Ag, Pt, Esmeraldas) con su respectiva base de datos y compilación de información. La memoria explicativa del mapa contine la descripción de los depósitos, prospectos y manifestaciones minerales presentes en la región de estudio.

Paredes et al., (2020) construyen el Mapa Metalogénico de Colombia, Es mapa a escala regional que muestra la distribución espacial y temporal de depósitos y ocurrencias o manifestaciones minerales en un contexto geológico, según el tipo de yacimiento mineral que relaciona la edad de las mineralizaciones, su génesis y los diferentes minerales de interés económico.

Geofísica

Moyano et al., 2020 realizaron el Mapa de Anomalías Geofísicas de Colombia para recursos minerales, el cual muestra los resultados del procesamiento, interpretación y análisis de los datos aerotransportados de Magnetometría y Gamma espectrometría en el territorio colombiano, específicamente sobre las zonas caribe, andina y oriental de Colombia.

4. Referente normativo y legal

Los estudios de potencial mineral son considerados de prospección; por tanto, el Capítulo IV de la Ley 685 del 15 agosto de 2001 "Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones", hace referencia a la Prospección en el Artículo 39:

Prospección de minas. 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.

La anterior norma hace referencia a las actividades de prospección de minas en campo, sin embargo, la presenta investigación, si bien es considerada de prospección, no presenta intervención directa en el territorio.

5. Referente teórico

La prospección es base preliminar para la exploración de recursos minerales, tradicionalmente, estas actividades se han realizado por medio de la observación y muestreo directo del terreno. No obstante, el avance tecnológico ha facilitado la incorporación de herramientas de análisis geoespacial para la captura, conjugación y visualización de diversos datos de reconocimiento y muestreo, basados en el entendimiento geológico-minero de una región y apoyados en sofisticadas técnicas de prospección geofísica, geoquímica y de teledetección (Revista Virtual Pro, 2021). Esto revolucionó el proceso de toma de decisiones en la identificación de zonas con potencial minero.

A nivel global, la minería es una de las industrias más antiguas y ha sido esencial para el desarrollo de civilizaciones a lo largo de la historia. Sin embargo, debido a la creciente demanda de minerales a nivel mundial, entre otras causas, por la imperante necesidad de cambiar la matriz energética y el transporte por sistemas que generen bajas emisiones contaminantes (Mundial, 2020), los expertos en geo-ciencias tienen grandes retos para identificar de manera más rápida, eficiente y precisa, el potencial mineral de una región y sus posibles reservas o revaluación de las mismas, a la luz de nueva información.

Colombia, con su diversidad geológica y riqueza mineral presenta grandes retos y oportunidades para la industria minera y sus cadenas de valor; a pesar de ello, regiones como la del oriente del Departamento de Caldas, presenta significativos vacíos de información técnica geocientífica. Es aquí donde las herramientas SIG ofrecen una ventaja significativa al permitir la

integración y análisis de múltiples conjuntos de datos en una plataforma unificada (Aguilar, 2016), facilitando la identificación de áreas prospectivas.

El desconocimiento sobre el potencial mineral de la región demuestra la necesidad de investigaciones especializadas. Las técnicas SIG, con su capacidad para manejar y analizar datos geoespaciales de diversas fuentes, presentan una solución viable para este problema; por tanto, la presente investigación busca llenar los vacíos existentes mediante la aplicación de herramientas geoespaciales. Sin embargo, es de precisar que existen brechas para la aplicación de los SIG en prospección mineral, asociadas a la falta de datos geoespaciales detallados, posibles imprecisiones en la definición de criterios técnicos de favorabilidad mineral y la ausencia de una metodología estandarizada para valorar y reclasificar mapas temáticos de interés para las sobreposiciones.

El fundamento teórico de la prospección minera basada en SIG, radica en su capacidad para analizar y representar geovariables relacionadas con minerales de interés económico. Estas geovariables, al ser estudiadas conjuntamente, permiten la construcción de modelos predictivos espaciales que pueden representar índices de potencial mineral (Araujo, 2017). A través de la presente investigación se espera, no solo identificar zonas con potencial minero, sino también contribuir al desarrollo teórico y metodológico de la prospección mineral basada en SIG.

6. Metodología

Los objetivos específicos propuestos se alcanzaron por medio de la realización de seis (6) fases descritas en el enfoque metodológico.

6.1 Enfoque metodológico

La presente investigación combina enfoques cuantitativos y cualitativos y, por tanto, corresponde a un enfoque mixto descrito en las siguientes fases de desarrollo metodológico.

Fase I. Definición de la escala de trabajo, sistema de coordenadas, área de estudio y topografía base.

- Estudio de escalas de trabajo y su disponibilidad cartográfica, definición del sistema de coordenadas y parámetros de proyección.
- Localización geográfica y política del área de estudio, descripción de sus vías de acceso y características generales.
- Descarga y edición de topografía base.

Fase II. Identificación y recopilación de información técnica disponible para la generación de mapas temáticos apropiados en prospección mineral.

- Búsqueda de información técnica en entidades públicas y privadas (SGC, IGAC, CARs, Universidades, Alcaldías, Gobernaciones, entre otras).

- Análisis, clasificación y almacenamiento de mapas geológicos, geodinámicos, geoquímicos, geofísicos y metalogénicos, imágenes satelitales y fotografías aéreas disponibles de la región.

Fase III. Edición, ajustes y creación de mapas temáticos

- Consolidación de información base.
- Ajustes y unificación de la escala de trabajo.
- Edición de capas en mapas de interés.
- Preparación de base de datos geoespaciales.
- Creación de mapas temáticos de geología, geodinámica, geoquímica, geofísica y metalogénia.

Fase IV. Estudio y argumentación de criterios de favorabilidad mineral.

- Descripción de la información geocientífica asociada a las capas vectoriales de puntos, líneas y polígonos de los mapas temáticos.
- Argumentación técnica de las capas vectoriales con más probabilidades de contener minerales metálicos y preciosos.

Fase V. Valoración y reclasificación de las capas de los mapas temáticos según criterios de favorabilidad mineral.

- Conversión de formatos vectoriales a ráster y definición del tamaño de celda.
- Valoración de rangos, categorías o clases de favorabilidad mineral.

- Reclasificación y asignación de criterios de favorabilidad a cada una de las capas ráster generadas.

Fase VI. Superposición ponderada de las capas ráster y reclasificación con criterios cualitativos de potencial mineral.

- Aplicación de la superposición ponderada a las capas ráster de los mapas temáticos.
- Asignación de porcentajes de influencia de los mapas temáticos, peso estimativo de su importancia en el análisis de potencial mineral.
- Reclasificación de los criterios cuantitativos de favorabilidad mineral a criterios cualitativos de potencial mineral para identificar blancos u objetivos de exploración.

6.2 Tipo de estudio

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo correlacional, donde las diferentes variables, asociadas a los mapas temáticos de favorabilidad mineral, se relacionan entre sí para indicar o predecir la presencia de mineralizaciones de interés, como el oro y sus elementos asociados.

6.3 Procedimiento

El procedimiento de la investigación cuenta con la definición de la escala de trabajo, sistemas de coordenadas, área de estudio y base topográfica, además de la identificación, recopilación y descripción de mapas temáticos, ajustes, ediciones y rasterización de las capas de

los mapas temáticos, descripción de criterios de favorabilidad mineral y reclasificación cualitativa del potencial mineral.

6.3.1 Escala de trabajo.

La escala de trabajo se define como la relación de proporcionalidad entre una distancia medida en un terreno y su correspondiente medida en un mapa. Las escalas de trabajo se dividen en tres (3) categorías según los detalles o elementos cartográficos que se deseen mostrar en un plano (IGAC, 2022):

- I. Escalas pequeñas.** Se tratan de planos o dibujos con bajos detalles cartográficos, se emplean en estudios regionales. Son mapas de carácter nacional, departamental o municipal donde se logran identificar elementos espaciales iguales o mayores de 1.000 m (Escala $\leq 1:100.000$).
- II. Escalas medianas:** Corresponden a representaciones gráficas con moderados detalles cartográficos, se emplean en estudios locales. Son mapas de carácter urbano o rural (corregimientos, veredas o caseríos) donde se logran identificar elementos espaciales menores de 1.000 m y mayores de 50 m (Escala $> 1:100.000$ y $< 1:5.000$).
- III. Escalas grandes:** Representan planos o ilustraciones con altos detalles cartográficos, se emplean en estudios puntuales o específicos. Son mapas de carácter particular (infraestructura agrícola, forestal, pecuaria, minero - energética, industrial, urbanística, entre otras) donde se logran identificar elementos espaciales iguales o menores de 50 m (Escala $\geq 1:5.000$).

Esto significa que entre más pequeña es la escala de trabajo menor son los detalles cartográficos y en sentido contrario (Figura 1).

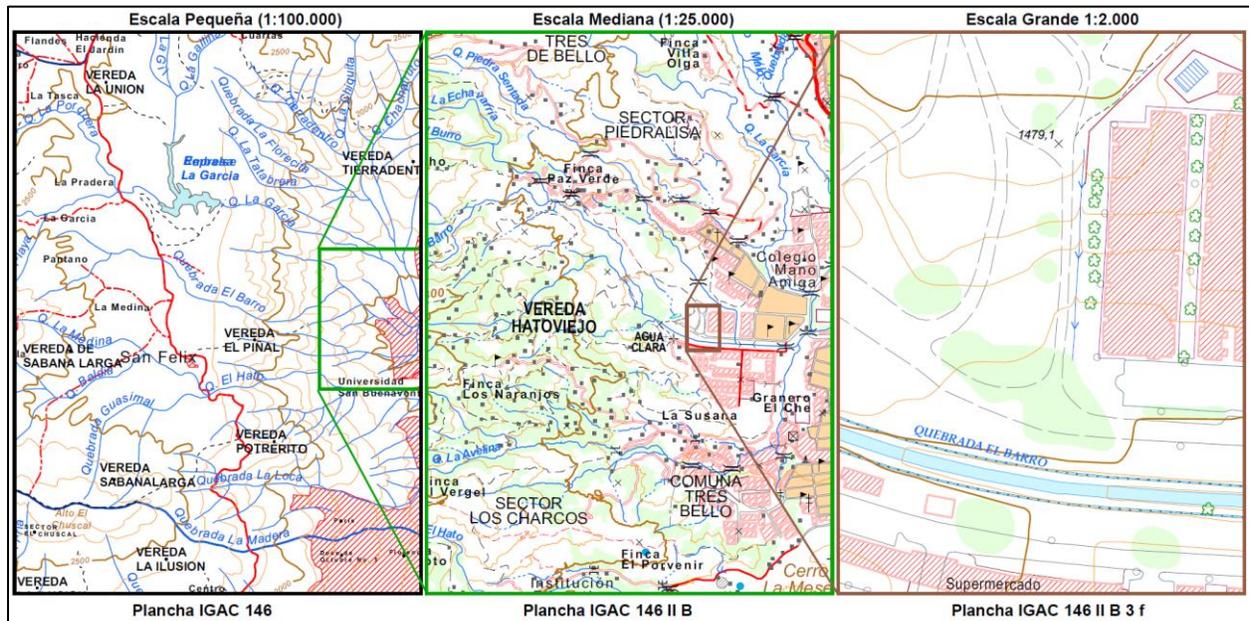


Figura 1. Ejemplos de Escalas de trabajo.
(Planchas IGAC 146 (1:100.00), 146IIB (1:25.000) y 146IIB3f (1:2.000)).

La prospección se realiza en escalas medianas y la exploración en escalas grandes, la primera busca encontrar blancos o anomalías minerales para establecer zonas de interés que ameriten estudios más precisos y detallados. Los mapas de potencial mineral son considerados estudios prospectivos; por tal motivo, el presente análisis se realiza a una escala de trabajo mediana, con distancias terrestres de 250 m equivalentes a 1 cm en el mapa, esto significa que los mapas temáticos se estudian y ajustan a una escala 1:25.000.

Los mapas se presentan como anexos a escala 1:25.000; además, en el presente documento se muestran como figuras con escalas gráficas representativas del terreno, esto con el fin de dar continuidad a las ideas del texto sin tener que desplegar los anexos.

6.3.2 Sistema de coordenadas.

A través de la Resolución 471 de 2020, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) estableció un único origen de coordenadas para Colombia con el fin de simplificar y flexibilizar la producción cartográfica del País.

El nuevo sistema de proyección cartográfica, denominado “*origen nacional*” (también conocido como *CTM12.prj*), facilita el uso de información y minimiza ambigüedades producidas por los seis (6) orígenes de coordenadas planas que se tenían para el desarrollo de la cartografía nacional a nivel regional, insostenibles en el tiempo (IGAC, 2022); por tal motivo, el presente estudio acoge la normativa vigente con la unificación y re-proyección de mapas temáticos, de acuerdo con los parámetros establecidos en la Figura 2.

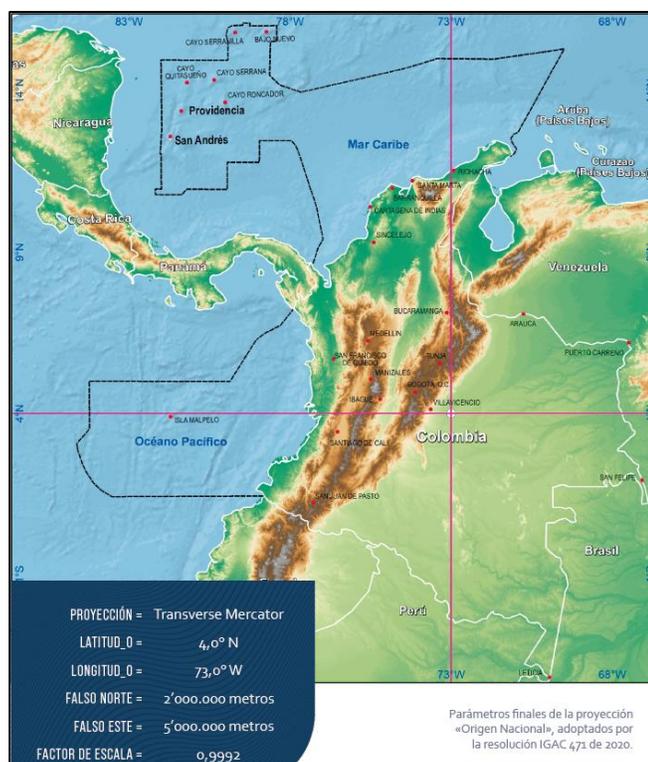


Figura 2. Parámetros de proyección del nuevo origen nacional. Tomada del IGAC, 2020.

6.3.3 Área de estudio.

El área de estudio se enmarca en un polígono de 15.000 ha ubicadas en el flanco Oriental de la Cordillera Central de Colombia, Oriente Cercano del Departamento de Caldas. Específicamente, 13.950 ha se encuentran en el municipio de Samaná (93%), 900 ha se localizan en el municipio de Victoria (6%) y, 150 ha se sitúan en el municipio de Pensilvania (1%).

El polígono de estudio cubre parcialmente las planchas topográficas IGAC 188III (A, B, C y D) e involucra el casco urbano del municipio de Samaná (Figura 3).

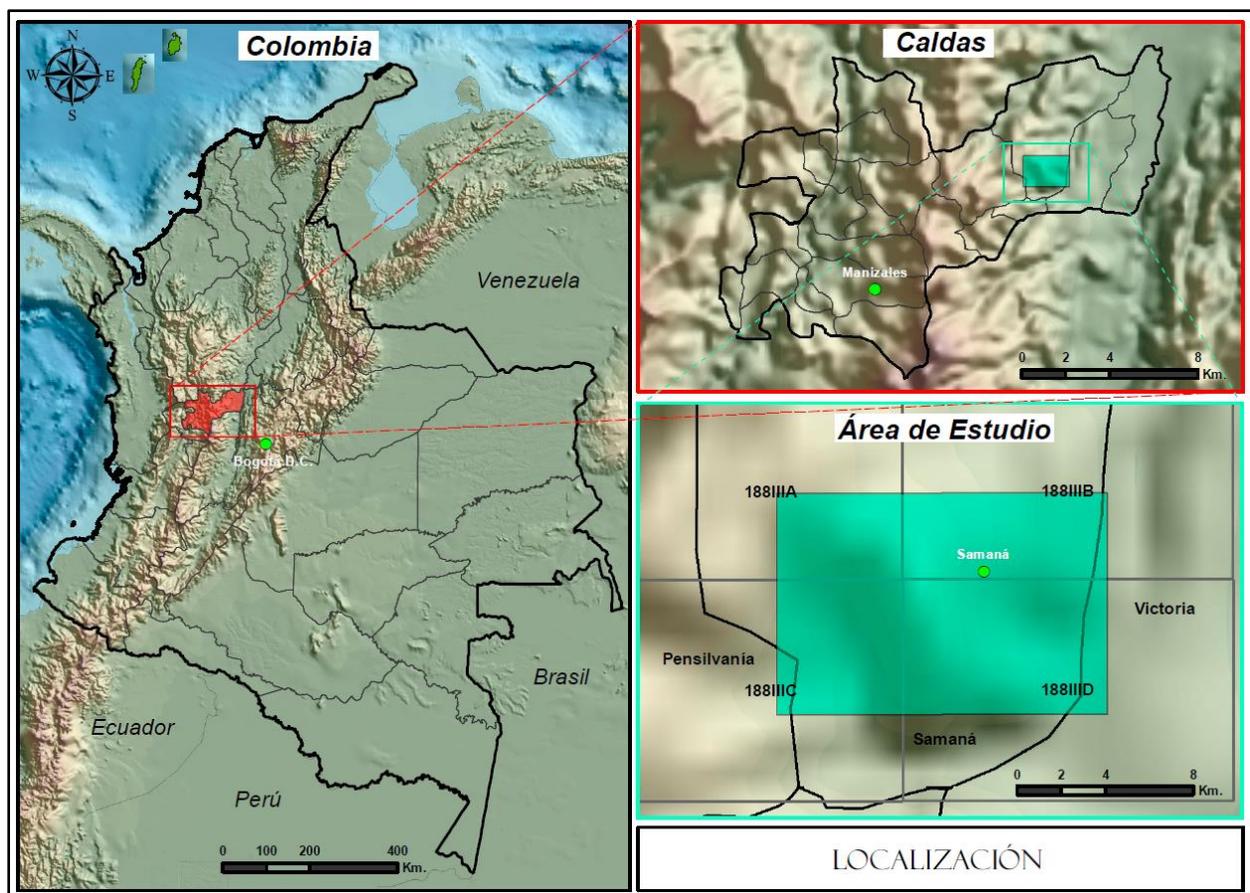


Figura 3. Mapas de localización del área de estudio. Modelo de elevación tomado de Bernal et al., 2012

El acceso terrestre al área de estudio se realiza sobre vía Manizales - La Dorada, rutas Nacionales No. 50 y 45 (Padua - Letras). Sobre la Ruta No. 50, en el sector conocido como Petaqueros, se desprende una carretera que conduce a los municipios de Pensilvania - Samaná y; sobre la Ruta No. 45, cerca del Río Guarino, se desprende una calzada que conduce a los municipios de Victoria - Samaná.

6.3.4 Base Topográfica.

El IGAC cuenta con datos abiertos para la descarga de cartografía (<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>), así se obtuvo la base topográfica del área de estudio a la escala de trabajo definida para el análisis geoespacial, 1:25.000.

Se estudiaron y editaron las capas de las Hojas 188III (A - Pensilvania), (B - Samaná), (C - La Miel) y (D - Victoria) del año 2010; de ellas se extrajeron las capas relevantes para cartografía base, tales como: curvas de nivel, drenajes, vías, puentes, construcciones y localizaciones político - administrativas, además de sus respectivas anotaciones (Figura 4 – Anexo 1).

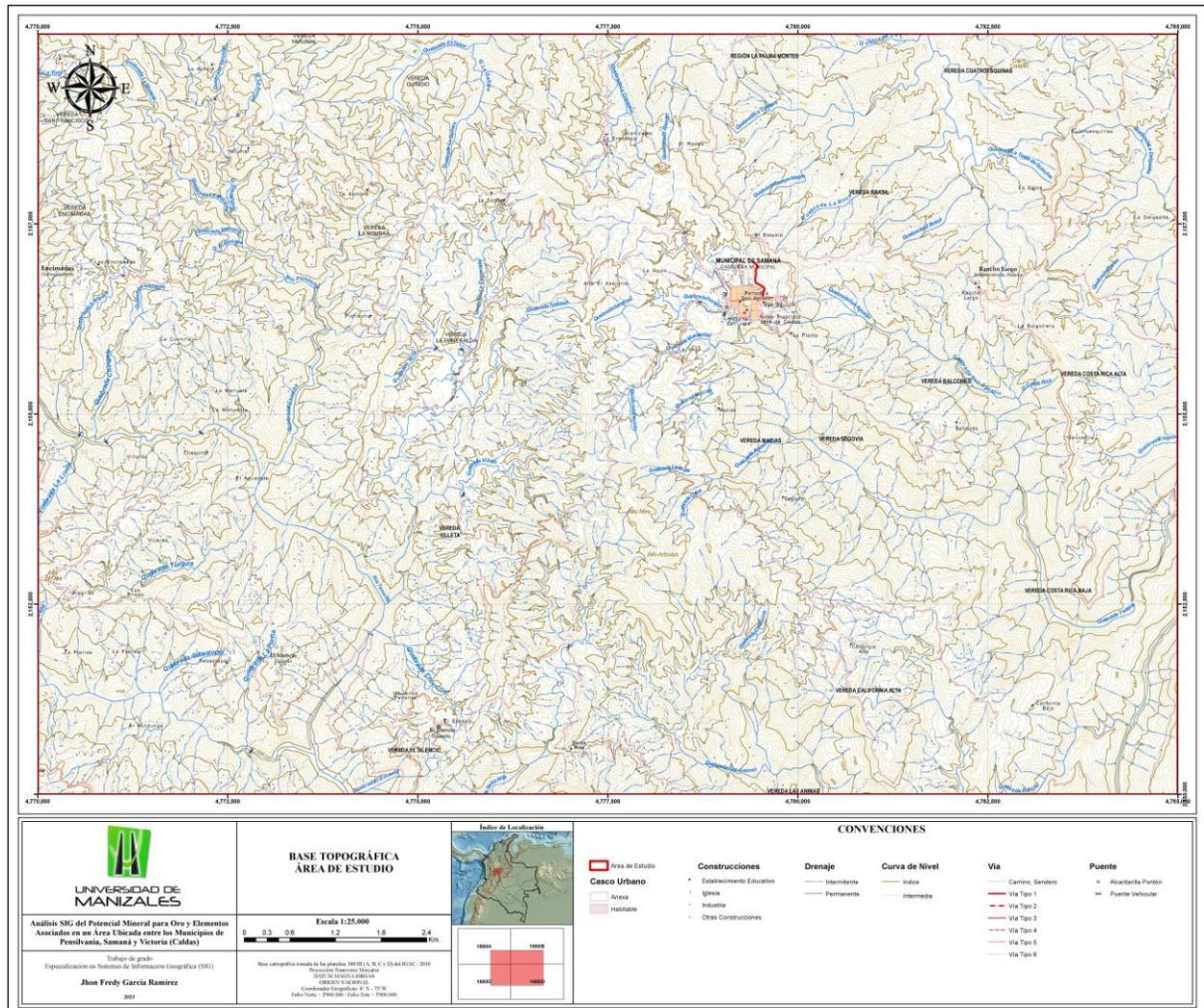


Figura 4. Base Topográfica del área de estudio.
Planchas IGAC 188III A, B, C y D a escala 1:25.000

6.3.5 Identificación, recopilación y descripción de mapas temáticos.

Según la International Cartographic Association (ICA) un mapa temático muestra y describe gráficamente características particulares de un área (Membrado, 2015). Para determinar de manera objetiva el potencial mineral de un territorio es necesario identificar y recopilar mapas temáticos con información técnica y científica de calidad en los tópicos de geología, geodinámica, geoquímica, metalogénia y geofísica.

La relación o conexión geoespacial de los diferentes mapas temáticos permiten una interacción conceptual de favorabilidad para la ocurrencia de yacimientos minerales. La geología posibilita la identificación de unidades litológicas fértiles o estériles para el almacenamiento de elementos de interés económico; la geodinámica permite cartografiar estructuras geológicas (fallas, contactos, lineamentos, entre otras) como posibles canales de movilización y depositación de mineralizaciones; la geoquímica proporciona la identificación de anomalías minerales en el terreno; la metalogenia describe la génesis u origen de los depósitos, prospectos, ocurrencias y productores minerales y; la geofísica registra, por medio de sensores remotos, características magnéticas, eléctricas o radiológicas inherentes a cuerpos enriquecidos con determinados elementos o compuestos químicos.

6.3.5.1 Mapa temático de geología

La geología del área de estudio se adquirió de la Plancha 188 - La Dorada -, publicada por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) a escala 1:100.000; la cual, fue compilada por Barrero & Vesga (1976) del estudio de Feininger et al., (1972) denominado: “Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (SUB-ZONA II-B)”.

El Mapa Temático de Geología (Figura 5, Anexo 2) se describe de acuerdo con la nomenclatura del Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Caldas, compilado por González (1993).

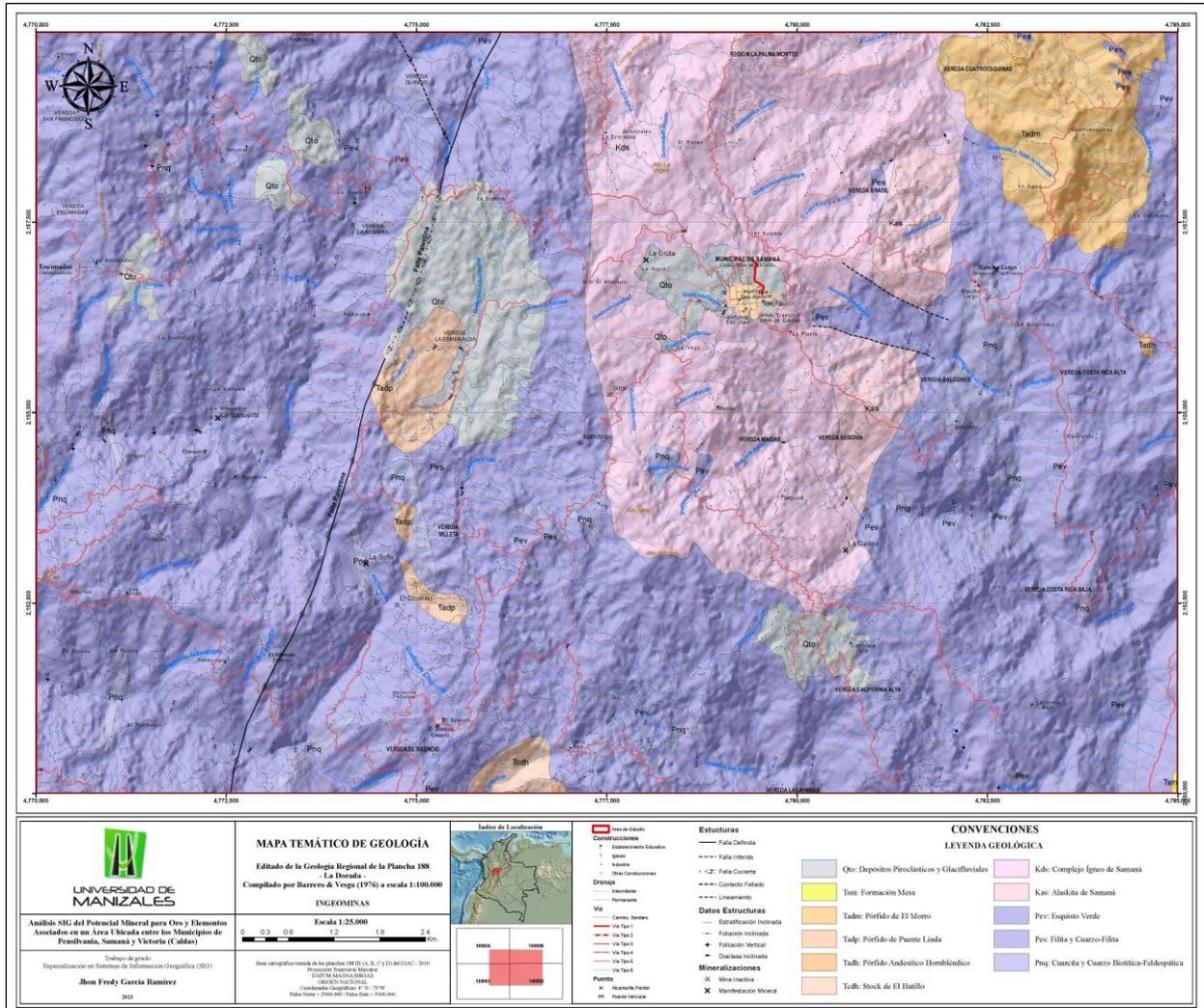


Figura 5. Mapa Temático de Geología.
 Editado de la Geología de la Plancha 188 - La Dorada - (Barrero & Vesga, 1976).

En el área de estudio se presentan rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, las cuales, se reseñan a continuación.

Rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas son las más antiguas del área de estudio, se asocian al Complejo Cajamarca descrito por González (1993) como un conjunto de diversas litologías de edad Paleozoica (P) que constituyen el núcleo de la Cordillera Central de Colombia; secuencia

lito-estratigráfica incompleta por el desconocimiento de su base, techo o espesor debido a plegamientos complejos y ausencia de capas guías. Estas rocas varían ampliamente en composición y son el resultado de diferentes episodios metamórficos regionales y de contacto.

Según Barrero & Vesga (1976), en el área de estudio se presentan esquistos verdes (Pev), filitas y cuarzo - filitas (Pes) y, cuarcitas y cuarcita biotíticas - feldespáticas (Pnq).

Esquistos Verdes (Pev). Se muestran como catorce (14) cuerpos elongados con extremos irregulares; los cuales, ocupan un área de 755,51 ha correspondientes al 5,03% de la zona de estudio. Estos cuerpos se distribuyen principalmente al sureste; sin embargo, uno de los cuerpos de mayor extensión se localiza al noroeste, entre las veredas La Sombra y Quindío del municipio de Samaná.

Estas rocas corresponden a esquistos actinolíticos y cloríticos, a veces calcáreos de color verde predominante; localmente con intercalaciones de esquistos negros sericíticos. Los esquistos verdes se originaron a partir de rocas tobáceas y basálticas formadas durante eventos volcánicos que se alternaron con la depositación de sedimentos en una cuenca geosinclinal (González, 1993).

De acuerdo con González (1993), estas rocas se distinguen por su coloración verdosa en tonos claros y oscuros; por lo general, son rocas macizas a esquistosas con foliación bien definida que a veces se confunde con planos de diaclasamiento cuándo son ricas en anfíbol - epidota y se van haciendo finamente laminadas a medida que aumenta el contenido de clorita.

Filitas y Cuarzo - Filitas (Pes). Se presentan asociadas a un (1) polígono irregular que contiene todas las demás litologías del sector, ocupa un área de 9.380,77 ha equivalentes al 62,53% de la zona de estudio, constituyéndose en las rocas de mayor extensión.

Estas rocas abarcan esquistos cuarzo sericíticos, grafitosos, pizarras y filitas; localmente con intercalaciones de esquistos cloríticos. Son litologías de color grisáceo a negro, presentan grano fino a muy fino con bandeamiento composicional, están bien foliadas y replegadas con venas de cuarzo lechoso de segregación metamórfica; además, muestran una mayor recristalización e indican un alto grado de metamorfismo, hasta facies anfibolita (González, 1993).

Gonzales (1993) indica que las filitas y cuarzo - filitas (Pes) exhiben variaciones texturales y composicionales; pueden pasar de cuarcitas por aumento en el contenido de cuarzo, a filitas por incremento de sericita o a esquistos micáceos por la intensificación de moscovita - biotita. Son rocas originadas a partir de una secuencia sedimentaria pelítica con intercalaciones de arenitas cuarzosas en un ambiente de plataforma continental, en condiciones reductoras que permitieron preservar materia orgánica (González, 1993).

Cuarcitas y Cuarcitas Biotíticas - Feldespáticas (Pnq). Se presentan como trece (13) cuerpos alargados sin una orientación particular y distribuidos de manera aleatoria, ocupan un área de 357,38 ha correspondientes al 2.38% de la zona de estudio. El cuerpo de mayor extensión se ubica en la vereda Balcones del municipio de Samaná, en inmediaciones de la quebrada San Agustín.

Para Gonzáles (1993), estas rocas varían de cuarcitas a esquistos cuarzosos de grano fino compuesto por cuarzo sacaroidal y bandas micáceas, son litologías macizas, granoblásticas de grano fino y color gris claro hasta esquistosas heteroblásticas de grano fino y color gris oscuro a negro, lo cual, indica variaciones composicionales del sedimento original y sus condiciones de depósito.

Las cuarcitas suprayacen neises feldespáticos y, son a su vez, suprayacidas por mármoles como la unidad de menor grado de metamorfismo. Respecto a los esquistos sericíticos, muestran variaciones agradacionales marcadas por un aumento en el contenido de micas, lo cual, indicaría cambios en la cuenca de depositación con aumento gradual en el contenido de material arcilloso y orgánico (González, 1993).

Rocas ígneas intrusivas.

El ascenso de rocas ígneas, con edades del plioceno, mioceno, eógeno y cretáceo, instruyeron o atravesaron las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca. Las rocas del plioceno - eógeno son principalmente cuerpos hipoabisales porfídicos que constituyen geoformas sobresalientes, interpretadas como antiguos cuellos volcánicos rodeados por terrenos sedimentarios o volcano-sedimentarios (González, 1993); estos cuerpos fueron denominados como: Pórfido de El Morro (Tadm), Pórfido de Puente Linda (Tadp) Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh) y Stock de El Hatillo (Tcdh). Las rocas ígneas del cretácico corresponden al Complejo Ígneo de Samaná (Kds) y La Alaskita de Samaná (Kas), relacionadas en espacio y tiempo.

Pórfido de El Morro (Tadm). Se muestra como un (1) cuerpo sub-redondeado ubicado en el extremo noreste del área de estudio, vereda Cuatro Esquinas del municipio de Samaná y asociado al Cerro Castillo - La Selva; tiene una extensión de 578,28 ha correspondientes al 3,88% de la zona de estudio.

Son rocas porfíricas de edad pliocénica con fenocristales de plagioclasa milimétricos a centimétricos y escasos cristales de hornblenda. La textura de estos cuerpos de matriz afanítica, ocasionalmente con vidrio, indican que la etapa final de cristalización se efectuó muy cerca de la superficie; los fenocristales se formaron a profundidad con un enfriamiento lento (González, 1993).

Pórfido de Puente Linda (Tadp). Estas rocas ocupan un área de 177,38 ha correspondientes al 1,18% del polígono de estudio, se presentan como tres (3) cuerpos sub-redondeados y elongados, alineados en sentido Norte - Sur. El más grande de ellos se encuentra en la vereda la Esmeralda y es cortado por la quebrada La Rica, los otros dos se ubican en la vereda Villeta, ambos sectores pertenecientes al municipio de Samaná.

Se asocia a cuerpos porfíricos de edad pliocénica con fenocristales y micro-fenocristales de plagioclasa, cuarzo escaso y anfíboles tipo hornblenda. Hay presencia de brecha polimícticas asociadas a la intrusión, con líticos del mismo pórfido (Rueda-Gutiérrez, 2019).

Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh). Se presenta como un (1) pequeño cuerpo tabular de 4,01 ha que representan el 0.02% del área de estudio, se localiza en la vereda Costa Rica del municipio de La Victoria.

Se relaciona con un conjunto de cuerpos porfiríticos de edad miocénica que presentan fenocristales de plagioclasas y anfíboles, dentro de una matriz criptocristalina. Químicamente son de composición andesítica y algunos pocos se encuentran en el límite dacítico con una geomorfología dómica, cuya matriz luce mucho más vítrea (Rueda-Gutiérrez, 2019).

Stock de El Hatillo (Tcdh). Se muestra como un (1) cuerpo redondeado, cortado por el límite inferior del área de estudio, posee un área de 62,89 ha ubicadas en la vereda el Silencio, al suroeste de la escuela Santa Rita; la proporción del área del Stock de El Hatillo, respecto a la zona de estudio, es del 0,41%.

Según González (1993), corresponde a un cuerpo irregular, elongado en sentido Norte - Sur, compuesto por cuarzodioritas y tonalitas biotíticas equigranulares de grano grueso y edad eógeno. Su aureola de contacto alcanza hasta las facies de hornblenda - cornubianita, truncando las isógradas de metamorfismo regional de bajo grado, localmente está cubierto por depósitos piroclásticos.

Complejo Ígneo de Samaná (Kds). Esta unidad geológica es llamada “Complejo” debido a que las relaciones espaciales entre los diferentes tipos de rocas ígneas que lo componen, no son claras y difíciles de ver en campo (Rueda-Gutiérrez, 2019). En el área de estudio se muestra como

un (1) cuerpo elongado en sentido Norte - Sur con límites curvilíneos, cubre un área 2.462,95 ha entre la región la Palma de Montes y la vereda Macias del municipio de Samaná, equivalentes a un 16.41% del polígono de estudio.

En este Complejo Ígneo, de edad cretácica, predomina la facie granítica y, en menor proporción, la diorítica; presenta pequeños diques maficos dioríticos - gabroicos. Químicamente las rocas son clasificadas como gabros, dioritas y granitos (Rueda-Gutiérrez, 2019); además, incluye alaskitas, cuarzodioritas y gabros con hornblenda y piroxeno (Barrero & Vesga, 1976); son rocas masivas de grano medio a grueso, inequigranulares, ocasionalmente con estructura foliada por efectos dinámicos (González, 1993).

Alaskita o Leocogranito de Samaná (Kas). Son rocas temporal, espacial y composicionalmente relacionadas con el Complejo Ígneo de Samaná, ocupan un área de 353.29 ha distribuidas en dos (2) cuerpos alargados en dirección NNE-SSE cortados por dos fallas que arrastran esquistos sericíticos del Complejo Cajamarca. Los polígonos asociados a la Alaskita corresponden al 2,35% del área total de estudio, se localizan en las veredas Segovia y Brasil del municipio de Samaná.

Son rocas generalmente de tonos blancos, de composición félsica con cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico. Químicamente se encuentran en el campo de los monzogranitos y sienogranitos (Rueda-Gutiérrez, 2019); forman una corona en el borde oriental del complejo ígneo, posiblemente como facie marginal, presentan grano grueso, inequigranulares (González, 1993).

Rocas Sedimentarias

En el área de estudio las rocas sedimentarias están representadas por litologías pliocénicas estratificadas de la Formación Mesa (Tsm) (Dueñas & Castro, 1981) y Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto) de edad cuaternaria y que se disponen discordantemente sobre rocas más antiguas.

Formación Mesa (Tsm). Las rocas de la Formación Mesa se presentan en el municipio de Victoria, esquina sureste del área de estudio. Se exponen en 2,11 ha correspondientes al 0.01% del polígono de análisis.

Esta formación geológica se caracteriza por presentar una morfología plana o meseta en su parte superior, con paredes verticales circundantes. Litológicamente está compuesta por alternancias de lutitas, areniscas, arenas tobáceas y gravas con cantos de rocas volcánicas, además muestra bancos de conglomerados, areniscas conglomeráticas y algunas intercalaciones de limolitas y cenizas volcánicas (González, 1993).

Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto). Se muestran como cuerpos sub-redondeados con superficies irregulares. El casco urbano del municipio de Samaná se encuentra sobre estos depósitos; los cuales, cubren un área de 865,35 ha equivalentes al 5,76% de la zona de estudio.

Los depósitos piroclásticos están constituidos por capas gruesas de cenizas y lapilli con suelos fósiles intercalados; cuando se depositan en medio acuoso aparecen delgadas capas de

arcilla (González, 1993). Los depósitos glaciófluviales muestran flujos de lodo y delgadas capas de tefras (Barrero & Vesga, 1976). En general, son depósitos de ceniza volcánica, flujos de pómez, tobas y tefras asociados a procesos de sobretensión y nubes ardientes (González, 1993).

6.3.5.2 Mapa temático de geodinámica

La geodinámica del área de estudio es inherente a los procesos tectónicos que dieron origen a la Cordillera Central de Colombia, tales como: colisión continental, orogénesis acrecional y tectónica extensional y compresiva, ocurridos desde el Proterozoico hasta el Cenozoico (Cediel, 2019).

La cartografía de la geodinámica identificada en la zona de investigación se apoyó en la geología estructural y las líneas de contacto de los cuerpos ígneos intrusivos registrados en la Geología de la Plancha 188 - La Dorada -, compilada por Barrero & Vesga (1976). Los contactos, fallas y lineamientos fueron validados y complementados con el Mapa Metalogénico de Colombia realizado por Paredes et al. (2020), incluyendo interpretaciones estructurales efectuadas a partir de un modelo de elevación digital (HillShade - DEM 12 m -) y el análisis de imágenes Landsat 8 descargadas del U.S. Geological Survey; a las cuales, se les aplicaron geo-procesos de combinación de bandas (Figura 6 - Anexo 3).

Las imágenes Landsat 8 corresponden a la Escena ID: lc80090562014232lgn00 de agosto 21 del 2014, con tamaño de celda pancromática de 15 m y tamaño de celda reflectiva y térmica de 30 m. El análisis de las imágenes, mediante software ArcGIS 10.8, se realizó con la

función aritmética de bandas compuestas 4/3, 6/2 y 7/3 para generar una imagen con un alto contraste geológico (Navarro et al., 2021).

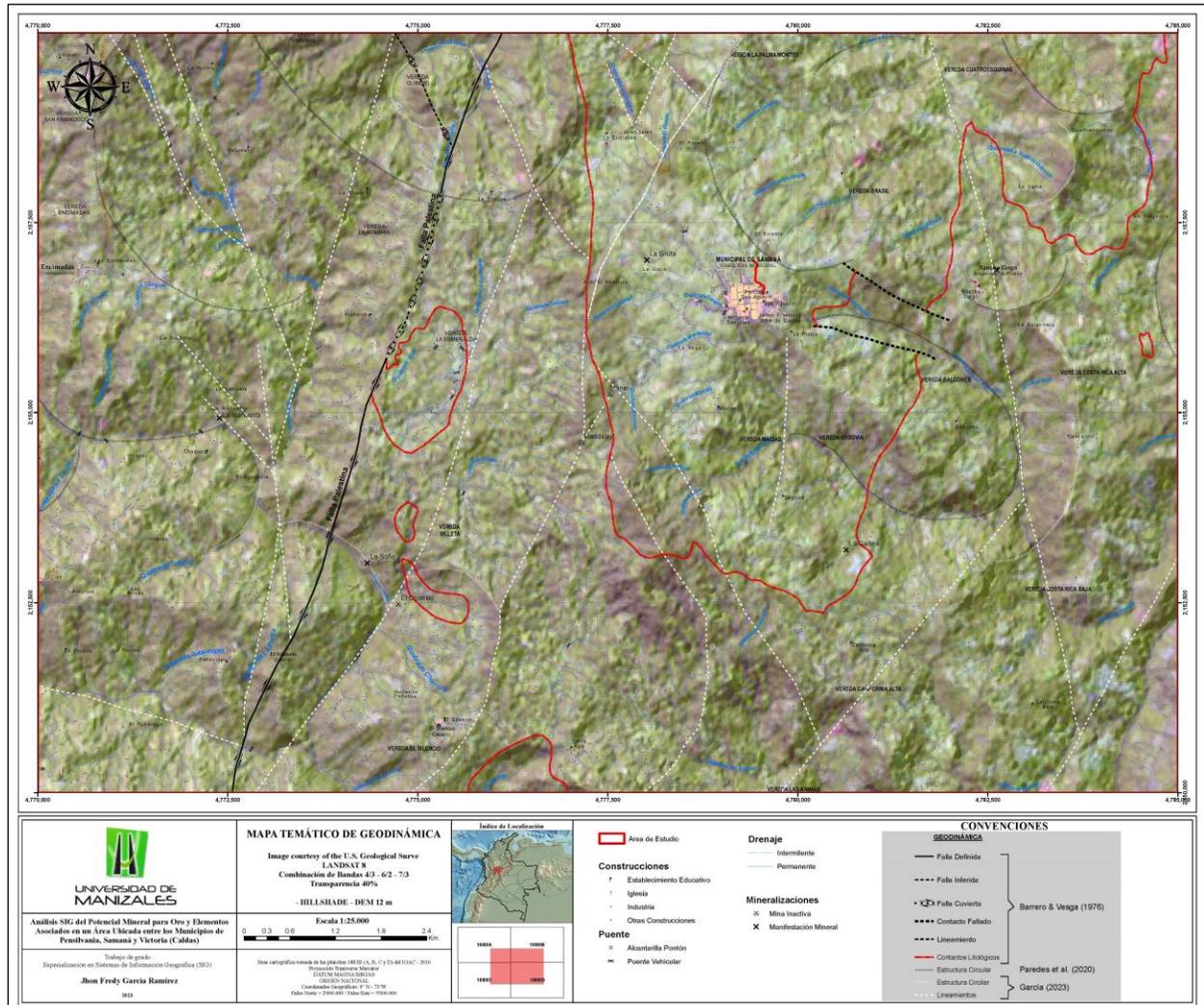


Figura 6. Mapa Temático de Geodinámica.

Editado de la Geología de la Plancha 188 - La Dorada - (Barrero & Vesga, 1976), el Mapa Metalogénico de Colombia (Paredes et al., 2020). HillShade - DEM 12 m e Imagen Landsat 8 con Combinación de Bandas 4/3, 6/2 y 7/3.

Los contactos litológicos, fallas geológicas, lineamientos y estructuras circulares son rasgos de la geodinámica relacionada con zonas de debilidad o fractura que pueden servir como canales de transporte y depositación de mineralizaciones de oro y elementos asociados.

Contactos litológicos

Los contactos litológicos entre rocas ígneas intrusivas y rocas metamórficas del Complejo Cajamarca son blancos de prospección mineral al presentar geodinámicas físicas (fracturas) y químicas (alteraciones hidrotermales); por tal motivo, la presente investigación involucra las líneas de contacto definidas por Feininger et al., (1972) entre el Complejo Cajamarca y los Pórfidos del Morro (Tadm), Puente Linda (Tadp) y Andesítico Hornbléndico (Tadh), además del Stock del Hatillo (Tcdh), Complejo Ígneo de Samaná (Kds) y Alaskita de Samaná (Kas).

Fallas geológicas

La Falla de Palestina, cartografiada por Feininger et al., (1972) como una estructura vertical de cinemática dextral y desplazamiento medido de 27,7 Km, es la única falla geológica identificada físicamente en la zona de estudio. Esta estructura tiene una dirección NNE-SSW con tramos definidos e inferidos sobre las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y tramos cubiertos sobre Depósitos Piroclásticos y Glacífliuviales; localmente, pone en contacto el Pórfido de Puente Linda (Tadp) con las rocas metamórficas.

Cortés (1990) describe la Falla Palestina como un sistema conjugado de diaclasas de compresión y cizallamiento; además, identificó la prolongación meridional de la estructura con rumbo N15°E en el Oriente del Departamento de Caldas.

Lineamientos

Los rasgos lineales o lineamientos corresponden a geoformas del terreno orientadas en una dirección predeterminada por factores geológicos que previsiblemente reflejan fenómenos del

subsuelo (Chuvienco, 1990). Los lineamientos se pueden interpretar como presuntas fallas geológicas o discontinuidades litológicas que alinean drenajes, escarpes, silletas o depresiones en parte aguas, entre otros rasgos geomorfológicos; con estas interpretaciones ha sido posible predecir y, hasta ubicar con cierta precisión, zonas mineralizadas u objetivos que deberían incluir investigaciones geológicas más detalladas (Berrezueta et al., 2012).

Lineamientos NWW. La Geología de la Plancha 188 - La Dorada - presenta, en el área de estudio, dos (2) lineamientos que al parecer desplazan de forma paralela rocas del Complejo Ígneo de Samaná (Kds) en la cabecera de la quebrada San Agustín, al este del casco urbano del municipio de Samaná.

El modelo digital de elevación y las combinaciones de bandas compuestas 4/3, 6/2 y 7/3 de las imágenes Landsat 8, permitieron interpretar una serie de lineamientos y estructuras circulares descritas a continuación. Entre los lineamientos NWW se encuentra uno (1) identificado en la esquina suroeste del área de estudio, sectores La Florida y Fandango; el mismo, alinea la quebrada Sebastopol y se trunca sobre la falla Palestina.

Lineamientos NNE. Los rasgos lineales NNE, la foliación de las rocas metamórficas y las estructuras mineralizadas identificadas en el área de estudio, visualmente están asociadas a la geodinámica de la falla Palestina debido a su paralelismo.

El análisis geo-espacial permitió identificar ocho (8) lineamientos NNE con algunas variaciones NE ubicadas en el sector sureste del área de estudio, localidades de California y

Costa Rica, esto debido, posiblemente, a un mayor distanciamiento del trazo principal de la falla Palestina. Entre los sectores de La Manuela y La Esmeralda, algunos lineamientos NNE se perciben con desplazamientos en dirección noroeste, además, se observan algunas estructuras circulares que los unen.

Lineamientos NNW. Son estructuras que visualmente unen, desplazan o truncan lineamientos NNE, en algunas ocasiones muestran aperturas de alineaciones paralelas que se desprenden en forma de V cerrada, esta característica se muestra en la esquina noroeste del área de estudio, entre los sectores de la Aurora y Yarumal.

Estructuras Circular. Paredes et al. (2020), cartografiaron en el área de estudio una serie de estructuras con formas de arco abierto o cerrado, asociadas a geomorfologías semicirculares interpretadas como posibles cuerpos intrusivos que no alcanzaron la superficie. Los cuerpos subvolcánicos son fuentes factibles de mineralizaciones.

El análisis SIG del presente estudio permitió identificar una estructura circular cerrada sobresaliente, ubicada al noroeste de la zona de estudio en la vereda Quindío, donde se presentan rasgos semicirculares en los cauces de las quebradas El Tabor y Gallera, controlados posiblemente por un cuerpo dómico sin exhumar. Además del anterior aporte técnico, se identificaron y dibujaron cinco (5) estructuras de semiarco.

6.3.5.3 Mapa temático de geoquímica

La geoquímica de superficie, respecto a contenidos de oro (Au) en 174 muestras de estructuras mineralizadas y rocas, fue suministrada por la Compañía Mandalay Minerales S.A.S como extitular de contratos de exploración mineral en el municipio de Samaná (Caldas); sin embargo, sus muestreos se concentraron en la antigua mina Mandalay y su zona de influencia localizada en el sector de Altamira, cabecera de la quebrada Villeta al suroeste del casco urbano del municipio de Samaná, con la imposibilidad de cubrir uniformemente la geoquímica del área de estudio (Figura 7 - Anexo 4).

Los estudios de Mandalay Minerales relacionan tres (3) estructuras vetiformes expuestas en minas abandonadas, con tenores de oro entre 0,1 y 17,75 gr/ton. La tendencia promedio de las vetas es N65E con espesores entre 0,2 y 0,8 m y mineralizaciones de pirita 3%, arsenopirita 5%, galena 1% y trazas de calcopirita.

Un depósito o yacimiento es un área donde se ubican concentraciones naturales de sustancias minerales útiles, las cuales, bajo circunstancias favorables pueden ser extraídas con rendimientos económicos; agrupan ocurrencias, prospectos y productores minerales (Paredes et al., 2020), estos últimos corresponden a minas activas, inactivas o abandonadas.

Un prospecto es un área donde se ubican anomalías minerales que han merecido estudios geológicos en etapas iniciales de investigación, con el fin de determinar su valor económico. Una ocurrencia es un área donde se presenta un indicio o manifestación mineral de interés geológico que ha sido objeto de medidas y/o muestreos limitados, donde los datos no permiten interpretar con certeza la continuidad de la mineralización (López et al., 2018).

La localización y descripción de las ocurrencias, prospectos y productores minerales de la zona de estudio, se realizó con base en los siguientes mapas y documentos: Mapa Metalogénico de Colombia (Paredes et al., 2020), Depósitos de Metales y Minerales Preciosos de Colombia, Grupo I (Au, Ag, Pt, Esmeraldas) (Prieto Gómez, 2010), Geología de la Plancha 188 (La Dorada) (Barrero & Vesga, 1976) y Recursos Minerales del Departamento de Caldas (J. H. López, 1971) (Figura 8 - Anexo 5).

En el área de la investigación, según los estudios anteriores, se identificaron tres (3) ocurrencias minerales denominadas La Manuelita, El Morro y La Esmeralda; cinco (5) prospectos minerales llamados La Gallina I y II, Rancho Largo, La Gruta y La Sofia y; cuatro (4) productores minerales correspondientes a las minas abandonadas del Chorrillo, El Dorado, Mandalay y Sinaí.

La Tabla 1 relaciona los metales descubiertos en las ocurrencias, prospectos y productores mencionados, su mineralogía, vetas y espesores, además de sus anotaciones geológicas.

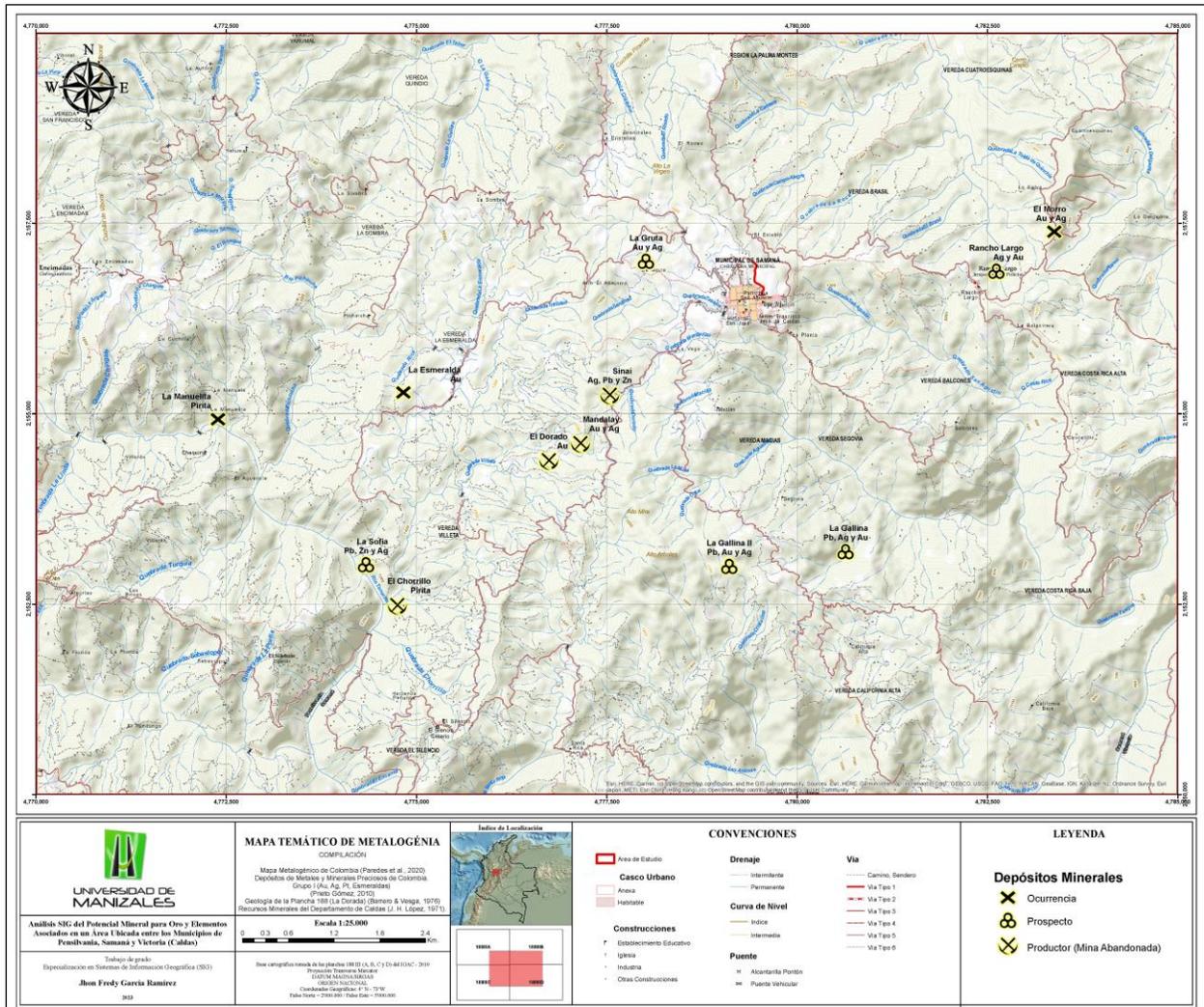


Figura 8. Mapa Temático de Metalogénia
 Localización ocurrencias, prospectos y productores minerales.

En general, de acuerdo con Paredes et al. (2020), el área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Metalogénica Andina Central (PMAC), limitada al este por el Sistema de Fallas de Palestina y al oeste por el Sistema de Fallas de Romeral, presenta un magmatismo Mioceno - Pleistoceno de composición calco - alcalina asociado a subducción y representado por cinturones de mineralizaciones Au (Cu) de tipo pórfido - epitermal de media a baja sulfuración.

Tabla 1. Descripción geológica de las ocurrencias, prospectos y productores minerales del área de estudio. Complicada de (J. H. López, 1971), (Prieto Gómez, 2010) y (Paredes et al., 2020)

Ocurrencia, Prospecto o Productor Mineral	Metales	Mineralogía	Espesor y vetas	Anotaciones geológicas
Ocurrencia LA MANUELITA	-	Cuarzo, Pirita	Veta N-S/90 con espesor de 1,30 m	Veta de cuarzo ligeramente piritizada, concordante con la foliación de esquistos cuarzo-grafitosos; asociaciones geoquímicas de Ag-Pb, Cu-Mo y Au-As.
Ocurrencia EL MORRO	Oro y Plata	Cuarzo, Pirita		Mineralización tipo pórfido de py + cuarzo + proustita en vetillas y disseminada encajada en pórfido andesítico.
Ocurrencia LA ESMERALDA	Oro	-	-	Mina abandonada a cielo abierto identificada en el inventario minero. Grupo 1 (Minerales Preciosos, 2010).
Prospecto LA GALLINA I y II	Plomo, Plata y Oro.	Galena (argentífera), Blenda, Pirita y Calcopirita	Vetas E-W/90 con espesores entre 0,35 y 2,00 m	Se presentan vetas mesotermales con minerales de galena, escasa pirita y calcopirita en zona de contacto entre esquistos cuarzo-micáceos y cuarzodioritas atravesando ambas formaciones; Asociaciones geoquímicas de Pb-Zn-Cd, Au-Ag-As y Cu-Mo, (W).
Prospecto RANCHO LARGO	Plata y Cobre.	Pirita y ¿Calcopirita?	Vetas N36° W/48°E. con espesores de 0,70 y 1,20 m.	Vetas con sulfuros dentro de esquistos grafitosos, evidencias de tectónica post-genética; asociaciones geoquímicas de Ag-Pb-Zn, Cu-Mo, (Au-As)
Prospecto LA GRUTA	Oro, Plata y trazas de Cobre.	Cuarzo, Pirita y trazas Calcopiritas.	Vetas N 70° E/60°N. Zona mineralizada de 2,60 m	Presenta dos (2) vetas cuarzosas separadas por una zona esquistosa muy bien mineralizada. Filones en proximidad con el contacto de esquistos cuarzo-micáceos y las rocas ígneas cuarzodioríticas; mineralización pobre en ambas salbandas. Con trincheras se comprobó la desaparición del filón muy cerca al afloramiento estudiado; asociaciones geoquímicas de Au-Ag-As, As-Sb y Ag-Pb-Zn.
Prospecto LA SOFIA	Plomo, Zinc, Plata y Oro	Cuarzo, Esfalerita, Galena, y Calcopirita,	Vetas N50°E/57°SE con espesores de 0,40 y 0,45 m	Mineralización mesotermal, filones encajados en esquistos cuarzo-grafitosos muy cerca al contacto con cuarzodiorita; Asociaciones geoquímicas de Zn-Pb-Ag.
Productor Mina Abandonada EL CHORRILO	Oro	-	-	Zona de esquistos cuarzo-micáceos. No se observó ningún mineral expuesto ni en escombrera.
Productor Mina Abandonada EL DORADO	Oro	-	-	Mina abandonada identificada en el inventario minero. Grupo 1 (Minerales Preciosos, 2010).
Productor Mina Abandonada MANDALAY	Oro, Plata, trazas de Cobre	Cuarzo, Pirita, trazas de Calcopirita	Vetas N30°W y N60° E con buzamientos entre 30° y 56° E y	Vetas entre rocas ígneas cuarzodioríticas ubicadas muy cerca al contacto con las rocas metamórficas.

Ocurrencia, Prospecto o Productor Mineral	Metales	Mineralogía	Espesor y vetas	Anotaciones geológicas
			espesores entre 0,30 y 1,00 m	
Productor Mina Abandonada SINAÍ	Plata, Plomo, Zinc y Arsénico	Cuarzo, Piritita, Arsenopiritita y poca Galena y Esfalerita	Veta N20°W/35°E con espesor de 0.7 m	Veta de cuarzo en esquistos cuarzosos muy meteorizados, mineralización en lentejones.

6.3.5.5 Mapa temático de geofísica

La geofísica del área de investigación fue tomada del Mapa de Anomalías Geofísicas de Colombia realizado por Moyano et al., (2020) con el alcance de apoyar la prospección mineral, hidrogeológica y geotérmica. El Mapa recopila información geofísica adquirida, procesada e interpretada por el SGC desde el año 2013, datos que fueron recolectados mediante métodos de magnetometría y gamma espectrometría aerotransportada.

Moyano et al., (2020) generaron con los datos geofísicos tres (3) cartografías: Mapa de Anomalía de Intensidad Magnética Total (IMT), Mapa de Señal Analítica de la Anomalía Magnética de Campo Total (ACT) y Mapa radiométrico de distribución ternaria de la concentración relativa de Potasio (K), Torio (Th) y Uranio (U); sin embargo, para el presente estudio solo se tomó el IMT ya que la magnetometría es un método de exploración geofísica que mide las variaciones del campo magnético de la tierra debidas a la magnetización de las rocas que conforman la corteza terrestre (Reeves, 2005).

La magnetización depende principalmente del contenido de minerales magnéticos tales como Magnetita y Pirrotina, los cuales están comúnmente asociados con diferentes tipos de yacimientos minerales. Las “Anomalías Magnéticas” indican contrastes y cambios en el contenido de minerales imantados en las rocas, que no existiría si el subsuelo tuviera una composición uniforme (Moyano et al., 2020).

El área de estudio se encuentra dentro del levantamiento aerogeofísico de la Zona Andina Norte, Bloques 6 del Mapa de Anomalía de Intensidad Magnética Total (IMT) cuya anomalía

corresponde a la gama de colores con tonos más cálidos, como el magenta y rojo. Las anomalías podrían estar correlacionadas con rasgos geológicos identificables en superficie o por una fuente geológica profunda asociada a cuerpos intrusivos, diques, zonas de alteración hidrotermal, vulcanismo, fallas, entre otros (Moyano et al., 2020) (Figura 9 - Anexo 6).

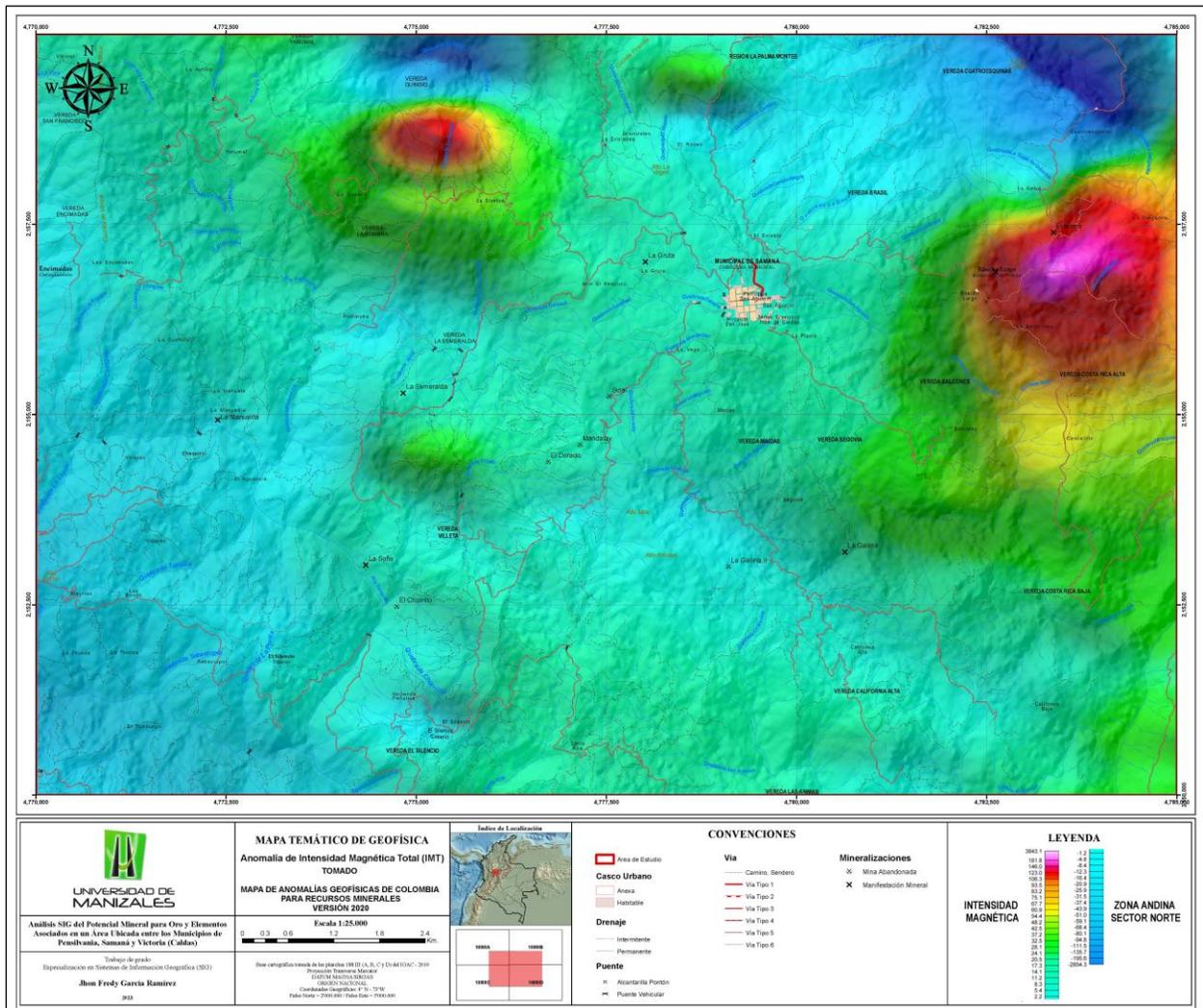


Figura 9. Mapa Temático de Geofísica
 Mapa de Anomalia de Intensidad Magnética Total (IMT) editado del Mapa de Anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales (Moyano et al., 2020).

El Mapa Temático de Geofísica muestra dos (2) fuentes magnéticas redondeadas a elongadas, probablemente asociadas a cuerpos ígneos hipoabisales cubiertos por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca. Según Moyano et al. (2020), los máximos magnéticos se

interpretan como resultado de complejos intrusivos profundos de rocas máficas a ultramáficas, este es posiblemente el caso de la anomalía más grande ubicada en el extremo noreste del área de estudio, vereda Costa Rica Alta, quebrada Planes, donde además se localiza el prospecto de Au y Ag de Rancho Largo y la ocurrencia de Au y Ag del Morro; es posible que este cuerpo sea la continuidad a profundidad del Pórfido del Morro, ya que la anomalía cubre parcialmente su expresión en superficie.

También para Moyano et al. (2020), los valores medios de susceptibilidad magnética pueden corresponder a plutones félsicos (granitos a tonalitas), siendo posiblemente el caso de la anomalía más pequeña ubicada al noreste de la zona de estudio, entre las veredas La Sombra y Quindío, quebrada La Gallera; la cual, además concuerda con la estructura circular identificada en la presente investigación, interpretada como la expresión geomorfológica superficial de un cuerpo ígneo sin exhumar.

6.3.6 Ajustes, ediciones y rasterizaciones de las diferentes capas de los mapas temáticos.

Los ajustes y ediciones de las diferentes capas de los mapas temáticos son requisito técnico para sus posteriores reclasificaciones (reclassify), paso indispensable para el uso de la herramienta de superposición ponderada (weighted Overlay) con la que se definirá el potencial mineral para oro y elementos asociados; por tal motivo, las capas fueron recortadas o ajustadas al área de estudio, además de ser convertidas al mismo sistema de coordenadas, escala y formato.

Las capas vectoriales representadas por puntos, líneas o polígonos fueron convertidas a formato ráster con el empleo de diferentes herramientas de rasterización según objetivos técnicos de favorabilidad mineral. En los geoprocesos se unificaron los tamaños de celdas a 12 m de píxel.

6.3.6.1 Rasterización de la geología

Para rasterizar las capas litológicas del mapa de geología, se empleó la herramienta *Feature to Raster* de la caja *Conversion Tools* (Figura 10).

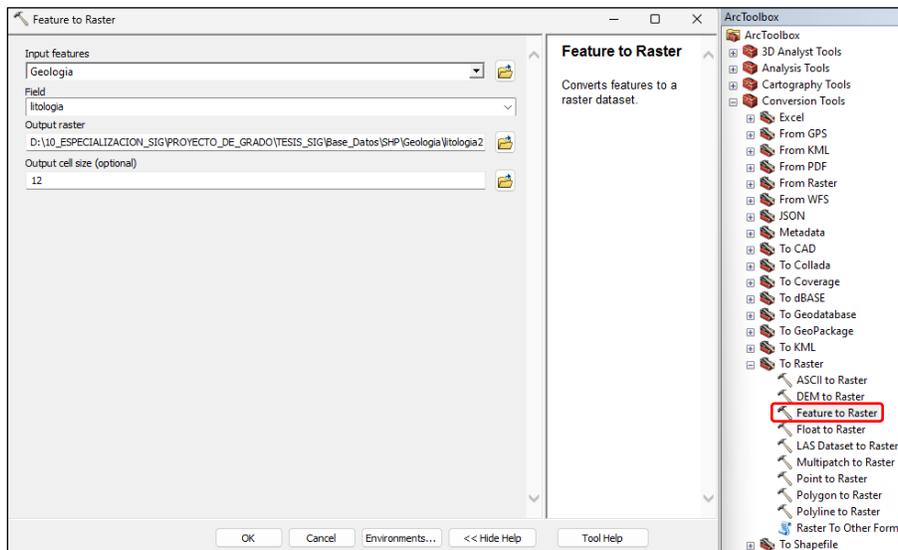


Figura 10. Geoproceso de rasterización de la geología.

La salida gráfica, producto del anterior geoproceso, corresponde a una imagen en formato ráster nativo de Esri, asociada a una nueva capa con simbologías generadas por defecto para cada una de las litologías del mapa geológico. Se generaron once (11) clases o categorías, consecuentes con las unidades geológicas originales (Figura 11).

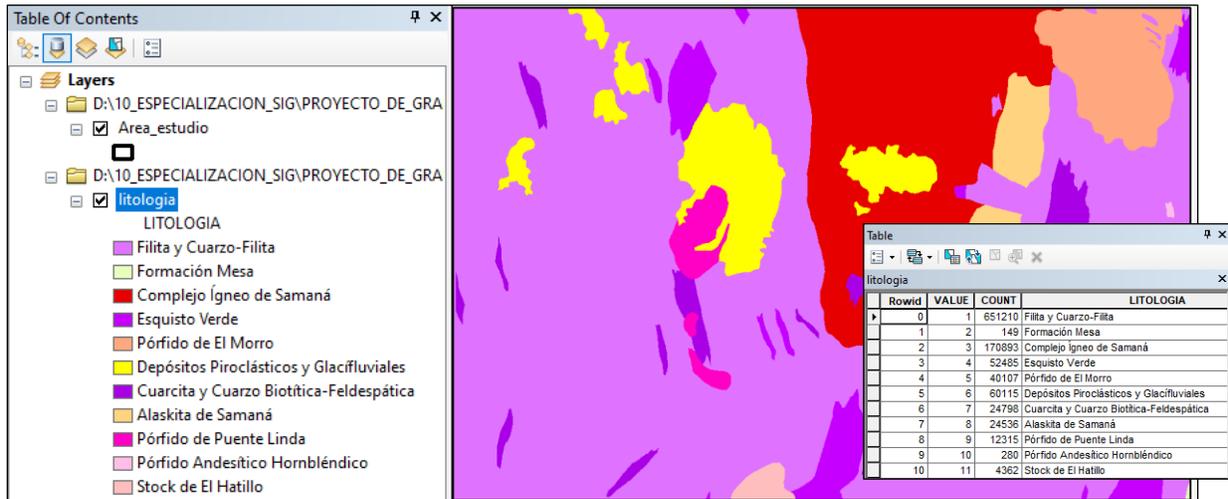


Figura 11. Salida gráfica de la rasterización de la geología.

Sobre las once (11) categorías, más adelante se agregarán criterios de favorabilidad mineral; es decir, cuáles son las litologías con mayores probabilidades de contener un depósito de oro y elementos asociados.

6.3.6.2 Rasterización de la geodinámica

Para rasterizar la capa de geodinámica se tubo presente que es un archivo vectorial de líneas asociadas a posibles canales o vías de mineralización, por tanto, se podrían encontrar depósitos minerales metálicos inherentes a las diferentes estructuras identificadas en el área de estudio, por tal motivo, los criterios de favorabilidad mineral estarían ligados a la distancia de su fuente, a mayor distancia de las líneas estructurales, menor sería la posibilidad de hallazgo de minerales de interés.

El presente estudio consideró una distancia máxima de 300 m para los lineamientos y estructuras circulares y de 500 m para los contactos litológicos intrusivos y la Falla Palestina.

La definición de una mayor distancia obedeció a criterios de favorabilidad mineral más sólidos relacionados a estructuras regionales, las cuales, presentan evidencias físicas documentadas por Feininger et al. (1972), González (1993), entre otros, que hacen de la falla Palestina y los contactos intrusivos las estructuras más relevantes.

Antes de rasterizar archivos vectoriales, por medio de la pestaña de geoprocésamiento (geoprocessing), es necesario configurar el entorno de trabajo (environment settings) a través de la extensión del procesamiento (processing extent) (Figura 12).

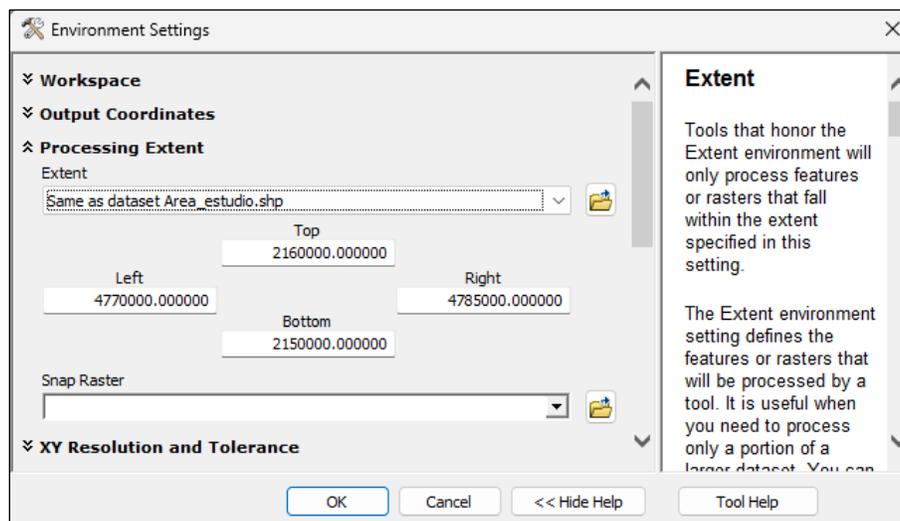


Figura 12. Configuración del entorno de trabajo, antes de rasterizar archivos vectoriales.

La distancia euclidiana (euclidean distance) de la herramienta de análisis espacial (spatial analyst tools), es el geoprocésamiento de rasterización que se utilizó para establecer las distancias, anteriormente definidas, para el conjunto de estructuras geológicas reconocidas en el área de estudio (Figura 13).

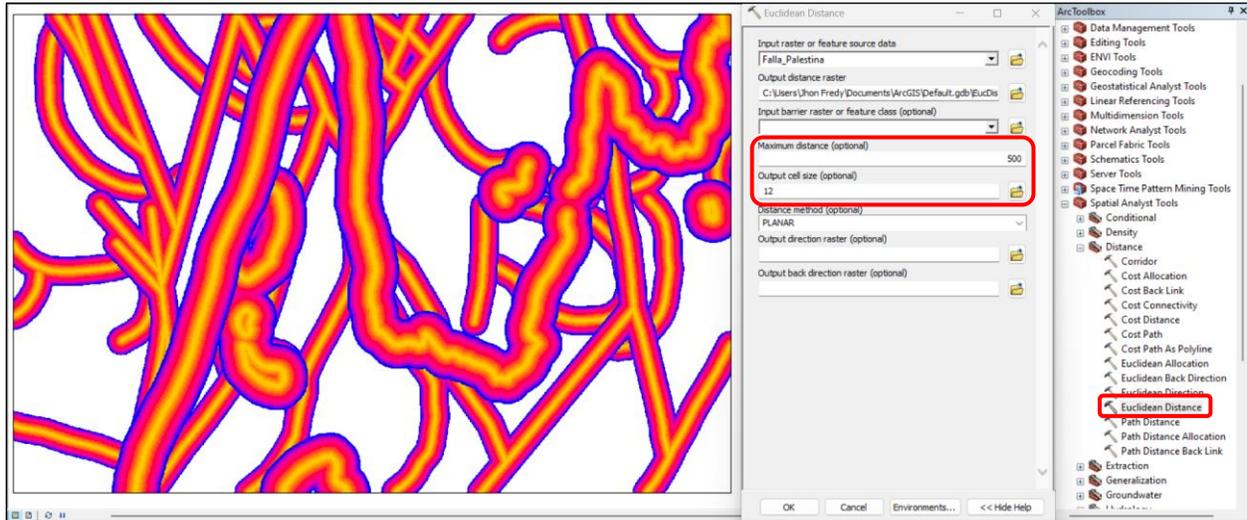


Figura 13. Proceso y salida gráfica de la rasterización de la geodinámica.

6.3.6.3 Rasterización de la geoquímica

La geoquímica corresponde a una capa vectorial de puntos con datos numéricos que permiten hacer una interpolación, para así crear un ráster continuo. Hay diferentes modelos matemáticos, sin embargo, el presente trabajo considera, para el caso de la geoquímica de superficie, que el más adecuado es el peso ponderado por el inverso de la distancia (Inverse Distance Weighted - IDW -).

En este método, cada punto de la muestra ejerce su influencia sobre los demás puntos y disminuye en función de la distancia. Así, cada punto vecino contará con un “peso” en la determinación del valor del punto a interpolar, que será mayor cuanto más cerca se encuentre, siguiendo el principio de correlación espacial (Benito, 2020).

El geoproceto se realizó empleando un radio de búsqueda fijo de 500 m (search radius fixed) debido a la desigual distribución de las muestras en el área de estudio; por tanto, el radio de

búsqueda variable (search radius variable) no fue una opción debido a que esta solo se emplea en muestras con distribución uniforme (Figura 14).



Figura 14. Proceso y salida gráfica de la rasterización de la geoquímica.

6.3.6.4 Rasterización de la metalogénia

El archivo vectorial de puntos, compuestos por ocurrencias, prospectos y productores minerales hacen parte de los eventuales yacimientos minerales del mapa metalogénico editado para el área. Estos puntos presentan concentraciones de minerales asociados a metales preciosos, sus clasificaciones corresponden al grado de conocimientos técnicos obtenidos en prospecciones históricas.

Las ocurrencias obedecen a indicios o manifestaciones minerales con estudios incipientes o restringidos que no permiten establecer la geometría de estructuras o cuerpos mineralizados; los prospectos indican anomalías minerales con investigaciones iniciales que pueden dar una idea hipotética de la geometría de un posible yacimiento mineral y, los productores son labores mineras con conocimientos técnicos o empíricos que permiten establecer, de manera local, la geometría de estructuras ricas en minerales que ameritan su extracción y beneficio con rendimientos

económicos. En el área de estudio se presentan puntos productores que corresponden a minas antiguas abandonadas.

En consecuencia, las diferencias entre ocurrencias, prospectos y productores minerales corresponden a sus niveles de conocimiento prospectivo. Las ocurrencias presentan bajos estudios geológicos, los prospectos tienen investigaciones geológicas moderadas y los productores poseen altas prospecciones minerales; sin embargo, para considerar el área donde se presentan, como yacimientos minerales, es necesario estudios de exploración detallados que permitan definir la forma, calidad y cantidad de las mineralizaciones. Algunos productores con estudios de factibilidad pueden ser considerados depósitos o yacimientos.

Para la rasterización de los puntos de metalogénia, se consideró una distancia radial de 300 m para las ocurrencias y prospectos minerales, identificados como puntos con menor conocimiento geológico - minero y, una distancia radial de 500 m para los productores minerales, establecidos como puntos con información geológica relevante, consecuente con la localización de minas abandonadas con registros de producción (J. H. López, 1971).

Las distancias serán posteriormente reclasificadas para establecer criterios de favorabilidad, teniendo presente que, a mayor distancia de su punto focal, menor serán las posibilidades de encontrar mineralizaciones de interés. La distancia euclidiana (euclidean distance) de la herramienta de análisis espacial (spatial analyst tools), es el geoproceto de rasterización que se utilizó para cubrir las distancias radiales, anteriormente definidas, desde los puntos de metalogénia reconocidos en el área de estudio (Figura 15).



Figura 15. Proceso y salida gráfica de la rasterización de la metalogénea.

6.3.6.5 Rasterización de la geofísica

El mapa geofísico de anomalías de Intensidad Magnética Total (IMT) de Moyano et al., (2020), descargado del Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG) del Servicio Geológico Colombiano, corresponde a una imagen RGB de tres (3) bandas sin valores de Intensidad Magnética, por tanto, no es posible clasificar sus valores representados en gamas de colores para generar una imagen ráster parametrizable.

Por lo anteriormente expuesto, la presente investigación realiza interpretaciones técnicas del Mapa Temático de Geofísica, de acuerdo con los valores de intensidad magnética representados gráficamente, los cuales, apoyan y validan la generación de polígonos rasterizables con parámetros de favorabilidad mineral. Los cuerpos magnéticamente anómalos generan un drástico contraste de intensidades magnéticas, los valores altos y bajos espacialmente continuos insinúan la presencia de cuerpos de interés prospectivo, si los valores fuesen regulares, el subsuelo tendría una composición uniforme (Moyano et al., 2020).

De acuerdo con la anterior base de análisis, en el área de estudio se presentan dos zonas con marcados contrastes de intensidad magnética total que varían entre + 3,843.1 nT y - 2,854.3 nT. La primera zona, de mayor contraste, se ubica al noreste del área de estudio, sobre la vereda Costa Rica Alta, quebrada Planes, a la altura del Prospecto Rancho Largo y la Manifestación el Morro; esta anomalía se asocia al Pórfido del Morro (Tadh), sin embargo, los valores más altos se presentan sobre las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, esto podría significar que el pórfido se extiende subterráneamente con picos magnéticos de interés exploratorio. La segunda zona se localiza al noroeste, sobre la vereda Quindío, quebradas el Tambor y la Gallera, donde la falla Palestina se bifurca hacia el noroeste y donde, además, se muestra una estructura circular, posiblemente asociada al cuerpo magnético subterráneo que sugiere la geofísica (Figura 16).

Con base en la anterior interpretación se establecieron cuatro (4) contornos anómalos que encierran los contrastes magnéticos y los isovalores positivos asociados, los cuales, fueron rasterizados por medio de la herramienta Feature to Raster de la caja Conversion Tools, teniendo presente la continuación del tamaño de pixel de 12m.

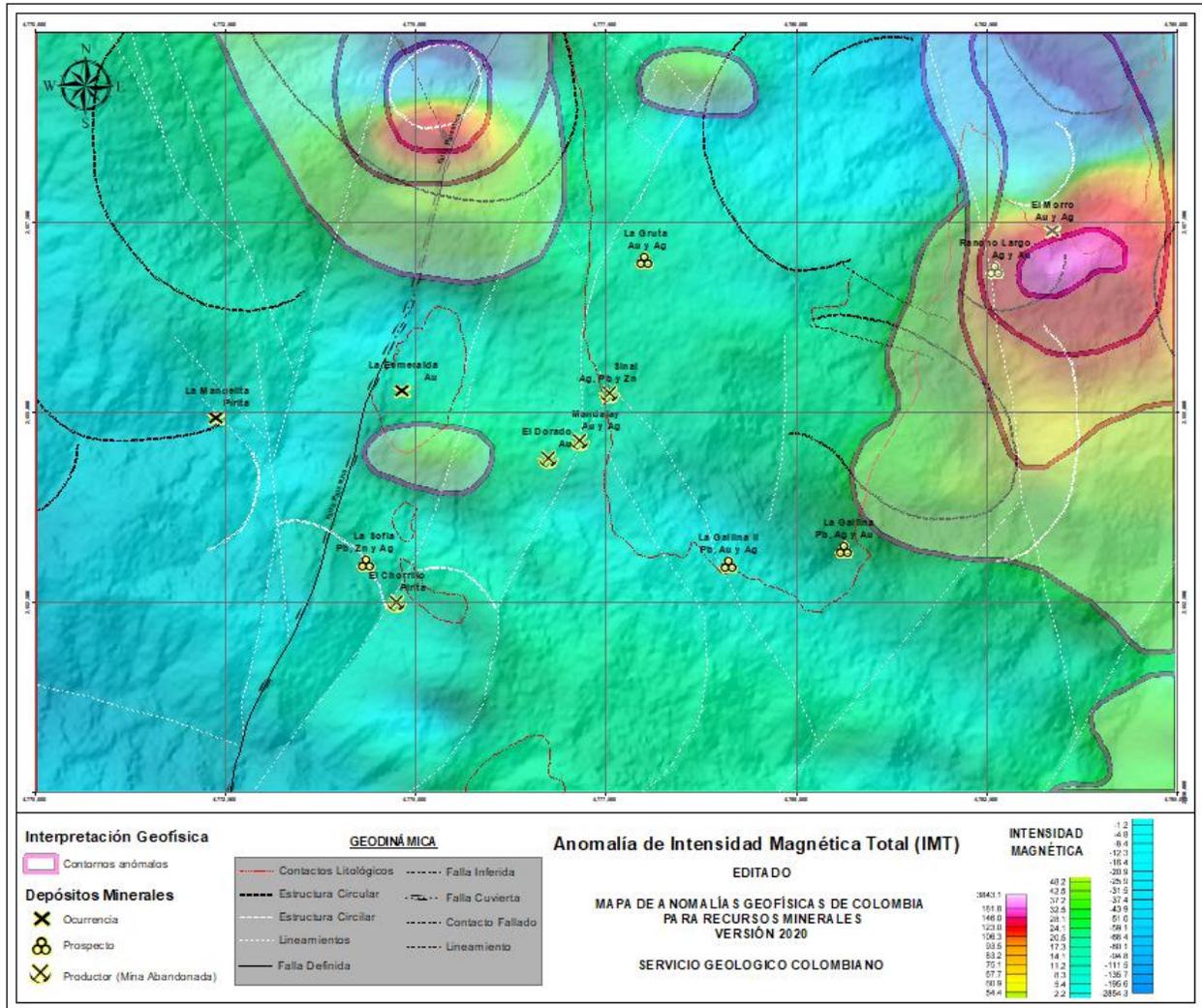


Figura 16. Interpretación geofísica de las anomalías de intensidad magnética total.

6.3.7 Criterios de favorabilidad mineral y reclasificación

Para evaluar el potencial mineral de un área, primero es necesario estudiar y definir criterios técnicos que permitan estimar la presencia o ausencia de elementos favorables o propicios para la ocurrencia de minerales valiosos, esto a través de la valoración de las capas que componen los mapas temáticos que apoyan la exploración mineral. La interpretación de información técnica permite la identificación de ambientes favorables para albergar depósitos minerales y los procesos geológicos que les dieron origen (Goudarzi, 1984).

La *favorabilidad mineral* corresponde a un entorno geológico asociado a contrastes litológicos, mecánicos, físicos, químicos, mineralógicos, entre otros; mientras que el *potencial mineral* hace referencia a un área específica que cualifica la integración de los criterios de favorabilidad, preliminarmente valorados.

Para cada una de las capas de los mapas temáticos se estimaron categorías de valor dentro de una escala de 1 a 10, la cual, permitió definir diferentes grados de favorabilidad para el hallazgo de oro y elementos asociados, donde 1 es el criterio menos favorable y 10 el más favorables, como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Categorías de favorabilidad mineral

Cuando no se tiene certeza de si una categoría en concreto era favorable o no, se le asignó un valor de 5, en lugar de 1, para no cometer el error de descartar una zona que en realidad sí podría tener un yacimiento de oro.

6.3.7.1 Favorabilidad mineral de la geología

La geología del área de estudio presenta once (11) categorías litológicas representadas por rocas metamórficas (3), ígneas (6) y sedimentarias (2).

Rocas metamórficas.

En el área de estudio, las rocas metamórficas están constituidas por Filitas y Cuarzo - Filitas (Pes), Esquistos Verdes (Pev) y, Cuarcitas y Cuarcitas Biotíticas - Feldespáticas (Pnq) pertenecientes al Complejo Cajamarca.

El Complejo Cajamarca presentan mineralizaciones vetiformes de oro y plata relacionadas a sistemas de tipo orogénico (J. López et al., 2018); además, presentan anomalías minerales emplazadas al interior de zonas de cizalla (González, 2001).

Según Angée M. & Betancur O. (2018), los esquistos grafitosos (Pes) del Complejo Cajamarca y, en menor proporción, los esquistos verdes y micáceos (Pev), presentan tres (3) eventos mineralizantes: 1). Vetas de cuarzo masivas con mineralización diseminada, 2). Vetas de cuarzo bandeado con sulfuros y, 3). Vetas con mineralización diseminada.

La zona de investigación presenta mineralizaciones en las Filitas y Cuarzo - Filitas (Pes), principalmente en la manifestación La Manuelita, el prospecto Rancho Largo y las minas abandonadas de Mandalay, El Dorado y El Chorrillo; además, en menor proporción, se presentan mineralizaciones sobre Esquistos Verdes (Pev) y, Cuarcitas y Cuarcitas Biotíticas - Feldespáticas (Pnq) primordialmente en el prospecto La Sofia (Figura 18).

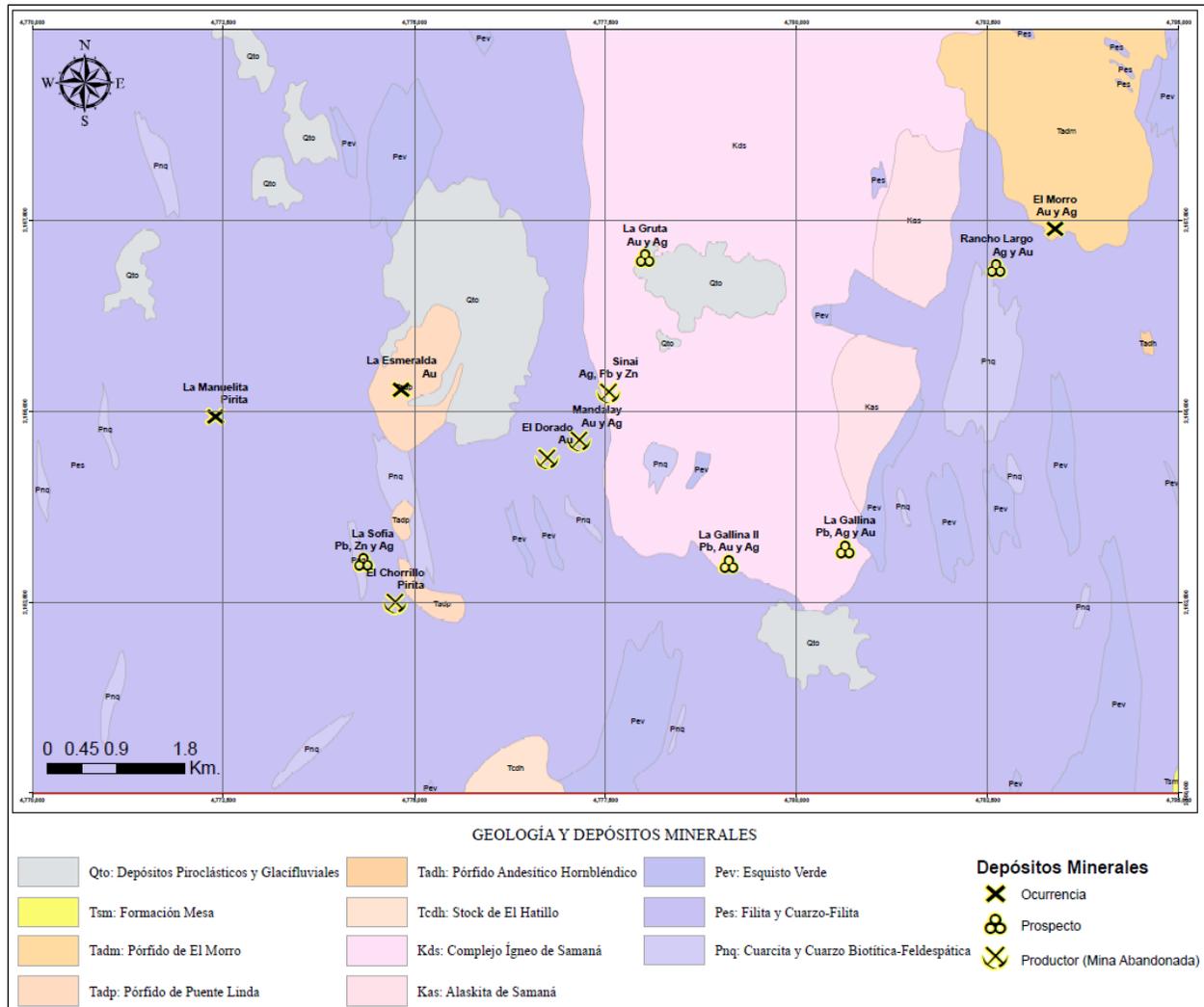


Figura 18. Mapa de geología y depósitos minerales

Los anteriores criterios técnicos permitieron estimar los siguientes grados de favorabilidad mineral para las rocas metamórficas del área de estudio:

1. Filitas y Cuarzo - Filitas (Pes) = 9
2. Esquistos Verdes (Pev) = 7
3. Cuarzitas y Cuarzitas Biotíticas - Feldespáticas (Pnq) = 6

Rocas ígneas intrusivas.

En la zona de estudio, las rocas ígneas están representadas por el Pórfido de El Morro (Tadm), Pórfido de Puente Linda (Tadp), Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh), Stock de El Hatillo (Tcdh), el Complejo Ígneo de Samaná (Kds) y La Alaskita de Samaná (Kas).

El Pórfido de El Morro (Tadm), ubicado al oriente del Cinturón Au (Cu) del Río Dulce, está ligado a la intrusión de múltiples episodios mineralizantes de metales preciosos (Au - Ag) y metales base (Cu - Pb - Zn), en su mayoría, magmáticos - hidrotermales con diatremas, venas y vetas epitermales (Leal Mejia, 2011; J. López et al., 2018; Shaw et al., 2019). La ocurrencia de Au y Ag denominada El Morro, se encuentra sobre El Pórfido que lleva su mismo nombre (Figura 18).

El Pórfido de Puente Linda (Tadp) pertenece al llamado Suite de Río Dulce, compuesto por un conjunto de stocks porfiríticos de composición diorítica a granodiorítica, cortados por brechas diatremas freato - magmáticas; estos cuerpos albergan mineralizaciones vetiformes de Au - Ag asociadas a sistemas de tipo epitermal, así como disseminaciones de pirita fina, con trazas de esfalerita + calcopirita + molibdenita (Leal Mejia, 2011).

Según Shaw et al. (2019), el Suite de Río Dulce podría representar un nivel cortical más superior que el clúster Cajamarca - Salento, de tal forma que los sistemas mineralizados tipo pórfido no han sido exhumados todavía; este podría ser el caso de la estructura circular identificada en la presente investigación al noroeste de la zona de estudio, en la vereda Quindío. La ocurrencia de Au denominado La Esmeralda se encuentra sobre El Pórfido de Puente Linda (Figura 18).

El Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh), según Rueda-Gutiérrez (2019), presenta brechas de matriz alterada y muy deleznable color amarillento, compuestas por líticos de esquistos negros y pórfidos andesíticos en los contactos con el Complejo Cajamarca, con indicios de minería artesanal cerca al sector de Puente Linda de Nariño (Antioquia). Es posible que estos cuerpos porfiríticos de composición predominantemente andesítica, emplazados a finales del neógeno, se encuentren relacionados con mineralizaciones de Au-Ag (González, 1993).

El Stock de El Hatillo (Tcdh) pertenece a un grupo de intrusivos que tipifican una fase de magmatismo de arco que perduró hasta el Eoceno, asociados a mineralizaciones vetiformes de Ag-Au-Pb-Cu-Zn (Barrero & Vesga, 1976; González, 1993). También se incluyen dentro de este evento, la mineralización de los distritos de Sonsón - Argelia, Maltería y Líbano - Santa Isabel, relacionados espacialmente con el Batolito de Sonsón, el Stock de Manizales y el Stock de El Hatillo (Leal Mejia, 2011).

El Complejo Ígneo de Samaná (Kds) y La Alaskita de Samaná (Kas) presentan mineralizaciones de tipo mesotermal a epitermal, principalmente en las zonas de contacto con las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca donde se conocen vetas con oro y plata; sin embargo, algunas de sus anomalías minerales son desconocidas (González, 1993; Lozano & Pulido, 1986; Pérez & Lozano, 1975). La mina abandonada de Sinaí y los prospectos de Pb, Au y Ag de Las Gallinas y La Gruta, se encuentran labradas sobre rocas del Complejo Ígneo de Samaná (Figura 18).

Los anteriores criterios técnicos permitieron estimar los siguientes grados de favorabilidad mineral para las rocas ígneas intrusivas del área de estudio:

4.	Pórfido de El Morro (Tadm)	=	8
5.	Pórfido de Puente Linda (Tadp)	=	10
6.	Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh)	=	6
7.	Stock de El Hatillo (Tcdh)	=	9
8.	Complejo Ígneo de Samaná (Kds)	=	8
9.	La Alaskita de Samaná (Kas)	=	8

Rocas Sedimentarias

En la zona de estudio, las rocas sedimentarias están representadas por la Formación Mesa (Tsm) y Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto).

La Formación Mesa (Tsm) presenta intercalaciones de lodolitas, areniscas y conglomerados de paleocorrientes, corresponden a canales fluviales fosilizados con trazas de minerales metálicos (Pelaez Isaza, 2012). Los Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto) son estériles de mineralizaciones, su génesis no produce minerales preciosos de interés económico.

Los anteriores criterios técnicos permitieron estimar los siguientes grados de favorabilidad mineral para las rocas sedimentarias del área de estudio:

10.	La Formación Mesa (Tsm)	=	6
11.	Los Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto)	=	1

Después de definidos los criterios de favorabilidad, se procedió con la reclasificación de las once (11) categorías litológicas, esto a través de códigos numéricos debido a que los campos de texto generan problemas en el geoprocso (

Tabla 2).

Tabla 2. Asignación de criterios de favorabilidad de la geología de acuerdo con los códigos numéricos (value #) determinados automáticamente por el sistema.

LITOLÓGÍA	VALUE (#)	CRITERIO
Filita y Cuarzo-Filita	1	9
Formación Mesa	2	6
Complejo Ígneo de Samaná	3	8
Esquisto Verde	4	7
Pórfido de El Morro	5	8
Depósitos Piroclásticos y Glacífloviales	6	1
Cuarcita y Cuarzo Biotítica-Feldespática	7	6
Alaskita de Samaná	8	8
Pórfido de Puente Linda	9	10
Pórfido Andesítico Hornbléndico	10	6
Stock de El Hatillo	11	9

La reclasificación (reclassify) de las capas geológicas se realizó por medio de las herramientas de análisis espacial (spatial analyst tools > reclass), específicamente para el campo valor (value) con códigos únicos (unique), esto significa que el sistema agrupa los diferentes polígonos de la litología con el mismo criterio numérico de favorabilidad (Figura 19).

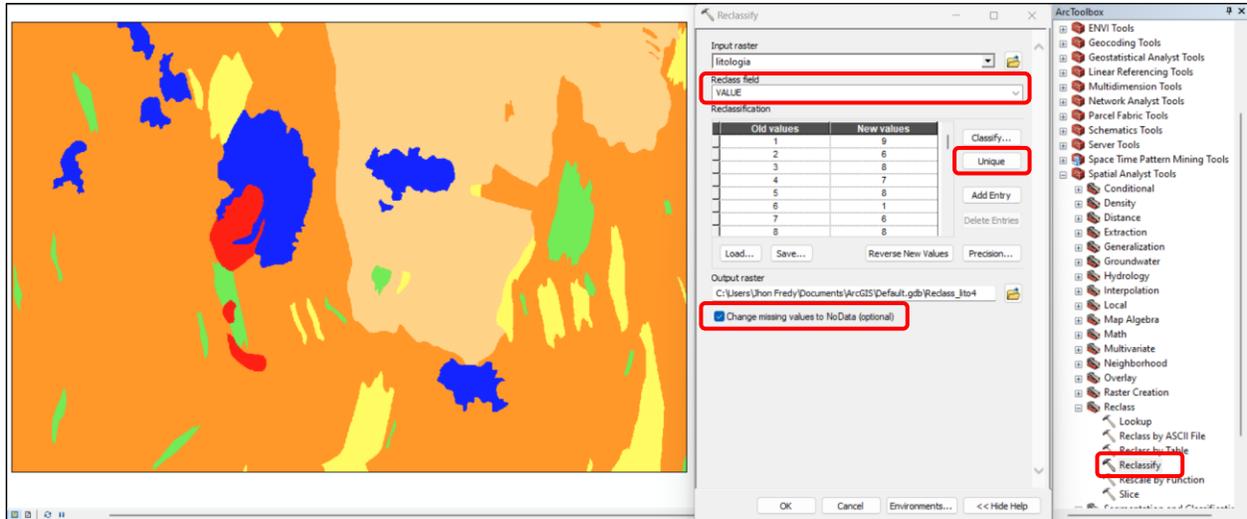


Figura 19. Procesos y salida gráfica de la reclasificación de la geología rasterizada.

6.3.7.2 Favorabilidad mineral de la geodinámica

El grado de favorabilidad mineral de la geodinámica es directamente proporcional a la escala de influencia de las estructuras geológicas en una distancia determinada. En el área de estudio, La Falla Palestina y Los Contactos Litológicos Intrusivos podrían llegar a tener una zona de influencia de 500 m en ambos lados de sus trazados, mientras que los Lineamientos y Estructuras Circulares podrían presentar efectos dinámicos hasta una distancia de 300 m a lado y lado de sus delineaciones.

En consecuencia, las celdas o píxeles ubicados más cerca de los trazados o delineaciones de las estructuras geológicas, definen las áreas más promisorias para descubrir minerales movilizados a través de canales asociados a zonas de debilidad estructural. Los fundamentos geológicos consideran de mayor relevancia las fallas y contactos litológicos definidos, respecto a los lineamientos y estructuras circulares interpretadas; por tal motivo, se diferenciaron sus posibles alcances de las zonas de influencia de 500 m y 300 m, respectivamente.

Además, se reclasificaron de manera individual cada una de las capas de la geodinámica para lograr hacer, más adelante, ponderaciones o pesos individuales que resalten las importancias mencionadas de una capa con respecto a otra, es decir, las fallas frente a los lineamientos.

Para reclasificar (reclassify) las diferentes capas rasterizadas de la geodinámica, por medio de las herramientas de análisis espacial (spatial analyst tools), fue necesario realizar la clasificación (classify) de las distancias definidas como zonas de influencia de las estructuras (Figura 20). El geoproceso se realizó a través del método de intervalos iguales (equal interval) con la aplicación de nueve (9) clases (classes) (Figura 21).

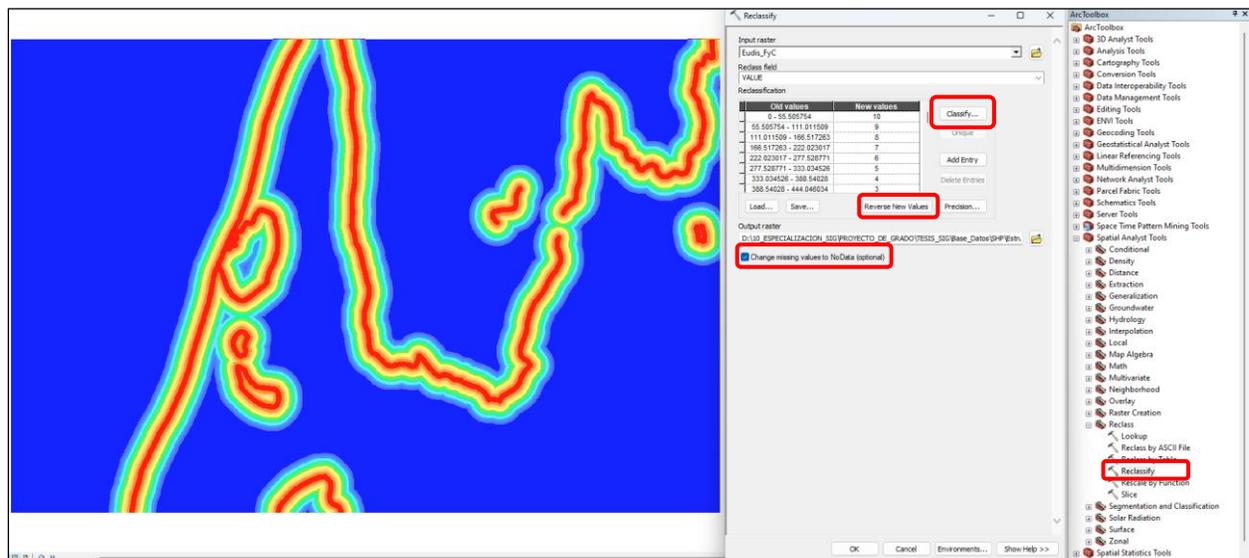


Figura 20. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la capa Falla Palestina y Contactos litológicos de la geodinámica rasterizada.

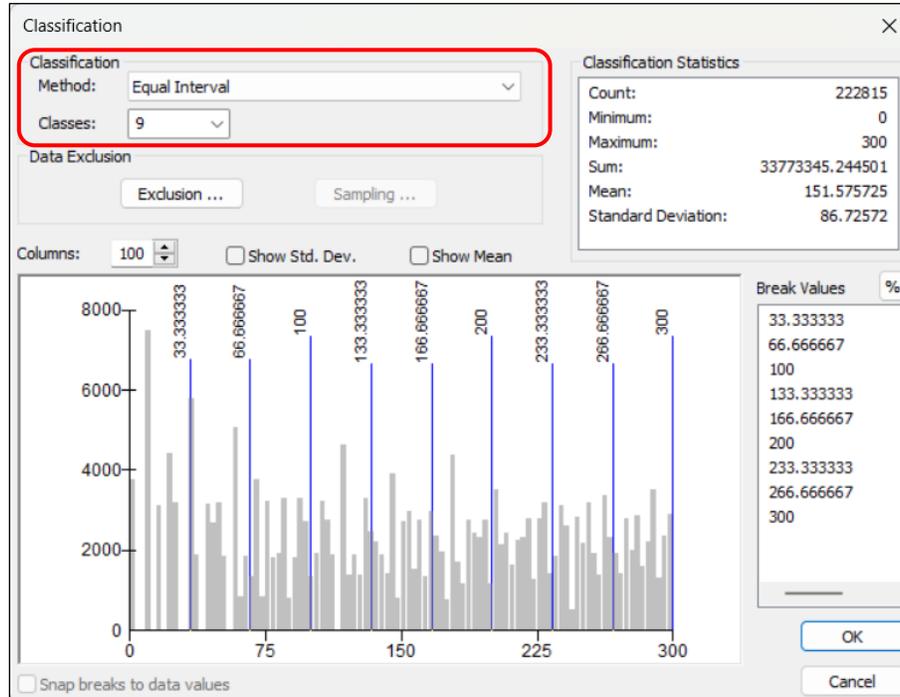


Figura 21. Clasificación de la distancia establecida como posible zona de influencia de los lineamientos y estructuras circulares (300m).

Las nueve (9) clases corresponden a distancias iguales acumulativas tomadas a partir del trazado de las estructuras geodinámicas, hasta cubrir las distancias totales de sus zonas de influencia. Los valores más bajos de distancia son los más favorables para el hallazgo de oro y minerales asociados, por tanto, se reordenaron los valores en forma inversa (reverse new values) para asignar los criterios de favorabilidad (Figura 20).

El geoproceto involucró los valores perdidos o No Data (change missing values to NoData), los cuales, corresponden a las áreas ubicadas por fuera de las distancias de influencia de las estructuras geológicas (Figura 20). A estos valores perdidos les fueron asignados el criterio más bajo (1), con el cuál, se completaron los diez (10) rangos de la categorización de la favorabilidad mineral, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Asignación de criterios de favorabilidad de la geodinámica de acuerdo con rangos de valor de

las distancias (m) determinadas automáticamente por el sistema.

GEODINÁMICA	VALUE (m)	CRITERIO
Falla Palestina y Contactos Litológicos Intrusivos	000.000 - 055.505	10
	055.505 - 111.011	9
	111.011 - 166.517	8
	166.517 - 222.023	7
	222.023 - 277.528	6
	277.528 - 333.034	5
	333.034 - 388.540	4
	388.540 - 444.046	3
	444.046 - 499.551	2
No Data	1	
Lineamientos y Estructuras Circulares	000.000 - 033.333	10
	033.333 - 066.666	9
	066.666 - 100.000	8
	100.000 - 133.333	7
	133.333 - 166.666	6
	166.666 - 200.000	5
	200.000 - 233.333	4
	233.333 - 266.666	3
	266.666 - 300.000	2
No Data	1	

6.3.7.3 Favorabilidad mineral de la geoquímica

Los criterios de favorabilidad de la geoquímica se establecieron con base al peso ponderado de los valores de oro contenidos en las muestras disponibles para el área de estudio, considerando la influencia de cada punto respecto a los demás. Para el caso de la investigación, se estableció un radio de influencia de 500 m para cada muestra, cuyo peso ponderado disminuye en función del inverso de dicha distancia (Inverse Distance Weighted - IDW -).

La reclasificación (reclassify) de la geoquímica rasterizada, por medio de las herramientas de análisis espacial (spatial analyst tools), se realizó con base en una nueva clasificación (classify)

de los pesos ponderados de oro (Figura 22). El geoproceso se realizó a través del método de quiebres naturales (natural breaks) con la aplicación de diez (10) clases (classes) (Figura 23).

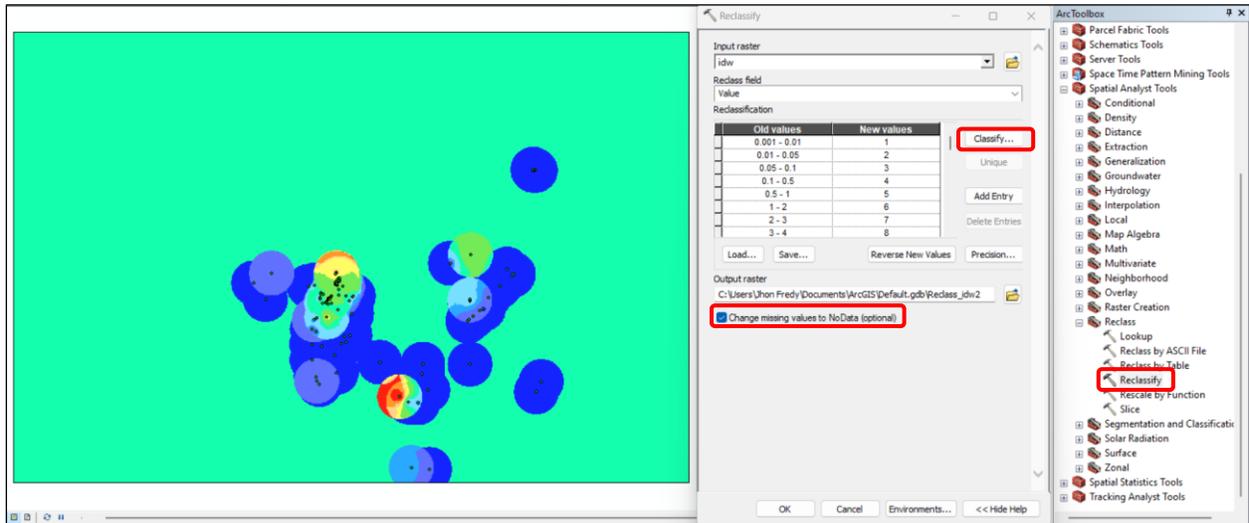


Figura 22. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la geoquímica rasterizada.

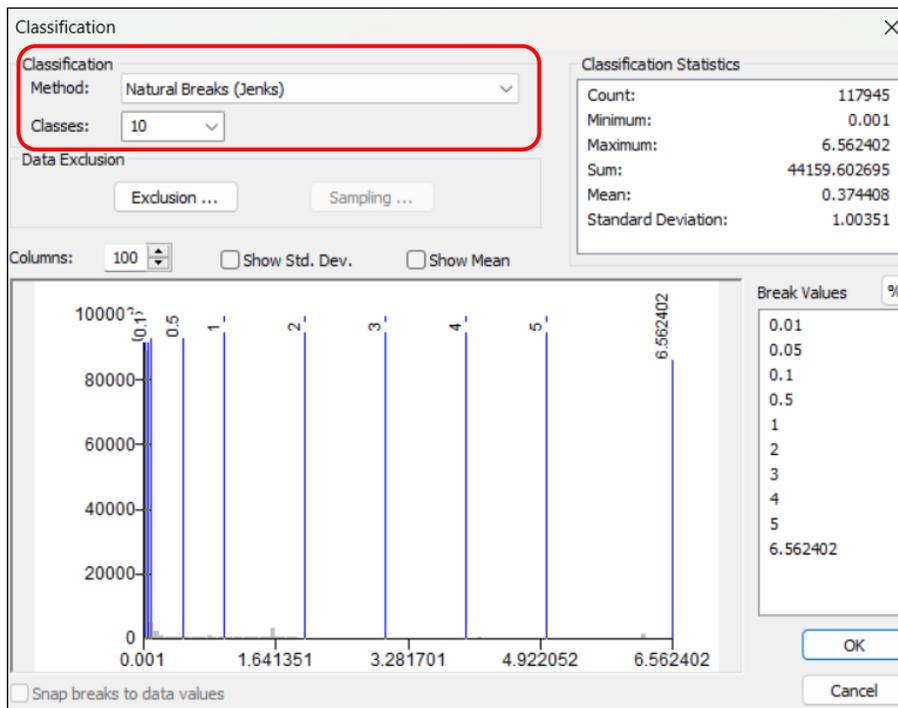


Figura 23. Clasificación de rangos de valores de oro, ponderados con la herramienta IDW.

Es de resaltar que en el área de estudio se presentan muestras de vetas con valores de oro de hasta 17.75 gr/ton, localizadas en la mina abandonada de Mandalay; sin embargo, al aplicar el

peso ponderado (IDW) el sistema promedia los valores de las muestras ubicadas en un radio de 500 m, en consecuencia, su valor se diluye dramáticamente debido a los bajos contenidos de oro en sus muestras vecinas, en ocasiones tomadas en roca caja.

Los criterios de favorabilidad mineral aplicados en la reclasificación de la geoquímica obedecen a rangos de valor de oro sobre quiebres naturales (natural breaks), los cuales, fueron ajustados técnicamente para reflejar mejor las zonas anómalas, donde el criterio # 10 representa los lugares con mayores resultados geoquímicos, dando inicio a una escala descendente con las zonas menos favorables para hallar mineralizaciones de metales preciosos, según la Tabla 4.

Como la distribución de las muestras en el área de estudio no es uniforme, se generaron zonas con valores perdidos o No Data (change missing values to NoData), las cuales, corresponden a áreas ubicadas por fuera del radio de 500m de las muestras con las que contaba la investigación, por tanto, se le asignó un criterio # 5 a No Data, en lugar de 1, para no cometer el error de descartar áreas que en realidad podrían tener anomalías minerales de oro (Tabla 4).

Tabla 4. Asignación de criterios de favorabilidad de la geoquímica de acuerdo con rangos de valor de oro en gr/ton.

GEOQUÍMICA	VALUE (gr/ton)	CRITERIO
Muestras	0.001 - 0.010	1
	0.010 - 0.050	2
	0.050 - 0.100	3
	0.100 - 0.500	4
	0.500 - 1.000	5
	1.000 - 2.000	6
	2.000 - 3.000	7
	3.000 - 4.000	8
	4.000 - 5.000	9
	5.000 - 6.562	10
No Data	5	

6.3.7.4 Favorabilidad mineral de la metalogénia

La favorabilidad de la metalogénia está directamente relacionada con la reclasificación de las distancias radiales que fueron rasterizadas desde los puntos de localización de los productores minerales (500 m) y las ocurrencias y prospectos minerales (300 m), teniendo presente que las celdas o píxeles que están más cerca a dichos puntos, se consideran los más favorables para descubrir oro y minerales asociados.

La reclasificación (reclassify) de la metalogénia rasterizada, por medio de las herramientas de análisis espacial (spatial analyst tools), se realizó con base en una nueva clasificación (classify) de distancias (Figura 24). El geoproceso se realizó a través del método manual (manual) con la aplicación de diez (10) clases (classes) (Figura 25).

Las diez (10) clases corresponden a rangos de distancias desiguales para dar mayor alcance y relevancia a las zonas cercanas a los puntos de la metalogénia, hasta cubrir las distancias totales

de sus zonas de influencia, por tanto, se reordenaron los valores en forma inversa (reverse new values) para asignar los criterios de favorabilidad (Figura 24).

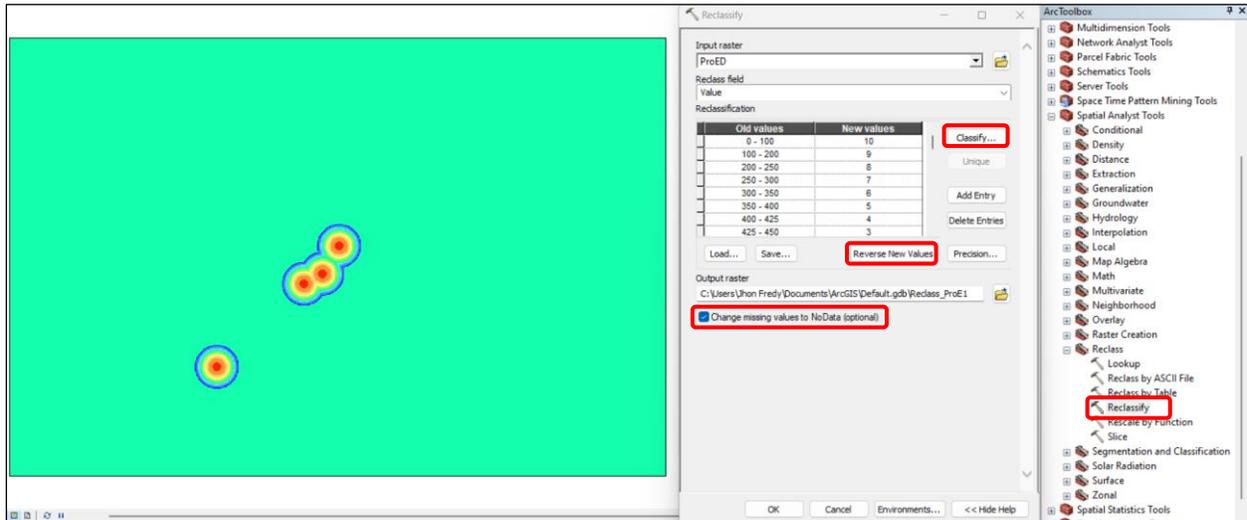


Figura 24. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la capa de productores minerales de la metalogénia

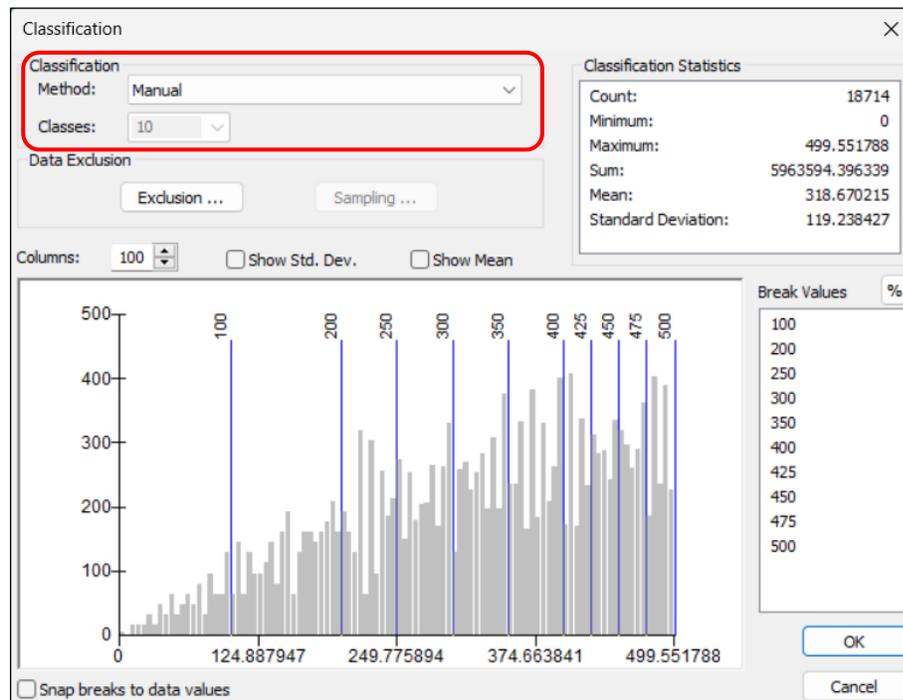


Figura 25. Clasificación de la distancia establecida de los productores minerales (500).

Las diferencias entre productores, ocurrencias y prospectos minerales son sus niveles de conocimiento prospectivo, donde los productores (minas abandonadas) presentan un mayor estudio geológico y minero, por tal motivo, se reclasificaron de manera individual para lograr hacer, más adelante, ponderaciones o pesos particulares.

Los valores perdidos o “No Data” corresponden a las áreas ubicadas por fuera de los radios predeterminados para los puntos de metalogénia, sin embargo, esto no significa que en dichas zonas no se puedan encontrar ocurrencias o prospectos minerales en futuras campañas de exploración; por tanto, se considera subjetivo asignarle un criterio # 1 de favorabilidad, razón por la cual, la presente investigación le asigna un criterio # 5 (neutral) para no castigar el área desconocida con el descarte de zonas que podrían contener mineralizaciones. La

Tabla 5 compila los criterios de favorabilidad de la metalogenia y su correspondencia con los rangos de las distancias asignadas.

Tabla 5. Asignación de criterios de favorabilidad de la metalogénia de acuerdo con rangos de valor de las distancias (m) a los productores, ocurrencias y prospectos minerales.

METALOGENIA	VALUE (m)	CRITERIO
Productores Minerales	000 - 100	10
	100 - 200	9
	200 - 250	8
	250 - 300	7
	300 - 350	6
	350 - 400	5
	400 - 425	4
	425 - 450	3
	450 - 475	2
	475 - 500	1
	No Data	5
Ocurrencias y Prospectos Minerales	000 - 050	10
	050 - 100	9
	100 - 150	8
	150 - 180	7
	180 - 200	6
	200 - 220	5
	220- 240	4
	240 - 260	3
	260 - 280	2
	280 - 300	1
	No Data	5

6.3.7.5 Favorabilidad mineral de la geofísica.

Los criterios de favorabilidad de la geofísica se realizaron con base en cuatro (4) categorías, las cuales, fueron generadas a partir de rangos de valor de la Intensidad Magnética Total (nT) expuesta en el Mapa de Anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales, realizado por Moyano et al., (2020). Los rangos cubren contrastes (nT) altos y moderados entre valores positivos y negativos, valores positivos altos inmersos en los contrastes geofísicos y valores positivos moderados contiguos a los contrastes geofísicos, según la Tabla 6.

Tabla 6. Asignación de criterios de favorabilidad de la geofísica de acuerdo con rangos de valor (nT) de intensidad magnética total.

Geofísica	VALUE (nT)	CRITERIO
Intensidad Magnética Total (IMT)	54,4 – 32,5	7
	106,3 - (-94,8)	8
	146,0 - (-2.854,3)	9
	3.843,1 - 146,0	10
	No Data	5

Los rangos de valor de la Tabla 6, permitieron generar diez (10) polígonos delimitados de manera manual, debido a que la información base de estudio correspondía a una imagen RGB de tres (3) bandas no parametrizables y, por tanto, no fue posible reclasificar los rangos de valores (nT) de acuerdo con criterios de favorabilidad. La reclasificación se realizó directamente sobre las capas rasterizadas, involucrando los valores No Data para cubrir toda el área de estudio (Figura 26).

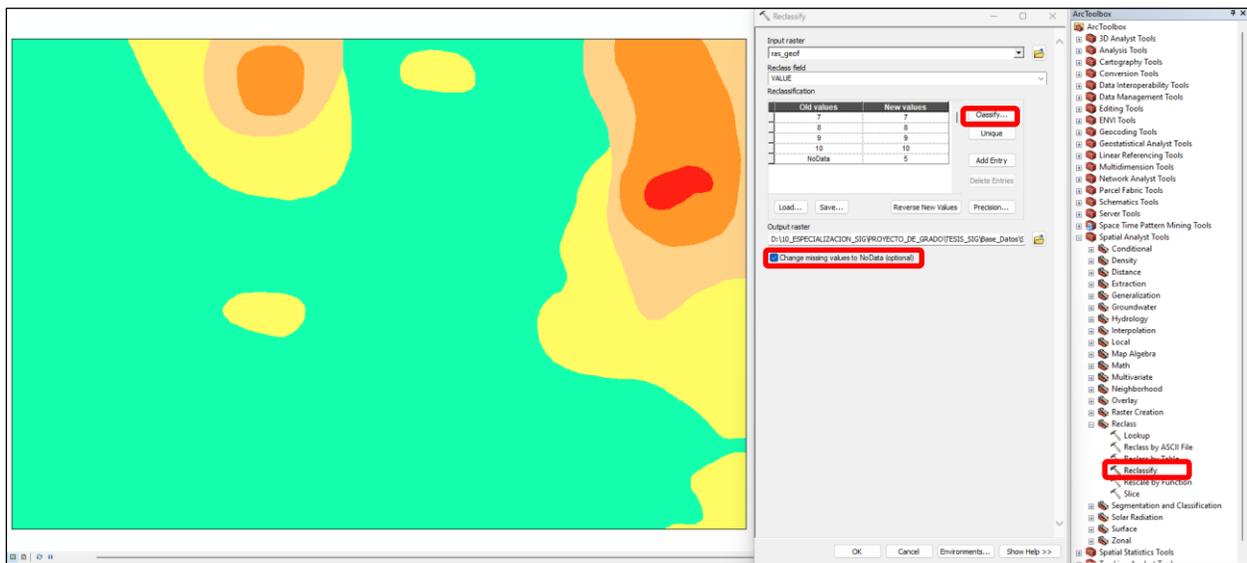


Figura 26. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de las capas de geofísica

El mayor criterio de favorabilidad geofísica (10) para el hallazgo de cuerpos con respuesta magnética, posiblemente asociados a minerales metálicos, corresponde a rangos altos positivos de

intensidad magnética total, entre los 3.843,1 (nT) y 146,0 (nT). Los altos contrastes geofísicos, asociados con rangos de valores entre los 146,0 (nT) y -2.854,3 (nT) le fue asignados un criterio de favorabilidad de 9; entre tanto, los moderados contrastes geofísicos relacionados con rangos de valores entre los 106,3 (nT) y -94,8 (nT) le fue asignado un criterio de favorabilidad de 8.

El menor criterio de favorabilidad geofísica asignado (7), producto del análisis de anomalías de Intensidad Magnética Total (IMT), corresponde a rangos moderados positivos de valores entre los 54,4 (nT) y 32,5 (nT). A los valores No Data, se les asignó un criterio de favorabilidad 5 (neutral) para evitar subvalorar áreas que no reflejan cuerpos magnéticos, generalmente asociados a intrusivos ígneos, ya que el área No Data presenta estructuras mineralizadas no identificadas por el método geofísico empleado en la presente investigación.

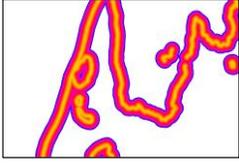
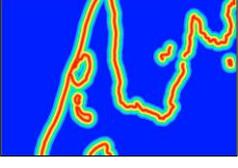
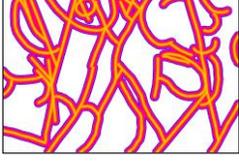
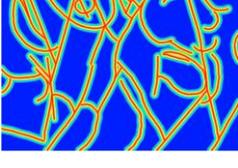
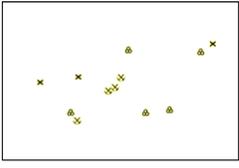
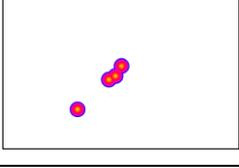
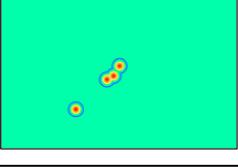
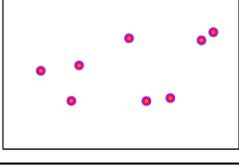
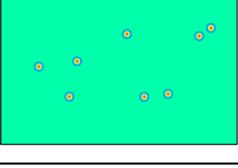
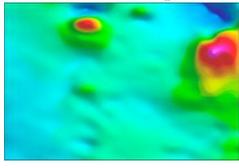
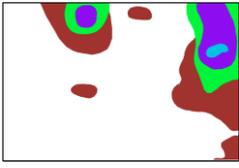
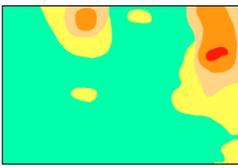
6.3.8 Superposición ponderada y reclasificación cualitativa del potencial mineral.

A continuación, se realiza un resumen de los pasos previos a la superposición ponderada con el nombre de las capas originales, intermedias y finales que se emplearon para la superposición de los mapas temáticos; igualmente, se incluye en el resumen expuesto en la

Tabla 7, todas las herramientas que se aplicaron a cada capa con los parámetros utilizados.

La superposición ponderada permite establecer la importancia de las capas de un mapa temático respecto a los demás mapas compilados; por ejemplo, la relevancia de los datos geológicos frente a la calidad y distribución de los datos geoquímicos, es decir el peso o influencia que queremos que cada temática tenga en el resultado final.

Tabla 7. Resumen del proceso de preparación de los datos para superposición ponderada.

Capas Iniciales	Proceso 1 (Pixel 12m)	Capas Intermedias	Proceso 2 (Pixel 12m)	Capas finales
Geología.shp 	Polígonos vectoriales a ráster discreto con Feature to Raster	Geología_RAS 	Asignación Criterios de favorables y Reclasificación con Reclassify	Geología_REC 
Geodinámica.shp 	Líneas vectoriales a ráster con Euclidean Distance 500 m Falla Palestina y Contactos litológicos	Geodinámica_RAS1 	Asignación Criterios de favorables y Reclasificación con Reclassify (Cubrir NoData)	Geodinámica_REC1 
	Líneas vectoriales a ráster con Euclidean Distance 300 m Lineamientos y Estructuras Circulares	Geodinámica_RAS2 		Geodinámica_REC2 
Geoquímica.shp 	Vectorial puntos a ráster continuo con Interpolación IDW empleando un radio de búsqueda fijo de 500 m	Geoquímica_RAS 	Asignar Criterios de favorables y Reclasificación con Reclassify (Cubrir NoData)	Geoquímica_REC 
Metalogenia.shp 	Vectorial puntos a ráster con Euclidean Distance 500 m Productores Minerales (Minas Abandonadas)	Metalogenia_RAS1 	Asignación Criterios de favorables y Reclasificación con Reclassify (Cubrir NoData)	Metalogenia_REC1 
	Vectorial puntos a ráster con Euclidean Distance 300 m Ocurrencias y Prospectos Minerales	Metalogenia_RAS2 		Metalogenia_REC2 
Geofísica.shp 	Polígonos vectoriales a ráster discreto con Feature to Raster	Geofísica_RAS 	Asignar Criterios de favorables y Reclasificación con Reclassify (Cubrir NoData)	Geofísica_REC 

6.3.8.1 Aplicación de la Superposición Ponderada.

Antes de aplicar la herramienta de análisis espacial denominada superposición ponderada (weighted overlay), se verificó que todos los mapas de favorabilidad mineral de geología, geodinámica, geoquímica, metalogénia y geofísica presentaran el mismo sistema de coordenadas (CTM12.prj), tamaños de píxel (12m) y rangos de favorabilidad (1 - 10).

Desplegada la herramienta de superposición ponderada se abre una tabla auxiliar; la cual, por defecto presenta una escala de evaluación de 1 a 9 y, por tanto, el techo fue necesario modificarlo manualmente por medio de las casillas From 1 To 10 By 1 para ampliar a 10 la escala, acorde con los rangos de favorabilidad establecidos en la presente investigación (Figura 27).

Sobre la misma tabla auxiliar se adicionó (+) cada una de las siete (7) capas finales o mapas ráster reclasificados (geologia_rec + geodina_rec1 + geodina_rec2 + geoqui_rec + metalo_rec1 + metalo_rec1 + geofísica_rec); adicionalmente, se verificó que todos los valores de los campos del mapa coincidieran con los valores de la escala de evaluación. En cuanto a NoData, la escala de valor se dejó con la misma denominación ya que, para el presente proceso, toda la zona de estudio cuenta con información geoespacial (Figura 27).

La ponderación o porcentaje de influencia de cada mapa reclasificado (7) para el proceso de superposición, se muestra en la

Tabla 8 - Figura 28. La asignación se realizó con el propósito de representar la importancia relativa de las diferentes temáticas estudiadas, para influir en consecuencia.

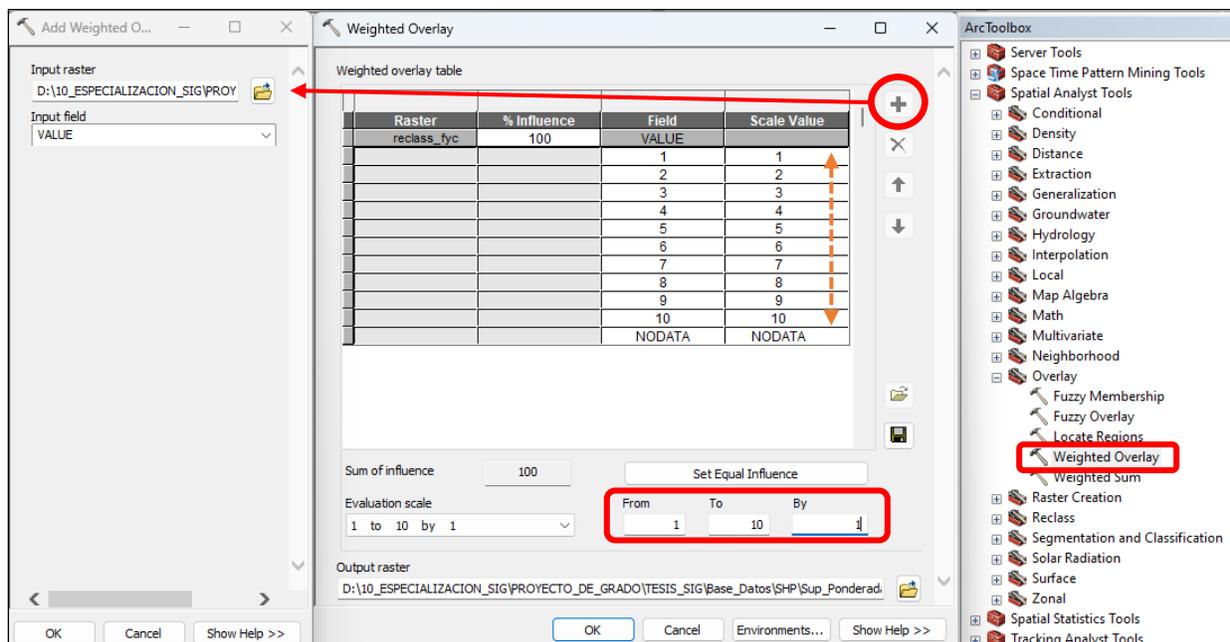


Figura 27. Procedimiento de aplicación de la herramienta de superposición ponderada.

Tabla 8. Ponderación o porcentaje de influencia de los mapas temáticos finales reclasificados.

Mapas Reclasificados	% Influencia	Subdivisión de Mapas Reclasificados	Denominación	% Influencia
Geología	20	-----	(geologia_rec)	20
Geodinámica	25	Falla Palestina y Contactos Litológicos Intrusivos	(geodina_rec1)	15
		Lineamientos y Estructuras Circulares	(geodina_rec2)	10
Geoquímica	10	-----	(goequi_rec)	10
Metalogenia	25	Productores Minerales	(metalo-rec1)	15
		Ocurrencias y Prospectos Minerales	(metalo_rec2)	10
Geofísica	20	-----	(geofísica_rec)	20
Total	100			100

Los porcentajes fueron asignados a juicio de experto, según datos técnicos y la literatura disponible:

Geología (20%). Se le asignó un porcentaje de influencia medio o moderado al mapa reclasificado de geología, debido a que, según la literatura disponible, en la zona de estudio se presentan litologías favorables para el hallazgo de metales preciosos; sin embargo, lo que le restó relevancia a esta temática fue que las unidades litológicas no fueron claramente correlacionables en los estudios de Feininger et al., (1972), Barrero & Vesga (1976) y González (2001) como

principales autores de los mapas geológicos elaborados para la zona de estudio, esto obligó a realizar un compendio de los mismos en la presente investigación.

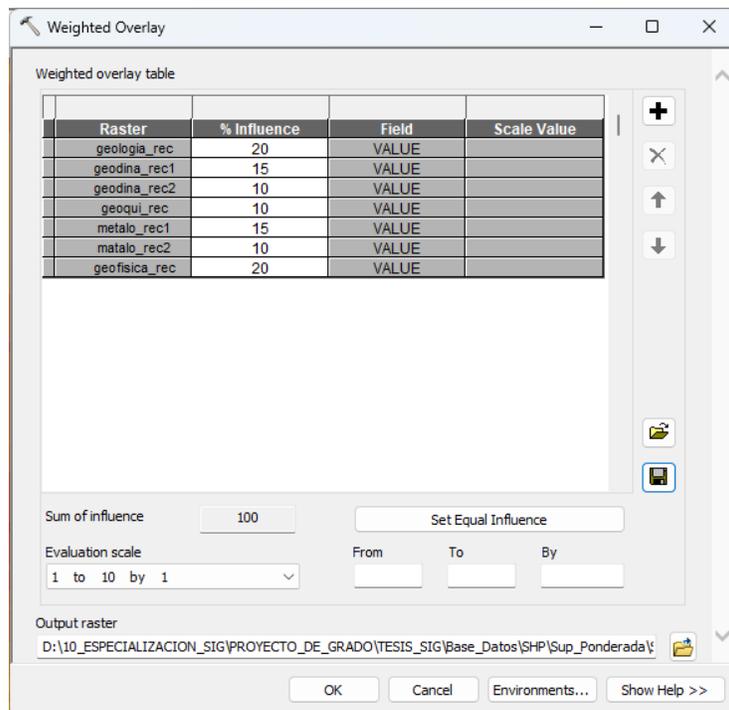


Figura 28. Ponderación o porcentaje de influencia de los mapas ráster reclasificados.

Geodinámica (25%). El porcentaje de influencia de la geodinámica se consideró medio - alto, debido a que las fallas, contactos litológicos, lineamientos y estructuras circulares tomadas de los mapas geológicos regionales, fueron verificadas, ajustadas o trazadas en su defecto por medio de modelos de elevación digital y el análisis de imágenes Landsat 8 con bandas combinadas.

La geodinámica reviste gran importancia como fuente generadora de fracturas o estructuras propicias para la movilización y depositación de minerales metálicos; algunos rasgos estructurales presentan un alto grado de certeza por verificaciones de campo, mientras otros corresponden a interpretaciones basadas en instrumentos remotos con cierto grado de incertidumbre; por tal

motivo; en la presente investigación se decidió redistribuir el 25% asignado a la geodinámica entre dos (2) grupos de estructuras identificadas en el área de estudio: 1) Falla Palestina y Contactos Litológicos Intrusivos y 2) lineamientos y Estructuras Circulares.

1) La Falla Palestina y Contactos Intrusivos (15%). Según la literatura disponible, en el área de estudio, estos rasgos estructurales fueron definidos y trazados por Feininger et al. (1972) por medio de controles de campo que permitieron identificar la Falla Palestina como una estructura regional de rumbo con desplazamiento lateral derecho y a los contactos intrusivos como fricciones generadoras de fallas o fracturas secundarias con mineralizaciones metálicas (González, 1993); por tal motivo, se asignó una amplia zona de influencia (500 m) para los trazados de estas estructuras, además de un mayor porcentaje de influencia dentro del mapa de geodinámica.

2) Lineamientos y Estructuras Circulares (10%). Los lineamientos corresponden a interpretaciones de rasgos estructurales, posiblemente asociados a fallas secundarias o satélites de estructuras regionales, como la Falla Palestina; estas posibles fracturas son propicias para posibilitar el enfriamiento de fluidos hidrotermales con su consecuente precipitación de metales (Olivares et al., 2010). Las estructuras circulares son asociadas a expresiones superficial o subterráneas de posibles cuerpos ígneos tipo pórfido de interés para la exploración de metales preciosos y base.

Ambos rasgos estructurales corresponden a hipótesis de la presencia de fallas o cuerpos intrusivos porfiríticos; por tal motivo, se les asignó una zona de influencia reducida de 300 m, además de un menor porcentaje de influencia dentro del mapa de geodinámica.

Geoquímica (10%). Se asignó un porcentaje de influencia bajo a la geoquímica por la reducida cobertura de muestras disponibles para la zona de estudio, las mismas se concentraron en las estructuras mineralizadas expuestas en antiguas labores mineras; motivo por el cual, se empleó

para la rasterización de la geoquímica, un radio de búsqueda fijo de 500 m y no un radio variable que establece automáticamente las equidistancias entre las muestras.

Metalogenia (25%): Los mapas metalogénicos son cruciales para la identificación de áreas propensas a contener recursos minerales valiosos, como oro, plata, cobre, entre otros (Brodtkorb & Leal, 2009); por tal motivo, se le asignó un porcentaje de influencia medio - alto a este mapa temático. Las capas de la metalogenia presentan diferentes relevancias frente a la exploración mineral, esto valida la redistribución de su 25% entre: 1) Productores Minerales y 2) Ocurrencias y Prospectos Minerales, descritos por Paredes et al. (2020), Prieto Gómez (2010), Barrero & Vesga (1976) y J.H. López (1971).

- 1) **Productores Minerales (15%).** Las antiguas labores mineras presentes en el área de estudio, reconocidas como productores minerales, fueron evidencias directas de posibles depósitos o yacimientos con algún grado de rentabilidad; por tal motivo, se les asignó una amplia zona de influencia (500 m) radiada sobre sus puntos de localización, además de otorgarles un mayor porcentaje de influencia dentro del mapa de Metalogenia.
- 2) **Ocurrencias y Prospectos Minerales (10%).** Las ocurrencias del área de estudio obedecieron a indicios minerales de interés económico con análisis limitados que esbozaron o proyectaron mineralizaciones y, los prospectos, correspondieron a investigaciones geológicas que permitieron establecer anomalías minerales que merecen una mayor investigación; por tal motivo, se les asignó una reducida zona de influencia (300 m) radiada sobre sus puntos de localización, además de otorgarles un menor porcentaje de influencia dentro del mapa de Metalogenia.

Geofísica (20%): El mapa geofísico de Anomalías de Intensidad Magnética Total (IMT) de Moyano et al., (2020), editado, rasterizado y reclasificado para el área de la investigación, le fue asignado un porcentaje de influencia medio o moderado debido a que presenta fuertes contrastes magnéticos asociados a anomalías que presumen el hallazgo de cuerpos intrusivos de interés exploratorio como eventuales blancos de perforación.

La distribución de los porcentajes refleja una mayor relevancia para la geodinámica y la metalogenia, seguidas de cerca por la geofísica y la geología, mientras que la geoquímica tiene una importancia menor debido a los la escasez de sus datos.

Al aplicar la herramienta de superposición ponderada se generó la Figura 29, capa ráster con una escala de favorabilidad discontinua, sin valores de 1, 2, 9 y 10; esto significa que no hay ningún píxel en toda la zona de estudio cuya suma de valores previamente multiplicados por la influencia de las capas haya dado un resultado que, al redondear a número entero, haya llegado a los valores relacionados. Seguramente, hay algunos valores de 8.3 o 8.4, pero han sido redondeados a 8 como el valor más alto de favorabilidad mineral promediada.

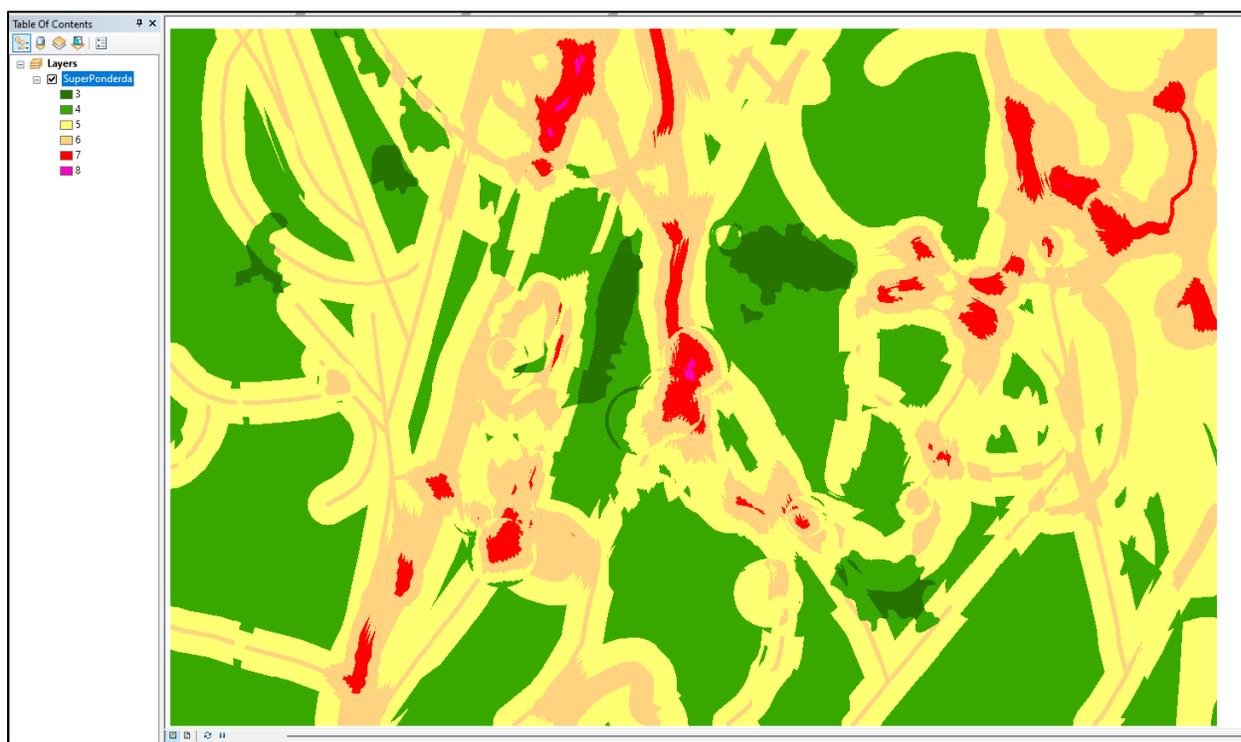


Figura 29. Salida gráfica de la Superposición Ponderada

6.3.8.2 Reclasificación cualitativa del potencial mineral.

El potencial mineral se define como la probabilidad que existe para la ocurrencia de depósitos minerales no descubiertos en un área determinada (Goudarzi, 1984) con base en estudios de ambientes geológicos favorables para el hallazgo de minerales de interés económico (J. López et al., 2018); en consecuencia, como el potencial mineral es una probabilidad, normalmente se categoriza en rangos altos, medios o bajos en función de la favorabilidad mineral.

La superposición ponderada generó un mapa ráster con seis (6) categorías de favorabilidad mineral con valores de 3, 4, 5, 6, 7 y 8; los cuales, fueron reclasificados en tres (3) clases para agrupar o categorizar tres (3) niveles de potencial mineral. Se agruparon los valores 3 - 4 (1), 5 - 6 (2) y 7 - 8 (3), tal como se muestra la Figura 30.

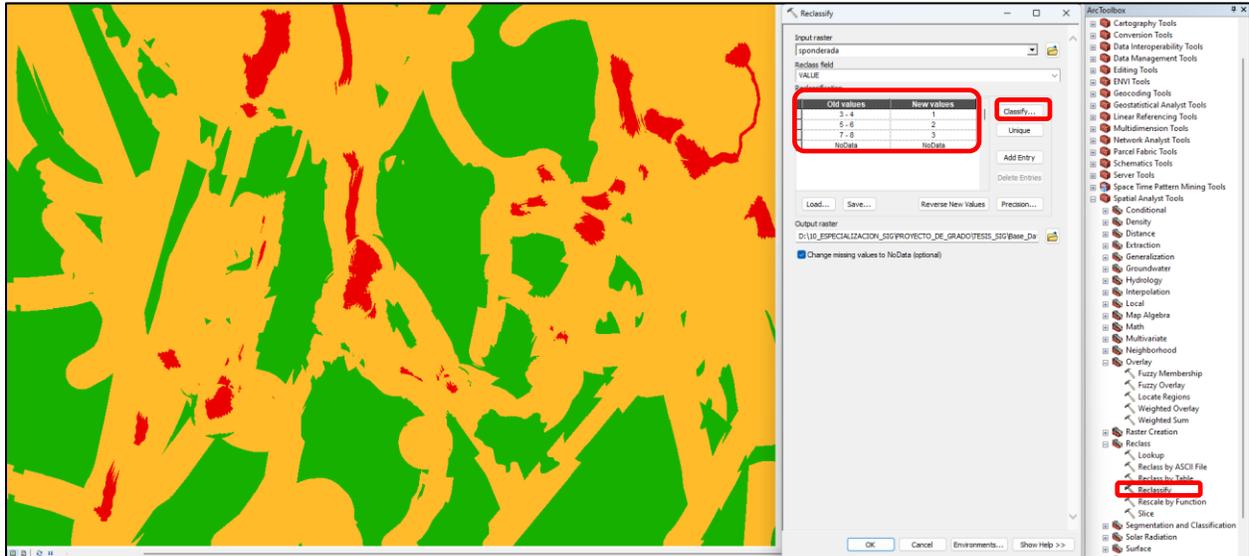


Figura 30. Proceso y salida gráfica de la reclasificación de la superposición ponderada

7. Resultados

La reclasificación del mapa de superposición ponderada permitió el resultado final de la investigación, correspondiente a la delimitación y definición de tres (3) categorías de potencial

mineral en un mapa ráster; el cual, se transformó a polígonos para evaluar, cuantificar, cualificar y presentar el mapa de potencial mineral para oro y elementos asociados en un área ubicada entre los Municipios de Pensilvania, Samaná y Victoria en el Departamento de Caldas (Figura 31 - Anexo 7).

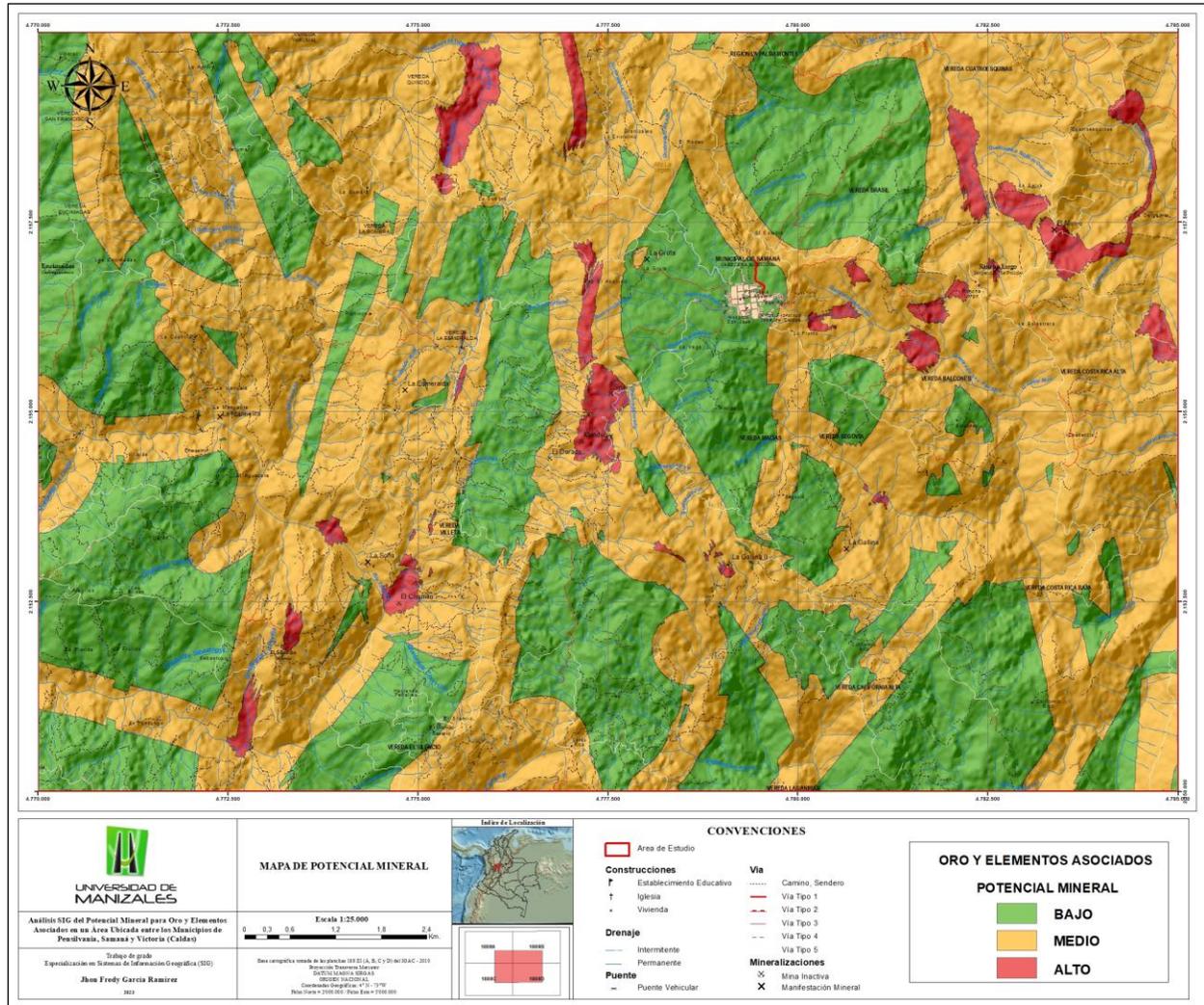


Figura 31. Mapa de potencial mineral para oro y elementos asociados en un área ubicada entre los municipios de Pensilvania, Samaná y Victoria en el Departamento de Caldas.

El mapa presenta tres (3) niveles de potencial mineral: bajo, medio y alto, con las siguientes características:

7.1 Potencial Mineral Bajo.

Este potencial se presenta en ochenta y un (81) polígonos con áreas que van desde los 0,0092 ha hasta las 696,6259 ha; los cuales, en total suman un área de 5.516,5081 ha correspondientes al 36,7% de la zona de estudio. Estos polígonos se encuentran distribuidos de forma irregular y aislada con ausencia de los mismos en el extremo noreste de la zona de estudio, esto debido a que allí confluyen las mayores categorías de favorabilidad mineral de los diferentes mapas temáticos.

Con relación a la geología, el bajo potencial cubre de manera extensiva las rocas sedimentarias del área de estudio, principalmente los Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto) considerados de menor grado de favorabilidad mineral, seguido de las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca principalmente asociadas a los Esquistos Verdes (Pev) y a las Cuarzitas Biotíticas - Feldespáticas (Pnq), además de cubrir el interior de los polígonos asociados a las rocas ígneas plutónicas del Complejo Ígneo de Samaná (Kds) y La Alaskita de Samaná (Kas).

Respecto a la geodinámica, los polígonos con bajo potencial mineral no cubren en absoluto los trazados de las estructuras asociadas a la Falla Palestina, contactos litológicos intrusivos, lineamientos o formas circulares; además, en lo que respecta a la geoquímica, el bajo potencial solo envuelve muestras con valores por debajo de los 0.5 gr/ton de oro, sin ningún interés exploratorio.

Dentro del campo de la metalogénia, el bajo potencial no se superpone con la localización de los productores, prospectos y ocurrencias minerales del área de estudio, con excepción del prospecto de oro y plata de La Gruta. En cuanto a la geofísica, los polígonos con potencial bajo solo cubren parcialmente el grado de favorabilidad mineral siete (7), asociado a valores inferiores

del contraste de la Intensidad Magnética Total (32.5 nT - 54.4 nT); en consecuencia, la mayoría de los polígonos se encuentran dentro de los valores No Data, al cual se le asignó un grado de favorabilidad cinco (5) considerado neutral para evitar subvalorar áreas que no reflejen cuerpos magnéticos al interior del terreno.

En general, el potencial mineral bajo corresponde a áreas donde la información geológica, geodinámica, geoquímica, metalogénica y geofísica disponible, permite inferir que las zonas son poco apropiadas para la acumulación de recursos minerales asociados al oro. En estas áreas las litologías presentan incipientes rastros de mineralización con venas y vetillas dispersas y sin anomalías geoquímicas de elementos de interés, ausencia de posibles estructuras que sean convenientes para la acumulación de minerales y carencia de labores mineras o vestigios de sustancias valiosas.

Las áreas con potencial bajo tienen probabilidades finitas o incipientes de contener recursos minerales; sin embargo, nuevas investigaciones podrían redefinir zonas de interés para actividades de exploración, con la posibilidad de recategorizar el potencial asignado.

7.2 Potencial Mineral Medio.

Este potencial se presenta en cincuenta y siete (57) polígonos con áreas que van desde los 0,0092 ha hasta las 8.917,3603 ha; los cuales, en total suman un área de 9.002,3523 ha correspondientes al 60% de la zona de estudio. El polígono de mayor extensión es equivalente al

99% del total del área con potencial medio, presenta corredores continuos e interconectados a manera de red, con límites irregulares que abarcan toda el área de estudio.

Respecto a la geología, el potencial medio cubre de manera extensiva rocas ígneas intrusivas asociadas al Pórfido de Puente Linda (Tadp), el Stock de El Hatillo (Tcdh), el Pórfido de El Morro (Tadm) y el Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh) con grados de favorabilidad mineral altos que van de 10 a 6 respectivamente; en menor proporción, cubre los bordes del Complejo Ígneo de Samaná (Kds) y La Alaskita de Samaná (Kas) con grados de favorabilidad mineral de 8. El potencial medio también está superpuesto con las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, principalmente sobre Filitas y Cuarzo - Filitas (Pes).

Con relación a la geodinámica, el potencial medio cubre ampliamente todas las estructuras geológicas asociadas a la Falla Palestina y los contactos litológicos intrusivos, además de los trazos de las interpretaciones lineales y formas circulares. Asimismo, la geoquímica presenta el 35% de sus muestras anómalas superpuestas con el potencial medio en el sector central de la zona de estudio, con valores entre los 0.5 gr/ton y 11,65 gr/ton de oro; donde, además cubre la mina inactiva El Dorado, productor pasado de la metalogenia.

Igualmente, el potencial medio se superpone con el prospecto La Sofia asociado con minerales de plomo, zinc, plata y oro y, los prospectos de La Gallina I y II relacionados con elementos de plomo, plata y oro; además, cubre las ocurrencias de oro de La Manuela y La Esmeralda.

En el contexto de la geofísica, el potencial medio cubre ampliamente todos los grados de favorabilidad mineral (5, 7, 8, 9 y 10) asignados a los contrastes de la Intensidad Magnética Total del área de estudio. Los contrastes por encima de 7, abarcan el espectro geofísico positivo a partir de los 32,5 nT y el espectro geofísico negativo hasta los - 2.854,3 nT. De manera extensiva, el potencial medio incluye las dos (2) fuentes magnéticas identificadas en la zona de estudio, posiblemente relacionadas a cuerpos sub-volcánicos de interés exploratorio cubiertos por rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, como se muestra en el extremo noreste del área de estudio, vereda Costa Rica Alta, quebrada Planes, donde el Pórfido del Morro (Tadm) aflora con anomalías magnéticas de alto contraste.

En general, el potencial mineral medio se asigna a áreas en las que la información geológica, geodinámica, geoquímica, metalogénica y geofísica disponible permite definir zonas convenientes para la acumulación de recursos minerales. En estas áreas las interpretaciones de los datos indican una probabilidad razonable de acumulación y posible asociación a algún tipo de depósito aurífero; sin embargo, a pesar que se encuentran diferentes niveles de información sobre minerales valiosos, no hay pruebas concluyentes de depósitos económicamente viables.

7.3 Potencial Mineral Alto.

Este potencial se presenta en ciento un (101) polígonos con áreas que van desde los 0,0092 ha hasta las 71,7258 ha; los cuales, en total suman un área de 475,1352 ha correspondientes al 3,3% de la zona de estudio; el polígono de mayor extensión es equivalente al 15% del total del área con potencial alto. El análisis de superposición ponderada generó veinticuatro (24) polígonos

con áreas mayores a una (1) ha para este potencial, los mismos se encuentran distribuidos en el centro del área con una tendencia noreste, posiblemente asociada a la Falla Palestina y, también se presentan en el extremo noreste del área con marcadas formas semi-circulares, posiblemente asociadas a la fuerte anomalía magnética que se encuentra allí. Los polígonos en general muestran formas irregulares, tabulares a sub-redondeadas con contornos angulares.

Concerniente a la geología, el 76,40% del área con alto potencial cubre las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, principalmente las Filitas y Cuarzo - Filitas (Pes), el 12,06% abarca rocas intrusivas del Complejo Ígneo de Samaná (Kds), el 8,06% se superpone con el Pórfido de El Morro (Tadm), el 2,27% se extiende sobre el Pórfido de Puente Linda (Tadp), el 1,18% de los polígonos con alto potencial están situados sobre La Alaskita de Samaná (Kas) y, en ínfimas proporciones cubre los Depósitos Piroclásticos y Glacifluviales (Qto) y el Pórfido Andesítico Hornbléndico (Tadh).

Es de resaltar que los polígonos con alto potencial se sitúan principalmente sobre los contactos intrusivos de las rocas ígneas con las metamórficas, sobre las litologías con mayores grados de favorabilidad mineral para el hallazgo de depósitos auríferos.

Con relación a la geodinámica, el alto potencial cubre sectorialmente las intersecciones de la Falla Palestina con las estructuras circulares y lineamientos, además de sus bifurcaciones, principalmente con polígonos tabulares que siguen su dirección noreste. También, los polígonos con alto potencial se presentan dispersos sobre los contactos intrusivos, justo donde se cruzan o cortan con los lineamientos y formas circulares, asumiendo la forma de dichos contactos.

En lo que respecta a la geoquímica, las muestras anómalas con los mayores resultados de oro, entre los 0.5 gr/ton y 17.75 gr/ton, se superponen con un polígono de alto potencial mineral ubicado en el centro del área de estudio, sobre la cabecera de la quebrada Villeta, sector de Altamira. Las muestras anómalas fueron tomadas en los antiguos socavones de la mina de oro y plata de Mandalay.

Referente a la metalogenia, el alto potencial abarca tres (3) de los cuatro (4) antiguos productores minerales del área de estudio, nombrados como minas Sinaí, Mandalay y El Chorrillo, de donde se extraían elementos de oro, plata, plomo y zinc, a través de túneles artesanales. Además, los polígonos con alto potencial se superponen con el prospecto de Rancho Largo y la ocurrencia de El Morro, ambas categorías asociadas a la presencia de mineralizaciones de plata y oro, ubicadas en los sectores de La Balastera, Rancho Alegre y La Selva.

En el contexto de la geofísica, el alto potencial cubre parcialmente las dos (2) fuentes magnéticas de la zona de estudio:

(1). La fuente magnética más grande, ubicada en el extremo noreste del área, se superpone con 194,6824 ha (41%) del alto potencial y, abarca principalmente los contrastes de Intensidad Magnética Total (IMT) con los siguientes rangos de valor nT: (106,3 - (-94,8)), (146,0 - (-2.854,3)) y (3.843,1 - 146,0) asociados a los grados de favorabilidad de 8, 9 y 10, respectivamente; estas anomalías magnéticas están asociadas al Pórfido del Morro (Tadm) y, muy posiblemente, a su proyección subterránea cubierta por las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca.

(2). La fuente magnética más pequeña, ubicada al norte del área, se superpone con 76,8794 ha (16%) del alto potencial y, abarca principalmente los contrastes de Intensidad Magnética Total (IMT) con rangos de valor nT de (106,3 - (-94,8)) y (146,0 - (-2.854,3)) asociados a los grados de favorabilidad de 8 y 9, respectivamente; estas anomalías magnéticas concuerdan con la estructura circular identificada en la presente investigación y se interpretan asociadas a un cuerpo ígneo porfídico, sin exhumar, cubierto por las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca.

En general, el potencial mineral alto se asigna a áreas en las que la información geológica, geoquímica, geofísica y metalogénica permite definir zonas muy apropiadas para la acumulación de recursos minerales con un alto grado de probabilidad de ser descubiertos. En estas áreas son esenciales la presencia labores mineras activas, inactivas o abandonadas, además de la localización de prospectos u ocurrencias debidamente caracterizadas.

8. Conclusiones

La investigación abarcó un área de 15.000 ha situadas en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia, distribuidas entre los municipios de Samaná (93%), Victoria (6%) y Pensilvania (1%) en el Departamento de Caldas. El estudio se llevó a cabo con una escala de trabajo mediana, utilizando las planchas topográficas IGAC 188III (A, B, C y D) a escala 1:25.000 y adoptando el sistema de proyección cartográfica origen nacional (CTM12.prj).

Para evaluar el potencial mineral del área de estudio se identificaron, recopilaron, ajustaron y editaron mapas temáticos con información técnica y científica relevante en prospección mineral, relacionada con geología, geodinámica, geoquímica, metalogenia y geofísica. La integración geoespacial de estos mapas proporcionó una comprensión conceptual de la probabilidad de encontrar oro y elementos asociados.

El mapa temático de geología presenta rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias de diversas edades y composiciones. Las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca son las más antiguas y predominantes, están compuestas por filitas y cuarzo - filitas (62,5%), esquistos verdes (5,0%) y Cuarcitas (2,3%). Las rocas ígneas, con edades del cretácico hasta el plioceno, son principalmente cuerpos intrusivos asociados al Complejo Ígneo de Samaná (16,4%), Pórfido de El Morro (3,8%), Alaskita de Samaná (2,3%), Pórfido de Puente Linda (1,1%), Stock de El Hatillo (0,4%) y Pórfido Andesítico Hornbléndico (0,02%). Las rocas sedimentarias son las más recientes y están representadas por depósitos piroclásticos y glaciófluviales (5,7%) y la Formación Mesa (0,01%).

El mapa temático de geodinámica se relaciona con los procesos tectónicos de la Cordillera Central de Colombia. Su elaboración se basó en cartografías de investigaciones previas, validadas, ajustadas o en su defecto adicionadas mediante análisis SIG, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 y modelos de elevación digital (DEM 12 m). Se identificaron contactos litológicos, fallas geológicas asociadas al sistema de Fallas de Palestina, lineamientos NWW, NNE y NNW y, estructuras circulares, algunas de las cuales, podrían estar relacionadas a cuerpos ígneos sin exhumar. Estos rasgos están vinculados a zonas de debilidad o fractura que pudieron actuar como canales para el transporte y depositación de mineralizaciones.

El mapa temático de geoquímica refleja el análisis de 174 muestras extraídas de estructuras mineralizadas y rocas. Estos datos, aportados por la Compañía Mandalay Minerales S.A.S, se enfocan predominantemente en la antigua mina Mandalay, ubicada en el municipio de Samaná. Se distinguieron tres estructuras vetiformes en minas abandonadas con concentraciones de oro que varían entre 0,1 a 17,75 gr/ton. Dichas estructuras poseen una orientación promedio de N65E y espesores entre 0,2 y 0,8 m. Además, presentan notables mineralizaciones de pirita, arsenopirita, galena y vestigios de calcopirita. No obstante, es importante destacar que el muestreo no abarcó uniformemente toda el área de estudio.

El mapa temático de metalogénia identifica las ocurrencias, prospectos y productores minerales reportados en el área de estudio. Las ocurrencias representan indicios de mineralización con estudios limitados, los prospectos corresponden a áreas con anomalías minerales en etapas iniciales de investigación y los productores se refieren a minas abandonadas. En el área estudiada, se identificaron específicamente tres (3) ocurrencias, cinco (5) prospectos y cuatro (4) productores

antiguos. Además, los estudios previos indican que esta zona forma parte de la Provincia Metalogénica Andina Central, caracterizada por su magmatismo Mioceno-Pleistoceno y sus cinturones de mineralizaciones de tipo pórfido-epitermal que validan su importancia geológica y económica.

El mapa temático de geofísica resalta las anomalías de Intensidad Magnética Total (IMT) del área de estudio, sugiere contrastes en el contenido mineral magnético de las rocas, revelando heterogeneidad en la composición del subsuelo. Se detectaron anomalías que podrían relacionarse con características geológicas, como cuerpos intrusivos o zonas de alteración hidrotermal. Específicamente, se identificaron dos (2) fuentes magnéticas que pueden estar vinculadas a cuerpos ígneos cubiertos por rocas metamórficas. Estas anomalías podrían corresponder a complejos intrusivos de interés exploratorio.

Se homogeneizaron los mapas temáticos en términos de coordenadas, escala y formato ráster, con tamaños de píxel de 12 m y usando las herramientas SIG “Feature to Raster” y “Euclidean Distance”, según criterios técnicos. En geología, se rasterizaron 11 categorías alineadas con las litologías. En geodinámica, se rasterizaron franjas con espesores de 300 m y 500 m en ambos lados de estructuras geológicas, 300 m para lineamientos y formas circulares y 500 m para la Falla Palestina y contactos intrusivos. En geoquímica, se rasterizó el peso ponderado por el inverso de la distancia (IDW) de las muestras, con un radio de búsqueda fija de 500 m. En metalogenia, se rasterizaron distancias radiales de 300 m para ocurrencias y prospectos y de 500 m para productores minerales. En geofísica, se rasterizaron 4 contornos anómalos relevantes que encierran contrastes magnéticos e isovalores positivos.

Las capas ráster de los mapas temáticos se reclasificaron para reflejar valores de favorabilidad mineral con base en información geológica y minera disponible. Se empleó una escala del 1 al 10 para asignar estos valores, donde 10 representa la probabilidad más alta de encontrar oro y minerales asociados. En casos de incertidumbre sobre la favorabilidad, se asignó un valor intermedio de 5, con el objetivo de no omitir áreas de posible relevancia.

La favorabilidad mineral de la geología, respecto a rocas metamórficas, determinó que las Filitas y Cuarzo-Filitas tienen la mayor probabilidad para el hallazgo de metales preciosos (9), seguidas por Esquistos Verdes (7). Entre las rocas ígneas, el Pórfido de Puente Linda destaca por el grado más alto de favorabilidad (10), seguido por el Stock de El Hatillo (9) y el Pórfido de El Morro, Complejo Ígneo de Samaná y La Alaskita de Samaná (8). En rocas sedimentarias, la Formación Mesa tiene un potencial moderado con un grado de 6.

Los grados de favorabilidad mineral de la geodinámica y la metalogénia se intensifican con la cercanía a las estructuras geológicas o puntos de localización de minerales. La favorabilidad mineral geoquímica se basó en el peso ponderado de los valores de oro en las muestras, con un radio de influencia de 500 m que disminuye inversamente con la distancia. En la geofísica, la favorabilidad mineral de interés se relacionó con altos rangos de valor y contraste de la Intensidad Magnética Total (nT).

La herramienta SIG de superposición ponderada se utilizó para determinar la importancia relativa de diferentes capas de los mapas temáticos. Los porcentajes de importancia asignados, basados a juicio de expertos y datos técnicos, son: Geología (20%), debido a la ambigüedad en las

correlaciones litológicas; Geodinámica (25%), subdividido en Falla Palestina y Contactos Intrusivos (15%) y Lineamientos y Formas Circulares (10%) por sus roles en la movilización y depositación de minerales; Geoquímica (10%) debido a su cobertura limitada de datos; Metalogenia (25%), distribuida entre Productores Minerales (15%) y Ocurrencias y Prospectos Minerales (10%) por su relevancia en la identificación de áreas con recursos minerales; y Geofísica (20%) por los contrastes magnéticos que sugieren áreas de interés exploratorio.

A partir de la superposición ponderada de mapas temáticos, se produjo un mapa ráster con seis categorías de favorabilidad mineral. Estas categorías fueron agrupadas o reclasificadas en tres niveles de potencial mineral: los valores 3 - 4 representan un potencial bajo, 5 - 6 un potencial medio y 7 - 8 un potencial alto.

El análisis SIG permitió la identificación y delimitación de tres (3) categorías de potencial mineral para oro y elementos asociados:

Potencial Alto: Representa el 3,3% del área de estudio (475,1352 ha), corresponde a zonas adecuadas para la acumulación de recursos minerales con una alta probabilidad de hallazgo de depósitos auríferos. Cubre esencialmente rocas metamórficas, representadas por Filitas y Cuarzo - Filitas y, en menor proporción, rocas ígneas, asociadas al Complejo Ígneo de Samaná, los Pórfidos de El Morro y Puente Linda y La Alaskita de Samaná; principalmente sobre sus contactos intrusivos. Además, se sobrepone con intersecciones y bifurcaciones de la Falla Palestina con lineamientos y formas circulares. También, abarca muestras anómalas con valores entre los 0.5 gr/ton y 17.75 gr/ton de oro, ubicadas principalmente sobre los antiguos productores minerales de

Sinaí, Mandalay y El Chorrillo, así como en el prospecto de Rancho Largo y la ocurrencia de El Morro. Adicionalmente, el alto potencial parcialmente abarca anomalías magnéticas asociadas al Pórfido del Morro y su posible proyección subterránea hacia las rocas metamórficas, además concuerdan con las formas circulares que podrían estar asociadas a cuerpos ígneos porfídicos sin exhumar.

Potencial Medio: Abarca el 60% de la zona de investigación (9.002,3523 ha) y sugiere una posibilidad razonable de encontrar depósitos auríferos. Cubre principalmente rocas ígneas, asociadas al Pórfido de Puente Linda, el Stock de El Hatillo, el Pórfido de El Morro y el Pórfido Andesítico Hornbléndico, además de los bordes del Complejo Ígneo de Samaná y La Alaskita de Samaná y las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, principalmente las Filitas y Cuarzo - Filitas. Adicionalmente, el potencial medio abarca ampliamente todas las estructuras geológicas y las anomalías geoquímicas entre los 0.5 gr/ton y 11,65 gr/ton de oro. También, cubre la mina abandonada de El Dorado, los prospectos La Sofia y las Gallinas y las ocurrencias de La Manuela y La Esmeralda; adicionalmente, incluye las dos fuentes magnéticas identificadas en el área de estudio, posiblemente relacionadas a cuerpos sub-volcánicos de interés exploratorio.

Potencial Bajo: Este potencial abarca el 36,7% del área estudiada, equivalente a 5.516.5081 ha. A pesar de mostrar una mineralización incipiente, la probabilidad de encontrar recursos minerales ligados a metales preciosos en esta zona es limitada. Predominan rocas sedimentarias y metamórficas, sin estructuras geológicas significativas. Los valores geoquímicos registrados se sitúan por debajo de los 0,5 gr/ton de oro, lo que sugiere un interés exploratorio reducido.

9. Recomendaciones

Se sugiere incorporar a la investigación coberturas ambientales y sociales que estén sujetas a restricciones o exclusiones mineras. Esta integración podría brindar una comprensión más clara sobre la viabilidad de proyectos de exploración en los blancos u objetivos identificados en este estudio. Además, al superponer dichas coberturas al área investigada, se facilitaría una perspectiva integral para la gestión de permisos, posibles exclusiones de áreas ambientales y consultas con comunidades locales.

Es recomendable emplear mapas de prospectividad o idoneidad mineral que incluyan el geoprocésamiento de datos ambientales y sociales. Estas herramientas ofrecen una visión holística de los objetivos de exploración y proporcionan información valiosa para la planificación técnica y eficiente de las actividades geológico-mineras. Estos mapas, al incluir detalles sobre zonas que requieren permisos especiales, facilitan una preparación anticipada en la gestión de accesos y trámites.

Se aconseja abordar la exploración mineral con una perspectiva consciente y predecible, considerando tanto aspectos sociales como ambientales al llevar a cabo actividades como la toma de muestras y cartografía detallada de la superficie y el subsuelo. Con un enfoque respetuoso y sensible, se sientan las bases para un desarrollo minero más inclusivo y responsable.

10. Referencias

- Alzate, J. M. (2001). *Samaná en la Historia: Vol. I*.
<https://www.ellibrototal.com/ltotal/?t=1&d=3863>.
- An, P., Moon, W. M., & Bonham-Carter, G. F. (1994). An object-oriented knowledge representation structure for exploration data integration. *Nonrenewable Resources*, 3, 132–145.
- Angée M., D. L., & Betancur O., C. A. (2018). *Caracterización petrográfica, metalográfica, microtermométrica y composicional de la mina El Gran Porvenir del Líbano, Tolima*.
- Barrero, D., & Vesga, C. J. (1976). Geología de la Plancha 188 La Dorada. In *Geología de la Plancha 188 La Dorada. Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS*.
- Benito, M. (2020). *Módulo 3, SIG Aplicado a Geología, Tema 8 Mapas de Prospektividad*.
- Bernal, L. E., Celada, C. M., Mora, B. M., Suárez, C., Jiménez, C. T., Castellanos, F. S., Terraza, R. M., Gómez, E., Rincón, M. M., Monroy, W., Alvarado, S., Sánchez, C. C., García, A., Moreno, G., & Prieto, G. (2012). *AREAS CON POTENCIAL MINERAL PARA DEFINIR AREAS DE RESERVA ESTRATÉGICA DEL ESTADO*.
- Berrezueta, E., María, A., & Domínguez-Cuesta, J. (2012). *TÉCNICAS APLICADAS A LA CARACTERIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS GEOLÓGICO-MINEROS*.
www.igme.es
- Cabrera, F., & del Carmen, D. M. (2022). *Preparación y Caracterización de Capas Plasmónicas: Nanopartículas de oro en matrices de óxido de Zinc y Níquel*.

-
- Camacho López, O., Montalvo Morales, M., & Campos Guerra, N. (2022). *Ciencias Técnicas y Aplicadas Artículo de Investigación*. 66, 947–955. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i1.3521>
- Cárdenas, M., & Reina, M. (2008). *La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal*.
- Cediel, F. (2019). Phanerozoic orogens of northwestern South America: cordilleran-type orogens. Taphrogenic tectonics. The maracaibo orogenic float. The chocó-panamá indenter. *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*, 3–95.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*.
- Cortés, R. (1990). Observaciones y Descripciones Petrológicas y Estructurales asociadas al tramo meridional de la Falla Palestina. *Geología Colombiana*, 17, 211–218.
- Cox, D. P., & Singer, D. A. (1986). *Mineral deposit models* (Vol. 1693). US Government Printing Office Bulletin.
- de Brodtkorb, M. K., & Leal, P. R. (2009). Mineralogía y Metalogenia: Homenaje a los pioneros de la mineralogía y la metalogenia. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 64(3), 363–364.
- Díaz, J. R., Porras, J. C. C., & Laverde, R. M. (2008). Técnicas de lógica difusa aplicadas a la minería de datos. *Scientia et Technica*, 3(40).
- Díaz-Martínez, R., González-Martínez, L. A., Batista-Rodríguez, J. A., Hernández-Rosales, A., Blanco-Moreno, J. A., Batista-Cruz, R. Y., Almaguer Carmenates, Y., Rodríguez Vega, A., López Saucedo, F. de J., & Vila Sánchez, A. R. (2020). Cartografía digital predictiva del potencial mineral mediante SIG de depósitos de fluorita en el noreste de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 72(3).

-
- Dueñas, H., & Castro, G. (1981). Asociación palinológica de la Formación Mesa en la región de Falán, Tolima, Colombia. *Geología Norandina*.(3), 27–36.
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-B). *Boletín Geológico*, 20(2), 1–173.
- González, H. (1993). Mapa geológico del departamento de Caldas, escala 1: 250.000. *Memoria Explicativa. INGEOMINAS*.
- González, H. (2001). Mapa geológico del Departamento de Antioquia (Memoria explicativa). *INGEOMINAS, Bogotá*.
- Goudarzi, G. H. (1984). *Guide to preparation of mineral survey reports on public lands*. US Geological Survey,.
- Harris, J., Lemkow, D., Jefferson, C. W., Wright, D., & Falck, H. (2008). Mineral Potential Modelling for the Greater Nahanni Ecosystem Using GIS Based Analytical Methods. *Natural Resources Research*, 17, 51–78. <https://doi.org/10.1007/s11053-008-9069-6>
- Hart, G., & Yao, J. (1977). Identificación de sistemas en dinámica estructural. . *Revista de La División de Ingeniería Mecánica*, 1089-1104.
- IGAC. (2020). *ABC Nueva Proyección Cartográfica para Colombia “ORIGEN NACIONAL.”* Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://origen.igac.gov.co/docs/ABC_Nueva_Proyeccion_Cartografica_Colombia.pdf
- IGAC. (2022, August 9). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Gobierno de Colombia. <https://www.igac.gov.co/>
- Leal Mejia, H. (2011). *Phanerozoic gold metallogeny in the Colombian Andes; a tectono - magmatic approach*. [Tesis PH]. Universidad de Barcelona.

- López, J. H. (1971). *Recursos Minerales del Departamento de Caldas*. Ministerio de Minas y Petróleos, Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras, Dirección Regional Ibagué.
- López, J., Leal-Mejía, H., Luengas, C. S., Velásquez, L. E., Celada, C. M., Sepúlveda, M. J., Prieto, D. A., Gómez, M., & Hart, C. J. R. (2018). Mapa metalogénico de Colombia. In *Bogotá: Servicio Geológico Colombiano*.
- López-Gómez, J., Higuera, P., & Carrasco, D. (2021). *LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA INVESTIGACIÓN MINERA*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27332.14725>
- Lozano, H., & Pulido, O. H. (1986). Situación actual del oro y la plata en Colombia: geología, génesis, aspectos mineros, reservas y producción. *Boletín Geológico*, 27(3), 1–56.
- Marjoribanks, R. (2010). Prospecting and the Exploration Process. In *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining* (pp. 1–12). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74375-0_1
- Membrado, J. C. (2015). El lenguaje cartográfico en los mapas temáticos. *Estudios Geográficos*, 76(278), 177–201. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201506>
- Moyano, I. E., Lara Martínez, N. M., Arias Muñoz, H. D., Gómez Londoño, E., Ospina Montes, D. L., Puentes Torres, M. F., Robayo Rodríguez, A. P., Rojas Sarmiento, O. E., & Torrado Pérez, S. A. (2020). *Memoria Explicativa del Mapa de Anomalías Geofísicas de Colombia para Recursos Minerales. Versión 2020*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Muñoz, J. O. (2021). *Principios de geología y exploración minera*. Editorial Universidad de La Serena.
- Navarro, B. B., Vega, C. H., & Fuentes, M. M. (2021). *Mapa fotointerpretado del área al sur del Cajón del Maipo*.

-
- Olivares, V., Cembrano, J., Arancibia, G., Reyes, N., & Herrera, V. (2010). Significado tectónico y migración de fluidos hidrotermales en una red de fallas y vetas de un Dúplex de rumbo: un ejemplo del Sistema de Fallas de Atacama. *Andean Geology*, 37(2), 1–24.
- Paredes, O., Giovanni, L., Solano, P., Giovanni, C., Forero, B., Sepúlveda, J., Carlos, O., Arango, M. C., Murillo Bohórquez, H., Rodríguez, A., Mayeli, V., Casallas, G., Prieto Gómez, D., Andrés, C., Torres, J., Rache Rodríguez, A., Leal-Mejía, H., Otros, C. J. R. H., Ávila, A. P., ... Hart, A. Y. (2020). *Mapa Metalogénico de Colombia, VERSIÓN 2020* ©. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Pelaez Isaza, J. E. (2012). *Estudio de paleocorrientes de la formación mesa, entre los Municipios de la Dorada y Norcasia, al Nororiente del departamento de Caldas.*
- Pérez, H., & Lozano, H. (1975). *Prospección geoquímica en los municipios de Samaná y Pensilvania, Caldas.*
- Prieto Gómez, D. (2010). *Depósitos de Metales y Minerales Preciosos de Colombia. Grupo I (Au, Ag, Pt, Esmeraldas).*
- Reeves, C. (2005). *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation* (Vol. 155). Geosoft Washington (DC).
- Rueda-Gutiérrez, J. B. (2019). Aportes al conocimiento del Magmatismo de la Cordillera Central de Colombia en su Flanco Oriental: Área geotérmica de San Diego, Samaná, Caldas. *Boletín de Geología*, 41(2), 45–70.
- Shaw, R. P., Leal-Mejía, H., & Melgarejo i Draper, J. C. (2019). Phanerozoic metallogeny in the Colombian Andes: a tectono-magmatic analysis in space and time. *Geology and Tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction*, 411–549.

World Gold Council. (2003). *Tendencias de la demanda de oro.*

<https://www.gold.org/goldhub/research/gold-demand-trends/gold-demand-trends-q2-2023>.

ANEXOS

Anexo 1. Base Topográfica del área de estudio.

Anexo 2. Mapa Temático de Geología.

Anexo 3. Mapa Temático de Geodinámica.

Anexo 4. Mapa Temático de Geoquímica.

Anexo 5. Mapa Temático de Metalogenia.

Anexo 6. Mapa Temático de Geofísica.

Anexo 7. Mapa de potencial mineral para oro y elementos asociados.