

**Metalogénesis en depósitos tipo placer asociados genéticamente con áreas ígneo-  
metamórficas en el Bajo Cauca: Caso de estudio Mina Lucky (Antioquia – Colombia)**

**Maria Alejandra Chávez Arrieta  
1000178431**

**Trabajo de grado para optar título de Geóloga**

**Asesor:  
Geólogo PhD. Diego Felipe Gómez Gutiérrez**

**Programa de Pregrado en Geología**

**Universidad EAFIT**

**Medellín**

**2023**

## Agradecimientos

Agradezco a mi familia por su apoyo inquebrantable en mi camino hacia la realización de mi proyecto de vida, gracias, papá y mamá por su incansable esfuerzo que ha hecho posible lograr el sueño de ser una profesional. A mi novio por su paciencia y amor en las situaciones más adversas.

Gracias a la institución que me brinda la formación, así como a cada uno de los profesores y compañeros de estudios que compartieron y me acompañaron en este proceso, finalmente mi agradecimiento especial a mi asesor de tesis por su dedicación y horas de trabajo que permitió desarrollar este proyecto.

*“Tomo mi dolor desde el lado izquierdo, tomo mi dolor desde el lado derecho, lo subo y lo transformo en mi corazón. ¡Porque soy fuerte en el medio!”*

## Tabla de contenido

<b>Resumen</b> .....	6
<b>Introducción</b> .....	8
<b>Generalidades</b> .....	9
<b>Pregunta de investigación</b> .....	9
<b>Hipótesis</b> .....	9
<b>Objetivos</b> .....	10
<b>Objetivo general</b> .....	10
<b>Objetivos específicos</b> .....	10
<b>Localización</b> .....	10
<b>Marco geológico</b> .....	11
<b>Geología regional</b> .....	11
<b>Rocas Metamórficas</b> .....	12
<b>Gneises Precámbricos y Anfibolitas (Pensl)</b> .....	12
<b>Rocas ígneas</b> .....	12
<b>Complejo Paleozoico de Cajamarca (Pznf)</b> .....	12
<b>Batolito Mesozóico de Segovia (Jdse)</b> .....	12
<b>Batolito Cretácico Antioqueño (J-Pi)</b> .....	13
<b>Rocas sedimentarias</b> .....	13
<b>Formación Cenozoica Caucasia (Ngca)</b> .....	13
<b>Formación Tarazá (Ngt)</b> .....	14
<b>Aluvión cuaternario (Qal)</b> .....	14
<b>Geología local</b> .....	14
<b>Metodología</b> .....	16
<b>FASE 1</b> .....	16
<b>Compilación de la información existente</b> .....	16
<i>Fase heurística</i> .....	16
<i>Fase hermenéutica</i> .....	16
<b>FASE 2</b> .....	17
<b>Geología de Campo</b> .....	17
<b>Recolección de muestras</b> .....	17
<b>Cuarteo</b> .....	17
<b>Análisis de muestras</b> .....	18

<b>Análisis microscópico .....</b>	<b>18</b>
<b>Caracterización mineralógica y petrográfico .....</b>	<b>19</b>
<b>Microscopio óptico luz reflejada .....</b>	<b>20</b>
<b>Microscopio óptico luz transmitida .....</b>	<b>20</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>20</b>
<b>Petrografía macroscópica .....</b>	<b>20</b>
<b>Análisis macroscópico-concentrados .....</b>	<b>24</b>
<b>Petrografía microscópica .....</b>	<b>25</b>
<b>Discusión.....</b>	<b>30</b>
<b>Caracterización textural de la zona de estudio .....</b>	<b>30</b>
<b>Identificación de áreas potenciales fuente de materiales Río Cauca mina Lucky ....</b>	<b>30</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>33</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>35</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>41</b>

## Lista de figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio dentro del polígono de explotación minero. .	11
Figura 2. Clasificación de materiales según Arturo Casagrande (1942) para definir los horizontes en los afloramientos según su granulometría.....	15
Figura 3. Aspectos mineralógicos y macroscópicos de concentrados extraídos por concentración gravimétrica.....	24
Figura 4. Aspectos petrográficos de sedimentos en depósitos placer.....	26
Figura 5. Aspectos metalográficos de sedimentos en depósitos de placer. ....	27
Figura 6. Características petrográficas en los sedimentos de Lucky 3 y Lucky 2.....	29
Figura 7. Mapa asociativo de áreas fuentes ígneo-metámorficas del Río Cauca-Mina Lucky .....	32

## Lista de tablas

Tabla 1. Fases de recolección y preparación de las muestras recolectadas.....	18
Tabla 2. Coordenadas de extracción de las muestras analizadas en cada unidad de producción minera. ....	19
Tabla 3. Análisis de resultados de petrografía macroscópica en las diferentes unidades de explotación minera. ....	22

## Resumen

De modo histórico, la extracción de minerales en Colombia ha tenido lugar a pequeña escala y de manera artesanal, como medio de sustento para algunas comunidades en el país. El oro ha sido considerado como un agente económico en el desarrollo de la región del nordeste antioqueño, particularmente en el Distrito Minero del Bajo Cauca-Nechí, reconocido por la explotación de oro en depósitos de placer asociados a terrazas y aluviones de edad Cuaternaria, los cuales han sido generados por la dinámica fluvial de los ríos Cauca y Nechí.

Sin embargo, a lo largo del tiempo no se ha llevado a cabo el análisis petrográfico que permita la identificación de la composición mineralógica de las unidades litológicas expuestas en la zona. La caracterización petrográfica/metalográfica, permite establecer las condiciones de transporte y mecanismos de deposición de las partículas de oro. Este enfoque servirá para proporcionar información detallada los rasgos composicionales y texturales de la mineralización presentes en el depósito aluvial de la zona de estudio.

La mineralogía del depósito analizado está compuesta en sus concentrados de arenas negras por óxidos como la Magnetita (Mt), Ilmenita (Ilm) y Hematita (Hm) acompañado por fracciones de oro dispuestas de forma laminar. Desde el enfoque petrográfico, se analizó la relación mineralógica, observando gran cantidad de Magnetita con pequeñas inclusiones de sulfuros como la Pirita (Py) y la presencia de minerales del grupo de silicatos como Circones (Zir), Granate (Gnt) y Epidota (Ep).

Este estudio se enfocó en analizar la composición mineralógica y los rasgos texturales del depósito tipo paleoplacer del Bajo Cauca, lo que permitió establecer información sobre las condiciones geológicas durante la formación de la mineralogía observada en el depósito. La información servirá como base para establecer aspectos específicos del modelo genético del depósito, aspecto importante en la exploración y explotación de yacimientos minerales, lo cual facilita la comprensión de las condiciones de sus áreas fuentes que favorecieron su formación.

**Palabras claves:** Petrográfico/metalográfico, Río Cauca, depósito aluvial, áreas fuente.

## **Abstract**

Historically, mineral extraction in Colombia has taken place on a small scale and in an artisanal manner, serving as a means of livelihood for some communities in the country. Gold has been considered an economic driver in the development of the northeastern Antioquia region, particularly in the Mining District of Bajo Cauca-Nechí, renowned for gold exploitation in Quaternary age placer deposits associated with terraces and alluvial formations, generated by the fluvial dynamics of the Cauca and Nechí rivers.

However, over time, petrographic analysis has not been conducted to identify the mineralogical composition of the exposed lithological units in the area. Petrographic/metallographic characterization enables the establishment of transport conditions and deposition mechanisms for gold particles. This approach will provide detailed information on the compositional and textural features of mineralization present in the alluvial deposit of the study area.

The mineralogy of the analyzed deposit in its concentrates of black sands is composed of oxides such as Magnetite (Mt), Ilmenite (Ilm), and Hematite (Hm), accompanied by laminarily arranged fractions of gold. From a petrographic perspective, the mineralogical relationship was analyzed, revealing a significant presence of Magnetite with small inclusions of sulfides like Pyrite (Py) and the existence of silicate group minerals such as Zircons (Zir), Garnet (Gnt), and Epidote (Ep).

This study focused on analyzing the mineralogical composition and textural features of the paleoplacer-type deposit in Bajo Cauca. This allowed the establishment of information regarding the geological conditions during the formation of the observed mineralogy in the deposit. The information will serve as a foundation to establish specific aspects of the genetic model of the deposit, which is crucial in the exploration and exploitation of mineral deposits, facilitating an understanding of the conditions in their source areas that favored their formation.

**Keywords:** Petrographic/metallographic, Cauca River, alluvial deposits, source areas.

## **Introducción**

La formación de minerales que dan lugar a los depósitos de placer y enriquecimientos metálicos están asociados a su entorno tectónico y la evolución de su roca huésped sedimentaria (Robb, 2005). Un depósito de placer es aquel donde se concentran minerales detríticos densos durante la deposición de sedimentos. Estos depósitos pueden contener una variedad de minerales y metales, incluyendo oro, uraninita, diamante, casiterita, ilmenita, rutilo y circón (Slingerland & Smith, 1986; Miall, 1978; Force, 1991, Pye, 1994).

El desarrollo general de la formación de depósitos económicos de placer ocurrió de forma discontinua durante el Terciario. La extensión y valor de estos depósitos depende de tres fenómenos a macro y meso escala: un fenómeno propiamente litológico (litología del lecho rocoso- distancia a la fuente), un fenómeno de tipo hidráulico (el clima y el gradiente del canal) y un fenómeno geodinámico - geomorfológico (Viladevall, 2005; Henley et al., 1979), serían la causa de la liberación o desprendimiento de las partículas, así como el transporte y la sedimentación de los minerales pesado en cuencas fluviales, como evidencia en el caso de estudio (Garnett et al., 2005).

Estos tipos de depósitos tienen ventajas económicas, en general, las concentraciones de minerales en el material de origen primario son producto de meteorización que se ven reforzados mediante procesos de extracción siendo más simple y rentable que la de fuentes primarias ígneas y metamórficas (Gary et al., 1972). Esto se debe principalmente a la implementación de procesos de concentración gravimétrica y equipos simples.

Según Klein y Cornelius "el oro se manifiesta en la naturaleza de forma diseminada, comúnmente en filones hidrotermales de cuarzo" (2018, p. 374), que se forman por la deposición de una solución mineral ascendente asociado con rocas ígneas (Bernal & Railsback, 2008). El oro al ser un elemento móvil es transportado desde las profundidades a través de fluidos hidrotermales o magmas y a menudo se presenta como inclusiones en sulfuros como piritita, calcopiritita, galena, esfalerita y óxidos como magnetita (Londoño et al., 2009).

En Colombia, los placeres auríferos recientes son muy importantes en la producción de oro en el país, se destacan los distritos mineros del Bagre (Antioquia), el bajo Cauca-Nechí; las cuencas de los ríos San Juan y Atrato (Chocó); Río Naya (Valle del Cauca) y Ataco (Tolima) (Lydon, 2007).

Sin embargo, debido a la falta de investigaciones llevadas a cabo, la zona de estudio carece una caracterización metalogénica detallada y sólida. La ausencia de estudios sobre este tipo de depósito y la asociación mineralógica, así como las prácticas deficientes en el proceso de beneficio del mineral y poco tecnificadas resultan en pérdidas significativas en el proceso de recuperación del oro (Figueroa, 2019).

En el desarrollo de este trabajo de investigación se pretende llevar a cabo la caracterización del ambiente sedimentario y realizar un análisis petrográfico que permita determinar las características metalogenéticas del área, estableciendo su relación las áreas fuentes correspondientes.

## **Generalidades**

### **Pregunta de investigación**

¿Cuál es la correlación mineralógica metálica y no metálica en los sedimentos presentes en los depósitos de placer con sus áreas fuentes, en sistemas de drenaje tipo meándrico?

### **Hipótesis**

Las características texturales y mineralógicas presentes en los sedimentos aluviales asociados al Río Cauca en el sector Margento, están directamente asociadas a sus áreas fuentes, siendo determinadas por la selección natural que sigue el patrón de drenaje predominante de la zona de estudio.

## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar la asociación del depósito tipo placer en la mina Lucky con el fin de determinar su área fuente, a partir del análisis de sus características petrográficas y metalográficas, así como a través de las relaciones geológicas documentadas durante el levantamiento de campo.

### Objetivos específicos

- Establecer el contexto geológico regional, a partir de la revisión bibliográfica de las áreas fuente vinculadas a las microcuencas que desembocan en el Río Cauca, específicamente en el sector de Margento.
- Realizar la caracterización petrográfica de la mineralogía metálica y no metálica en sedimentos aluviales mediante análisis metalográficos a partir de secciones delgadas pulidas.
- Determinar la relación existente entre las características texturales y composicionales de los sedimentos que componen el depósito de placer y las áreas potenciales fuentes.

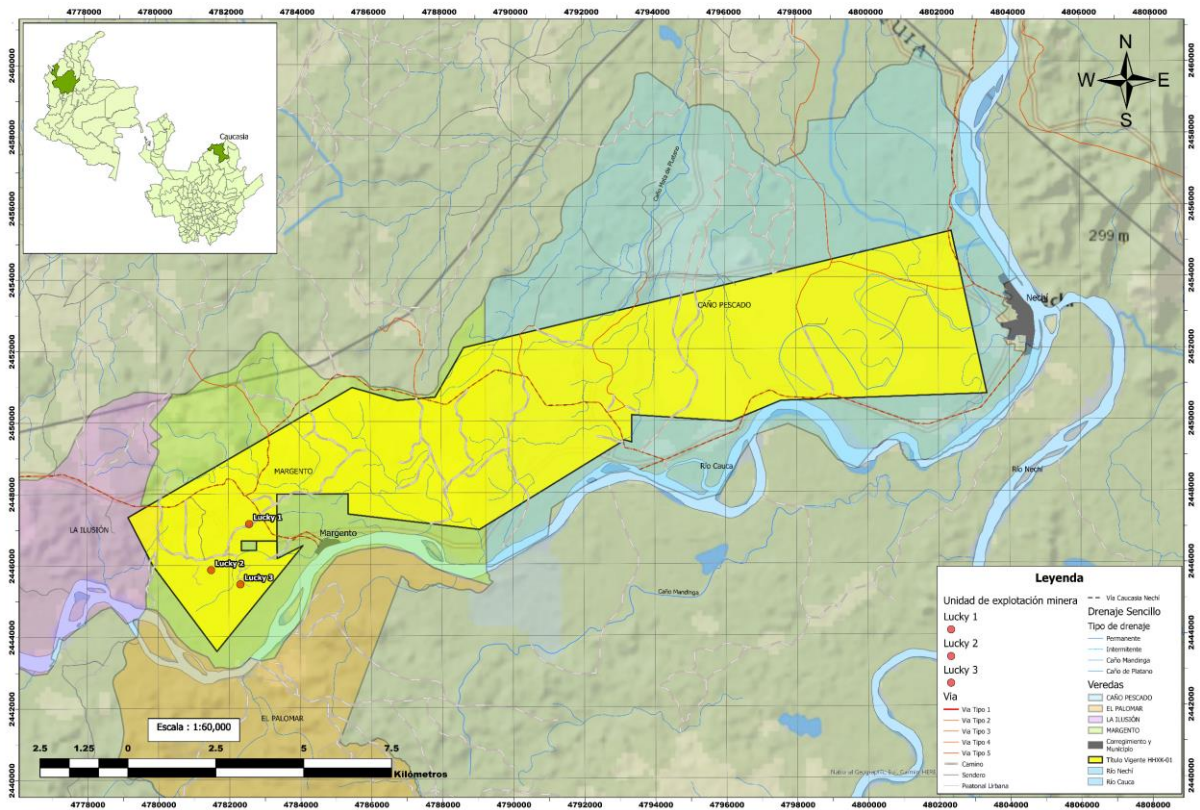
### Localización

El área de estudio se ubica sobre las estribaciones de la Cordillera Central de los Andes, al nordeste del departamento de Antioquia (**Anexo 1**), específicamente en el municipio de Caucasia dentro del distrito minero de Nechí (Giraldo et al., 2021). Es reconocido ampliamente como un importante distrito de explotación de oro aluvial asociado a terrazas del Río Nechí formadas durante el Cuaternario (Londoño et al., 2009; Shaw, 2000), su cartografía geológica está explicada en la plancha 83-Nechí del SGC (Zapata et al., 2013).

La investigación se llevó a cabo en la zona de producción aurífera del corregimiento de Margento, definida por la vía que conecta Caucasia con Nechí y el río Cauca. Esta área está delimitada por las veredas de Villa del Socorro, Los Medios, Palanca y Palomar; quienes constituye la mano de obra para el proyecto de explotación (**Figura 1**).

La mina Lucky se encuentra ubicada en las coordenadas 74°04'51.30" W 4°35'56.57" N, dentro del sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS Origen Nacional. La empresa Tamana

Pacific título minero HHXK-01 (**Anexo 2**), opera bajo un contrato de concesión, en el cual poseen cinco unidades de explotación minera identificadas como "Lucky".



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio dentro del polígono de explotación minera. Sistema de coordenadas MAGNA- SIRGAS Origen Nacional. Fuente: Elaboración propia.

## Marco geológico

### Geología regional

Se reconocen dos dominios geológicos limitados por la falla Otú - Pericos la cual separa el terreno Tahamí (sector occidental) del Terreno Chibcha (sector oriental) (Restrepo y Toussaint, 1988). El distrito minero del nordeste antioqueño se ubica en el flanco oriental de la Cordillera Central al noreste del departamento de Antioquia (Londoño et al., 2009), sobre las cuencas de los ríos Cauca y Nechí acompañado de un sistema de arroyos, quebradas, caños y ciénagas (Molina & Alberto, 2023).

## **Rocas Metamórficas**

### **Gneises Precámbricos y Anfibolitas (Pensl)**

En la zona oriental se encuentran rocas metamórficas de edad precámbrica que corresponden a gneises cuarzo-feldespáticos, anfibolitas y mármoles pertenecientes a la unidad Gneis de San Lucas (Clavijo et al, 2008) la cual aparece expuesta en un cuerpo alargado que se extiende a lo largo de 50 kilómetros aproximadamente en el costado oriental de la falla Otú-Pericos, en el cual las rocas han sufrido metamorfismo de facies granulitas (Bogotá y Aluja, 1981).

Estudios recientes describen a la Serranía de San Lucas como basamento metamórfico Mesoproterozoico conformado por gneises cuarzo feldespáticos, anfibolitas y lentes de calizas (Feininger et al., 1972). Las edades interpretadas como periodos de metamorfismo que varían entre 1042 a 1344 Ma y de cristalización de  $1310 \pm 20.7$  Ma (Cuadros et al., 2014).

## **Rocas ígneas**

### **Complejo Paleozoico de Cajamarca (Pznf)**

Esta unidad se ubica regionalmente al oriente de la falla Otú-Pericos y al costado oeste de la falla San Jerónimo. Hacia el oeste del Río Nechí, está representado por gneises cuarzo-feldespáticos y aluminicos junto con esquistos verdes y esquistos moscovíticos. (Maya y González, 1995). Según Vinasco et al., (2006), el Complejo Cajamarca se considera de edad Permo-Triásica y es interpretado por Cochrane et al. (2014), con edades obtenidas por método U-Pb interpretadas como edades de metamorfismo que oscilan entre 234 a 245 Ma, lo que indica un evento de metamorfismo de edad Triásica (Restrepo *et al.*, 2010).

### **Batolito Mesozóico de Segovia (Jdse)**

Este cuerpo alargado se encuentra en la misma dirección de la Cordillera Central (González y Londoño, 2002), fue nombrado por Feininger et al. (1972) como dioritas y cuarzodioritas que componen al Batolito de Segovia, yacen al este del río Nechí en contacto fallado (Falla El Bagre) con la serranía de San Lucas y al oeste con el Complejo de Cajamarca (Bogotá y Aluja, 1981; Kerguelen, 2016).

Está compuesto principalmente por dioritas, con amplias variaciones texturales y composiciones en especial a diorita cuarzosa, posee la siguiente mineralogía: Plagioclasas, cuarzo, ortoclasa, hornblenda, biotita y algunos accesorios magnetita – ilmenita, apatito y pirita (González, 1992). Su registro de mineralización de oro corresponde al fraccionamiento del Batolito de Antioquia durante su última fase de cristalización, por lo cual Echeverri (2006) propone este evento metalogénico en el periodo Cretácico.

El Batolito de Segovia de acuerdo con Leal – Mejía (2011) registra edades del Jurásico Superior, estas edades fueron identificadas en el norte del Batolito en dioritas hornbléndicas ubicadas en el área de Nechí, con edad de  $(166,5 \pm 2,3 \text{ Ma})$ .

### **Batolito Cretácico Antioqueño (J-Pi)**

Está compuesto en su mayoría por rocas metamórficas de medio a bajo grado como gneises, anfibolitas, filitas y esquistos, las cuales sugieren edad Paleozoica o Precámbrica, a demás se encuentra rocas sedimentarias y volcánicas de edad Cretácica (Carmona & Pimentel, 2001). Con composición mineralógica de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita, hornblenda y clinopiroxeno, determinando una litología de granodioritas y tonalitas (Feininger & Botero, 1982).

La edad del Batolito Antioqueño varía de 63 a 90 Ma, determinada por varios métodos de datación (K-Ar, Rb-Sr y U-Pb) (Antioquia Gold Ltda, 2017).

### **Rocas sedimentarias**

#### **Formación Cenozoica Caucasia (Ngca)**

El techo del Grupo Sincelejo ha sido denominado por Lobo Guerrero, 1984, en (Huguett, 1987) representada por conglomerados pocos consolidados de guijarros, bloques de rocas metamórficas de alto grado de metamorfismo y cuarzo lechoso dentro de una matriz arenosa arcillosa de color rojo rojizo. (González, 2001).

Posee un contacto discordante con las rocas metamórficas del complejo de Puquí y un contacto gradacional con la Formación Tarazá, definido por el cambio de conglomerado a areniscas (Molina & Alberto, 2023).

### **Formación Tarazá (Ngt)**

La formación Taraza de edad Cenozoica se encuentra al noroccidente de Antioquia desde la margen occidental del río Man y hacia la margen oriental del río Cauca (INGEOMINAS, 1979), donde se observa que la llanura aluvial se amplía (Kerguelen, 2016). Constituido por areniscas de color amarillo, con escasa consolidación y conglomerados con estratificación cruzada, intercaladas con cuarzo lechosos de tamaño guijarro (González, 2001).

Esta unidad geológica y la formación Caucasia afloran desde Zaragoza en el sur a lo largo del margen occidental de la llanura de inundación del río Nechí hasta el río Cauca donde la llanura aluvial se amplía (Molina & Alberto, 2023).

### **Aluvión cuaternario (Qal)**

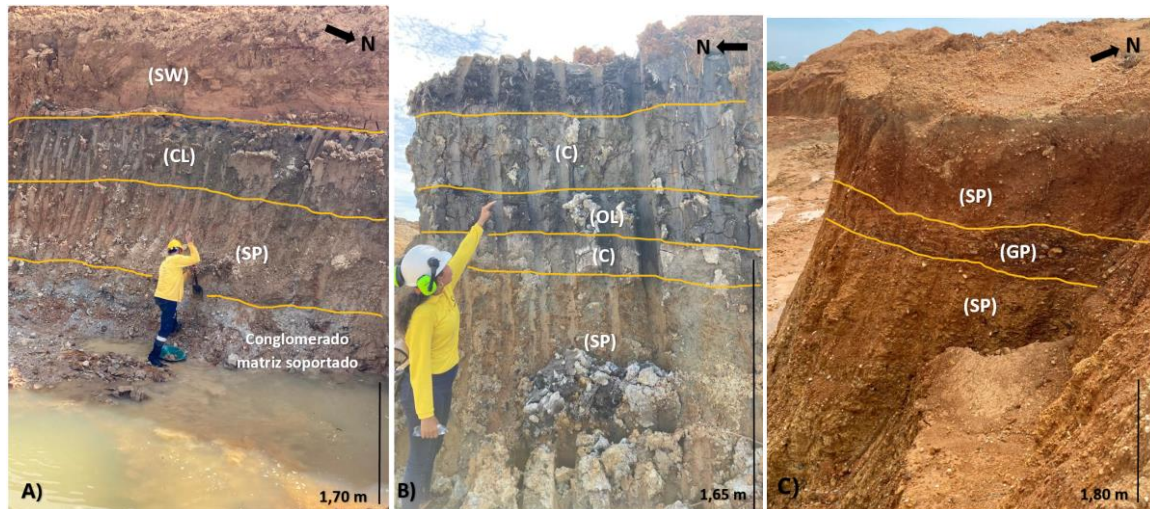
Esta unidad presenta material ligeramente consolidado, se identifica en la mayor parte del área de influencia del estudio (Padilla et al., 1983). Existe fragmentos de cuarzodiorita, anfibolitas, esquistos sericíticos, cuarzo de filón, andalucita, neises cuarzo feldespáticos, conglomerados con cuarzo blanco y bloques de arcillas (Lamus, 2005). A demás se encuentran en mayor proporción los sedimentos de edad terciaria las cuales son arenas de grano fino (Kerguelen, 2016).

### **Geología local**

En el área de influencia, se destaca principalmente la llanura aluvial del río Cauca. La parte más elevada del proyecto minero de la mina Lucky se encuentra en las terrazas aluviales y deposito correspondientes al Cuaternario.

Este tipo de depósito sedimentario aluvial con componente de mineral metálico surge como resultado de la meteorización y transporte de rocas ígneas y metamórficas que han sido removidas de su lugar de origen por distintos eventos (Molina & Alberto, 2023).

La geología expuesta en los afloramientos estudiados de la mina Lucky, se presenta de la siguiente manera:



**Figura 2.** Clasificación de materiales según Arturo Casagrande (1942) para definir los horizontes en los afloramientos según su granulometría. **A** – En el afloramiento de la mina Lucky 1 se diferencian 4 diferentes estratos, el primer horizonte representa arena bien gradada (SW), arcilla inorgánica de plasticidad baja a media (CL), arena mal gradada (SP), seguida de conglomerado matriz soportado. **B**- Afloramiento de la mina Lucky 2 expresa la presencia de arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH), limos orgánicos de baja plasticidad (OL), intercalación de arcillas y limos, como base del afloramiento arena mal gradada (SP) con presencia de grava. **C**- En la mina Lucky 3 su afloramiento posee una intercalación de arena de tamaño grueso (SP) y grava mal gradada (GP).

Las terrazas vistas en la zona de referencia indica que los materiales se encuentran depositados sobre rocas sedimentarias del terciario y poseen un espesor de aproximadamente entre 10-12 metros.

Los materiales de estas terrazas muestran variaciones en el color rojizo de sus materiales, lo cual está relacionado con su grado de exposición, lo cual indica que presenta procesos de oxidación y se distingue a demás características como el tamaño de grano y la redondez, lo que es un indicio del transporte que ha sufrido dicho material.

Generalmente las terrazas se encuentran compuesta por capas gruesas de gravas, arenas y limos que están poco compactados expuestos de color pardo rojizo con representación de mineralógica de magnetita. Así como en la memoria explicativa del mapa geológico del

departamento de Antioquia (González, 2001) afirma que las terrazas de origen aluvial son acumulaciones de grava, arenas y limos que se encuentra a lo largo de la dinámica reflejada por los materiales del río Cauca.

Caballero et al., (1988) expone y logra distinguir cinco niveles de terrazas, que han sido intervenidas y por lo tanto dificultan el análisis cartográfico y estratigráfico del área de estudio.

### **Metodología**

Con el fin de lograr los objetivos establecidos, se realizó las diferentes tareas dentro de un modelo sistemático que brinda un manejo adecuado a la información obtenida y en la cual se establece la aplicación de técnicas apropiadas en el estudio que se quiere lograr, como se describen en el (**Anexo 3**).

### **FASE 1:**

#### **Compilación de la información existente**

En esta investigación se emplea el método descriptivo de la investigación (Gutiérrez, 2018), en base al análisis y revisión de información geológica, tectónica, hidrológica, cartográfica y técnicas de estudios en petrografía y metalográfico que abordan los depósitos de tipo placer en el Bajo Cauca, todo esto bajo el método heurístico y hermenéutico (Kerguelen, 2016).

*Fase heurística:* Consiste en la búsqueda, la recopilación y la organización de investigaciones y diferentes autores que han estudiado y tratado el tema por medio de una base de datos bibliográficos, como lo son artículos, libros, tesis, publicaciones de revistas de investigación científica y análisis de información proporcionadas por portales de información.

*Fase hermenéutica:* Se basa en comprimir, analizar e interpretar las diferentes fuentes bibliográficas que han sido consultadas (Arteta, 2017) para permitir la explicación acerca de la metalogénesis en depósitos paleo placer, como su origen en áreas ígneo-metamórficas de la zona de estudio.

## **FASE 2**

### **Geología de Campo**

De acuerdo al objetivo de establecer las características texturales y composicionales de este depósito tipo placer, se realiza la geología de campo y el muestreo representativo, el 1 de agosto de 2023 en las unidades de explotación de la empresa Tamana Pacific S.A.S, la cual brindó acceso a la zona de estudio y el apoyo logístico para acceder a las unidades de explotación aurífera que serían analizadas.

Se realiza la selección de los afloramientos más representativos para realizar la caracterización mineralógica de las terrazas pertenecientes a la mina que se encuentra constituido por gravas, arenas, limos y arcillas, que han sido retrabajadas por retroexcavadoras (Durán, 2020).

Posteriormente, se realiza una recuperación del material a analizar por medio de calicatas, que puede llegar a los estratos más profundos del afloramiento, constituido en su mayoría por arenas y gravas; para esto se toma el estrato más profundo llegando al nivel de arcilla azul, conocido en la operación minera como peña, generalmente se encuentra mayor a los 12 o 15 metros de profundidad, dado que es el horizonte o estrato más cercano donde existe la mayor representación el metal de interés, con mayor potencial que en superficie.

### **Recolección de muestras**



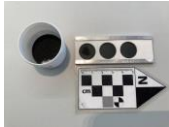
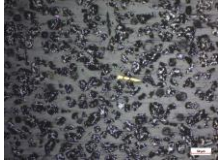






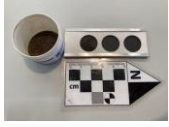

Se toman concentrados de arenas que son guardados en bolsas herméticas con un peso aproximadamente de 2 kilos y previamente rotuladas con el nombre de cada frente de explotación para la elaboración de sección delgada pulida, en este tipo de muestra se debe tomar el concentrado final mediante el uso de la batea, en el cual quedan los minerales más densos como lo son la magnetita y el oro, para así disponerla en pequeños frascos que luego serán destinados a laboratorio.

### **Cuarteo**

Según lo planteado por Rendón (2012) este método se realizó con el objetivo de obtener de una muestra, porciones representativas y homogéneas para efectuar las pruebas de

laboratorio que requieren, en este caso los concentrados de arenas (**Anexo 4**). Estos concentrados de arenas, se hizo la disposición de los que se van a analizar y se tomó una contramuestra por reposición.

En la siguiente tabla, se explica ilustrativamente las diferentes etapas que abarcan desde la recolección hasta la preparación final de las muestras de esta investigación:

Código de muestra	Afloramiento	Minerales livianos	Minerales pesados	Sección delgada pulida
Lucky 1				
Lucky 2				
Lucky 3				

**Tabla 1. Fases de recolección y preparación de las muestras recolectadas-**

### **Análisis de muestras**

#### **Análisis microscópico**

Para llevar a cabo este análisis, se emplearán los concentrados de arenas, los cuales serán analizados mediante el uso del estereoscópico estereográfico. Se dispondrá en una platina una porción pequeña de las arenas, y mediante el software de microscopía digital Motic Images Plus 2.0, junto con un microscopio petrográfico Olympus, facilitará la determinación de su representación y asociación mineralógica (**Anexo 5**).


Estas muestras proporcionarán y confirmarán la asociación de minerales predominantes y líticos, permitiendo determinar características como color, textura, forma, disposición y estructuras (MacKenzie et al., 1982).

### Caracterización mineralógica y petrográfico

Para el desarrollo del análisis petrográfico, se obtuvo la preparación de las secciones delgadas pulidas que fue brindada por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT, quien suministro todas las herramientas necesarias en su manipulación y preparación.

La metodología empleada para el análisis petrográfico de las muestras de arenas fue el método Gazzi- Dickinson. Este método constituye una técnica estadística diseñada para la medición de los componentes de una roca sedimentaria, en este caso las arenas.

En la caracterización petrográfica, se hará el análisis de 3 secciones delgadas doblemente pulidas (**Tabla 2**), en este caso de Lucky 1 (L1), Lucky 2 (L2) y Lucky 3 (L3).

Afloramiento	Coordenadas	Sección delgada
<i>Lucky 1</i>	8° 2' 1" N 74° 58' 25" W	
<i>Lucky 2</i>	8° 1' 49" N 74° 58' 60" W	
<i>Lucky 3</i>	8° 1' 36" N 74° 58' 33" W	

**Tabla 2.** Coordenadas de extracción de las muestras analizadas en cada unidad de producción minera.

Se llevará a cabo el análisis petrográfico de las secciones delgadas pulidas mediante el microscopio petrográfico Zeiss. Las imágenes serán visualizadas a través de la aplicación Snap 1417; permitiendo una representación visual más detallada de la composición mineralógica encontrada.

### **Microscopio óptico luz reflejada**

En el microscopio petrográfico mediante luz reflejada se observarán los minerales metálicos, es decir, las características ópticas y mineralógicas de la mena, combinado de los diferentes objetivos oculares que logran aumentar o disminuir el detalle (Kerguelen, 2016). Mediante este método se establece la asociación mineralógica existente, principalmente de los minerales metálicos, y a su vez la mineralogía ganga o no metálica.

### **Microscopio óptico luz transmitida**

El análisis de microscopio petrográfico mediante luz transmitida permite observar los minerales traslucidos, que bajo la luz polarizada plana o nicols paralelos (PPL), se pueden observar propiedades como el color, pleocroísmo, hábito y foliación, alteración y relieve (Kerr, 1965).

En la caracterización mineralógica se tendrá en cuenta los siguientes aspectos: Diferenciación e identificación de minerales predominantes, identificación de texturas principales y el reconocimiento de los minerales que contienen el oro (diseminado) y las partículas de oro que se encuentran de manera libre.

## **Resultados**

### **Petrografía macroscópica**

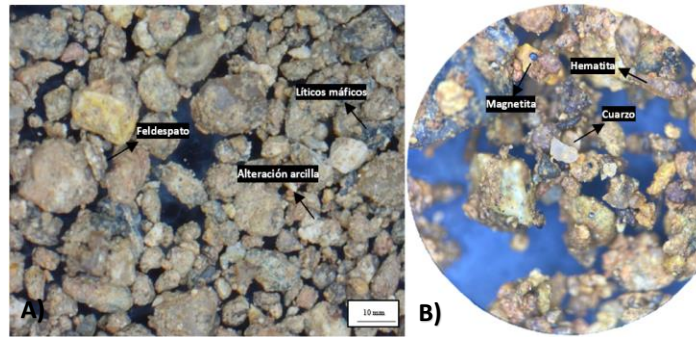
Los sedimentos analizados en esta sección son vistos desde la lupa binocular, el cual genera un campo visual que produce una imagen tridimensional, con el fin de describir la composición y clasificación mineralógica, especificando su tamaño, forma y nivel textural (**Tabla 3**).

Los sedimentos de la mina Lucky 1 están conformados predominantemente por partículas de arena fina a media que varían de tamaño de 0,25- 0,5 mm, detritos máficos con tamaño grava de 13 mm, hematita de 2-3 mm , cuarzo tamaño de 1- 3 mm y magnetita de 0,25 – 0,2 mm (Folk, 1974), los fragmentos de tamaño arena poseen forma subhedral- subredondeada, el

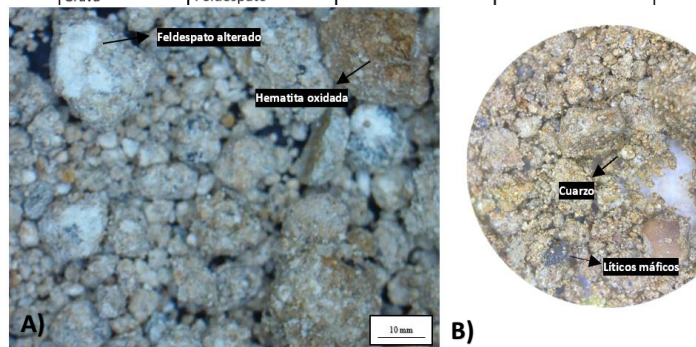
material es moderadamente seleccionado y presenta una madurez textural de submaduro; los feldspatos y cuarzos poseen una forma subhedral -angular, hematitas subangulares, los detritos máficos angulares y magnetita de forma subangular más elongada.

Los minerales que componen estos sedimentos presentan un color café a naranja con subtonalidades rojizas, lo cual indica oxidación o hidróxidos de hierro, composicionalmente está conformada por cuarzo, feldespato, hematita y magnetita.

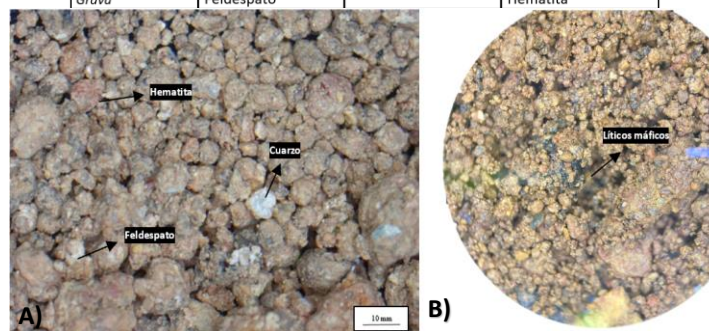
Los porcentajes de los fragmentos presentes se determinaron de acuerdo con el diagrama composicional a vista (Bacelle & Bosellini, 1965) para definir la proporción de minerales predominantes y accesorios vistos desde el microscopio binocular, el feldespato en 30%, los líticos máficos en un 12.5 %, cuarzo en 2.5%, hematita 7,5 % y arcilla 7,5%. Mientras que las partículas de arena están presentes en un 40%.



Tamaño	Minerales primarios	Minerales secundarios	Minerales de alteración supérgena
<b>Sedimentos Lucky 1</b>			
Limo			Minerales arcillosos
Arcilla			Hematita
Arena	Cuarzo	Magnetita	
Grava	Feldespato		



Tamaño	Minerales primarios	Minerales secundarios	Minerales de alteración supérgena
<b>Sedimentos Lucky 2</b>			
Limo			Minerales arcillosos
Arcilla			Hematita
Arena	Cuarzo	Moscovita	
Grava	Feldespato		



Tamaño	Minerales primarios	Minerales secundarios	Minerales de alteración supérgena
<b>Sedimentos Lucky 3</b>			
Limo			Minerales arcillosos
Arcilla			Hematita
Arena	Cuarzo	Magnetita	
Grava	Feldespato		

**Tabla 3.** Análisis de resultados de petrografía macroscópica en las diferentes unidades de explotación minera. **A-** Sedimentos vistos desde estereomicroscopio. **B-** Foto tomada desde ocular 10X y zoom 4.

Los sedimentos de la mina Lucky 2 están compuestos por una matriz de arena fina de tamaño de 0,05 a 0,2 mm con forma subhedral y subredondeada (Krumbein & Sloss, 1969), feldespato de tamaño 8-10 mm subredondeado-subesferico, hematita de tamaño 10- 12 mm subangular elongado, líticos máficos de 5 mm con redondez subangular, cuarzo  $\leq 3$  mm subredondeado, moscovita de tamaño 0.1 mm dispuestas de forma laminar y limo con tamaño de grano de 0,02 a 0,01 mm (Folk, 1974) la selección del material es moderadamente seleccionado y presenta una madurez textural submaduro (Compton, 1962).

El color de los sedimentos en Lucky 2 tiene tonalidades mayormente grisáceas por el contenido de limo y arcilla en su matriz, presenta feldespato alterándose a arcilla, mineralógicamente se puede encontrar hematita, feldespato, cuarzo, limo, arcilla, líticos máficos y moscovita.

La composición los fragmentos en porcentaje de estos sedimentos es de arena de tamaño fino en un 30%, feldespato 15%, líticos máficos 10%, hematita 12,5%, cuarzo 10%, arcilla 12,5 % y limo 10 % (Bacelle & Bocellini, 1965).

La composición de los sedimentos recolectados en Lucky 3 posee arena fina a media de 0,25-0,5 mm subhedral- subredondeada, líticos félsicos de tamaño 11 mm con forma subangular elongado, hematita de forma subhedral, angular con tamaño de 6-10 mm, feldespato subangular de 5-10 mm, cuarzo de 2- 5 mm subhedral- subredondeados (Krumbein & Sloss, 1969), la selección del material está bien seleccionado y presenta una mayor madurez textural de submaduro-maduro (Compton,1962).

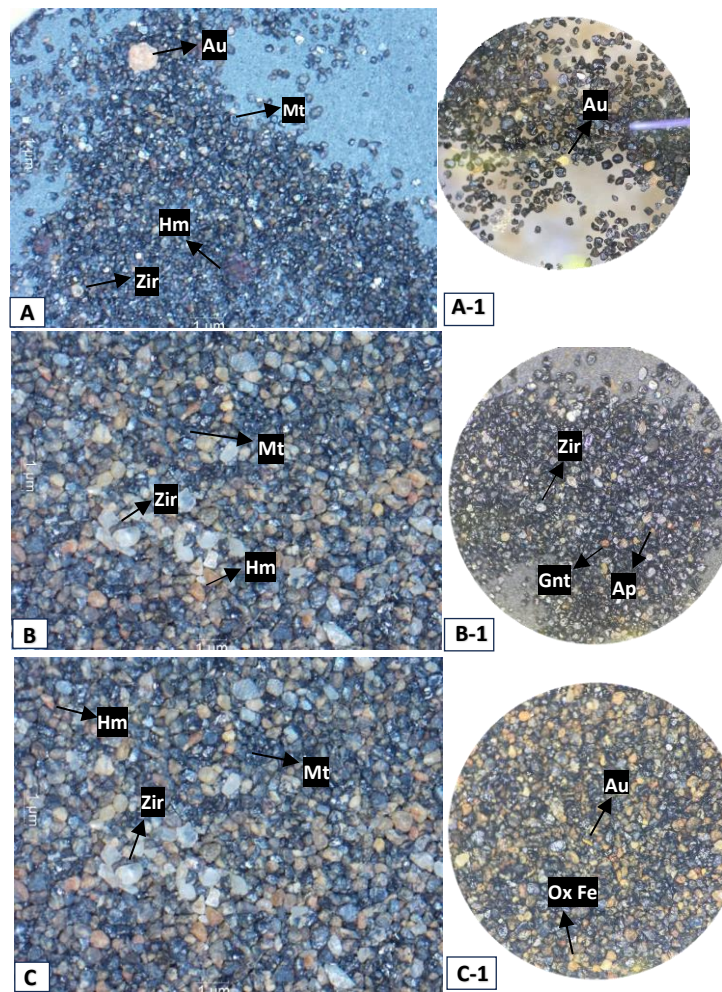
Presenta un color naranja con subtonalidades ferrosas, en su composición mineralógica se halla cuarzo, hematita, feldespato y pequeños detritos máficos. Porcentualmente los fragmentos de estos sedimentos están compuestos por arena fina a media 40%, feldespato 30%, hematita 20%, detritos máficos 20% y cuarzo 10%.

Según la clasificación mineralógica de Folk (1974) los sedimentos de la mina Lucky 1 se atribuyen a ser una arcosa lítica, mientras que la relación composicional indica que los

sedimentos Lucky 2 representan una arenisca limosa y por último los sedimentos de Lucky 3 están asociados a una arenisca arcosa.

### Análisis macroscópico-concentrados

Los concentrados analizados tuvieron un tratamiento previo de lavado y secado en el cual se separan las arenas y queda en el concentrado minerales de mayor peso específico que acompañan al oro por medio de procesos de separación gravimétrica.

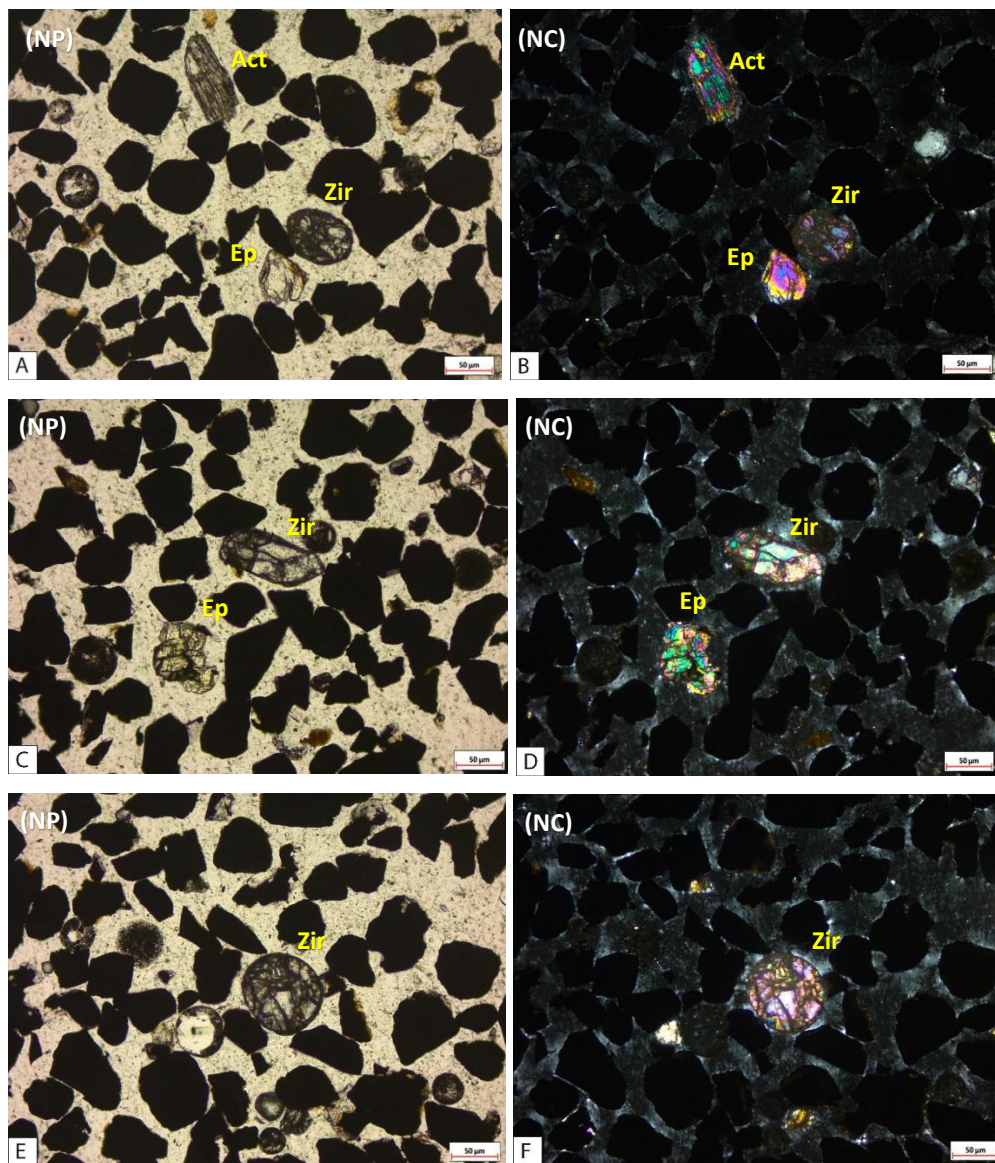


**Figura 3.** Aspectos mineralógicos y macroscópicos de concentrados extraídos por concentración gravimétrica. **A, B y C** - Cristal de circón (Zir), hematita (Hm) en estado de oxidación, oro (Au) libre y magnetita (Mt) en mayor proporción. **B-2** - Cristales de apatito (Ap) representado como mineral secundario. **C-2** - Oro (Au) expresado de manera libre como una partícula fina y laminar, con patinas de oxidación en minerales traslucidos.

En esta composición se encuentra predominantemente la magnetita que posee propiedades ferromagnéticas, minerales de oxido como la hematita, traslúcidos pesados representado por el circón y apatito y mineral opaco expresado en las partículas de oro.

### Petrografía microscópica

En este tipo de petrografía se determina las propiedades ópticas de los minerales identificados, sus características y la asociación mineralógica presente en las muestras tomadas en cada una de las unidades de producción minera (UPM).



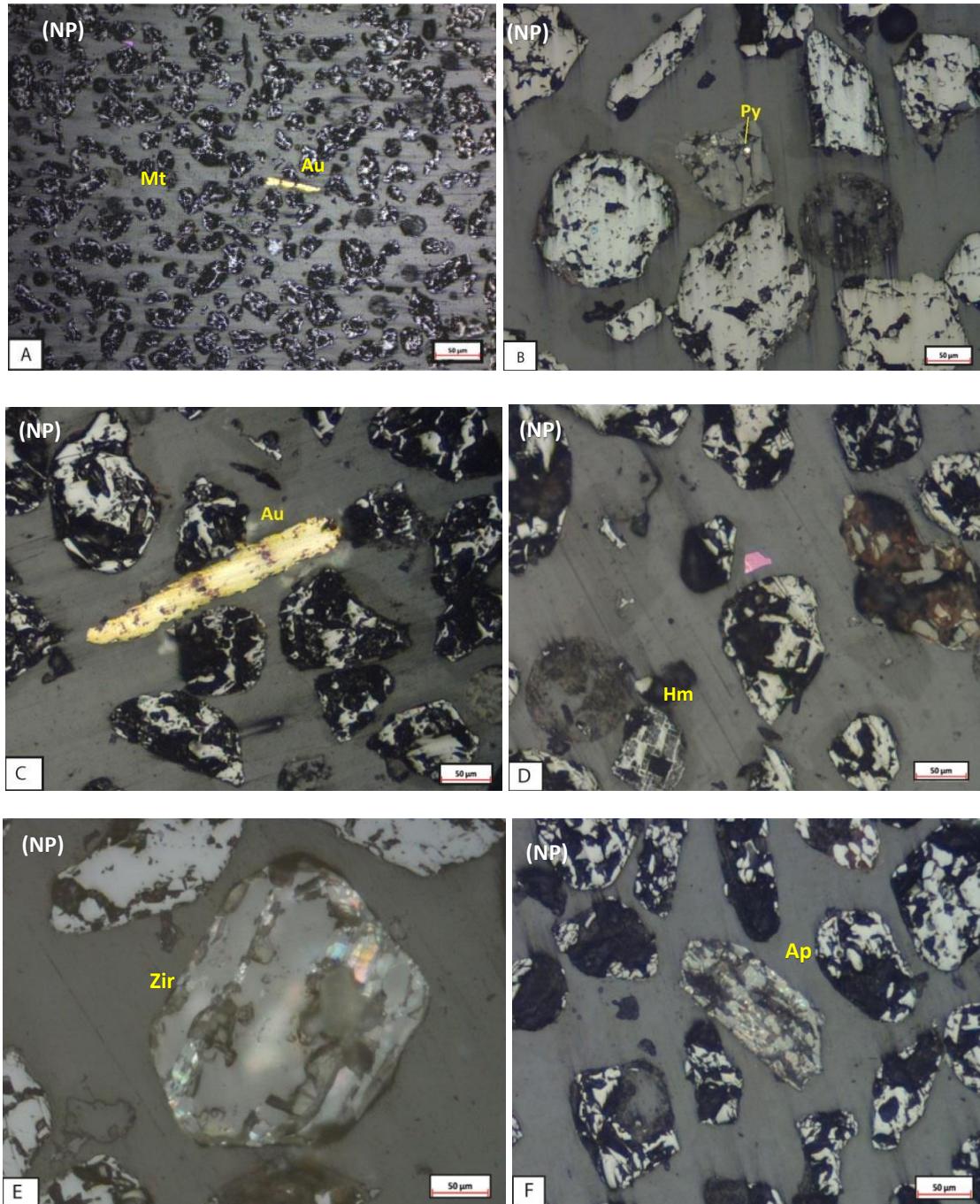
**Figura 4.** Aspectos petrográficos de sedimentos en depósitos placer. **A y B** - Asociación mineral de Actinolita (Act), Circón (Zr) y Epidota (Ep). **C y D** – Circón (Zir) asociado a mineral opaco como la magnetita (Mt), junto a una Epidota- Clinozoisita (Ep). **E y F**- Circón (Zir) con hábito redondeado y fracturado debido al transporte del ambiente sedimentario. NP= polarizadores paralelos, NC= polarizadores cruzados. Muestra L1.

En la identificación de los minerales traslucidos se obtuvo un anfíbol de la serie tremolita-actinolita con un tamaño de 50  $\mu\text{m}$  de ancho, varía entre automorfo a sub-automorfo, posee un hábito prismático alargado, alta birrefringencia, posee relieve medio a alto y expresa una apariencia fibrosa con pequeñas fracturas.

Los cristales de circón de la muestra Lucky 1 posee un tamaño variable de 50- 80  $\mu\text{m}$  los cristales más pequeños mientras que los cristales de mayor tamaño varía entre 80-100  $\mu\text{m}$ , automorfo, con color de interferencia de colores altos y vivos como el rosa, verde y azul, posee hábito prismático a redondeado (debido al transporte del ambiente aluvial), se encuentra con líneas de fractura, no posee pleocroísmo y un presenta alto relieve.

En el caso de la epidota dispone de un tamaño de  $\leq 50 \mu\text{m}$ , incoloro a amarillento en nicoles paralelo, xenomorfo, tiene colores de interferencia altos, posee relieve de medio- alto, es característico en fracciones pesadas de rocas sedimentarias. encuentran fracturados.

A nivel metalográfico se analiza las propiedades de los minerales metálicos y su tipo de aleación. El Oro se presenta de manera libre, posee un tamaño de 70  $\mu\text{m}$ , su color amarillo latón está relacionado a las aleaciones presentes, en el (**Anexo 6**) indica según su color una aleación de 75% de oro (Au), 12.5% de plata (Ag) y 12.5% de cobre (Cu), tiene una forma laminar, con alta reflectancia y borde irregulares



**Figura 5.** Aspectos metalográficos de sedimentos en depósitos de placer. **A-** Oro (Au) de manera libre asociado a magnetita dominante (Mt). **B-** Hematita con inclusión de pirita (Py) que resistió a lo largo del transporte sedimentario. **C-** Oro (Au) con forma laminar. **D-** Hematita (Hm) con exfoliación romboédrica en 3 direcciones. **E-** Circón (Zr) de la muestra L1. **F-** Apatito (Ap). NP= polarizadores paralelos, NC= polarizadores cruzados. Muestra L1 representado en las microfotografías **A, B, C y D** y Muestra L2 en **E y F**.

La Magnetita tiene un color característico grisáceo, con tamaños menores a 200  $\mu\text{m}$ , de baja reflectividad, sub-automorfo a xenomorfas probablemente asociada a la técnica de elaboración, algunas de sus se ven mejores formadas con otras asociadas al proceso sedimentario de transporte, por ende, presenta un hábito masivo. Las maclas que se aprecian en la (**Figura 5-D**) son maclas lamelares que se asocia a hematita.

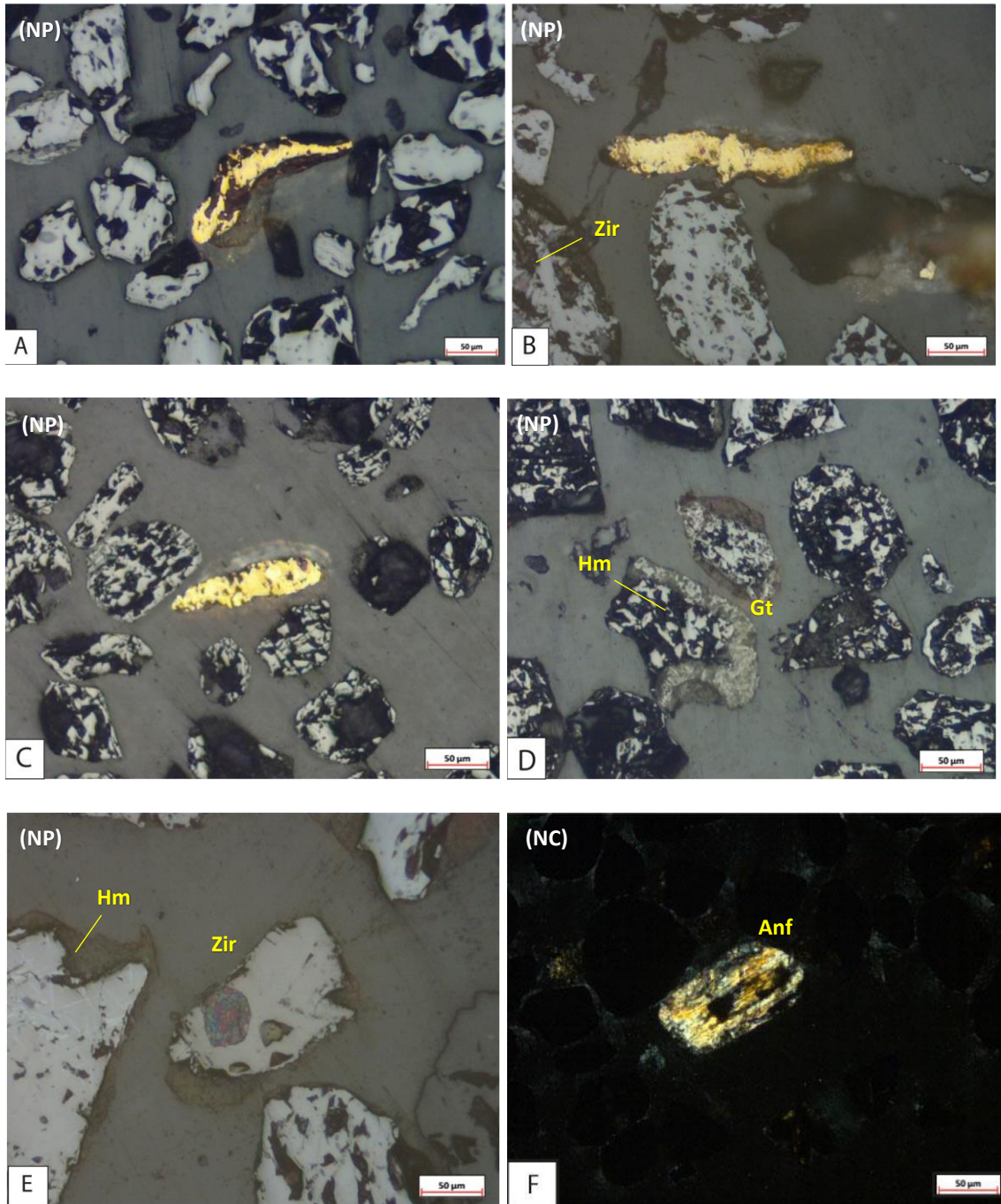
Los pequeños cristales de pirita con tamaño de 10  $\mu\text{m}$  se encuentran embebidos dentro de las vacuolas de la magnetita, de forma idiomórfica desarrollado en pequeños cubos (**Figura 5-B**), posee un color amarillo latón claro. En la (**Figura 5-E**) la magnetita o incluso el anfíbol pueden contener circón, que se caracteriza por su hábito bipiramidal y la exhibición de colores de interferencia con un alto relieve.

En la muestra llamada Lucky 2, la (**Figura 5- F**) evidencia la presencia de cristales de apatito con tamaño superior a 200  $\mu\text{m}$ , muestran una variación e su morfología que va desde xenomorfa a subautomorfo. Estos cristales tienen forma de pequeños prismas hexagonales u exhiben colores de interferencia en tonalidades pastel (azulados).

En cuanto al análisis metalográfico, el oro posee diversas representaciones de forma laminar con bordes irregulares, con tamaños que oscilan entre 20-40  $\mu\text{m}$  hasta 100 – 200  $\mu\text{m}$ , para los de mayor tamaño, su tonalidad característica presenta una aleación de 12.5% plata (Ag) y 12.5% de cobre (Cu), el restante en porcentaje puro (**Figura 5- C**).

Por otro lado, los granos de magnetita presentan una forma alargada con presencia de múltiples vacuolas con pequeñas inclusiones de zircón, varían entre 30-100  $\mu\text{m}$ .

En la muestra de Lucky 3 se encontró la menor representación del mineral metálico de interés. Sin embargo, se observaron signos de alteración y oxidación característico de minerales traslucidos pesados, como la magnetita. En este caso, el mineral muestra una alta presencia de vacuolas que contienen inclusiones de minerales de tipo sulfuro como la pirita y la calcopirita (**Figura 6**).



**Figura 6.** Características petrográficas en los sedimentos de Lucky 3 y Lucky 2. **A, B y C-** Representación del oro a lo largo de la sección delgada pulida en la mina Lucky 2 dispuesta de forma alargada y bordes irregulares. **D-** Alteración de borde de goethita (Gt) y núcleo de hematita (Hm). **E-** Cristal de circón (Zir) y representación de clivaje típico de hematita (Hm) dentro de la magnetita (Mt). **F.** Plagioclasa alterando a anfíbol con textura fibrosa. NP = polarizadores paralelos, NC= polarizadores cruzados. Microfotografías D, E y F corresponden a la Muestra L3.

## **Discusión**

### **Caracterización textural de la zona de estudio**

La mineralización tipo placer presente en la Mina Lucky, localizada en el departamento de Antioquia, limitado con el municipio de Nechí y el Bagre, corresponde a un depósito de placer tipo aluvial, ubicado entre los ríos Cauca y Nechí.

El Bajo Cauca se caracteriza por tener una topografía suave, marcada por superficies de amplios topes y se encuentra geomorfológicamente conformado al costado este por colinas aisladas con un relieve que sobresale los depósitos cuaternarios presentes en la zona (Zapata et al., 2013). La región está definida por un cauce meándrico y los ríos que la atraviesan generan nuevas sedimentaciones, lo cual resulta en la concentración del oro aluvial por acción de su densidad y gravedad específica (Sandoval, 2013).

En la zona de investigación, se llevó a cabo un análisis de las terrazas expuestas en varios puntos de extracción. Estos puntos presentan una variedad de tamaños de partículas que incluyen limo, arena y grava. Las muestras mostraron una mineralogía rica en minerales opacos como la hematita, magnetita e ilmenita y minerales traslucidos como cuarzo, feldespatos y pequeñas micas.

### **Identificación de áreas potenciales fuente de materiales Río Cauca mina Lucky**

La metalografía desempeña un papel esencial en áreas geológicas, puesto que permite analizar la composición mineralógica, que permite entender la génesis de depósitos minerales principalmente en las relaciones espacio – temporales, con características geológicas-regionales (evolución y procesos geológicos) (Palcawanka, 2017). La identificación de depósitos minerales es fundamental en la industria minera y geológica.

Los procesos de la formación de los depósitos minerales pueden ser magmáticos, metamórficos, hidrotermales y/o sedimentarios, estos pueden ser explicados en términos de la teoría de la tectónica de placas. En este caso se analizan la formación de minerales que dan lugar a la concentración epigenética de metales y minerales en rocas sedimentarias (Robb, 2005).

El tipo de depósito donde se desarrolla el estudio corresponde a un depósito placer tipo aluvial, en el cual la concentración de minerales es el resultado de la fracturación, meteorización y transporte desde depósitos primarios, que posteriormente son concentrados y depositados por acción del agua (Meza et al., 1997).

Este tipo de depósito placer tiene su origen en las áreas fuente, donde los sedimentos que contienen el oro entran por afluentes de agua como distintos drenajes o quebradas, en forma de mezclas heterogéneas de rocas parcialmente meteorizadas (Lamus, 2005), para que sea posible la concentración gravitacional de minerales pesados es necesario que ocurra un proceso de meteorización que permita la liberación de minerales de la roca fuente, en este caso áreas ígneo-metamórficas (Guilbert, 1986).

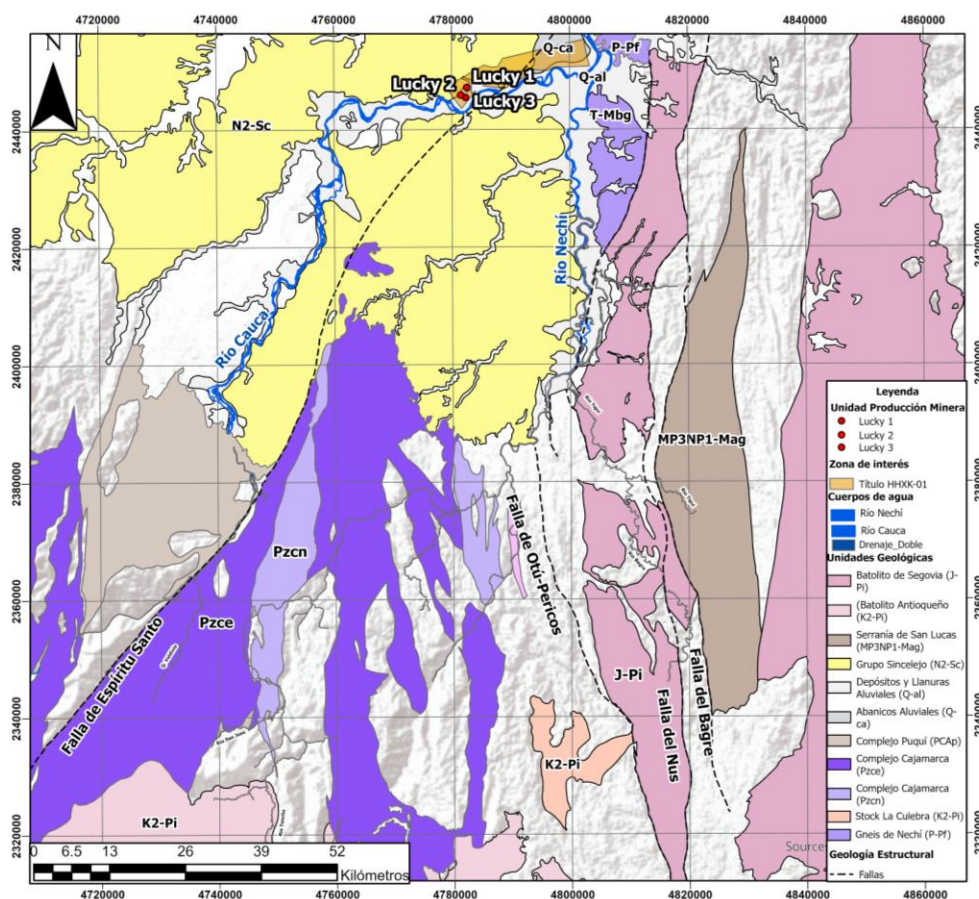
En el análisis metalográfico de los concentrados de arenas negras recolectados en este depósito de placer se observa notoriamente una dominancia de magnetita con formas que van de subredondeada a redondeadas. Están acompañada de minerales traslucidos pesados, como granates, micas y apatitos, que muestran una resistencia a lo largo del proceso sedimentario hasta el lugar donde se encuentra la mineralización tipo placer. A demás de una mineralogía de ganga asociada a presencia dominante de feldespatos, cuarzos y moscovitas indicando un origen asociado a rocas cristalinas en la zona.

Al analizar, la procedencia y afinidad de estas mineralogías, se destaca la presencia significativa de minerales pesados. Este tipo de mineralogía puede asociada a un tipo de origen ígneo o a partir de un protolito ígneo-metamórfico. A pesar de la presencia de las formaciones sedimentarias Sincelejo y Cerritos, no se pueden descartar según su cartografía geológica. Sin embargo, se evidencia que estas formaciones no evidencian la asociación mineralógica de traslúcidos pesados, a diferencia de las muestras analizadas.

Esto sugiere que las zonas potenciales de procedencia se encuentran las estribaciones de la Cordillera Central, donde se ubican las unidades del Complejo Cajamarca, denominada como un depósito de origen orogénico (Angée y Betancur, 2018; Durán, 2018). Esta unidad presenta metamorfismo regional y está definida litológicamente por neises cuarzo feldespáticos y alumínicos que contienen minerales como biotitas, moscovita, andalucita,

plagioclasas, granate, apatito, circón y grafito (González, 2001). Además, existen cuerpos intrusivos como el Batolito Antioqueño de composición litológica conformada principalmente por rocas tipo granodioritas y en menor proporción por tonalitas y cuarzdioritas, el cual forma un contacto bien definido sobre la unidad del Complejo Cajamarca, esto podría estar relacionado con esquistos grafitosos y moscovíticos de grado medio y bajo, que alcanzan facies de esquistos verdes y se formaron como resultados de los efectos del metamorfismo regional (Maya, 1995).

Esto evidencia que en los procesos sedimentarios, en ríos con patrones meándricos maduros, el oro de mayor tamaño y peso tiende a hundirse al lecho del río, mientras que el oro más fino y laminar, como el que se analizó, es transportado desde su área de procedencia a más de 40 o 50 kilómetros a lo largo del río (**Figura 7**).



**Figura 7.** Mapa de áreas fuentes de material del Río Cauca-Mina Lucky. Mapa en coordenadas MAGNA- SIRGAS en Origen Nacional. Escala 1: 800.00. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se han realizados estudios, como el de Betancur et al. (2009) que sugieren que la mineralogía de las rocas en el Bajo Cauca corresponde a un basamento o ígneo y metamórfico del Paleozoico, estas rocas se encuentran sobre unidades litológicas formadas por depósitos de edades Terciario y Cuaternario. Estos cuerpos se atribuyen al Batolito de Segovia en contacto con las rocas del Complejo Puquí y Cajamarca. Mientras que Rodríguez et al. (2014) atribuye a la presencia de un cuerpo denominado “Neis de Nechí”

Este tipo de análisis de procedencia es una propuesta que tiene como objetivo comprender la evolución metalogenética de ríos meándricos en áreas donde se encuentran fuentes ígneo-metamórficas distantes. Esto es viable para entender la evolución de los depósitos de placer al noroeste de Colombia, la clave radica en la no generalización a una misma área fuente, sino que deben ser caracterizados de manera que la mineralogía ganga de minerales traslucidos y mineralogía de opacos sea correlacionada con las áreas fuentes que de acuerdo al reconocimiento de con las cuencas hidrográficas y de acuerdo al flujo de los drenajes potencialmente sean asociados al origen primario de estos depósitos auríferos.

### **Conclusiones**

En la caracterización efectuada en los concentrados de minerales pesados a partir de secciones delgadas pulidas de la mina Lucky proporciona información valiosa sobre la asociación de minerales metálicos y no metálicos presentes en el entorno sedimentario. Esto permite identificar posibles paragénesis mineral a partir de litologías que pueden contener estos minerales, logrando establecer posibles anomalías primarias que puedan ser un fin exploratorio para depósitos de placer aguas arriba de la zona de estudio.

Así mismo, la presencia dominante de magnetita y en pequeña proporción el circón aumenta la probabilidad de áreas fuente ígneas o de afinidad básica/ ultrabásica como aportante primario de fases oxidadas de hierro (magnetita) o magmas oxidados con afinidad a zonas continental a partir de fluidos hidrotermales, que a menudo pueden contener depósitos de oro de tipo pórfido y epitermal.

La ocurrencia de minerales pesados traslucidos, como apatito y circones, no se limita únicamente a fuentes ígneas, también pueden estar relacionados con rocas metamórficas que se originaron a partir de protolitos sedimentarios. Estas rocas se encuentran asociados al Grupo Cajamarca.

Lo anterior se resume en que existen varios tipos de depósitos primarios que potencialmente relacionarse con las litologías ígneo -metamórficas entre las cuales tenemos depósitos magmáticos hidrotermales intrusivos porfídicos y su epitermales asociados, donde muestras de oro muestran su afinidad con plata (Au), indicando su relación con depósitos epitermales. A demás de depósitos magmáticos primarios relacionados con rocas máficas dada a la abundante presencia de magnetita y finalmente, depósitos orogénicos relacionados con procesos metamórficos en rocas ígneo-metamórficas donde los fluidos orogénicos pueden generar sistemas vetiformes de este tipo.

Por lo tanto, es recomendable llevar a cabo investigaciones futuras que incluyan el análisis de minerales pesados y la geocronología detrítica, ya que estos métodos podrían proporcionar información valiosa sobre las áreas potenciales fuente y posibles depósitos minerales primarios.

## Bibliografía

- Angée, D.; Betancur, C., (2018). Caracterización petrográfica, metalográfica, microtermométrica y composicional de la mina El Gran Porvenir, Líbano, Tolima.
- Arteta Ripoll, C. (2017). Hermenéutica, pedagogía y praxeología.
- Antioquia Gold Ltda. (2017). Technical Report on Updated Mineral Resource Estimate and Preliminary Economic Assessment. 2017, 205
- Bacelle, L., & Bosellini, A. (1965). Diagrams for visual estimation of percentage composition in sedimentary rocks [Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie]. *Ann. Univ. Ferrara, NS, sez. IX., Sci. Geol. Paleont, 1*, 59-62.
- Bernal, J., y Railsback, L., 2008. Introducción a la Tabla Periódica de los Elementos y sus Iones para Ciencias de la Tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 25, No. 2, pp. 236 – 246.
- Betancur, T., Mejía, O., & Palacio, C. (2009). Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño: un sistema acuífero tropical. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (48), 107-118.
- Bogotá, J. & Aluja, J. 1981. Geología de la serranía de San Lucas. *Geología Norandina*, (4): 49–55.
- CABALLERO, H., JAMES, M Y MEJÍA I., 1988. Cartografía fotogeológica de las terrazas aluviales en el Bajo Cauca y Bajo Nechí, Departamento de Antioquia. Informe interno Ingeominas (Inédito), 21 p. Medellín.
- Carmona, O. O., & Pimentel, M. M. (2001). Consideraciones geocronológicas e isotópicas del Batolito Antioqueño. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 25(94), 27-35.
- Clavijo J., M.; Mantilla, Figueroa. L. C.; Pinto J.; Bernal L.; Pérez, A. 2008. Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, Norte del Valle Medio del Magdalena y Noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30 (1): 45-62.
- Colombiano, S. G. (2013). Cartografía Geológica de la Plancha 83 Nechí (Departamento de Antioquia). *Medellín, Colombia. (13-73), Mar.*

- Cuadros, F.A., Botelho, N.F., Ordóñez–Carmona, O. & Matteini, M. 2014. Mesoproterozoic crust in the San Lucas Range (Colombia): An insight into the crustal evolution of the northern Andes. *Precambrian Research*, 245: 186–206. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.02.010>.
- Compton, R. R. (1962). *Manual of Field Geology*. New York: John Wiley.
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., ... Chiaradia, M. (2014). Lithos Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos*, 190–191, 383–402. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.020>.
- De Antioquia, G. (2017). Mapa minero de Antioquia. *Sectorización minera de los municipios*.
- Durán Ruíz, N. R. (2020). Prospección de oro aluvial en la concesión minera “Bellamaría” en el cantón Santa Rosa, provincia El Oro, Ecuador (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil).
- Durán, J., (2018). Metallogenic approach of the orogenic gold mineralization present at Líbano, Tolima. Universidad de los Andes.
- Echeverri, B. (2006). Genesis and thermal history of gold mineralization in the Remedios – Segovia – Zaragoza Mining District of Northern Colombia. Master Thesis, University of Shimane, Japón
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas, sub-zona II-B. República, de Colombia, Ministerio de Minas y Petróleos, Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras.
- Feininger, T. & Botero, G. (1982). The Antioquian Batholith, Colombia. *Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas* 12: 1-50.
- Fierro, J., 2012. Políticas mineras en Colombia. Bogotá: Instituto Latinoamericano para una Sociedad y un Derecho Alternativos – ILSA. Recuperado a partir de: (27) Políticas mineras en Colombia - Julio Fierro Morales | Giovanni Hernández - Academia.edu
- Figuroa Chilito, M. (2019). Oro del Sur de Bolívar: Consideraciones Metalogenéticas y Optimización del Beneficio Mineral. *Departamento de Geociencias*.

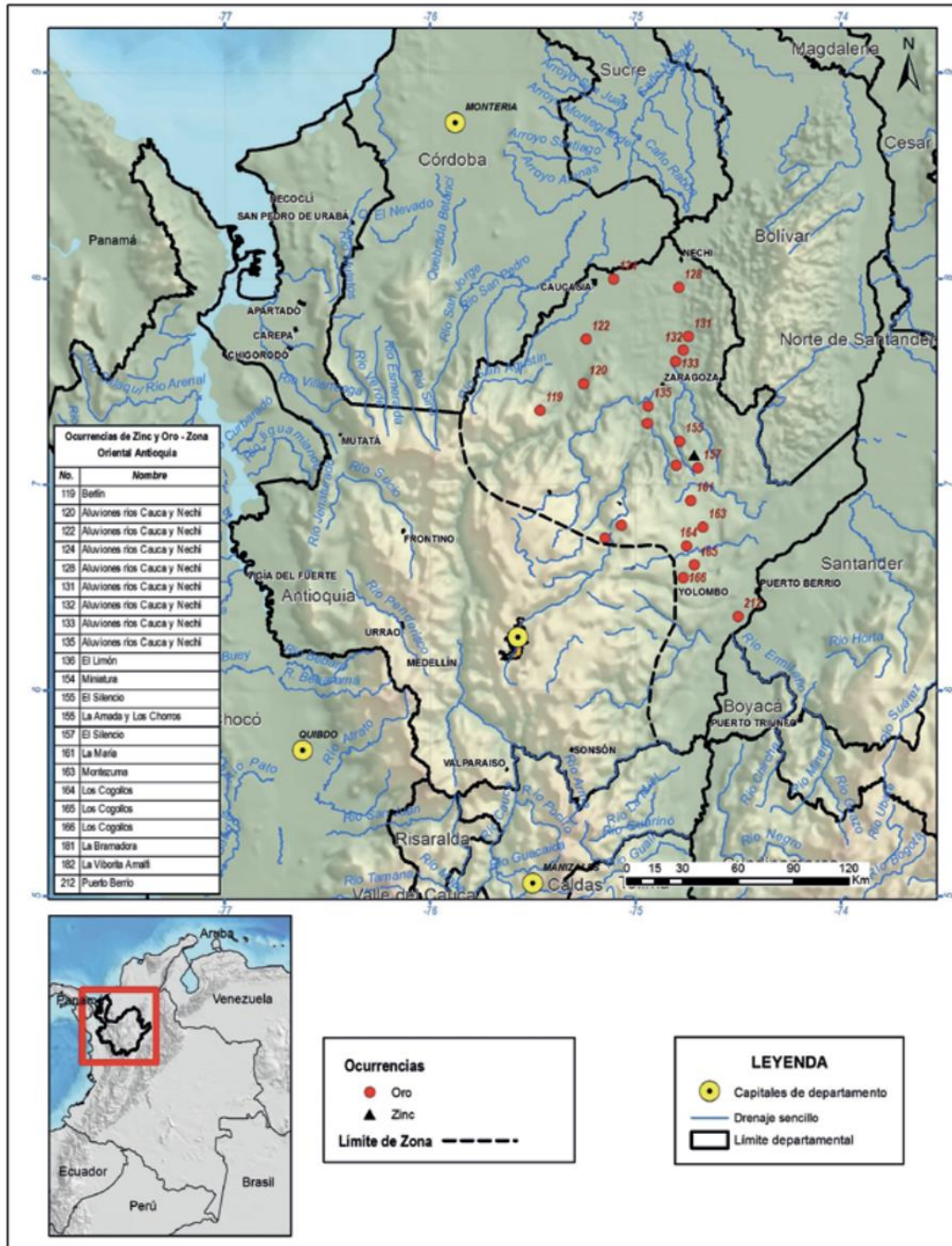
- Folk, R. L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, TX: Hemphill Publishing, pp. 184.
- Hallsworth, C. R., & Knox, R. (1999). BGS rock classification scheme. Classification of sediments and sedimentary rocks. Research report number RR 99-03 (Vol. 3). Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- Force, E. R. (1991). Placer deposits. <https://doi.org/10.5382/Rev.05.09>
- Garnett, R. H., & Bassett, N. C. (2005). Placer deposits. <https://doi.org/10.5382/AV100.25>
- Gary, M., & McAfee, R. JR. & Wolf, CL (Eds) (1972) *Glossary of Geology*. pp. *American Geological Institute, Washington, DC*, 805-25.
- Giraldo Osorio, D y Loaiza Quinceno, J., 2021. Caracterización metalográfica y petrográfica de las mineralizaciones vetiformes presentes en los prospectos Santa Elena y Santa María en el distrito minero Nechí, sur de Bolívar.
- Gómez Gutiérrez, D. F., & Juliani, C. (2018). Petrogênese e metalogenia do magmatismo paleoproterozoico na porção sul da Província Mineral do Tapajós, Cráton Amazônico.
- González, H. (1992). Mapa geológico de la Plancha 106 Liberia.
- González, H., & Londoño, A. (2002). Catálogo de las unidades litoestratigraficas de Colombia: Diorita de Segovia. *Cordillera Central, departamentos de Antioquia y Bolívar. INGEOMINAS, 16p. Bogotá.*
- González, H., 2001. Mapa geológico de Antioquia Escala 1:400.000. Memoria explicativa. Ingeominas. Bogotá.
- Golfarb, R., Baker, T., Dubé, B., Groves, D., Hart, C. and Gosselin, P., 2005. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes.
- Guilbert, J. M., & Park, C. F. (1986). *The geology of ore deposits*. W. H. *H Freeman and Company, New YorN*, 985p.
- Henley, R. W., & Adams, J. (1979). On the evolution of giant gold placers. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B*, 88, 41-50. Recuperado de: [https://repositorio.ucaldas.edu.co/bitstream/handle/ucaldas/17098/DanielAndres\\_GiraldoOsorio\\_JeanKarlo\\_LoaizaQuiceno\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucaldas.edu.co/bitstream/handle/ucaldas/17098/DanielAndres_GiraldoOsorio_JeanKarlo_LoaizaQuiceno_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- INGEOMINAS. Mapa geológico del departamento de Antioquia, Medellín, 1979.

- Kerguelen Bendeck, J. L. (2016). Caracterización y aprovechamiento de recursos minerales en colas de terrazas aluviales del distrito Bagre-Nechí. Escuela de Ingeniería de Materiales.
- Kerr, P. F. (1965). Optical Mineralogy.
- Klein, C., y Cornelius Jr, S., 2018. Manual de mineralogía, Vol. 2, IV edición. Editorial Reverté S.A. España.
- Krumbein, W. C., & Sloss, L. L. (1969). Estratigrafía y sedimentación. Uteha, México. Maya, M. (2003). Zonas potenciales para materiales de construcción en los alrededores de Medellín, Colombia, Planchas 130, 146, 166, Escala 1:100.000. Bogotá: INGEOMINAS.
- Lamus-Molina, A. (2005). Minerología Aplicada al uso y Aprovechamiento de las Arenas Negras (El Bagre, Antioquia). *Universidad Nacional de Colombia*.
- Leal-Mejía H (2011) Phanerozoic Gold Metallogeny in the Colombian Andes: A tectono-magmatic approach. PhD Thesis, Universitat de Barcelona.
- Lobo Guerrero, 1984. Mapa geológico preliminar sobre el área del Alto San Jorge a escala 1: 100,000. Propuesta técnica al concurso "Estudio de Prefactibilidad Minera de la Zona Alto San Jorge". CARBOCOL.
- Londoño Escobar, J. I., Mojica Buitrago, J., Molano Mendoza, J. C., Cañón Romero, Y., Mosquera, G. S., Ruiz Solano, V., Pérez, N., Gutiérrez, H. M., González, M. del C., Concha, H., Galindo, B., Londoño Madrigal, S. E., & Buriticá, J. J. (Eds.). (2010). *Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/51>.
- Londoño, C., Montoya, J.C., Ordoñez, O., y Restrepo, J.J., 2009. Características de las mineralizaciones vetiformes en el Distrito Minero Bagre-Nechí, Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 26, 29-38.
- Lydon, J.W., 2007. An overview of the economic and geological contexts of Canada's major mineral deposit types. *Special Publication*. 5. 3-48.
- MacKenzie, W. S., Donaldson, C. H., & Guilford, C. (1982). Atlas de Rocas Igneas en Ingles.pdf (p. (Vol. 148). Harlow: Longman).

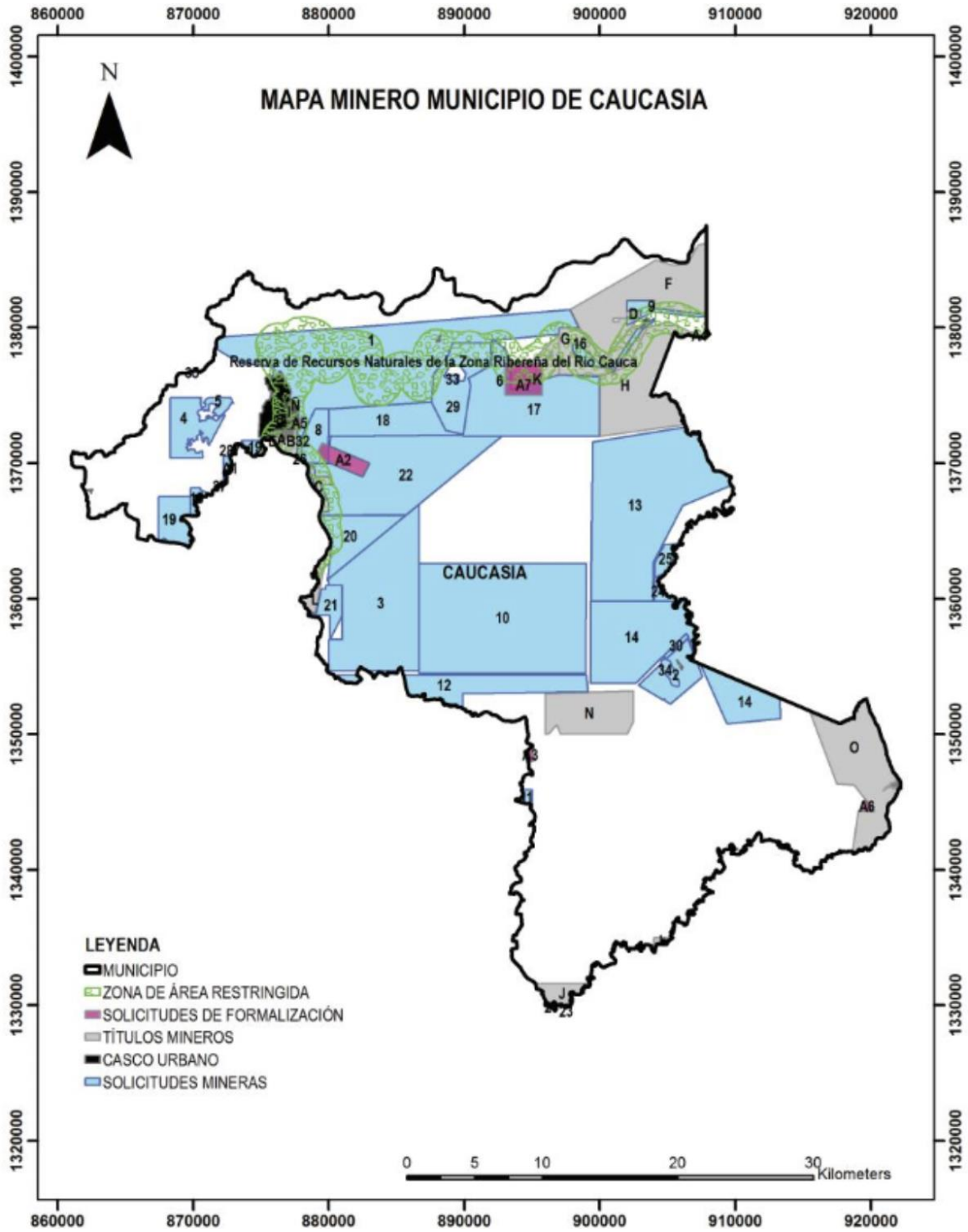
- Maya Sánchez, M., & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico*, 35(2-3), 44–57. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol35.2-3.1995.316>.
- McDowell, R. R. (2004). Book Review: Introduction to Ore-Forming Processes. Laurence J. Robb, Blackwell Publishing, 2005, 373 pp., ISBN 0-632-06378-5, US \$74.95.
- Miall, A. D. (1985). Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews*, 22(4), 261-308.
- Molina, L., & Alberto, R. (2023). Supervisión y control de calidad en labores de exploración, explotación y modelamiento geológico en las operaciones mineras del depósito aluvial de Nechí, Minerías Aluviales s.a.s. en el distrito Bajo Cauca-nechí, departamento de Antioquia.
- Padilla-V., L. E., & Leon-S, L. A. (1983). Aspectos geológicos y geomorfológicos de como el río Cauca corría hacia el sur. *Boletín De Geología*, 18(32), 13–20. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/7862>.
- Pye, K. (1994). Shape Sorting During Wind Transport of Quartz Silt Grains: Discussion. *Journal of Sedimentary Research*, 64(3).
- Palcawanka, C. (2017). “*Exploración geológica y evolución genética del yacimiento polimetálico* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de San Agustín).
- Rendón, A. F. M. (2012). Caracterización de residuos sólidos. *Cuaderno activa*, 4, 67-72.
- Restrepo, J.J & Toussaint, J.F. 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. Episodes. 11(3): 189–193.
- Restrepo, J.J., Ordoñez, O., and Armstrong, R. 2010. Triassic metamorphism in the northern part of the Central Cordillera of Colombia, VII SSAGI, Brasilia, 405-408p.
- Restrepo JJ, Ordóñez-Carmona O, Armstrong R, Pimentel MM (2011) Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. *J S Am Earth Sci* 32(4):497–507.

- Rios, N., 2002. Cratón Amazónico como posible origen de la ocurrencia aurífera tipo placer en el Oriente Colombiano. Departamento de Ciencias de la Tierra-Universidad EAFIT, Medellín.
- Robb, L. (2005). *Introduction to ore-forming processes*. John Wiley & Sons.
- Rovira, S. (2017). La metalurgia inca: estudio a partir de las colecciones del Museo de América de Madrid. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, (46 (1)), 97-131.
- Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G., y Bermúdez J.G. 2014. Petrografía y geoquímica del Neis de Nechí. *Boletín de Geología*, 36(1): 71-84.
- Sandoval Granda, G. A. (2013). Caracterización geológica y geoquímica de la zona A, del área minera reventador; Cantón Gonzalo Pizarro provincia de Sucumbíos.
- Shaw, R., Leal-Mejía, H., y Melgarejo, J.C., 2018. Phanerozoic Metallogeny in the Colombian Andes: A Tectono-Magmatic Analysis in Space and Time. Chapter 5. *Geology and Tectonics of Northwestern South America*, *Frontiers in Earth Sciences*.
- Slingerland, R., & Smith, N. D. (1986). Occurrence and formation of water-laid placers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1), 113-147.
- Viladevall, M., 2005. La prospección de placeres de oro y otros minerales densos. Facultad de Geología. Universidad de Barcelona. Recuperado a partir de: [http://www.publicacions.ub.es/refs/pub\\_dig/pros\\_aluv.pdf](http://www.publicacions.ub.es/refs/pub_dig/pros_aluv.pdf).
- Vinasco, C.J., Cordani, U.G., Gonza, H., 2006. Geochronological, isotopic , and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes 21, 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.007>
- Zapata, G., Bermúdez, J. G., Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2013). Cartografía geológica de la plancha 83 Nechí (departamento de Antioquia). *Bogotá DC: Ministerio de Minas y Energía-Servicio Geológico Colombiano*.

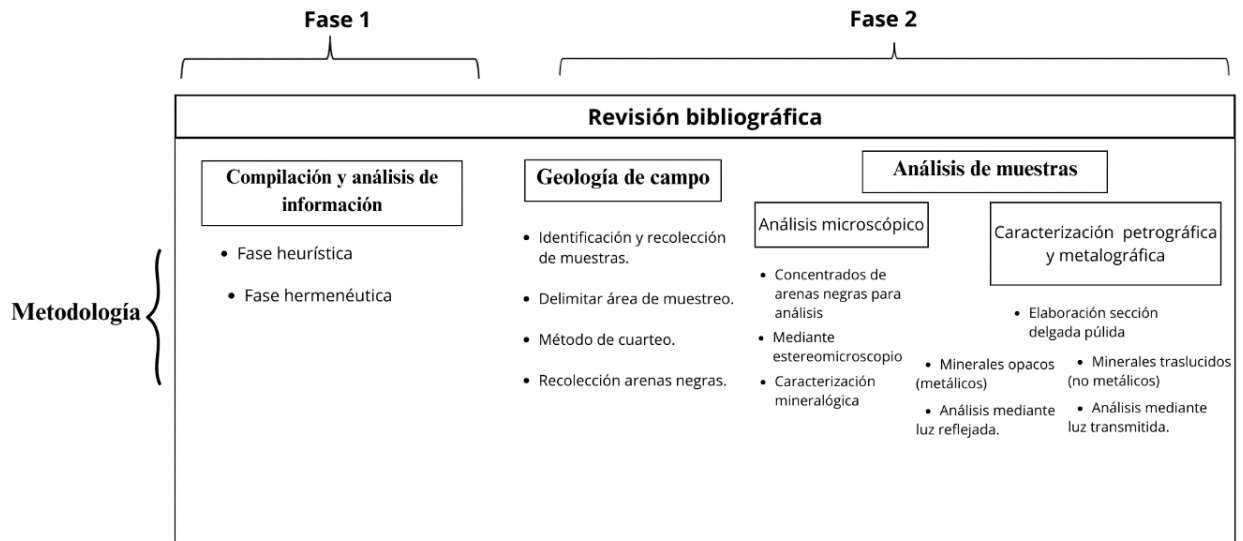
ANEXOS



Anexo 1. Localización de las mineralizaciones en la región del Bajo Cauca- Nechí. Fuente: González (2001).



**Anexo 2.** Localización de la subregión del Bajo Cauca en el departamento de Antioquia, el título F es el correspondiente a la zona de estudio. Fuente: Gobernación de Antioquia (2017).



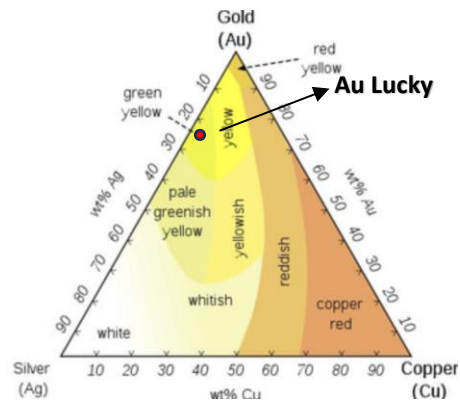
**Anexo 3.** Esquema de metodología implementada.



**Anexo 4.** A- Recolección de muestra considerable por cada unidad de producción minera. B - Método de cuarteo.



**Anexo 5.** A- Análisis mediante microscópio estereográfico y B- Análisis de secciones delgadas pulidas mediante microscópio petrográfico.



**Anexo 6.** Diagrama ternario de las aleaciones de oro. Modificado de Rovira (2017).