

Juliano Pizzano Ayoub  
Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira  
Fabrício Hernandes de Freitas  
(Orgs.)

# **GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

**ANÁLISES, MÉTODOS E TÉCNICAS EM PESQUISA**



científica digital



## EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL LTDA

Guarujá - São Paulo - Brasil

www.editoracientifica.com.br - contato@editoracientifica.com.br

**Diagramação e Arte** Edição © 2024 Editora Científica Digital

**Equipe Editorial** Texto © 2024 Os Autores

**Imagens da Capa** 1ª Edição - 2024

**Adobe Stock - 2024** Acesso Livre - Open Access

© COPYRIGHT DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais pela edição e projeto gráfico. Os autores detêm os direitos autorais dos seus respectivos textos. Esta obra foi licenciada com uma Licença de Atribuição Creative Commons – Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou em partes, desde que seja citada a fonte, com os créditos atribuídos aos autores e obrigatoriamente no formato Acesso Livre (Open Access) e sem a possibilidade de alteração de nenhuma forma. É proibida a catalogação em plataformas com acesso restrito e/ou com fins comerciais.



### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G345 Geologia de engenharia e ambiental: análises, métodos e técnicas em pesquisa / Organização de Julianno Pizzano Ayoub, Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira, Fabricio Hernandes de Freitas. – Guarujá-SP: Científica Digital, 2024.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui Bibliografia

ISBN 978-65-5360-626-5

DOI 10.37885/978-65-5360-626-5

1. Engenharia ambiental. I. Ayoub, Julianno Pizzano (Organizador). II. Oliveira, Marcel Ricardo Nogueira de (Organizador). III. Freitas, Fabricio Hernandes de (Organizador). IV. Título.

CDD 628

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. Engenharia ambiental

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2024

Julianno Pizzano Ayoub  
Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira  
Fabricio Hernandes de Freitas  
(Orgs.)

# **Geologia de Engenharia e Ambiental: análises, métodos e técnicas em pesquisa**

1ª EDIÇÃO



científica digital

**2024 - GUARUJÁ - SP**

# CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho  
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda  
Profª. Ma. Auristela Correa Castro  
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro  
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke  
Profª. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida  
Profª. Dra. Clara Mockdece Neves  
Profª. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva  
Profª. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco  
Prof. Dr. Cristiano Marins  
Profª. Dra. Cristina Berger Fadel  
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr  
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso  
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes  
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves  
Profª. Dra. Fernanda Rezende  
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida  
Profª. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz  
Profª. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes

Prof. Dr. Humberto Costa  
Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto  
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura  
Prof. Dr. José Aderval Aragão  
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub  
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli  
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior  
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva  
Profª. Dra. Maria Cristina Zago  
Profª. Dra. Maria Otília Zangão  
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes  
Prof. Dr. Nelson J. Almeida  
Prof. Dr. Octávio Barbosa Neto  
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez  
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos  
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo  
Profª. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento  
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin  
Prof. Me. Silvio Almeida Junior  
Profª. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro  
Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista  
Prof. Dr. Willian Carboni Viana  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em [www.editoracientifica.com.br/conselho](http://www.editoracientifica.com.br/conselho)

## Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra foram submetidos para avaliação do Conselho Editorial e Revisados por Pares Externos (Peer Review), sendo indicados para publicação.

**Nota:** Esta obra é uma produção colaborativa, tornando-se uma coletânea com reservas de direitos autorais para os autores. Alguns capítulos podem ser derivados de outros trabalhos já apresentados em eventos acadêmicos, todavia, os autores foram instruídos ao cuidado com o autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo de cada capítulo é exclusiva dos/as respectivos/as autores/as, não representando, necessariamente, a opinião da editora, tampouco dos organizadores e membros do conselho editorial.



# APRESENTAÇÃO

É com imenso prazer que apresentamos a obra “Geologia de Engenharia e Ambiental - Análises, Métodos e Técnicas em Pesquisa”. Este livro representa um esforço colaborativo que reuniu a expertise e a paixão de professores, engenheiros e estudantes, todos empenhados em compartilhar seus conhecimentos e descobertas no campo da geologia de engenharia e ambiental.

Dividido em vários artigos, esta obra abrange uma ampla gama de tópicos fundamentais para a compreensão e aplicação das ciências geológicas e ambientais na engenharia, onde cada capítulo foi cuidadosamente elaborado para oferecer conteúdo de alta relevância e aplicabilidade prática.

Os artigos presentes neste livro foram submetidos a um rigoroso processo de revisão por pares, garantindo a qualidade e a precisão das informações e trazem uma combinação única de conhecimento teórico e experiência prática, proporcionando aos leitores uma visão abrangente e detalhada dos desafios e soluções encontrados.

Esta coletânea é destinada tanto a profissionais, acadêmicos quanto curiosos que buscam aprofundar seus conhecimentos e atualizar-se com as últimas tendências e práticas do setor. Além disso, serve como uma fonte valiosa de referência para estudantes que desejam construir uma base sólida em geologia de engenharia e ambiental, inspirando-os a explorar novas fronteiras e a contribuir para o avanço dessa área essencial.

Agradecemos a todos os colaboradores, revisores e apoiadores que tornaram este projeto possível. Esperamos que “Geologia de Engenharia e Ambiental - Análises, Métodos e Técnicas em Pesquisa” não seja apenas uma fonte de conhecimento, mas também um catalisador para novas pesquisas e inovações.

Desejamos a todos uma leitura enriquecedora e inspiradora

**Julianno Pizzano Ayoub**  
**Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira**  
**Fabricio Hernandes de Freitas**

# SUMÁRIO

## Capítulo 01

### ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL EN LA CABECERA DE LA CUENCA DEL TITICACA: IMPACTO SOBRE LAS FUENTES DE AGUA Y SUELO

Américo Arizaca Avalos; Wilber Pastor Contreras; Fidel Huisa Mamani; Anthony Juan Félix Arizaca Maquera; Emmanuel Hernan Tomy Gómez; Every Daysy Choque Quispe; Gary Armando Terroba Valdivia; Harold Mayolo Huisa Valdivia

 10.37885/240516538 ..... 7

## Capítulo 02

### ARTISANAL AND SMALL-SCALE GOLD MINING IN THE SOUTHERN ESPINHAÇO RANGE, BRAZIL, USING TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC INDUCTION: PROSPECTING, EFFICIENCY, AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

Henrique Borgatti; Aline Tavares Melo; Luiz Guilherme Knauer

 10.37885/240416489 ..... 24

## Capítulo 03

### ESTUDO E ANÁLISE DE FÍSICA DAS ROCHAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS

Juliana Beatriz Alves Viana; Joemes de Lima Simas

 10.37885/240316157 ..... 46

## Capítulo 04

### OPALAS DO BRASIL: REVISÃO DOS ASPECTOS MINERALÓGICOS, QUÍMICOS E GEMOLÓGICOS

Maria do Carmo Santos da Silva; Rafaela de Aquino Rodrigues; Naedja Vasconcelos Pontes; Francielson da Silva Barbosa; Ijan de Carvalho Silva; Vinícius Igor Albuquerque Batista de Araújo; Talita Fernanda Carvalho Gentil; Herdivânia Pires de Souza; Maria Jarlene Silva

 10.37885/240316108 ..... 57

**SOBRE OS ORGANIZADORES** ..... 71

**ÍNDICE REMISSIVO** ..... 72

## **ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL EN LA CABECERA DE LA CUENCA DEL TITICACA: IMPACTO SOBRE LAS FUENTES DE AGUA Y SUELO**

**Américo Arizaca Avalos**

Universidad Nacional del Altiplano

**Wilber Pastor Contreras**

Universidad Nacional del Altiplano

**Fidel Huisa Mamani**

Universidad Nacional del Altiplano

**Anthony Juan Félix Arizaca Maquera**

Universidad Nacional del Altiplano

**Emmanuel Hernan Tummy Gómez**

Universidad Nacional del Altiplano

**Every Daysy Choque Quispe**

Universidad Nacional del Altiplano

**Gary Armando Terroba Valdivia**

Universidad Nacional del Altiplano

**Harold Mayolo Huisa Valdivia**

Universidad Nacional del Altiplano

# RESUMEN

La pequeña minería, también conocida como minería de pequeña escala, se ha convertido en un problema social y ambiental en varios países; a pesar de los esfuerzos por formalizar esta actividad, su crecimiento sigue siendo exponencial, lo que agrava la situación. **Objetivo:** Analizar el impacto de la degradación ambiental en las fuentes de agua y suelo en la cuenca Ramis que es la cabecera de la cuenca del Titicaca. **Métodos:** El estudio realiza un análisis histórico comparativo de imágenes satelitales de Google Earth Pro desde el 1984 al 2022, además los impactos se cotejarán con estudios de agua y suelo realizados en la zona de estudio. **Resultados:** Entre los años 2005 y 2022 se han degradado 6297 hectáreas en tres zonas de la cuenca alta del río Ramis que son Jancoccala, Ananea y Pampa Blanca, dejando áreas sin cobertura de suelos; mientras que todos los estudios realizados sobre monitoreo de agua, suelos y animales arrojan presencia de metales pesados, siendo predominante el mercurio debido a la amalgamación en los procesos de recuperación de oro. **Conclusión:** Los impactos ambientales dejados por la minería de pequeña escala formal e ilegal han degradado miles de hectáreas en diferentes zonas de la región utilizando maquinaria y moviendo grandes volúmenes de mineral que desprenden metales pesados generando un alto riesgo para los ecosistemas.

**Palabras-clave:** Degradación Ambiental, Digitalización, Sistemas de Información Geográfica, Minería Aurífera.



## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la minería de pequeña escala o minería artesanal, se ha convertido en una amenaza para los ecosistemas en diferentes partes del mundo; en algunos países se ha promovido su formalización, sin embargo; los resultados no son los esperados y su crecimiento y desarrollo se ha hecho incontrolable, millones de personas cada vez más se incorpora a esta actividad principalmente por la facilidad con la que se puede explotar los yacimientos de oro, mientras que el precio del valioso metal se incrementa cada día. El principal problema de esta actividad informal e ilegal son los impactos ambientales que ocasionan en el suelo, aire y agua, principalmente por el uso inadecuado del mercurio y la presencia de metales pesados en las áreas de explotación.

Algunos países reconocen la minería artesanal y en pequeña escala (MAPE) como sustento legítimo, pero su regulación es mayormente inaplicable y a pesar de la formalización, la mayoría sigue en el sector informal e ilegal (KUMAH, 2022). Existen lugares tradicionalmente mineros con una antigüedad mayor a 500 años a.d.c como en Marmato, Colombia, que vienen utilizando el marco de medios de vida sostenibles, revelando cómo diversos capitales sostienen y limitan la sostenibilidad y la formalización de la MAPE (DELGADO JIMÉNEZ; SMITH; HOLLEY, 2022). Por su parte MOYO; CHITAKA; LOTTER; SCHENCK e PETERSEN (2022) comparan la minería artesanal y el reciclaje informal de desechos electrónicos, destacando sus contribuciones a los medios de vida uno extrae el mineral del subsuelo impactando el entorno y el otro reciclando, mostrando sus desafíos comunes y diferencias en la sostenibilidad y vulnerabilidad sectorial.

La aplicación de tecnologías limitada por diversos factores como el económico y legal es otro de los componentes de la informalidad; LEIVA (2022), evalúa cómo la evolución de las tecnologías de extracción de oro en Madre de Dios, Perú, impacta en la gobernanza y propuestas de sostenibilidad para la minería artesanal, sugiriendo enfoques de gobernanza más flexibles. Analizando la formalización de la minería artesanal en Ghana, se destacan las deficiencias en la ejecución de políticas, obstaculizando la sostenibilidad del sector, frente a ello se propone el Plan de Minería Comunitaria para mejorar la gobernanza y facilitar prácticas más sostenibles y eficientes (HILSON; BARTELS; HU, 2022). Por su parte el gobierno nigeriano fomenta la formación de cooperativas de

MAPE para su formalización, pero ha fallado en cerrar brechas de financiamiento esenciales para operaciones productivas y sostenibles, pese a iniciativas como el Proyecto Integrado de Exploración (ENIOWO; KILAMBO; MEYER, 2022).

Si se analiza los factores que condicionan el crecimiento de la minería de pequeña escala HEEMSKERK (2001) plantea el modelo que indica que el incremento en los precios al consumidor y el desempleo impulsan la minería de oro en pequeña escala; de forma directa, la subida de precios eleva los costes cotidianos, intensificando la demanda de activos valiosos como el dólar estadounidense o el oro. Por otro lado un problema global son las emisiones de gases de efecto invernadero por los insumos utilizados en la minería de oro, de allí que para avanzar hacia prácticas más sostenibles; estas emisiones que varían significativamente según la fuente energética y los métodos de extracción utilizados deben reducirse (ULRICH; TRENCH; HAGEMANN, 2022). Una metodología que considera variables contextuales y mejora la evaluación de impactos del mercurio en la salud, es considerar los costos totales que llegarían a mil millones de dólares, dominados por daños relacionados con la contaminación por mercurio (GASPARINNETTI; BAKKER; QUEIROZ; VILELA, 2024).

El uso de imágenes satelitales como Sentinel-2 de libre disponibilidad configuran una herramienta para analizar la evolución de la minería aluvial, como el caso de Antioquia, Colombia; entre 2016 y 2019, se observa una reducción en las áreas minadas y variaciones estacionales y anuales en la cobertura terrestre, mostrando cómo la observación de la Tierra puede guiar el monitoreo y la remediación de impactos mineros (IBRAHIM; LEMA; BARNABÉ; LACROIX; PIRARD, 2020). Estos aspectos pueden ser evaluados mediante estas herramientas así OPPONG NTIRI; APPIAH-BOATENG e KOOMSON (2023) analiza el aumento de la minería de oro en las MAPE en África subsahariana, como en Ghana, donde se da una tendencia a la declinación de la agricultura y el aumento de la pobreza, el estudio destaca que, más allá del tamaño, factores como liderazgo y cohesión grupal son cruciales en la formación de grupos de MAPE. Por otro lado si bien las MAPE se promociona como generadora de empleo, las oportunidades laborales para mujeres son limitadas, a pesar de ofrecer roles más altos y mejores condiciones comparado con entornos informales (OFOSU; TORBOR; SARPONG, 2022).

En el tema del empleo existe un creciente número de graduados en Ghana que se unen al sector de la MAPE; a pesar de su estigma previo; su participación no solo transforma las comunidades rurales donde operan, sino que también redefine la percepción de la MAPE como una vía legítima y empresarial de empleo, desafiando la visión tradicional de esta actividad como meramente impulsada por la pobreza (ARTHUR-HOLMES; ABREFA BUSIA; VAZQUEZ-BRUST; YAKOVLEVA, 2022). De allí que formalizar y apoyar la minería artesanal y de pequeña escala podría mitigar significativamente la crisis de desempleo juvenil, proporcionando estabilidad laboral en un sector hasta ahora subestimado (HILSON; OSEI, 2014).

La recuperación del oro no tiene aún un mecanismo alternativo económico aparte del mercurio SPIEGEL; AGRAWAL; MIKHA; VITAMERRY *et al.* (2018), explora las dificultades en reducir el uso de mercurio en la minería de oro artesanal; a pesar de las restricciones globales, el aumento del suministro interno de cinabrio ha mantenido bajo el costo del mercurio, obstaculizando el cumplimiento del Convenio de Minamata y la transición a tecnologías libres de mercurio. La contaminación ambiental por mercurio en Ghana, derivada de diversas operaciones de minería artesanal ilegal, varía significativamente entre los sitios estudiados; la mala gestión del mercurio conduce a niveles perjudiciales en suelo, agua y sedimentos, requiriendo acciones y políticas urgentes para su mitigación y limpieza (MANTEY; NYARKO; OWUSU-NIMO; AWUA *et al.*, 2020).

Una comprensión holística de las dinámicas sociales, económicas y políticas de la ASGM para abordar efectivamente las emisiones de mercurio; sugiere que las políticas y desarrollos deben ser inclusivos y sostenibles, diseñados con y para la comunidad minera, y apoyados con educación y capacitación continuas (SMITH, 2019). Es necesario tener en cuenta el impacto económico de las emisiones de mercurio por onza de oro producida en diferentes tipos de minería: formal, artesanal y de pequeña escala; estas varían significativamente, desde menos de \$1 en minas formales en Nevada hasta \$3200 en sitios artesanales que amalgaman todo el mineral (GULLEY, 2017).

La cuenca del río Ramis ha sido objeto de múltiples impactos y conflictos socioambientales entre productores agropecuarios y mineros formales e informales que operan en las proximidades de la cordillera oriental entre los 3,800 y 5,400 m.s.n.m. SALAS-MERCADO; HERMOZA-GUTIÉRREZ e SALAS-ÁVILA

(2020) analizaron los parámetros fisicoquímicos y la contaminación en el río Crucero, cerca de la mina La Rinconada y al área de estudio; los resultados muestran que el pH en época seca afecta la calidad del agua, haciéndola no apta para consumo humano y favoreciendo la precipitación de metales; así mismo se detectaron altas concentraciones de arsénico, cadmio y zinc en los sedimentos.

OLARTE e TANAKA (2009), en un estudio de las aguas de la cuenca del Ramis revelan que mientras los niveles de pH y conductividad no disueltos (CND) se mantienen dentro de los límites aceptables en las partes altas, estos aumentan en las áreas bajas hacia el lago Titicaca. Se identificó contaminación significativa por arsénico (As) y plomo (Pb) en las aguas, atribuida a la minería, pasivos mineros, y erosión litogénica; en los sedimentos se encontraron concentraciones altas de As, mercurio (Hg), y Pb, superando los estándares de la USEPA, lo cual podría estar afectando negativamente las funciones hidrológicas de la cuenca y las actividades económicas locales como la ganadería y la agricultura.

**Figura 1 - Cuenca del río Ramis.**



**Fuente:** Ministerio de Salud Peru.

En este contexto, analizaremos los impactos ambientales en la cuenca del río Ramis, Figura 1, una zona de alta sensibilidad donde las comunidades locales se dedican a la actividad agropecuaria en las partes media y baja de la cuenca. Estas comunidades utilizan agua procedente de la parte alta de la

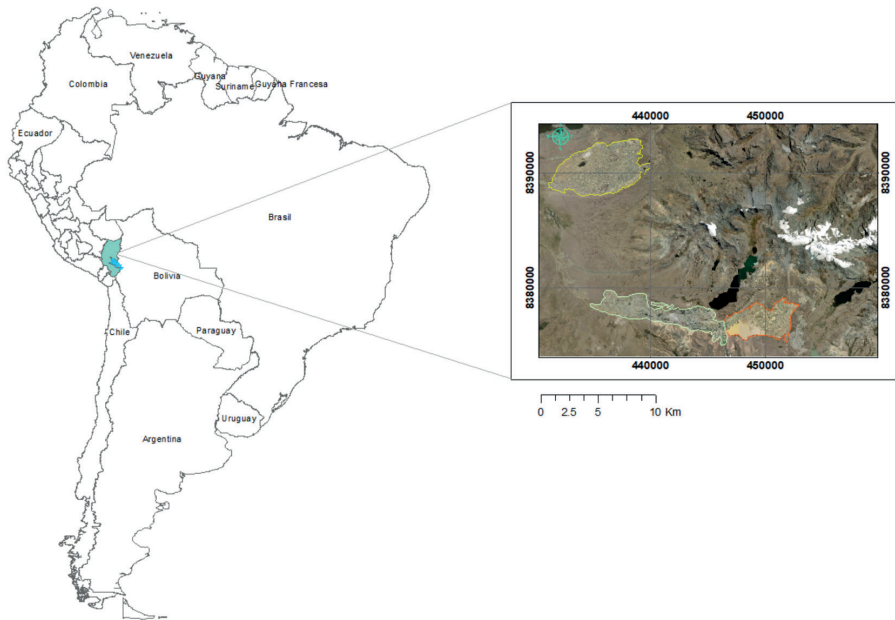
cuenca, lugar donde operan los mineros informales. Durante el 2006 y 2007, la alta conflictividad en la región llevó a enfrentamientos entre productores y mineros, obligando al gobierno a declarar el estado de emergencia y promulgar disposiciones legales que restringían la minería, incluso prohibiendo todas las formas de minería artesanal; sin embargo, estas medidas no han logrado detener su expansión ni mitigar los impactos ambientales, que hasta la fecha siguen sin remediarse.

## **MÉTODOS**

### **Ubicación y geología de Ananea**

Los depósitos fluvioglaciares de la zona se localizan en la vertiente suroeste del macizo nevado de Ananea, a altitudes que varían entre 4500 y 5000 m.s.n.m.(FIDEL; RODRÍGUEZ, 2008). Los yacimientos de Anccocala y Pampa Blanca se sitúan entre el macizo del nevado Ananea, que alcanza los 5800 metros al norte, y relieves más bajos, que llegan hasta los 5100 metros al sur. La cuenca ha sido rellenada por sedimentos durante diversos episodios glaciares, incluyendo avances y retrocesos de los hielos; se destacan; Janccocala, Chaquiminas y Pampa Blanca (CHÁVEZ; SALAS; CUADROS; GUTIÉRREZ, 1996) Figura 2.

**Figura 2** - Ubicación de la zona de estudio degradada.



El yacimiento corresponde a los placeres auríferos, donde el oro se presenta en diversas formas como chispas, pepitas o de manera diseminada (RODRÍGUEZ; FABIÁN; CHOQUEHUANCA; SÁNCHEZ; DEL CASTILLO, 2021). Se asocian con formaciones morrénicas de acción glaciaria, típicas del Paleozoico, con predominio de pizarras y esquistos (ACOSTA; RODRÍGUEZ; VALENCIA; FLORES, 2011). Las concentraciones promedio de oro es de  $0.29 \text{ g/m}^3$ , y se estima que las reservas alcanzan los 168 millones de toneladas de material aluvial; en la zona de Pampa Blanca, las concentraciones de oro son superiores a las de Ananea, destacando una sección central de hasta 60 m de grosor y reservas que superan los 400 millones de  $\text{m}^3$ , posiblemente debido a su proximidad a la mina vetiforme de oro de La Rinconada. Adicionalmente, al este de Jancoccala aflora el Intrusivo San Francisco de Quenamari, un plutón monzogranítico neógeno compuesto por granodiorita y monzogranito porfíricos, datados en el Oligoceno-Mioceno. Esta área es lo que se conoce como la cabecera de la cuenca del río Ramis la mas importante dentro de la cuenca del Titicaca.

## **Minería informal**

La minería artesanal y de pequeña escala ha sido una práctica histórica en el distrito de Ananea y Cuyocuyo, coexistiendo tradicionalmente con actividades agropecuarias, incluida la crianza de camélidos sudamericanos, que ha disminuido en los últimos años. Tradicionalmente, la explotación minera se realizaba mediante sistemas de caños y empedrados; sin embargo, el aumento en el precio del oro ha incentivado el uso de maquinaria pesada, como retroexcavadoras, cargadores frontales y volquetes.

## **Impacto ambiental y digitalización de imágenes**

Este trabajo presenta un enfoque exploratorio, iniciando con una revisión bibliográfica exhaustiva sobre estudios previos de contaminación por metales pesados, en especial el mercurio, utilizado en el proceso de amalgamación del oro en la explotación de minas de pequeña escala. Posteriormente, se analizaron imágenes satelitales Landsat y se procedió a la digitalización de las zonas impactadas. Durante una visita de campo a la zona de estudio, se verificaron in situ tres áreas de mayor impacto: Janccocala, Ananea — adyacente a la población local — y Pampa Blanca. Se utilizaron las imágenes de Google Earth Pro disponible desde 1984 hasta el 2022.

## **RESULTADOS**

La cabecera de la cuenca del río Ramis, específicamente el distrito de Ananea, históricamente se dedicaba a la cría de camélidos sudamericanos y a actividades agrícolas complementarias, incluida la minería. No obstante, entre los años 2000 y 2005, un notable aumento en los precios del oro provocó un cambio drástico en las actividades económicas de la población local. Este incremento desencadenó una especie de fiebre del oro, atrayendo a la zona tanto a personas como a maquinaria de diversas partes de la región y de regiones aledañas, como Madre de Dios. Este flujo migratorio y cambio en la actividad económica provocaría un conflicto significativo durante los años 2006 y 2007 paralizando y ordenándose diversas normas legales con la finalidad de



recuperar y remediar los impactos ambientales en la cuenca. Se ha observado además un fortalecimiento en los niveles de organización a través de sistemas cooperativos, lo que ha facilitado la adaptación a la formalidad y permitido a los mineros convertirse en exportadores directos; no obstante, persisten desafíos relacionados con la minería informal e ilegal.

## **Contaminación por metales pesados en la cuenca Ramis**

En el análisis de diversos estudios sobre la presencia de metales pesados en la vertiente de la cuenca Ramis, la mayoría concluye que los niveles superan los Límites Máximos Permitidos establecidos por la legislación peruana, según el Decreto Supremo N° 010-2010-MINEM. Así para HUMPIRI (2017); evaluó la concentración de metales pesados (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y Zn) en la subcuenca de Crucero entre 2011 y 2015, encontrando que todos los metales excedieron en algún momento los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), con el Cr y el Hg se ha mostrado concentraciones elevadas independientemente del período analizado. Por su parte NOVOA; ARIZACA e HUISA (2022), destacan que la minería de pequeña escala en Puno, Perú, ha incrementado el daño ecológico, identificando altas concentraciones de mercurio (0.1301 mg/L) y hierro (280 mg/L) en las provincias de Sandia, Carabaya y San Antonio de Putina. Estos niveles superan los estándares ambientales, afectando adversamente tanto a los ecosistemas como a la salud humana.

Por su parte HUANQUI (2018); determino la presencia de metales pesados (As, Hg y Pb) en pastos, carne, fibra y vísceras de alpaca en la zona de Pampa Blanca en evaluaciones de espectroscopia de absorción atómica. Así mismo, PAREDES (2019) encontró en Azángaro, Puno, muestras con concentraciones de 1.27 mg/kg de mercurio, 11.61 mg/kg de plomo y 1.83 mg/kg de cadmio en leche, pelo de vaca y pastos, superando los límites permitidos por la Unión Europea, representando un riesgo sanitario significativo. En el mismo sentido, SALAS (2017) determino la contaminación por metales pesados en suelos, sedimentos y vegetación considerado un problema grave, especialmente en el Altiplano del Sur Peruano; afectando la cadena alimenticia y la salud de la fauna y humanos; confirmando estudios recientes en la cuenca del río Ramis, específicamente en un tramo de 83.7 Km del río Azángaro, que revelan que el

cadmio en sedimentos supera los estándares nacionales, mientras que el arsénico y cromo exceden los internacionales, destacando la urgente necesidad de medidas de preservación y regulación.

En otro estudio realizado en Ñaupapampa, Puno, a 3913 msnm durante 2014-2015, se evaluó la contaminación por metales pesados en suelos irrigados y no irrigados. Los suelos irrigados presentaron arsénico (As) a 69 mg/kg y plomo (Pb) a 21 mg/kg, superando los límites permisibles, lo que resalta la urgencia de regulaciones ambientales (VARGAS, 2017). La investigación en Ananea evaluó los riesgos ambientales causados por la minería, analizando agua, sedimentos y plantas. Se encontraron concentraciones de plomo en agua de hasta 0.185 mg/L y de mercurio en sedimentos hasta 0.860 mg/kg. Los impactos negativos afectaron principalmente al aire (5.11%), agua (13.09%) y suelo (15.95%), mientras que el sector económico mostró un impacto positivo del 9% debido a la actividad comercial incrementada (PÉREZ, 2017); la Tabla 1 nos muestra un resumen de dichos estudios.

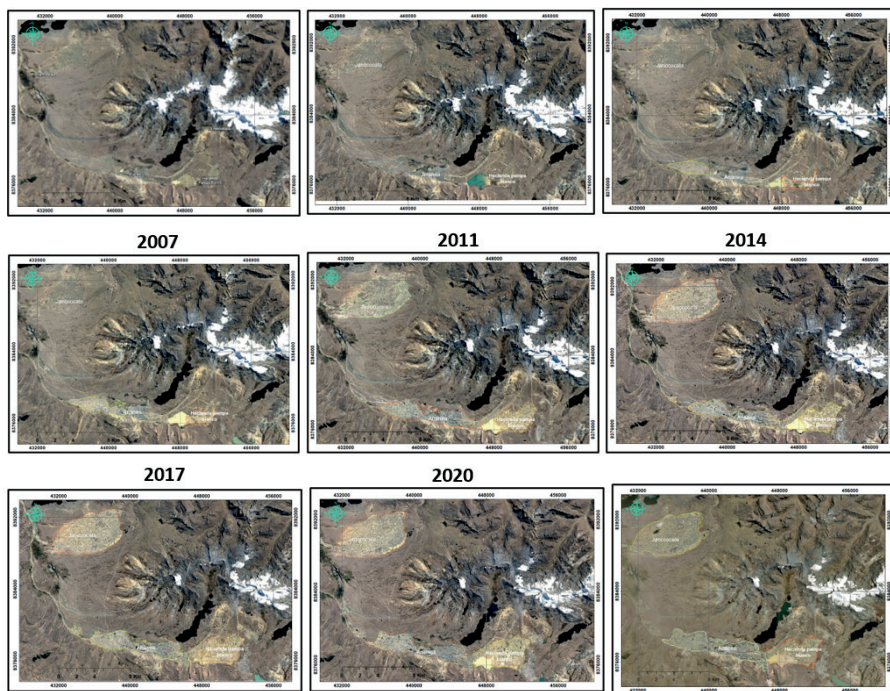
**Tabla 1** - Estudios realizados que precisan metales pesados en la cuenca Ramis.

| Estudio | Título                                                                                                                    | Autor                     | Año  |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------|
| A       | Concentración de los metales pesados y propuestas de recuperación en la Sub-cuenca del río Crucero                        | Issac Humpiri Ramos       | 2017 |
| B       | Evaluación de metales y metaloides en sedimentos en la sub cuenca del río Azángaro y su modelamiento ambiental            | Dante Salas Mercado       | 2017 |
| C       | Metales pesados en vacunos alimentados con pastos cultivados bajo riego de la cuenca del río Ramis Azángaro, Puno         | Genrry Paredes Chura      | 2019 |
| D       | Determinación de metales pesados en pastos, fibra, carne y vísceras de alpacas en comunidades del distrito de Ananea-Puno | Roger Huanqui Perez       | 2018 |
| E       | Metales pesados en suelos cultivados con riego y sin riego en la comunidad de Ñaupapampa del distrito de Asillo - Puno    | Richard Vargas Estofanero | 2017 |
| F       | Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno              | Novoa, Arizaca y Huisa    | 2022 |
| G       | Evaluación de riesgo ambiental en el área de influencia minera del río Crucero por plomo y mercurio-Distrito de Ananea    | Moises Perez Capa         | 2017 |

## Impactos de la actividad minera informal en la cuenca

En los últimos 15 años, la minería en la zona ha experimentado una transformación radical, pasando de métodos artesanales en caños a la utilización de maquinaria pesada. Esta transición ha convertido la actividad minera de subsistencia en una fuente de grandes ingresos, y una considerable proporción de los involucrados ha logrado integrarse a la formalidad. Sin embargo, los impactos ambientales también han escalado significativamente. La falta de un control riguroso sobre los efluentes que se descargan al río principal y la expansión de la cobertura de suelo disturbado han eliminado la viabilidad de otras actividades económicas en la región. La Figura 3 ilustra que, entre 1984 y 2005, el área no sufrió perturbaciones significativas, con solo algunos pasivos ambientales remanentes de operaciones mineras anteriores.

**Figura 3** - Evolución de la degradación ambiental en el distrito de Ananea.



Aplicando una técnica de análisis espacial con imágenes satelitales que se realizo un proceso de digitalización repitiéndose el procedimiento por tres veces para obtener un resultado promedio aplicándose la metodología de (Bansah; Acquah; Boafu, 2024).

$$T_R = S_1 + S_2 + S_3 .....S_n$$

T<sub>R</sub> - corresponde al total del área degradada.  
S<sub>1</sub> + S<sub>2</sub> + S<sub>3</sub> .....S<sub>n</sub> son las áreas parciales que se han digitalizado

$$T_N = (T_1 + T_2+T_3)/ 10000$$

T<sub>N</sub> - Es la degradación calculada para las tres regiones en hectáreas.

Alrededor de 2849 hectáreas en la zona de Janccocala se habrían disturbado por efectos de la minería informal e ilegal, mientras que unas 1965 corresponderían a Ananea y 1483 a Pampa Blanca lo que hace un total de 6297 hectáreas que se han impactado y su proceso evolutivo se muestra en la Tabla 2. Los impactos se caracterizan por excavaciones abandonadas, montones de tierra sin cobertura de suelo.

**Tabla 2 - Áreas y perímetros digitalizados calculados en promedio.**

| Año  | Zonas                 | Ha      | ML       |
|------|-----------------------|---------|----------|
| 2005 | Janccocala            | -       | -        |
|      | Ananea                | 460.91  | 10648.54 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 391.44  | 13173.61 |
| 2007 | Janccocala            | -       | -        |
|      | Ananea                | 817.67  | 17720.05 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 389.72  | 11028.33 |
| 2011 | Janccocala            | 871.47  | 20556.66 |
|      | Ananea                | 1599.08 | 30720.35 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 901.75  | 16060.12 |
| 2014 | Janccocala            | 2593.84 | 20937.99 |
|      | Ananea                | 1459.27 | 29783.18 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 984.86  | 14225.69 |

| Año  | Zonas                 | Ha      | ML       |
|------|-----------------------|---------|----------|
| 2017 | Janccocala            | 2806.40 | 21410.20 |
|      | Ananea                | 1652.92 | 32676.01 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 1422.99 | 17596.87 |
| 2020 | Janccocala            | 2841.82 | 22433.02 |
|      | Ananea                | 1812.10 | 30994.72 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 1544.50 | 18890.63 |
| 2022 | Janccocala            | 2849.78 | 26484.73 |
|      | Ananea                | 1965.29 | 36906.33 |
|      | Hacienda Pampa Blanco | 1483.62 | 20566.98 |

## DISCUSION

Se ha demostrado que el daño ambiental alcanza las 6297 hectáreas degradadas para un periodo del 2005 al 2022 generándose un desaparición de la cobertura de suelo y contaminación de las aguas subterráneas lo que configura una amenaza a los ecosistemas que allí existían (BANSAH; ACQUAH; BOAFO, 2024). La promulgación de diferentes Decretos Supremos por parte del gobierno en el año 2012 tampoco ha podido controlar y reducir la informalidad, por el contrario hay un incremento de la actividad que deja en la imposibilidad de usar estas áreas en otras actividades alternas, mientras que existe un alto riesgo de impactar las aguas subterráneas por ser una zona de recarga y haberse identificado la presencia de metales pesados y principalmente Hg que utilizan los pequeños mineros (HUMPIRI, 2017; PAREDES, 2019; SALAS, 2017).

## CONCLUSIONES

La minería informal en la parte alta de la cuenca representa un alto riesgo ambiental, principalmente debido a la pérdida de cobertura vegetal y de suelo. La reducción del uso de maquinaria pesada junto con una zonificación adecuada podría organizar mejor la actividad. Los mineros formales o aquellos en proceso de formalización pueden contribuir significativamente elaborando e implementando planes de cierre con el objetivo de restaurar el suelo y recuperar la vegetación. Por su parte, la fiscalización y el control por parte del gobierno regional son esenciales para asegurar la efectividad de estos programas y reducir los riesgos asociados.

Actualmente, existen tecnologías y métodos que permiten minimizar el uso de mercurio en la minería. Como medida inicial, se recomienda el uso de retortas para controlar las emisiones de mercurio a la atmósfera. En cuanto al manejo de otros metales pesados, también hay mecanismos disponibles para mitigar su impacto y prevenir su vertido en cuerpos de agua, contribuyendo así a una actividad minera más sostenible que proteja las regiones aguas abajo de la cuenca.

## REFERENCIAS

ACOSTA, J. *et al.* **Memoria sobre la geología económica de la región Puno.** Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Recursos Minerales y Energéticos, 2011.

ARTHUR-HOLMES, F. *et al.* Graduate unemployment, artisanal and small-scale mining, and rural transformation in Ghana: What does the 'educated' youth involvement offer? **Journal of Rural Studies**, 95, p. 125-139, 2022/10/01/ 2022.

BANSAH, K. J.; ACQUAH, P. J.; BOAFO, A. Land, water, and forest degradation in artisanal and small-scale mining: Implications for environmental sustainability and community wellbeing. **Resources Policy**, 90, p. 104795, 2024/03/01/ 2024.

CHÁVEZ, A. *et al.* Geología de los cuadrángulos de Putina y La Rinconada, hojas: 30-xy 30-y. **Boletín A** 66, 1996.

DELGADO JIMÉNEZ, A.; SMITH, N. M.; HOLLEY, E. A. Capitals in artisanal and small-scale mining in Marmato, Colombia: Using the sustainable livelihoods framework to inform formalization. **The Extractive Industries and Society**, 12, p. 101157, 2022/12/01/ 2022.

ENIOWO, O. D.; KILAMBO, S. R.; MEYER, L. D. Risk factors limiting access to formal financing: Perceptions from artisanal and small-scale mining (ASM) operators in Nigeria. **The Extractive Industries and Society**, 12, p. 101181, 2022/12/01/ 2022.

FIDEL, S. L.; RODRÍGUEZ, M. R. **Evaluación geológico e ingeniero-geológico de tres presas de sedimentación cuenca alta del río Ramis-Ananea, Puno.** Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 2008.

GASPARINNETTI, P. *et al.* Economic valuation of artisanal small-scale gold mining impacts: A framework for value transfer application. **Resources Policy**, 88, p. 104259, 2024/01/01/ 2024.

GULLEY, A. L. Valuing environmental impacts of mercury emissions from gold mining: Dollar per troy ounce estimates for twelve open-pit, small-scale, and artisanal mining sites. **Resources Policy**, 52, p. 266-272, 2017/06/01/ 2017.

HEEMSKERK, M. Do international commodity prices drive natural resource booms? An empirical analysis of small-scale gold mining in Suriname. **Ecological Economics**, 39, n. 2, p. 295-308, 2001/11/01/ 2001.

HILSON, G.; BARTELS, E.; HU, Y. Brick by brick, block by block: Building a sustainable formalization strategy for small-scale gold mining in Ghana. **Environmental Science & Policy**, 135, p. 207-225, 2022/09/01/ 2022.

HILSON, G.; OSEI, L. Tackling youth unemployment in sub-Saharan Africa: Is there a role for artisanal and small-scale mining? **Futures**, 62, p. 83-94, 2014/10/01/ 2014.

HUANQUI, P. R. **Determinación de metales pesados en pastos, fibra, carne y vísceras de alpacas en comunidades del distrito de Ananea-Puno**. Universidad Nacional del Altiplano, 2018.

HUMPIRI, R. I. **Concentración de los metales pesados y propuestas de recuperación en la Subcuenca del río Crucero**. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Agrícola, 2017.

IBRAHIM, E. *et al.* Small-scale surface mining of gold placers: Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 93, p. 102194, 2020/12/01/ 2020.

KUMAH, R. Artisanal and small-scale mining formalization challenges in Ghana: Explaining grassroots perspectives. **Resources Policy**, 79, p. 102978, 2022/12/01/ 2022.

LEIVA, J. D. Appropriate technologies and the geosocial evolution of informal, small-scale gold mining in Madre de Dios, Peru. **The Extractive Industries and Society**, 12, p. 101165, 2022/12/01/ 2022.

MANTEY, J. *et al.* Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). **Heliyon**, 6, n. 6, p. e04312, 2020/06/01/ 2020.

MOYO, T. *et al.* Urban mining versus Artisanal and Small-Scale Mining (ASM): An interrogation of their contribution to sustainable livelihoods in sub-Saharan Africa. **The Extractive Industries and Society**, 12, p. 101173, 2022/12/01/ 2022.

NOVOA, V. H. H.; ARIZACA, A. A.; HUISA, M. F. Efectos en los ecosistemas por presencia de metales pesados en la actividad minera de pequeña escala en Puno. **Revista de Investigaciones Altoandinas**, 24, p. 182-189, 2022.

OFOU, G.; TORBOR, M.; SARPONG, D. Gender and artisanal and small-scale mining: Exploring women's livelihood and occupational roles in formalised settings. **Journal of Rural Studies**, 96, p. 121-128, 2022/12/01/ 2022.

OLARTE, D. A. C.; TANAKA, M. E. P. Contaminación de aguas y sedimentos por as, pb y hg de la cuenca del río ramis, puno-peru. **Revista de Investigaciones (Puno)-Escuela de Posgrado de la UNA PUNO**, 5, n. 4, 2009.

OPPONG NTIRI, R.; APPIAH-BOATENG, S.; KOOMSON, F. Beyond the numbers: Group formation in the artisanal and small-scale mining in Ghana. **World Development Perspectives**, 32, p. 100538, 2023/12/01/ 2023.

PAREDES, C. G. **Metales pesados en vacunos alimentados con pastos cultivados bajo riego de la cuenca del río Ramis Azángaro, Puno**. Repositorio Institucional - UNAP, 2019.

PÉREZ, C. M. **Evaluación de riesgo ambiental en el área de influencia minera del río Crucero por plomo y mercurio-Distrito de Ananea**. Universidad Nacional del Altiplano, Repositorio Institucional - UNAP, 2017.

RODRÍGUEZ, M. R. *et al.* Geología de los cuadrángulos de Putina (hojas 30x1, 30x2, 30x3, 30x4) y La Rinconada (30y1, 30y3, 30y4). **Boletín L** 5, 2021.

SALAS-MERCADO, D.; HERMOZA-GUTIÉRREZ, M.; SALAS-ÁVILA, D. Distribution of heavy metals and metalloids in surface waters and on sediments of the Crucero river, Peru. **Revista Boliviana de Química**, 37, p. 185-193, 2020.

SALAS, M. D. **Evaluación de metales y metaloides en sedimentos en la sub cuenca del río Azángaro y su modelamiento ambiental**. Maestría en Tecnologías de protección ambiental, Repositorio Institucional - UNAP, 2017.



SMITH, N. M. "Our gold is dirty, but we want to improve": Challenges to addressing mercury use in artisanal and small-scale gold mining in Peru. **Journal of Cleaner Production**, 222, p. 646-654, 2019/06/10/ 2019.

SPIEGEL, S. J. *et al.* Phasing Out Mercury? Ecological Economics and Indonesia's Small-Scale Gold Mining Sector. **Ecological Economics**, 144, p. 1-11, 2018/02/01/ 2018.

ULRICH, S.; TRENCH, A.; HAGEMANN, S. Gold mining greenhouse gas emissions, abatement measures, and the impact of a carbon price. **Journal of Cleaner Production**, 340, p. 130851, 2022/03/15/ 2022.

VARGAS, E. D. R. **Metales pesados en suelos cultivados con riego y sin riego en la comunidad de Ñaupapampa del distrito de Asillo-Puno**, 2017.

## **ARTISANAL AND SMALL-SCALE GOLD MINING IN THE SOUTHERN ESPINHAÇO RANGE, BRAZIL, USING TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC INDUCTION: PROSPECTING, EFFICIENCY, AND ENVIRONMENTAL ASPECTS**

Henrique Borgatti

Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG)

Aline Tavares Melo

School of Earth Sciences, University College Dublin – Dublin, Ireland

Luiz Guilherme Knauer

Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG)

# ABSTRACT

Gold mining has profound ties to the history of Brazilian colonization and still takes place with many communities involved in artisanal and small-scale gold mining. The most relevant gold deposits in the Southern Espinhaço Range are related to the occurrence of shear zones in the region between the cities of Diamantina and Gouveia, Minas Gerais, Brazil. Former colonial-dated gold mines were depleted; however, the use of newer prospecting practices has brought new interest in these areas. In this context, this study assesses the efficiency, environmental impacts, and economic viability of time-domain electromagnetic induction as a gold exploration method for small-scale prospecting in Gouveia county. Additionally, this study provides a characterization of the local gold mineralization and brings awareness to the prospecting community regarding environmental and legal aspects of gold mining. This article presents the results of a field campaign of prospecting efforts in which 114 metallic targets were located, 35 of which were identified as native gold. The gold samples have specific morphology, depth, and weight that suggest a hypogenic origin with a low degree of transport at eluvial levels. From an environmental perspective, the time-domain electromagnetic induction method has presented fewer impacts, related mostly to site-specific remobilization of the soil.

**Keywords:** Artisanal and Small-Scale Gold Mining, Geophysical Prospecting, Metal Detecting, Gold, Southern Espinhaço Range.

## INTRODUCTION

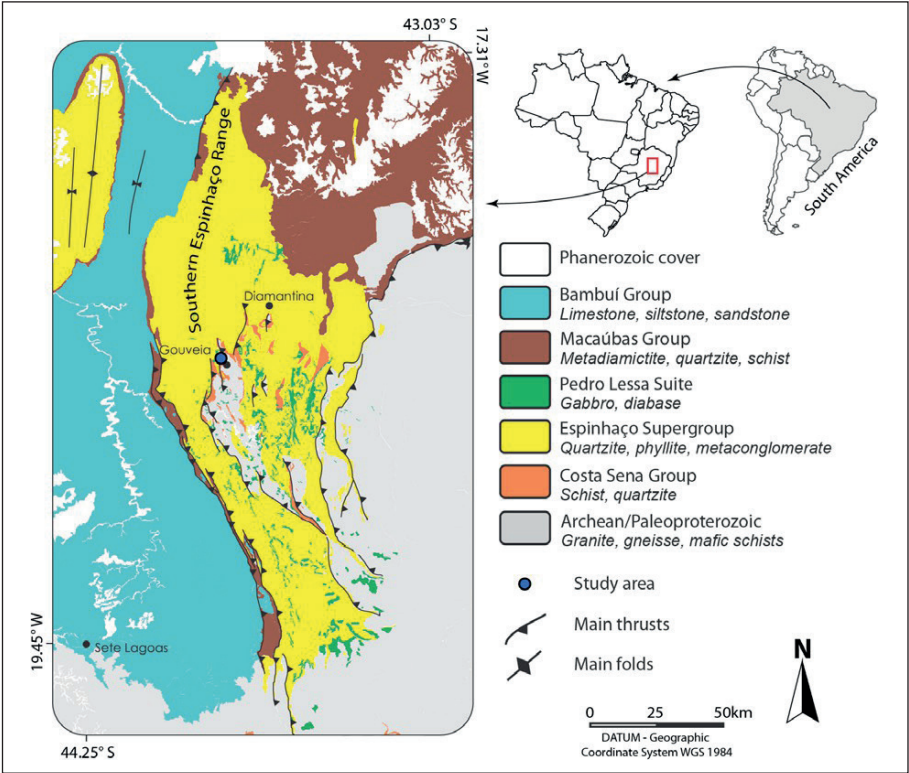
Artisanal and small-scale gold mining is ongoing around the world, particularly in developing countries. These activities are mostly informal and, at times, illegal, performed under poor working conditions that oftentimes result in significant environmental impacts. On the other hand, gold mining presents an undeniable role in poverty reduction at a local level, representing a promising economic activity and often the single viable economic possibility for many poverty-stricken communities. The International Institute for Environment and Development estimates that at least 13 million people work directly in artisanal and small-scale gold mining around the world (Hentschel *et al.*, 2002). In Brazil, the number of people working directly on small-scale gold mining is around 250,000; however, close to 1.5 million people are dependent on such activities (Hilson; Maconachie, 2017). Brazil also takes the lead with the largest small-scale gold mining district, located in the Tapajós River watershed (Lobo *et al.*, 2016). Historically, such gold mining practices were significant for the discovery of many deposits around Brazil during colonial times; in contrast, nowadays they have great social and environmental impacts. Hence, there is an ever-growing need for research on such a controversial subject in both academic and governmental spheres regarding prospecting guidelines, new technology, and the regularization of this practice.

With the advent of new technology, very promising tools for artisanal mining are now metal detectors. Such equipment was developed alongside radiotelephony in the late 19th century and was quickly adapted for many diverse applications, such as war engineering, archeology, and mineral prospecting (Connor; Scott, 1998). Initially used for amateur gold prospecting, metal detectors developed from 2000 to 2020 have evolved into robust equipment that is easily used with a relatively low cost and high efficiency, which generated major changes in subsurface gold prospecting (Dessertine, 2016).

Metal detectors in Brazil have become increasingly popular in the past decades in gold prospecting regions. Many areas considered to be depleted, colonial-time mines, and even brand-new gold occurrences are now being targeted for exploration using this technology. One of these regions is located in the Southern Espinhaço Range (Fig. 1), in Gouveia county, Minas Gerais. This

area, despite not presently having large gold mining enterprises, is exploited by small-scale individual prospectors that extract shallow subsurface-level gold utilizing metal detecting equipment. Therefore, this study aimed to study gold prospecting campaigns that employ time-domain electromagnetic induction (EMI) in Gouveia/MG to assess their efficiency, environmental impacts, and economic viability; provide a characterization of the local gold mineralization; and finally bring awareness to the prospecting community regarding environmental and legal aspects of this small-scale gold mining.

**Figure1** - Schematic geological map of the Southern Espinhaço Range and adjacent regions showing the study area in Gouveia county, Minas Gerais.



**Source:** modified from Kuchenbecker (2019).

## GEOLOGICAL SETTING

### Regional geology context

The study area is located in the Southern Espinhaço Range in the Araçuaí Belt. The Southern Espinhaço Range extends along the southeastern margin of the São Francisco Craton (Almeida, 1977) and hosts the Gouveia granite-gneiss complex and the Pedro Pereira Group, composed of mafic schist and banded iron formations (BIFs), with both geological units dating to the Archean eon. There are also outcrops of metasedimentary rocks from the Costa Sena Group and Espinhaço Supergroup dating to the Proterozoic eon. Subordinately, metabasic rocks occur in association with the Pedro Lessa suite (Knauer, 2007).

According to Dossin *et al.* (1990), the most significant gold deposits in the Southern Espinhaço Range coincide with the occurrence of ductile shear zones in association with quartz veins that predominantly occur in mylonitic schists, in which the main conditioning factors of mineralization are physical aspects of the host rock that control the flow of hydrothermal fluids. According to other authors (Abreu, 1991), it is less common to find gold mineralizations in association with pelitic metasediment levels, with possible occurrences in hematitic phyllites related to the Espinhaço Supergroup.

Research on fluid inclusions in quartz veins associated with gold mineralizations in this region, conducted by Ronchi *et al.* (1992), suggested that gold precipitation took place due to the mixing of fluids of different compositions (carbonic and aqueous), in which the oxygen fugacity of the mineralizing fluid is close to the conditions of the hematite-magnetite buffer solution. Furthermore, their research suggests that the metal complexing agent would be  $\text{AuCl}_2$  and that destabilization would occur as a result of the process of progressive fluid dilution. In convergence, studies on fluid inclusions carried out by Freitas (2020) in quartz veins in Serra do Pasmarr (20 km southwest of Diamantina, Fig. 1) suggested oxidizing conditions in the field of hematite stability, in addition to transport in the form of chloride complexes, supported by the low salinity of the fluids.

From a geotectonic perspective, the Brasiliano event (490–630 Mya) originated large folds and extensive and numerous ductile shear zones of preferential north-south direction and transported them to the west in the Espinhaço Range (Knauer, 2007). The large amount of hydrothermal quartz veins, concordant or discordant with the foliation, developed during this event

is associated with, besides gold, hematite, magnetite, rutile, anatase, brookite, and, more rarely, minerals from the groups of crichtonite, euclase, and monazite (Chaves *et al.*, 2010).

Based on direct gold dating with radiogenic Helium ( $^4\text{He}$ ) by the U/Th – $^4\text{He}$  method, Cabral *et al.* (2013) suggested an age of  $515 \pm 55$  Mya, relating the gold mineralization of the Diamantina region to the Brasiliano orogenetic event during the Gondwana amalgamation. Furthermore, according to these authors, gold mineralization can be understood as an oxidized variant within the series of orogenic gold deposits.

### **Local geology context**

The exploration study area is located south of Cuiabá village, approximately 6 km northwest of the Gouveia urban area (Fig. 2A). The area is characterized by gentle-slope landscapes on “half dome-like” hillslopes in which rocks of the Gouveia granite complex outcrop. The rocks are composed of quartz, potassium feldspar, plagioclase, muscovite, and biotite; they are mylonitized and homogeneously weathered. The target area of this study is the top portion of a half-dome hillslope with a total area of 0.38 ha.

The region is covered by approximately 3.0 m of eluvial conglomeratic sediments with subangular to angular clasts that are texturally immature, mineralogically mature, and predominantly composed of quartz. Among the clasts, the pebble fraction is predominant, with rare occurrence of larger grain fractions (Fig. 2B). Regarding the matrix, there is a predominantly fine, silty-clay matrix with an orange-ocher color. In the south region of the area, there is a large gully (Fig. 3C) in which the white hue of kaolin can be seen, the result of the weathering of granite rocks. Such geological conditions are favorable for the exploration of native gold with metal detectors, considering the relatively shallow eluvial layer (up to 3 m).

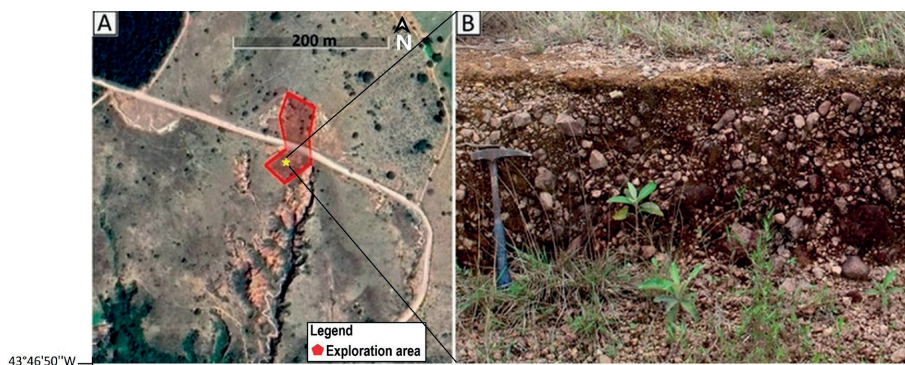


## METHODOLOGY

### Exploration and data processing

The gold exploration campaign discussed here had a total duration of 7 days and encompassed a preliminary reconnaissance of the area, terrain preparation (2 days), exploration (3 days), and finally row closure and soil compaction (2 days). The exploration stage was further subdivided into three parts, corresponding to each prospecting day. There was no difference in any variable on each prospecting day: same duration, area, and depth. This subdivision of the prospecting stage was carried out to emphasize the decrease in metallic targets found as a function of prospecting days. The terrain preparation comprised selection of row placement (length, width, and depth) followed by systematic excavation of 12 rows that were 2.0 m wide, 0.50 m deep, and 20–30 m long (Figs. 3A and 3B). It is noteworthy to emphasize that the device depth investigation increases with the volume of the metal target until its maximum reach. Therefore, smaller metal targets are only found at shallow depths (less than 1 m), making the stage of terrain preparation fundamental to improve accuracy of the gold finds.

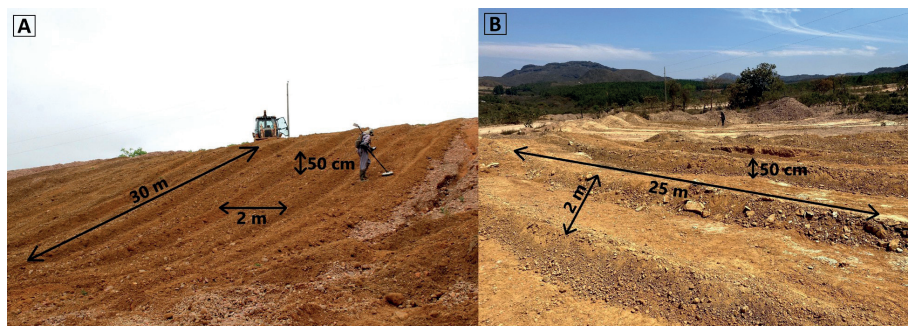
**Figure 2** - (A) Satellite image of the study area – Google Earth Pro 7.3 (2022). (B) Eluvial level of quartz angular gravels/pebbles. (C) Panoramic view of the adjacent gully (south sight).



I  
18°25'06"S



**Figure 3** - (A) and (B) Open rows excavated with the aid of mechanical scarification for metal prospecting at the eluvial gravel level, row dimensions 2 m × 0.5 m × 25–30 m.



For such excavation, a Case backhoe model 580M was used. In the subsequent exploration days, the freshly excavated rows were randomly surveyed by two high-resolution Minelab metal detectors, model GPZ 7000. This type of metal detector is widely used among individual professional gold prospectors, considering its investigation depth (up to two meters), accuracy regarding small metallic targets (from 2 mm), and relatively affordable price (same price as a standard car). We only found gold targets in the rows given that the shallow eluvium blanket was already intensely surveyed. The metallic targets were manually extracted using a pickaxe. The final stage consisted of the closure of the excavated rows and the compaction of the eluvial materials to minimize related environmental impacts. Following the field campaign stage, the gathered data were logged into spreadsheets. The processing of the data used descriptive statistics, a sample Pearson correlation coefficient ( $r$ ), and a hypothesis test to assess its significance.

In this study, a 10% significance level was adopted, that is,  $\alpha = 0.10$ . This level was selected based on the existing relationship between type I ( $\alpha$ ) and type II ( $\beta$ ) and for consistency with the sample size (Kim 2015). Therefore, all p-values lower than 0.10 will lead to the conclusion of the significance of the correlation coefficient. The R software™ version 4.0.3 was used to perform the analyses.

## **Operation principles: EMI devices**

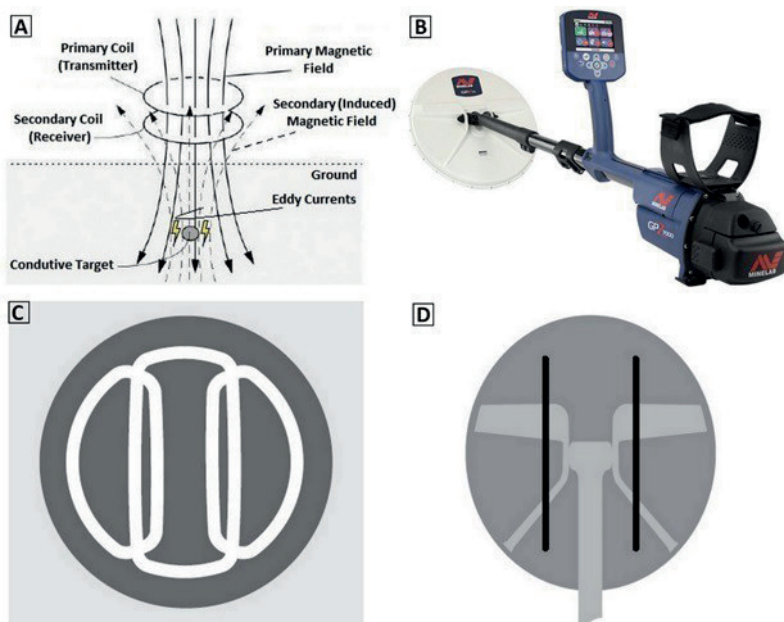
EMI sensors have been used for the detection of metallic objects since the 19th century and are currently considered a mature technology (Mlambo *et al.*, 2018). The term “metal detectors” is commonly used to refer to EMI devices that are low-frequency inductive systems composed of a search head containing one or more coils carrying a time-varying electric current. These can be subdivided into frequency-domain and time-domain systems (Bruschini, 2002). This study will focus on the time-domain systems.

Field research using time-domain electromagnetic detection consists of a transmitter coil that generates a pulsating primary magnetic field that induces eddy currents in any nearby metallic objects. The decay of these currents with time generates a secondary magnetic field with a specific rate of decay that is determined by the object's characteristics (size, shape, and composition) (Telford *et al.*, 1990). Measurement of the decay of this secondary field (the transient response) therefore provides the metallic location of the target once read through the receiving coil (Fig. 4A) (Bruschini, 2002).

Traditional metal detectors are not commonly power-efficient. For this reason, in this study we opted to use the GPZ 7000 gold detector (Fig. 4B), which is a high-sensitivity, high-resolution, constant-current time-domain metal detector suitable for gold detection. This device emits a sonorous alert when it detects any metallic object in the subsurface. Expert metal prospectors can differentiate metals based on their sound characteristics; basically, two sound categories are informally classified: one, the target should be gold, silver, aluminum, or copper; the other, the target should be iron or steel alloys. This is expected due to the values of their electrical conductivities. Besides, this metal detector can also map their finds with a GPS and a PC mapper; however, this study did not map

their finds given that this kind of prospection is not formally legalized with the regulatory agency and is not the purpose to harm local miners.

**Figure 4 -** (A) Schematic illustration of the time domain electromagnetic detection principle showing the primary and secondary fields (modified from Bruschini 2002). (B) Geophysical equipment for detection of metallic materials – Minelab Model GPZ 7000 based on timedomain electromagnetics. Source: Minelab (2022). (C) The schematic Super-D technology model for positioning the coils; (D) the parallel lines represent the intersection area between coils, where the signal is strongest (modified from Minelab 2022).



The equipment incorporates the Zero Voltage Transmission (ZVT) and Super-D technologies and works at a standard frequency of 3675 kHz with a maximum investigation depth of 2 m (Minelab, 2022). It repeats the signal cycle composed of at least one receiver period and one non-zero transmitter period, keeping the current substantially constant from cycle to cycle regardless of the inductance of the transmission coil due to the ZVT technology (Candy, 2014). The Super-D coil (Fig. 4C) consists of one middle transmission winding and two outer receiving windings, which essentially form the equivalent of two symmetric Double-D coils, one on the left and one on the right. This winding interception setting results in a double response for targets close to the surface of the coil,

whereas for deep targets it behaves like a traditional coil, which will show a stronger signal in the central parallel lines (Fig. 4D) (Minelab, 2022).

## RESULTS

The metallic targets were quantified for both gold and other metallic targets (any conductive metals), and the proportion between the two was calculated, as shown in Table 1.

A total of 114 targets were identified during the 3 days of exploration, of which 35 were samples of native gold and 79 were samples of other conductive metals. Individually, exploration days 1, 2, and 3 obtained 19, 11, and 5 gold targets, respectively. As mentioned in Table 1, the targets found for other metals were substantial, such as cans, nails, horseshoes, coins, and other discarded objects. The large number of discarded objects is probably due to the proximity to the road (Fig. 2A).

Figure 5 shows the variation in weight per sample of native gold between 0.05 and 1.50 g, with 75% of the samples found having masses up to 0.5 g. The depth at which the gold samples were found was also determined to range from surface level (0 cm) to 35 cm. Around 75% of the total samples were found in depths up to 19 cm (originally 79 cm).

The relationship between depth and weight for the gold targets was analyzed through the sample Pearson correlation coefficient ( $r$ ) along with its population significance (Fig. 6). A crescent-linear correlation was found to exist between the variables weight (g) and depth (cm). For the gold targets, as the depth increases, the weight (g) also increases. Pearson's correlation coefficient ( $r$ ) between the variables depth and weight, calculated for this scenario, is 0.35. Using a hypothesis test at the 10% level, a  $p$ -value of 0.03 (3%) was found.

Figures 7A, 7B, and 7C show the total number of gold samples found at exploration days 1, 2, and 3, respectively. In terms of mineralogy, the samples were mostly xenomorphic, spherical, angular, and intensely pitted, with the presence of cavities and voids. Rarely, in just one sample, multiple crystals with an arborescent habit were observed (Fig. 7D). Few samples were also xenomorphic with low sphericity, elliptical geometries, angular, intensely pitted, and numerous cavities and voids (Figs. 7E and 7F). Despite the results of this

prospecting campaign for gold resulted in only grains and small gold nuggets, local gold prospectors report having found larger gold nuggets using the same geophysical device previously in the same region. Two of such samples (Figs. 8A and 8B) weighing 15.06 and 26.30 g, respectively, were temporarily provided to this study to be further described and characterized.

## DISCUSSIONS

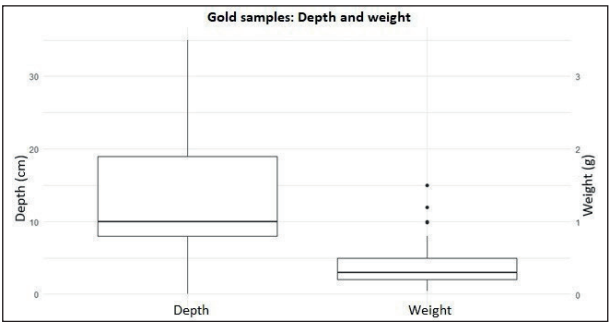
### Prospecting and efficiency

Gold nuggets and grains are symbolic objects of mineral wealth, highly sought after by individual prospectors and, often, neglected by the mineral industry and academic world.

**Table 1** - Total targets and proportion of gold and other metals found through prospecting.

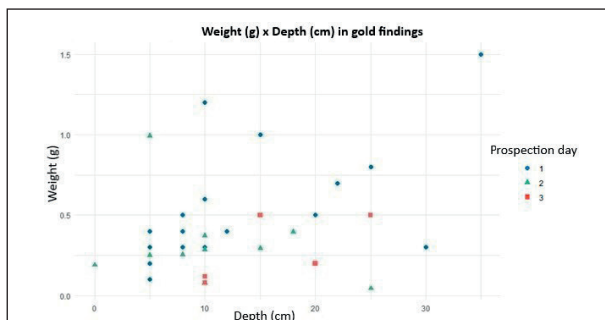
| Exploration<br>(day) | Total<br>targets | Gold               |                   | Other metals       |                   |
|----------------------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                      |                  | Absolute<br>number | Proportion<br>(%) | Absolute<br>number | Proportion<br>(%) |
| 1                    | 60               | 19                 | 31.7              | 41                 | 68.3              |
| 2                    | 33               | 11                 | 33.4              | 22                 | 66.6              |
| 3                    | 21               | 5                  | 23.8              | 16                 | 76.2              |
| Total                | 114              | 35                 | 30.7              | 79                 | 69.3              |

**Figure 5** - Boxplot for depth and sample weights of prospected native gold samples.





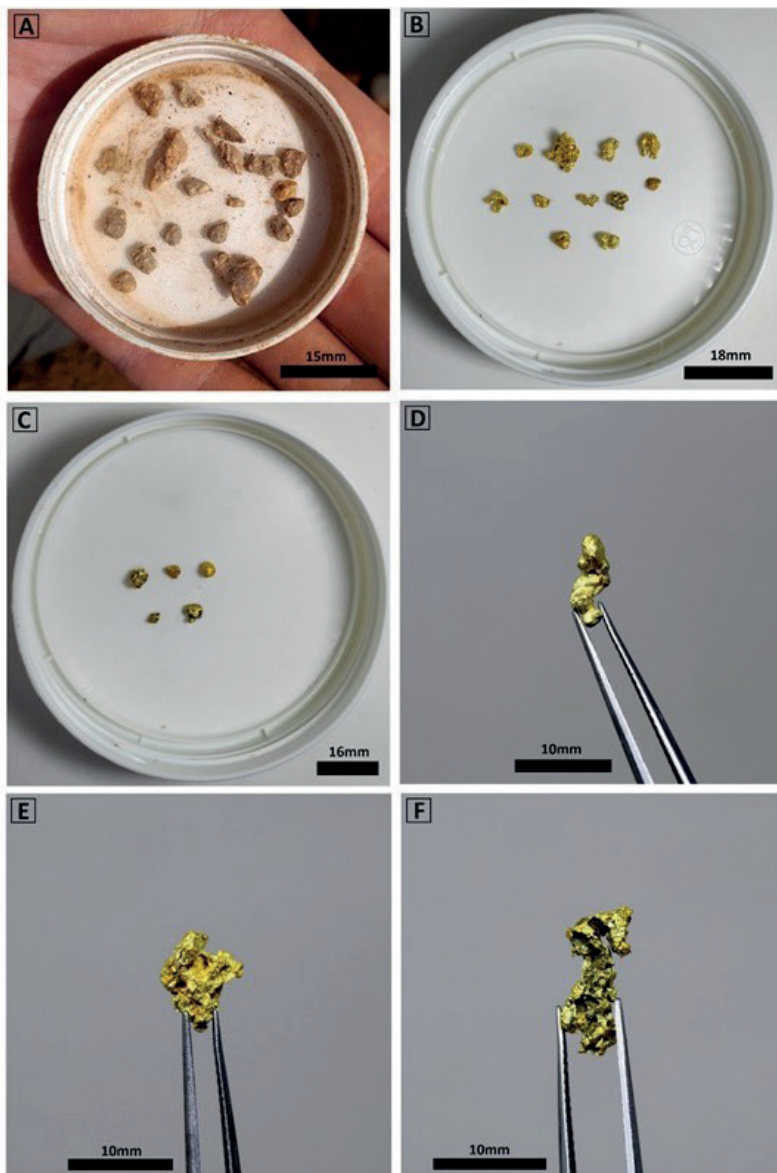
**Figure 6** - Weight versus depth for gold grains found during three exploration days.



The local concentrations and rarity of these specimens typically do not make large mineral exploration projects viable. Additionally, the high economic value and high liquidity of these finds make it difficult to acquire samples for scientific analysis, given that they are quickly sold and melted down for use in the jewelry industry.

The collected data shows the economic viability of the proposed project and methods, considering that the prospected gold value exceeded the production costs, thus generating profits for both prospectors and the landowner. The 35 gold samples found with the geophysical device amount to 14.64 g in weight, valued at the price of gold at the time of extraction (R\$ 310/g) in R\$ 4,538 (nov. 5, 2020). The total exploration and extraction costs, including the backhoe rental, fuel, and team logistics, amounted to R\$ 2,750. At the studied area, the other prospection methodology possibility to find gold would be removing all the eluvial blanket by using backhoes and trucks to a washing area associated with a gravimetric concentrator. This kind would need a considerably larger monetary investment and would definitely represent a huge environmental impact. Furthermore, that was not done in this and any nearby area to compare the results. It is worth mentioning that the project area is considered by the local prospectors as already depleted of large gold volumes, with previous reported exploitation of considerable gold volumes at the local level.

**Figure 7** - (A) Total native gold samples prospected during the first day, grains and nuggets with debris. (B) Total native gold samples prospected during the second day, clean grains. (C) Total native gold samples prospected during the third day, clean grains. (D) Native gold sample crystallized in arborescent habit with dimensions of 9×3×2 mm and a weight of 0.5 g. (E) Xenomorphic native gold sample, low sphericity, angular, with the presence of cavities and voids with dimensions of 9×7×5 mm and a weight of 1.0 g. (F) Xenomorphic native gold sample, low sphericity, angular, with numerous cavities and voids. Some voids have geometric surfaces, which are evidence of the dissolution of other minerals existing there (box works). Iron oxides/hydroxides were also found within the holes with dimensions of 13×6× 2 mm and a weight of 0.9 g.





From a statistical standpoint, the value determined for the sample correlation coefficient (0.35) demonstrates a positive association between the weight of the samples according to the depth found. Despite the value of the sample association determined ( $0.35 < 1$ ) not being considered a noteworthy value, the (r) value at the significance level of 10% found a p-value of 0.03 or 3%. As the p-value obtained in the hypothesis test was lower than the established significance level of 10% (error probability), it was concluded that the population correlation coefficient is statistically different from zero; hence, admittedly, the correlation coefficient is significant. Therefore, its population significance is confirmed, which, in turn, validates the tendency for larger nuggets to be found at a greater depth at the regolith level.

Except for a few specimens with defined habits and preserved faces typical of the cubic system, the prospected samples were xenomorphic and presented intensely pitted surfaces. This surface, which in some cases produces a spongy texture in the nuggets (Fig. 8B), added to the high angulation — prominent and pointed edges — suggests a low degree of transport of the nuggets, since such metal is highly malleable and ductile. With a small degree of transport, these nuggets would display significant changes in morphology (flattening, smoothing, and low angulation).

Native gold generally occurs in an alloy with silver. The atomic ratio of both metals is equal, allowing the formation of a continuous series between them (Hough *et al.*, 2009). According to Butt *et al.* (2020), the depletion of silver can be understood as the first stage of weathering, in which a microporosity develops in the free gold particle, resulting in voids that facilitate the access of weathering fluids and fine particles, such as clays and secondary oxides. According to these authors, in larger samples, an extreme depletion of Ag associated with Au dissolution can lead to the formation of a spongy texture on the intensely pitted surfaces of the gold nuggets.

**Figure 8** - (A) Gold nugget with dimensions of 2.9 cm × 2.3 cm × 1.5 cm and a weight of 15.06 g, crystallized in arborescent habit with a slightly pitted surface. (B) Gold nugget with dimensions of 3.4 cm × 2.3 cm × 1.2 cm and a weight of 26.30 g, xenomorphic, low sphericity, angular geometry, intensely pitted, spongy texture, and presence of voids and cavities, mostly filled with iron oxides/hydroxides.



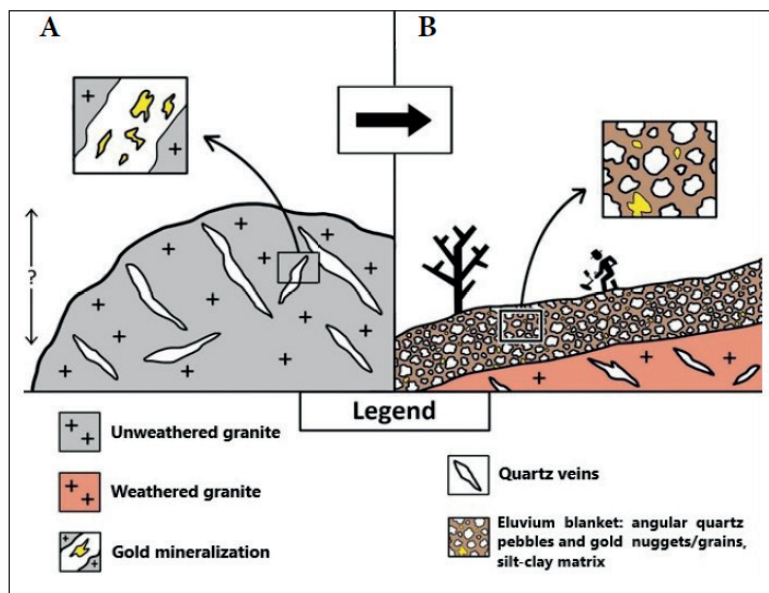
The geological aspects of the study area integrated with the regional geology and the characteristics of the native gold samples found all indicate that the gold mineralization at the site is hypogenic and comes from quartz veins intruded into the host rocks. The preferential weathering of the host rocks, the Gouveia granite complex, simultaneously with the dismantling and accommodation of the voluminous quartz veins mechanically concentrated the gold nuggets and grains at this regolith level above the bedrock, and large nuggets naturally occupied great depths. The high degree of mineralogical maturity of the unconsolidated sediment of the regolith layer, formed almost exclusively of highly angular quartz pebbles, together with the irregular and angular morphology of the nuggets and auriferous grains, suggest low transport of this sediment, thus being interpreted as an eluvial layer originated from weathered granitic rocks underneath (Fig. 9).

## Environmental and social aspects

Traditionally in Brazil, the main artisanal and small-scale gold mining methods use gravimetric concentration, blasting, washing, and dredging (Rodrigues *et al.*, 1994). Artisanal alluvial mining, carried out with the help of pans and improvised gravimetric concentrators, is a widespread practice throughout Brazil. In the colonial period, this mining was synonymous with wealth; however, today it represents scarcity; those who practice it do so as a form of subsistence since the shallow alluvial gold deposits have already been

exhaustively exploited, leaving tiny amounts of metallic mineral resources in the main water courses. Associated with this method of gold prospecting, it is quite common to use liquid mercury in order to unite fine-grained gold into a single amalgam, which, when burned, volatilizes the mercury and forms a single gold agglomerate. This practice is particularly harmful to the workers in direct contact with such substances, as well as to the entire ecosystem since this volatile metal is easily oxidized in the environment and methylated to its most toxic form, methylmercury, which can then be incorporated into organisms through the food chain (De-Paula *et al.*, 2006).

**Figure 9** - Schematic geological model of the genesis and concentration of the gold at the eluvium blanket. (A) Gold mineralization in quartz veins intruding the unweathered granite and (B) eluvium blanket composed of angular quartz pebbles and gold nuggets/grains, result of the weathering of the granite rock as well the dismantling and accommodation of the gold-quartz mineralized veins.



The dismantling of slopes and thick soils followed by washing, a typical method of artisanal small-scale gold mining in the Amazon region, also presents major environmental impacts, both physical and biotic. This practice encompasses first the deforestation of the target area, followed by removal and intense washing of the lateritic/saprolitic material, which results in the dumping of tons of sediment into waterways. This practice causes direct changes in the

particle sedimentation dynamics, causing changes in the color and turbidity of the water (Rodrigues *et al.*, 1994). The prospected site completely loses its original geomorphological features and becomes intensely susceptible to accelerated degradation from weathering and erosion. In addition, mercury is also utilized in this practice for separation and beneficiation in cases where the granulometry is fine.

Commonly used in larger watercourses, mining by dredging unconsolidated material deposited in thalwegs and subsequent gravimetric concentration is associated with major environmental impacts. According to Castro and Almeida (2012), the main aspects related to such practices are as follows: change of the hydraulic and sedimentological conditions of the flow, with possible alteration of the circulation patterns, water mixing, and turbidity; alteration of the conditions at the place of release of the dredged material; and pollution by toxic substances existing in the dredging material from its suspension and movement during the activity. In gold mining, the indiscriminate use of mercury is a significant addition in terms of impacts besides the previously mentioned issues since this ore, in large waterways and at great depths, is usually found in fine granulometry. Apart from the environmental impacts, the dredging of sediments in rivers requires a significant financial contribution for the acquisition of equipment and maintenance of activities.

In this study, it is understood that the gold prospecting method by high-resolution metal detectors imposes local impacts restricted to the remobilization of unconsolidated material where the metallic targets are located, usually in eluvium, colluvium, and low-depth alluvium, with this remobilization carried out manually with shovels and pickaxes. Although this technology cannot be considered effective in all environments (for instance, deep underwater environments or very fine-grained ores), prospecting using this method is effective, mercury-free, and has low impacts on local fauna and flora while providing a significant income to many people. It should be noted, however, that the opening of trenches/ rows represents a more significant environmental impact, considering the removal of local undergrowth in addition to the remobilization of a greater volume of unconsolidated material.

The small-scale gold mining industry has remarkable economic significance at local level. However, a key point in the artisanal and small-scale

gold prospecting issue is its legality, considering that such practices often do not comply with the obligations imposed on them by local authorities. Thus, it is recommended that small local prospectors organize mineral cooperatives that can be duly formalized with the Agência Nacional de Mineração (National Mineral Agency) in favor of cooperation among prospectors, land owners, and proprietors of mineral rights in the area in question.

## CONCLUSION

The employment of geophysical methods for prospecting subsurface gold occurrences carried out by time-domain EMI equipment proved to be effective in detecting several samples of native gold in eluvial material. The easy operation of the equipment and the rapid response associated with geological knowledge contribute to the expansion of this method, providing subsidies for investments in mineral exploration in this area and other regions.

Based on the collected data and statistical analyses conducted for both sample and population coefficients, there is a positive linear correlation between weight and depth for gold samples. Larger nuggets tend to be found at a deeper level. The gold mineralization in this area was found to be hypogenic, with native gold crystallized in the quartz veins present in the host rock. The current concentration of gold at regolith levels developed due to preferential weathering of granite rock with posterior dismantling and accommodation of gold in quartz veins in the local relief. The study of gold nuggets and grains provides an understanding of the mineralogy and metallogeny of such occurrences in the Southern Espinhaço Range, and further academic contributions are necessary to deepen the understanding of the subject in this region.

From an environmental perspective, traditional artisanal and small-scale gold mining practices in Brazil are undoubtedly related to several important environmental and social impacts. It is concluded that high-resolution metal detectors are a viable alternative to archaic and damaging prospecting practices and methods, particularly considering their effectiveness, relatively low cost, and significantly lower environmental impacts. Given this context, this study is likely applicable to all areas of the world where similar practices are utilized.

## Acknowledgments

This study was funded in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001. We especially thank the local prospector community, particularly Itamar Mauricio Pereira Neto, Emerson Aparecido Alves Afonso, and their families for their hospitality, for allowing the accompaniment of exploration campaigns, and for providing personal gold samples to be studied and characterized for this project. We would also like to thank professors Antônio Wilson Romano and Pedro Benedito Casagrande for their contributions to the field campaigns and in the geological discussions conducted during this study, and professor Ted Steinberg for his comments and review.

## REFERENCES

- ABREU, F. R. **Estudo das Mineralizações Auríferas Filonianas da Região da Cidade de Diamantina/MG**. Master's dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991. p. 85.
- ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, 7(4), p. 349-364, 1977.
- BRUSCHINI, C. **A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining**. Doctorate thesis, Faculty of Applied Sciences, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 2002. p. 230.
- BUTT, C. R. M.; HOUGH, R. M.; VERRALL, M. Gold nuggets: the inside story. **Ore and Energy Resource Geology**, 4-5, p. 100009, 2020. Available at: <<https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2020.100009>>.
- CABRAL, A. R. *et al.* Direct dating of gold by radiogenic helium: Testing the method on gold from Diamantina, Minas Gerais, Brazil. **Geology**, 41(2), p. 163-166, 2013. Available at: <<https://doi.org/10.1130/G337511>>.
- CANDY, B. H. **Constant current metal detector with driven transmit coil**. 2014. AU. N° US 2014/0232408 A1.
- CASTRO, S. M.; ALMEIDA, J. R. Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. **Sociedade & Natureza**, 24(3), p. 519-533, 2012. Available at: <<https://doi.org/10.1590/s1982-45132012000300011>>.
- CHAVES, M. L. S. C.; BRANDÃO, P. R. G.; BUHN, B. Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, idades LA-ICP-MS e implicações geológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, 40(4), p. 506-515, 2010. Available at: <<https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010404506515>>.

CONNOR, M.; SCOTT, D. D. Metal detector use in archaeology: An introduction. **Historical Archaeology**, 32(4), p. 76-85, 1998. Available at: <<https://doi.org/10.1007/bf03374273>>.

DE-PAULA, V. G.; LAMAS-CORRÊA, R.; TUTUNJI V. L. Garimpo e mercúrio: impactos ambientais e saúde humana. **Universitas: Ciências da Saúde**, 4(12), p. 101-110, 2006. Available at: <<https://doi.org/10.5102/ucs.v4i1.25>>.

DESSERTINE, A. From pickaxes to metal detectors: Gold mining mobility and space in Upper Guinea, Guinea Conakry. **The Extractive Industries and Society**, 3(2), p. 435-441, 2016. Available at: <<https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.02.010>>.

DOSSIN, T. M.; CHAVES, M. L. S. C.; DOSSIN, I. A. Mineralizações Auríferas Associadas às Zonas de Cisalhamento Brasileiras do Espinhaço Meridional (Minas Gerais). **Revista de Geologia**, 3, p. 19-28, 1990.

FREITAS, M. H. G. **Característica das inclusões fluidas de veios de quartzo da Serra do Pasmarr, Diamantina/MG e seu significado na deposição de ouro na Serra do Espinhaço Meridional**. Master's dissertation, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020. p. 113.

GOOGLE EARTH PRO 7.3. 2022. **Landscapes and Reliefs 43°46'50"W, 18°25'06"S, elevation 1080 m**. Available at: <[www.google.com/intl/pt-BR\\_ALL/earth/about/versions/#earth-pro](http://www.google.com/intl/pt-BR_ALL/earth/about/versions/#earth-pro)>. Access: apr. 1, 2022.

HENTSCHEL, T.; HRUSCHKA, F.; PRIESTER, M. **Global Report on Artisanal and Small-Scale Mining**. Minerals Mining and Sustainable Development (MMSD) Project, 2002. London: International Institute for Environmental Development.

HILSON, G.; MACONACHIE, R. Formalising artisanal and small-scale mining: insights, contestations and clarifications. **Area**, 49(4), p. 443-451, 2017. Available at: <<https://doi.org/10.1111/area.12328>>.

HOUGH, R. M.; BUTT, C. R. M.; FISCHER-BÜHNER, J. The crystallography, metallography and composition of gold. **Elements**, 5(5), p. 297-302, 2009. Available at: <<https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.297>>.

KIM, J. Archive How to Choose the Level of Significance: A Pedagogical Note. **Munich Personal RePEc**, 2015. Available at: <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/66373/>>. Accessed in: mar. 2022.

KNAUER, L. G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**, 15(1), p. 81-90, 2007. Available at: <<https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.109>>.

KUCHENBECKER, M. Os processos geológicos por trás dos sítios arqueológicos da Serra do Espinhaço Meridional. **Revista Espinhaço**, 8(2), p. 212, 2019. Available at: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.3583279>>.

LOBO, F. *et al.* 2016. Distribution of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the Past 40 Years and Relationship with Water Siltation. **Remote Sensing**, 8(7), p. 579, 2016. Available at: <<https://doi.org/10.3390/rs8070579>>.

MINELAB 2022. **Manual de instruções GPZ 7000**. Rev. 3. Available at: <[https://www.minelab.com/files/f/408231/GPZ7000\\_InstructionalManual\\_PT.pdf](https://www.minelab.com/files/f/408231/GPZ7000_InstructionalManual_PT.pdf)>. Accessed in: sep. 2021.

MLAMBO, P. *et al.* Inductive Metal Detectors and the Design of Prospecting Robots: a Possibility. **EAI International Conference for Research, Innovation and Development for Africa**, p. 10-19, 2018. Available at: <<https://doi.org/10.4108/eai.20-6-2017.2270713>>.

RODRIGUES, R. M. *et al.* **Estudo dos impactos ambientais decorrentes do extrativismo mineral e poluição mercurial no Tapajós**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1994. p. 220.



RONCHI, L. H. *et al.* Caracterização físico-química dos fluidos associados aos veios de quartzo auríferos de Costa Sena MG. **Revista Brasileira de Geociências**, 22(2), p. 129-138, 1992. Available at: <<https://doi.org/10.25249/0375-7536.1992129138>>.

TELFORD, W. M. *et al.* 1990. **Applied geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p. 792.

## **ESTUDO E ANÁLISE DE FÍSICA DAS ROCHAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS**

Juliana Beatriz Alves Viana  
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Joemes de Lima Simas  
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

# RESUMO

Os primeiros trabalhos relacionados a aplicação de Física de Rochas remetem à década de 40 e 50. Na sismologia de exploração, as ondas sísmicas trazem informações de rochas e fluidos subterrâneos na forma de tempo de viagem, amplitude de reflexão e variações de fase. Durante os primeiros anos da sismologia de exploração, os dados sísmicos foram interpretados principalmente para estruturas que poderiam reter hidrocarbonetos. Com o avanço do poder computacional e das técnicas de processamento e interpretação sísmica, os dados sísmicos são agora comumente analisados para determinar litologia, porosidade, fluidos de poros e saturação. Neste projeto foram analisadas as propriedades elásticas em laboratório a partir do estudo de física das rochas no material rochoso que compõem a bacia sedimentar do Amazonas. Foram feitos o cálculo da velocidade das ondas sísmicas com a utilização de um módulo ultrassônico montado em programação com Arduino.

**Palavras-chave:** Física, Rochas, Elasticidade.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, houve um grande progresso no estudo das propriedades físicas das rochas e minerais em relação à exploração sísmica e a sismologia. Durante este período, muitas teorias foram desenvolvidas e muitos experimentos foram realizados. Algumas dessas teorias e resultados experimentais desempenharam papéis importantes no avanço das ciências da terra e tecnologias de exploração (Wang, 2001).

A petrofísica é considerada um campo amplo e interdisciplinar e, por essa razão, seu arcabouço aglutina conhecimentos provenientes de diferentes áreas, como geologia, geofísica, química, mecânica, engenharia do petróleo, entre outras. A aplicação da petrofísica também é vasta e abrange praticamente todas as atividades relacionadas à exploração e produção de recursos minerais subterrâneos (Soares, 2011).

Nas atividades de exploração e produção (E&P), por exemplo, estudos petrofísicos são intensivamente empregados com o objetivo de adensar o conhecimento das heterogeneidades internas e a distribuição de fases fluidas no reservatório. Com isso, torna-se possível delimitar e estimar reservas, determinando, inclusive, a quantidade de óleo *in place* (Soares, 2011).

O principal benefício obtido com a realização de um estudo petrofísico é a melhoria no entendimento de como determinadas propriedades físicas das rochas afetam as medidas geofísicas.

Existem muitas variações de métodos e equipamentos empregados para investigar as propriedades físicas das rochas. O uso das técnicas de perfilagem geofísica permite estimar diferentes parâmetros petrofísicos, principalmente radioatividade natural e induzida, resistividade e condutividade elétrica, porosidade, densidade e velocidade de propagação do som nas rochas (ondas sísmicas).

As ondas sísmicas são pacotes de energia de deformação elástica que se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica, um exemplo de propagação dessas ondas é o terremoto. As fontes apropriadas para levantamentos sísmicos comumente geram trens de onda de curta duração, conhecidos como pulsos, que contêm uma ampla gama de frequências (Kearey, 2009).

As ondas sísmicas de mais importância na indústria petrolífera são as ondas P e S também denominadas de ondas de corpo propagam-se através

do volume de um sólido elástico e podem ser de dois tipos: As ondas compressoriais ou longitudinais, (primárias ou ondas P), que se propagam por deformação uniaxial (compressão e expansão) na direção de propagação da onda. E as ondas de cisalhamento ou transversal (secundária ou ondas S) que se propagam por meio de um cisalhamento na direção perpendicular à direção de propagação da onda.

Os movimentos das partículas individuais envolvem oscilação, ao redor de um ponto fixo, num plano perpendicular à direção de propagação da onda. Se todas as oscilações de partículas estão contidas num mesmo plano, a onda de cisalhamento é denominada plano-polarizada.

O conceito de sistema linear é de fundamental importância para o método sísmico, particularmente nos processos de filtragem. Os sistemas lineares possuem propriedades e uma delas é que independem do tempo, se os sinais submetidos a um sistema linear forem deslocados de acordo com um determinado intervalo de tempo, os sinais obtidos serão deslocados de acordo com o mesmo intervalo (Rosa, 2010).

A velocidade de propagação de uma dada onda de corpo num material homogêneo, isotrópico, é dada por (Telford, 1990):  $v = [\text{módulo elástico apropriado do material}]^{1/2} / \text{densidade}$ .

Dessa forma o estudo da Física de Rochas relaciona as propriedades físicas das rochas e as medidas ou quantidades geofísicas que são influenciadas por tais propriedades.

No Brasil o estudo de propriedades petrofísicas das rochas iniciou na década de 70. O objetivo de medir as velocidades nas rochas em laboratório é a possibilidade de controlar as condições à qual a rocha é submetida e simular a situação física na qual ela se encontrava no campo.

As propriedades sísmicas são afetadas de maneira complexa por muitos fatores, como pressão, temperatura, saturação, tipo de fluido, porosidade, tipo de poro etc. Esses fatores são frequentemente inter-relacionados ou acoplados de uma maneira que muitos também mudam quando um fator muda. O efeito dessas mudanças nos dados sísmicos pode ser aditivo ou subtrativo. Como resultado, a investigação do efeito da variação de um único parâmetro enquanto se fixa outros torna-se imperativa na compreensão das aplicações da física das rochas às interpretações sísmicas (Wang, 2001).

## DETALHAMENTO DO CASO

O objetivo geral deste estudo é identificar as propriedades elásticas presentes em rochas reservatório através da análise da física das rochas, enquanto os objetivos específicos envolvem a seleção dos tipos de rochas reservatório para estudo e análise, a definição dos parâmetros dos equipamentos para medição de velocidade, a relação entre as velocidades obtidas e a porosidade das rochas, a identificação das características das rochas reservatório analisadas, e a análise dos dados obtidos em comparação com a literatura especializada.

A primeira etapa foi a pesquisa bibliográfica para a identificação das metodologias utilizadas para estudo e análise de física das rochas com foco na propriedade petrofísica da elasticidade.

A etapa seguinte, a aplicação da metodologia identificada na pesquisa bibliográfica, para este estudo optou-se pela metodologia de Wangy (2001), que realiza a análise e o estudo das rochas a partir da litologia, densidade, textura e velocidade das ondas sísmicas.

A terceira etapa foi a escolha das amostras de rochas para aplicação das etapas de análise e estudo. Para o desenvolvimento do projeto foram selecionados dois tipos de rochas: uma amostra de carbonato (da Formação Itaituba) e outra de folhelho (da Formação Manacapuru). Também foram utilizados sedimentos inconsolidados (areia de granulometria variando de média a fina da Formação Alter do Chão).

A quarta etapa foi a análise visual das amostras de rocha a fim de identificar suas características físicas como: coloração, tamanho dos grãos e possibilidade da presença de poros.

A quinta etapa foi a utilização de um sensor para análise das velocidades sísmicas nas amostras.

E por fim, a interpretação dos resultados e a comparação com a literatura para definição das características elásticas presentes nas amostras de rochas selecionadas e a elaboração do relatório final.

## DISCUSSÃO

As rochas sedimentares são um dos principais tipos de rochas na crosta terrestre e são formadas pela deposição e compactação de sedimentos ao longo do tempo. Duas categorias importantes de rochas sedimentares são os folhelhos (sedimentares detríticos) e as rochas carbonáticas (químicas). A escolha de duas amostras rochas com essas características definidas na literatura se deu em virtude da disponibilidade no mostruário do Departamento de Geologia da UFAM que cedeu as mesmas para elaboração do projeto.

Os folhelhos são compostos principalmente por partículas minerais, incluindo argila, silte e areia muito fina. Eles também podem conter pequenas quantidades de matéria orgânica, são formados pela deposição lenta de partículas minerais em ambientes sedimentares, como lagos, rios, oceanos e áreas costeiras. As partículas minerais são transportadas pela água ou pelo vento e se acumulam gradualmente no fundo desses corpos de água, frequentemente exibem camadas ou laminações devido à deposição sequencial de sedimentos ao longo do tempo, em algumas bacias sedimentares, os folhelhos contêm matéria orgânica suficiente para gerar petróleo e gás natural ao longo do tempo, tornando-os importantes para a indústria de energia.

As rochas carbonáticas são compostas principalmente por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O mineral mais comum encontrado nessas rochas é a calcita. Elas se formam principalmente a partir da acumulação de detritos carbonáticos, como fragmentos de conchas, recifes de coral, algas calcárias e precipitação química de carbonato de cálcio a partir de água rica em cálcio. As rochas carbonáticas também são conhecidas por preservar fósseis, muitas vezes de organismos marinhos, como corais, moluscos e crinoides. As amostras selecionadas são observadas na Figura 1 abaixo:



**Figura 1** - Amostras de Rochas sedimentares: folhelho e carbonato, respectivamente.



**Fonte:** Do autor (2023).

Para o estudo e análise das características físicas das rochas, o calcário apresenta a maior relação  $V_p/V_s$  (velocidade da onda P pela Velocidade da onda S).

As areias não consolidadas rasas podem ter  $V_p/V_s$  muito altos devido a contatos de grãos irregulares, que é o caso das amostras de areia inconsolidadas. Mas uma vez que os grãos entram em contato uns com os outros sob pressão, as areias não consolidadas normalmente apresentam relações  $V_p/V_s$  mais baixas do que os carbonatos. A diferença da razão  $V_p/V_s$ , portanto, fornece uma ferramenta para discriminação de litologia. Para uma melhor relação seria necessário a medição de temperatura, o que não foi possível no desenvolvimento deste projeto.

Os folhelhos são considerados rochas selantes de reservatório que possuem uma ampla faixa de velocidades e impedâncias. No entanto, os folhelhos sempre têm relações  $V_p/V_s$  mais altas do que as areias do reservatório. Como resultado, quando o folhelho e as areias do reservatório têm impedâncias de onda P semelhantes, suas impedâncias S são diferentes.

Nos testes com as amostras de rochas e o sensor montado a partir do Arduino para identificarmos as velocidades foram realizados os cálculos de velocidades considerando 3 distâncias: de 5 cm, 10 cm e 15 cm com a identificação do tempo de propagação em milissegundos. Para melhor visualização dos resultados foi montada a Tabela 1 onde consta o tempo e a distância para cada amostra de rochas. Nesta etapa não foram consideradas as areias inconsolidadas em virtude de os testes iniciais com o sensor nessas amostras não terem um bom resultado de resposta.

**Tabela 1** - Tempo e distância das rochas adquiridos com o módulo ultrassônico.

| Rocha     | D1(cm) | T1(ms) | D2(cm) | T2(ms) | D3(cm) | T3(ms) |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Carbonato | 5,07   | 280    | 10,03  | 554    | 15,01  | 829    |
| Folhelho  | 5,07   | 709    | 10,03  | 1402   | 15,01  | 2098   |

**Fonte:** Do autor (2023).

**Figura 2** - Teste nas rochas como sensor ultrassônico.



**Fonte:** Do autor (2023).

A partir dos resultados das distâncias e tempo de propagação da onda medidos com o sensor ultrassônico para as duas amostras de rocha foram possíveis calcular a estimativa de velocidade das ondas para cada tipo de amostra utilizando a seguinte equação:

$$V = \frac{L}{t - t_{delay}}, \quad (1)$$

Onde, L é a distância percorrida pela onda; t é o seu tempo de primeira chegada e; t<sub>delay</sub> é o atraso intrínseco existentes nos transdutores que, neste caso, é igual a 0.14μs.

A equação (1) é definida pelo próprio sensor ultrassônico em suas definições de uso. Dessa forma adquiriu-se a velocidade estimada do carbonato em 1812 ms<sup>-1</sup> e no folhelho de 715 ms<sup>-1</sup>. Com isso, o carbonato apresenta uma velocidade de propagação maior que a do folhelho por influências dimensionais como altura da rocha facilitando a devolução mais rápida para o sensor receptor. Na literatura encontra-se que a variação média de velocidade do folhelho é de 2000 ms<sup>-1</sup> e 6000 ms<sup>-1</sup> e rocha carbonática de 3500 ms<sup>-1</sup> e 6500 ms<sup>-1</sup>.

Tendo a velocidade da onda P conhecida podemos identificar os parâmetros elásticos como o módulo de onda compressional da rocha através da equação (2):

$$M = \rho \cdot Vp^{-2} \quad (2)$$

Onde, M é o módulo de onda compressional, definido como relação entre tensão e deformação em um estado de deformação uniaxial;  $\rho$  é a densidade de cada rocha.

Na literatura temos que a densidade do folhelho é  $2.580 \text{ kg m}^{-3}$  e carbonato  $2.860 \text{ kg m}^{-3}$ , com isso obtivemos o resultado do módulo de onda compressional das rochas sendo  $5,59 \times 10^{-3}$  e  $7,85 \times 10^{-4}$  respectivamente.

Na equação (3) podemos obter o módulo volumétrico compressional, definido como a relação entre tensão hidrostática e deformação volumétrica:

$$M = \rho \cdot Vp^{-2}$$
$$k = \rho \left( V \frac{2}{p} - \frac{4}{3} V \frac{2}{s} \right) \quad (3)$$

De acordo com a literatura, a velocidade de onda de cisalhamento ( $V_s$ ) do folhelho é  $1500 \text{ ms}^{-1}$  e do carbonato  $3000 \text{ ms}^{-1}$ , com a equação tivemos o resultado de 13GPa e 93GPa.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As velocidades das propriedades elásticas das rochas estão relacionadas com a capacidade das rochas de propagar ondas mecânicas, como ondas sísmicas, através delas. Essas velocidades são importantes em diversas aplicações geofísicas, pois fornecem informações valiosas sobre a composição, densidade e estado de tensão das rochas subsuperficiais.

O estudo com o sensor ultrassônico auxiliou na caracterização das rochas, a partir da velocidade de propagação, mas devido às amostras de rochas terem dimensões diferentes e apenas um sensor ultrassônico não foi suficiente para identificar o processo em vários ângulos e sentidos diferentes.

A amostra de carbonato por possuir uma altura maior fez com que o sensor adquirisse leitura que favoreceu uma velocidade de propagação maior

do que o folhelho, isso pode ser observado pela distância que é a mesma e o tempo de propagação serem diferentes.

Os resultados esperados de acordo com a literatura era a variação média de velocidade do folhelho ser de  $2.000\text{ ms}^{-1}$  e  $6.000\text{ ms}^{-1}$  e rocha carbonática de  $3.500\text{ ms}^{-1}$  e  $6.500\text{ ms}^{-1}$ , e foi encontrado valores abaixo dessa média, sendo assim, podemos concluir que as velocidades encontradas no experimento com o sensor ultrassônico não correspondem com a literatura.

Para minimizar a diferença de valores adquiridos com o sensor, sugere-se que sejam realizados novos experimentos utilizando pelo menos dois sensores, um onde seja possível vedar o receptor e manter a fonte (que gera a energia) e o outro onde seja possível vedar a fonte e manter o receptor. Talvez dessa forma seja possível a aquisição de dados mais próximos aos encontrados na literatura.

## Agradecimentos

Ao Programa de Iniciação Científica da Universidade Federal do Amazonas (2022-2023) PIBIC UFAM pelo apoio no desenvolvimento do projeto.

## REFERÊNCIAS

AMINZADEH, F.; DASGUPTA, S. **Geofísica para engenheiros de petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2015. p. 304. Série Engenharia de Petróleo.

ENTREVISTA. José Agnelo Soares *et al.* Stael: Propriedades Físicas das Rochas. SBGf. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica**, v. 1, 2011.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de textos, 2009. p. 438.

ROSA, A. **Análise do Sinal Sísmico**. 1. ed. Rio de Janeiro: SBGF, 2010.

SILVEIRA, J.; SANTOS, L.; FIGUEIREDO, J.; COSTA, L. **Análise ultrassônica de meios ortorrômbicos sintéticos**. Pará: SBGf, 2018. Disponível em: <[https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded\\_abstracts/VIII\\_SimBgf/An%C3%A1lise%20ultrass%C3%B4nica%20de%20meios%20ortorr%C3%B4mbicos%20sint%C3%A9ticos.pdf](https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/VIII_SimBgf/An%C3%A1lise%20ultrass%C3%B4nica%20de%20meios%20ortorr%C3%B4mbicos%20sint%C3%A9ticos.pdf)>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SCHÖN, J. **Propriedades físicas das rochas aplicadas à engenharia de petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2014.

TELFORD, W. M. **Applied geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

WANG, Z. Fundamentals of seismic rock physics. **Geophysics**, v. 66, n. 2, p. 398-412, mar./apr. 2001 .

VASQUEZ, G.; JUSTEN, J.; MORSCHBACHER, M. Aplicações da Física de Rochas na Exploração e Produção de Petróleo - Artigo Técnico. SBGf. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica**, v. 1, 2011.

## **OPALAS DO BRASIL: REVISÃO DOS ASPECTOS MINERALÓGICOS, QUÍMICOS E GEMOLÓGICOS**

**Maria do Carmo Santos da Silva**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Rafaela de Aquino Rodrigues**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Naedja Vasconcelos Pontes**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Francielson da Silva Barbosa**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Ijan de Carvalho Silva**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Vinícius Igor Albuquerque Batista de Araújo**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Talita Fernanda Carvalho Gentil**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

**Herdivânia Pires de Souza**

Universidade Federal do Ceará(UFC)

**Maria Jarlene Silva**

Instituto Federal do Piauí (IFPI)

# RESUMO

Este trabalho trata-se de um estudo cujo objetivo é discorrer sobre aspectos gerais do mineral de Opala no Brasil. A metodologia empregada foi caracterizada pela abordagem integrativa, tendo como principal técnica o método de revisão bibliográfica. A coleta de dados deu-se com busca sistematizada de artigos e materiais publicados na base de dados SciELO, Periódicos CAPES e Google Acadêmico. O levantamento foi realizado a partir dos descritores: opala, opala mineralogia e opala geologia. Como resultado foi possível perceber que há pouquíssimos trabalhos focados nos minerais de opala do Brasil, onde sua maioria está concentrado nos estados do Rio Grande do Sul, Bahia e principalmente Piauí. Entre as fontes investigadas, as análises preponderantes se concentram nos dados gemológicos, DRX, FRX, densidade, índice de refração e morfologia. Foi possível perceber uma grande variedade de opalas quanto as suas cores (branca, vermelha, azul, amarela, castanha, verde, laranja, e o tipo mais raro sendo colorido apresentando um jogo de cores). Na composição mineralógica, foi possível detectar em algumas opalas o sulfato de prata, halita, silvita, calcita/dolomita, siderita, cristobalita, tridimita, calcedônia, paligorskita e serpentina. Na composição química, mostrou predominância de  $\text{SiO}_2$ . Há presença considerável em algumas opalas de alumínio, ferro, níquel, cromo e cálcio. Quanto as análises de índice de refração e densidade os resultados corroboram com os dados da literatura, com exceção da opala azul. Logo, foi possível concluir que ainda são necessários mais estudos sobre os minerais de opala do Brasil e que o Estado do Piauí possui uma maior riqueza de dados, detalhando também questões ambientais e socioeconômica, além de ser o único que possui APLs.

**Palavras-chave:** Química, Minerais, Gemologia.

## INTRODUÇÃO

A opala é um polimorfo da sílica hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) e é classificada quanto ao seu grau de cristalinidade, sendo reconhecida como uma fase intermediária entre a sílica amorfa, biogênica e a calcedônia, com o teor de água variando de 1 a 20% (Brum *et al.*, 2009; Giuliano, 2015; Fröhlich, 2020). A opala é classificada quanto ao seu grau de cristalinidade, sendo que podem variar de amorfas a mais cristalinas (opalas – CT, onde C é referente a cristobalita e T a tridimita) (Miceli; Schnellhath, 2013).

Quanto a sua densidade, ela pode variar entre 1,98 a 2,20 g/cm<sup>3</sup>. Algumas opalas, extremamente porosas como a hidrofana, têm a obtenção de sua densidade bastante dificultada, já que um dos passos para a obtenção deste dado é a imersão da opala na água, que infiltra nos poros mascarando o valor obtido (Webster, 1983).

Quanto as propriedades físicas, a fratura é do tipo concoidal, possui uma dureza variando de 5-6, brilho vítreo; frequentemente algo resinoso. Contém uma variedade de cores incolor, branco, tons claros de amarelo, vermelho, marrom, verde, cinza e azul. As cores mais escuras resultam da presença de impurezas. Geralmente com um efeito leitoso ou “opalescente” e pode apresentar um belo jogo de cores, tanto transparente a translúcida (Klein; Dutrow, 2012).

Os autores Klein e Dutrow (2012) citam algumas variedades da opala:

- a) Opala comum. Branco leitoso, amarelo, verde, vermelho etc., sem as reflexões internas.
- b) Hialita. Opala limpa e incolor com uma superfície globular ou botrioi-de.
- c) Geiserita ou sínter silicoso. Opala depositada por fontes quentes e gêiseres. Encontrada sobre os gêiseres no Parque Nacional de Yellowstone, Wyoming.
- d) Madeira opalizada. Madeira fóssil com opala substituindo a celulose.
- e) Diatomito. Depósitos finamente granulados, com aparência semelhante a giz. Formado pela decantação a partir da superfície e a acumulação nos fundos oceânicos de carapaças silicosas de diatomáceas. Também conhecido como terra-de-diatomáceas ou terra-de-infusórios.



A exploração das gemas no país apresenta grande importância para a economia brasileira, onde torna-se necessário a caracterização gemológica com objetivo de avaliar os minerais para a comercialização (Machado; Schnellrath; Queiroz, 2020).

A opala constitui o depósito gemológico mais importante dentro da Bacia do Parnaíba, sendo o Município de Pedro II, por muito tempo, o único produtor de opala preciosa do Brasil (Vidal *et al.*, 2018).

As principais ocorrências de opalas no Brasil estão situadas nos estados do Piauí, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Bahia e Ceará. Mundialmente, as principais ocorrências estão situadas nos países como Austrália, Peru, México, Iugoslávia, Somália, Madagascar, EUA, França, Turquia, Sérvia, Cazaquistão, África, Espanha e Hungria (Pimentel, 2007).

**Figura 1** - A - Opala azul provenientes do Rio Grande do Sul, município do Salto do Jacuí; B- Opala nobre tipo white opal exibindo padrão bandado de Pedro II - PI; C - Opala nobre tipo white opal exibindo padrão bandado de Pedro II - PI; D - Amostras brutas e lapidadas de Opala de Fogo e Ágata Cornalina do estado da Bahia; E - Opala de fogo do município Lageado - RS; F - Opala mostarda do município de Lageado - RS.



**Fonte:** A - (Miceli; Schnellrath, 2013); B- (CPRM, 2015); C - (CPRM, 2015); D - (Silva *et al.*, 2022); E - (Pimentel, 2007); F - (Pimentel, 2007).

## **METODOLOGIA**

A coleta de dados deste estudo seguiu a metodologia delineada por Yin (2005), iniciando-se com a pesquisa de literatura relacionada ao tema “mineral opala”. A busca por este material foi conduzida utilizando-se recursos disponíveis em plataformas de revistas científicas e bases de dados online, tais como SciELO, Periódicos CAPES e Google Acadêmico.

Foram empregadas as seguintes palavras-chave na busca de material: “opala”, “opala mineralogia”, “opala geologia”, “opala gemologia” e “opala química mineral”. Através deste método de busca, foi possível identificar uma variedade de trabalhos relacionados ao tema da pesquisa (um total de 867 trabalhos, incluindo monografias, dissertações, teses, artigos e livros). Para este estudo, foram selecionados 7 artigos, os quais apresentavam maior relevância para o tema em questão. Os demais foram excluídos com base em critérios como a data de publicação anterior ao ano de 2000 e a falta de alinhamento temático com a proposta da pesquisa.

Os parâmetros de seleção empregados para o material utilizado neste estudo foram fundamentados na inclusão daqueles que abordavam referências aos seguintes temas: a) aspectos geológicos das opalas; b) aspectos químicos e mineralógicos das opalas; e c) aspectos gemológicos das opalas no Brasil. Nesse contexto, os trabalhos escolhidos para esta pesquisa foram submetidos a uma análise detalhada, estudo e agrupamento conforme as categorias mencionadas anteriormente.

## **OPALAS NO BRASIL**

### **Opala do Piauí**

O Piauí é o estado brasileiro onde se encontram as mais importantes jazidas de opala, situadas nos arredores dos municípios de Pedro II e Buriti dos Montes, estando estes depósitos dentro da Bacia do Parnaíba. Pedro II, município do norte do Piauí, é conhecido internacionalmente por seu artesanato, suas redes e a opala, que tem as cores do arco-íris. Além de ser bela e rara, a opala

apresenta atrativo comercial, sendo explotada durante décadas essa região do Estado e em minas na Austrália (Vidal *et al.*, 2018).

Atualmente, a mineração de gemas no Piauí (assim como o setor mineral de forma geral) enfrenta alguns obstáculos para seu desenvolvimento. Entre estes, destacam-se a falta de uma política setorial que inclua mapeamento geológico e laboratórios de análise mineral, a precariedade da infraestrutura básica (rodovias, energia elétrica, comunicação etc.) e limitações institucionais dos órgãos públicos, como duplicidade de funções, demora para o licenciamento, excesso de taxas e o desconhecimento da legislação pelos técnicos do governo (Fundação Cepro, 2005).

O uso da opala em joias foi iniciado em 400 a.C. e seu valor depende do tamanho, da cor e de seu jogo de cores. Elas podem ser usadas tanto na confecção de joias, quanto de peças de artesanato. Em Pedro II, as primeiras lojas datam do final da década de 1980 e nessa época comercializavam apenas pedras brutas e lapidadas. As joias somente começaram a ser produzidas no município a partir do ano 2000. (Milanez; Puppim, 2009).

No estado do Piauí, estão as ocorrências de opala mais importantes do país. As qualidades gemológicas dessas opalas são equivalentes às famosas opalas australianas (Marques; Costa; Gomes, 2015).

Os pesquisadores Machado, Schnellrath e Queiroz (2020) analisaram 11 amostras brutas provenientes das localidades de Riacho do Meio e Tranqueira do município de Buriti dos Montes. Foram realizados ensaios e análises quanto a determinação da cor do mineral, sua densidade, índice de refração, espectrometria Raman, Fluorescência de Raio-X (FRX) e Difração de Raio-X (DRX). As densidades das amostras variaram de 1,892 – 2,092 g/cm<sup>3</sup>, onde apenas duas amostras apresentaram valores inferiores a literatura, que segundo Lazzarelli (2002), a densidade da opala deve variar de 1,97 a 2,22 g/cm<sup>3</sup>. Os autores interpretaram esses valores de densidades inferiores como um reflexo da interferência do craqueamento encontrado nestas amostras. Os resultados dos índices de refração variaram entre 1,424 - 1,450, apresentando um comportamento esperado de acordo com os padrões estabelecidos por Lazzarelli (2002).

Na Espectroscopia Raman os resultados adquiridos apresentaram espectros com bandas centradas em torno de 350 cm<sup>-1</sup>, com arranjo do tipo tridimita. Apenas duas amostras não apresentaram picos definidos, sugerindo

menor grau de cristalinidade e possível estágio inicial de formação mineralógica. As análises químicas por fluorescência de Raios - X (FRX) mostraram a presença predominante de  $\text{SiO}_2$  em todas as amostras, seguida do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ . Uma das amostras (BM9) exibiu grande concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5,25%), seguido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8,30%), e a menor concentração de  $\text{SiO}_2$  (79,89%). Nas amostras submetidas à análise cristalográfica por difração de raios-X (DRX), observou-se a partir dos difratogramas em todas as amostras a presença de quartzo, exceto duas amostras (BM1 e BM5). E, em uma amostra (BM9) foi detectado caulinita e hematita. Quanto as características gemológicas, foram observadas a identificação da coloração, transparência e localidade das amostras. As opalas de Buriti dos Montes constituem uma diversidade de cores, variando de branca, amarela, laranja e vermelha. Quanto a diafaneidade de modo geral é opaca, com algumas amostras translúcidas.

Os autores Milanez e Puppim (2009) propuseram em seu trabalho análises voltadas para políticas públicas em Arranjos Produtivos Locais (APLs) de opalas em Pedro II, a qual tem importante papel em trazer melhoria dentro de pequenos garimpos e minas de gemas no Brasil, desde que integrem questões ambientais e sociais voltadas ao desenvolvimento econômico. Uma observação de interesse no artigo são os aspectos ambientais, que apesar dos garimpos da cooperativa e de alguns garimpos autônomos terem obtido as licenças ambientais, ainda ocorrem práticas que não estão em conformidade com a regulamentação. Dois aspectos se mostram relevantes: o impacto sobre os recursos hídricos e a recuperação das áreas degradadas. Em um período recente, ocorreram situações em que os resíduos da atividade mineradora não foram descartados de maneira apropriada, sendo carreado para o riacho, trazendo prejuízos para as populações rurais que utilizam do recurso hídrico. Quanto a recuperação das áreas degradadas, atualmente, o rejeito da mina de Boi Morto vem sendo usado para recompor as cavas abertas e vem sendo estudada a utilização desse material como agregado para a construção civil.

Marques, da Costa e Gomes (2015) buscaram discutir a morfologia, composição mineralógica e química de inclusões sólidas, e sua interação com as opalas alaranjadas. Para alcançar os objetivos propostos foram utilizadas 146 amostras de opalas distribuídas em 20 lotes, com média de aproximadamente 7 peças cada. As opalas e suas inclusões foram caracterizadas quanto à sua

morfologia, micromorfologia e composições mineralógicas. As opalas de Buriti dos Montes foram classificadas como semitransparentes a translúcidas e possuindo uma ampla gama de tonalidades, do amarelo claro ao vermelho acastanhado. Durante a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), os autores, observaram que os interstícios entre as esferas de sílica que formam a opala foram parcialmente preenchidos por cimento de opala, mascarando o típico aspecto subesferulítico, dando origem a uma feição quase maciça. Os diâmetros das esferas variam de 150 a 500 nm.

No que diz respeito à morfologia das inclusões sólidas, estas manifestam-se em diversas formas: bolhas (correspondem a cavidades arredondadas com diâmetro entre 5 a 20 mm e são branco-creme ou acastanhadas); bolhas com película branca (apresentam uma parede interna da cavidade, enquanto outras estão completamente vazias); bolhas por fraturas de tensão (possuem um aspecto externo de microcraquelões e preenchidas por sílica opalina); intrusões botrioidais (são agregados arenosos da rocha hospedeira com tendência geral ao arredondamento, sua cor varia do branco ao creme e do marrom aos tons avermelhados); intrusões dendríticas (são escuras, sendo geralmente marrons, e estão associadas a inclusões botrioides, bolhas e fraturas); intrusões tabulares ou lamelares (são grupos de lamelas paralelas ou plaquetas de material arenoso); inclusões helicíticas ou teias de aranha (são formados por minúsculas agulhas marrons, irregulares, semelhantes a fios de cabelo, constituindo em conjunto um arranjo semelhante a uma teia de aranha) e frequentemente inclusões de quartzo. A análise mineralógica por DRX revelou diferentes graus de ordem-desordem em opalas alaranjadas, desde opalas amorfas (opala-A) até opalas cristobalita-tridimita (opala-CT). Quimicamente as opalas de Buriti dos Montes são compostas principalmente por  $\text{SiO}_2$  (90,14% em média) e 8,03% de água, 1,32%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,2%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## **Opala do Rio Grande do Sul**

Os depósitos de opala estão associados às rochas vulcânicas, tanto de composição ácida como básica, da Formação Serra Geral, do Cretáceo, da Bacia do Paraná.

A opala do Rio Grande do Sul (RS) é microcristalina, com uma variação significativa no grau de cristalinidade (Brum; Juchem, 2014), sendo identificada como tipo cristobalita (opala – C) e cristobalita-tridimita (opala – CT). Giuliano (2015) buscou dar continuidade aos trabalhos realizados em amostras de opala do RS, através da caracterização da textura das fases cristobalita e tridimita e a localização de elementos traço nas amostras de opala, utilizando principalmente a microscopia eletrônica de transmissão, juntamente com o apoio de análises de DRX e MEV. Duas amostras de opala do tipo CT, uma branca e outra vermelha, foram analisadas por DRX, MEV e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET). No caso da DRX foi possível identificar as fases cristalinas mostrando que ambas eram amostras de opala do tipo CT. Através do uso de difratogramas foram analisados com o *software X'pert*, identificando as fases tridimita e cristobalita pelas fichas do *powder diffraction file*. Os fragmentos maciços de opala branca e de opala vermelha foram analisados por DRX em ângulo de incidência rasante.

Comparando os dois difratogramas na região de interesse, mostrando que os picos da opala vermelha são mais largos que o da opala branca, portanto se concluiu que a opala branca possui mais alta do que a opala vermelha. Já as análises por MEV-EDS, as imagens em escala de microns e microanálises químicas foram realizadas nas duas amostras de opala (branca e vermelha), com a utilização conjunta das técnicas de MEV e do sistema EDS de janela ultra-fina. Os resultados revelaram inclusões micrométricas e submicrométricas com vários tipos de minerais presentes nas inclusões das duas amostras.

Estas inclusões são monominerálicas e poliminerálicas. Na opala branca foi identificada com a presença de prata, tanto nas intrusões de menor quanto nas de maior tamanho, geralmente associada à presença de enxofre. Na amostra branca foram encontradas associações de elementos que permitem supor a presença de sulfato de prata (prata e enxofre), halita e silvita (sódio/potássio e cloro), calcita/dolomita (cálcio/magnésio e intenso sinal de carbono), siderita e calcita (Fe, Ca e intenso sinal de C). O teor de Al na matriz da opala branca foi muito baixo (não detectado na maioria das análises), porém em vários precipitados se constatou a presença deste elemento. Na opala vermelha se constatou a presença de alumínio sistematicamente na matriz. Os minerais presentes, compatíveis com a presença dos elementos determinados pelo EDS, foram os

carbonatos (calcita, dolomita, cerussita e siderita), além de cromita e cloretos de sódio e potássio.

Miceli e Schnellhath (2013) propuseram uma nova metodologia para a distinção entre opalas - C e cristobalita. Foram utilizadas na pesquisa opalas azuis do município de Jacuí. Através da análise realizada pelo polariscópio o material apresentou dupla refração anômala e medida do índice de refração revelou um valor de aproximadamente (1,473). A medição do peso específico (densidade) resultou em valores de até 2,25 g/cm<sup>3</sup>. Tanto o valor do índice de refração, quanto da densidade são os maiores já registrados para esse tipo de material de origem brasileira. A fim de verificar o grau de cristalinidade do material, foi realizada uma análise de Difração de Raios X, resultando em um difratograma característico de cristobalita. Ao analisar os gráficos dos estudos termogravimétricos (DTA/DTG) os autores constataram que existem duas descontinuidades evidentes. A 39°C há a perda de água contida nos interstícios do material, visto que este é um agregado, num processo semelhante à desidratação; e a 266°C ocorre justamente a transição cristalográfica. As características do espectro RAMAN das amostras estudadas mostraram-se típicas de cristobalita, com picos muito bem definidos e situados em 114, 231 e 419 cm<sup>-1</sup> (FWHM a 23 cm<sup>-1</sup>).

## **Opala da Bahia**

Silva *et al.* (2022) investigaram a opala de fogo da Bahia, cujas propriedades físicas observadas demonstraram hábito amorfo, fratura conchoidal e dureza 5, sendo a amostra bruta testada com canivete e com os minerais apatita (dureza 5) e ortoclásio (dureza 6). As espécies têm densidade relativa de 1,9 g/cm<sup>3</sup>, com brilho vítreo com exceção da Gota A e Oval A que possuem brilho resinoso, observadas na figura 2. A cor varia entre amarelo e castanho, não havendo presença de inclusões e clivagem. Além disso percebe-se que o cristal em luz branca é translúcido com reflexos intensos e internos que vão do alaranjado ao vermelho. A presença de cores mais escuras é em consequência de impurezas.

**Figura 2** - Imagem ilustrativa da amostra bruta e lapidada da opala de fogo da Bahia.



Fonte: Silva *et al.*, 2022.

A pesquisadora Rocha (2014) estudou amostras de opala verde proveniente da cidade Boa Nova (BA). Em suas análises observou-se que as amostras apresentaram índices de refração entre 1,440 a 1,454 e densidades entre 2,05 a 2,12 g/cm<sup>3</sup>. Esses resultados são compatíveis com as amostras avaliadas por Cassedanne (1975), que, em média, apresentam índice de refração de 1,445 e densidade de 2,07 g/cm<sup>3</sup>.

Na análise química foram detectados elementos como o ferro, o níquel e o cromo como fatores responsáveis pela cor, onde a opala escura deve sua cor a elevados teores de níquel, além de altos teores, quase equivalentes, de cromo e ferro (mais altos que nas outras opalas); a opala “verde maçã” deve sua cor principalmente à presença de níquel, já que os valores de cromo e ferro são muito baixos; a opala verde amarelada deve sua cor à presença de ferro e níquel em proporções semelhantes, sendo que o cromo não foi detectado. No ensaio de Difração de Raios X, observou-se baixa cristalinidade associada aos picos de cristobalita e tridimita, indicada não apenas pela baixa intensidade dos respectivos picos, mas também por serem bem largos, confirmam a sua classificação em opalas do tipo CT. Vale destacar, ainda, a presença de picos que indicam a existência de outras fases minerais: calcedônia, paligorskita e serpentina. Na análise de MEV foi possível observar a presença de diversas fases como inclusões ou intercrescimento com a opala. São elas: calcedônia, filossilicatos diversos, dentre os quais destacamos a nontronita e a saponita/poligorskita, a cromita e faialita.



## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo foram significativos ao constatar que há uma escassez considerável de trabalhos dedicados aos minerais de opala do Brasil, onde sua maioria está concentrado nos estados do Rio Grande do Sul, Bahia e principalmente o Piauí. Grande parte dos trabalhos selecionados consideraram fatores importantes como: cor, brilho, dureza, composição química, análise cristalográfica, morfologia e dados gemológicos.

A maioria dos pesquisadores concluíram que as opalas estudadas apresentam características gemológicas compatíveis com os citados na literatura. Observou-se que a opala possui variedades de cores, a qual se diferenciam de acordo com os respectivos estados. No RS, as tonalidades variam de branca, vermelha e azul. Na BA, apresentam cores do tipo amarela, castanha e verde. No PI, as cores ocorrem no branco, amarelo, laranja, vermelho e do tipo raro sendo colorido apresentando um jogo de cores.

Quanto a composição química e mineralógica, no RS foi encontrado a presença de sulfato de prata (prata e enxofre), halita e silvita (sódio/potássio e cloro), calcita/dolomita (cálcio/magnésio e intenso sinal de carbono), siderita e calcita. Na opala vermelha se constatou a presença de alumínio sistematicamente na matriz. Os minerais presentes, compatíveis com a presença dos elementos determinados pelo EDS, foram os carbonatos (calcita, dolomita, cerussita e siderita), além de cromita e cloretos de sódio e potássio. Na BA, os elementos detectados foram ferro, níquel e cromo. Observou-se picos de cristobalita e tridimita, em adição, a presença de picos de outras fases minerais: calcedônia, paligorskita e serpentina. No PI, especificamente em Pedro II, mostrou a presença predominante de  $\text{SiO}_2$ , seguida do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$ . Somente uma amostra exibiu grande concentração de  $\text{F}_2\text{O}_3$  (5,25%), seguido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8,30%), e a menor concentração de  $\text{SiO}_2$  (79,89%). Em todas as amostras há presença de quartzo, exceto em duas. Em Buriti, a análise mineralógica revelou desde opalas amorfas (opala-A) até opalas cristobalita-tridimita (opala-CT). Quimicamente são compostas principalmente por  $\text{SiO}_2$  (90,14% em média) e 8,03% de água, 1,32%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,2%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Quanto as análises para identificar o índice de refração e densidade todos os autores alcançaram resultados que corroboram com a literatura,

com exceção da opala azul do RS que registrou os maiores resultados para esse tipo de material de origem brasileira. O estado do Piauí se destaca como o único a contar com um maior número de estudos detalhados sobre a opala, abrangendo tanto aspectos ambientais quanto socioeconômicos, além de ser o único a possuir Arranjos Produtivos Locais (APLs) relacionados a esse mineral.

## REFERÊNCIAS

- BRUM, T. M. M. *et al.* Opala no Rio Grande do Sul, Brasil. **Seminário sobre Design e Gemologia de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul**, 1.
- BRUM, T. M. M.; JUCHEM, P. L. Técnicas de identificação e certificação de gemas In: HINRICHS, R. (Org.). **Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014. p. 27-43.
- CASSEDANNE, J. P. L'opale verte de la fazenda Brejinho (Brésil). **Bull. A.F.G.**, 45, p. 6-7, 1975.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto avaliação dos depósitos de opalas de Pedro II**. Teresina: CPRM; Ed. CPRM, 2015. p. 88.
- FRÖHLICH, F. The opal-CT nanostructure. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 533, 2020.
- FUNDAÇÃO CEPRO. **Diagnóstico e diretrizes para o setor mineral do estado do Piauí**. Teresina: Fundação Centro de Pesquisas Econômicas e Sociais, 2005.
- GIULIANO, W. S. **Caracterização de opala do Rio Grande do Sul por MET, MEV e DRX**. 63p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- LAZZARELLI, H. N. **Blue Chart - Gem Identification**: Natural/ Treated / Synthetic / Imitation, 2002.
- MACHADO, D. V.; SCHENELLRATH, J.; QUEIROZ, J. P. C. Caracterização Mineralógica e Gemológica das Opalas de Buriti dos Montes – Piauí. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 2, p. 415-425, 2020. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo>>. Acesso em: 15 set. 2023.
- MARQUES, G. T.; COSTA, M. L. da; GOMES, E. R. Orange opals from Buriti dos Montes, Piauí: solid inclusions as genetic guides. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 68(1), p. 53-59, jan./mar. 2015.
- MICELI, R. S. D.; SCHNELLHATH, J. Nova metodologia para distinção entre opalas-C e cristobalita. **III Jornada do Programa de Capacitação Interna – CETEM**, 2013, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/998/1/20%20-%20Roberto%20Salvador%20Dias%20Miceli.pdf>>. Acesso em: 8 set. 2023.
- MILLANEZ, B.; PUPPIM, J. A. Ambiente, pessoas e labor: APLs além do desenvolvimento econômico na mineração de opalas em Pedro II, no Piauí. **Cadernos EBAPE.BR**, Rio de Janeiro, v. 7, p. 527-546, dez. 2009.

PIMENTEL, P. C. **Caracterização de opalas-CT coloridas de qualidade gema**. 45f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Geologia) – Centro de Ciências e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

ROCHA, L.R. **Caracterização mineralógica e gemológica das ocorrências de opala verde na região de Boa Nova, Bahia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, M. F. da. *et al.* Análise comparativa entre os minerais – gemas opala de fogo e ágata cornalina. OPEN SCIENCE RESEARCH VI. 1. São depósitos de opalas de Pedro II. **Informe de Recursos Minerais. Série Pedras Preciosas**, n. 8. Teresina, 2015.

VIDAL, F. W. H. *et al.* **As opalas de Pedro II no PIAUÍ e o arranjo produtivo local**. Série Rochas e Minerais Industriais, 23. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2018.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. p. 212.

WEBSTER, R. **Gems. Their Sources, descriptions and identifications**. 4. ed. England: Butterworth & Co Publishers, 1983.

# **SOBRE OS ORGANIZADORES**

## **Juliano Pizzano Ayoub**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Engenheiro de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário Campo Real. Especialista em Engenharia da Qualidade. Especialista em Engenharia de Produção. Especialista em Engenharia de Suprimentos. Especialista em Engenharia Geotécnica. Especialista em Meio Ambiente, Desenvolvimento e Sustentabilidade. Especialista em Gestão Ambiental. Especialista em Direito Ambiental. Especialista em Educação Ambiental. Especialista em Docência no Ensino Superior. Especialista em Gestão de Produção Industrial. Especialista em Engenharia Química. Mestre em Bioenergia pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Escritor e membro de conselho editorial. Tem experiência com gestão de pessoas, redução de custos, adequações às NRs, aplicação de ferramentas de Qualidade, certificações, auditorias, perícias e treinamentos. Possui também experiência em laboratório, análise, desenvolvimento de produtos e processos de isolantes termoacústicos minerais, inclusive atuando como Gerente de uma Fábrica de Lã de Rocha. Desde 2023 atua como Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho na Atlas Engenharia Ambiental. Consultor na Dgema Assessoria Industrial.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3534582408466846>

## **Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira**

Possui Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Possui Graduação interrompida em Engenharia Civil pela Faculdade Campo-Real. Possui Especialização em Estruturas de Concreto e Fundações pela Universidade Paranaense. Tem experiência no ramo de construção civil como proprietário de empresa e consultor. Atuou com elaboração e implantação de gestão ambiental, como PGRCC, técnicas e matéria prima sustentável. Ministrou palestras e cursos nas áreas de engenharia ambiental, civil, segurança, gestão empresarial e marketing. Pesquisador da engenharia, escritor e proprietário da Atlas. Atualmente atua na área comercial da Gesla Isolamentos Termoacústicos.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9482779378958000>

## **Fabrizio Hernandes de Freitas**

Geógrafo formado pela Universidade Estadual de Maringá (UEM, 2009), especialista em Gestão Ambiental pelo Centro Universitário Metropolitano de Maringá (2010,

## SOBRE OS ORGANIZADORES

UNIFAMMA), Mestre em Bioenergia (Área de Biocombustíveis, Departamento de Engenharia Química, UEM, 2020). Perito Judicial Ambiental cadastrado no Projudi - PROCESSO ELETRÔNICO DO JUDICIÁRIO DO PARANÁ E JUSTIÇA FEDERAL. Conhecimento técnico em Gestão e reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos, gestão urbana, acessibilidade, conforto térmico de ruas e avenidas, planejamento e estruturação de calçadas.

**Lattes:** <http://lattes.cnpq.br/9901799429644416>

# ÍNDICE REMISSIVO

## A

**Artisanal and Small-Scale Gold Mining:** 23, 24, 25, 26, 39, 42, 44

## D

**Degradación Ambiental:** 7, 8, 18

**Digitalización:** 8, 15, 19

## E

**Elasticidade:** 47, 50

## F

**Física:** 46, 47, 49, 50, 56

## G

**Gemologia:** 58, 61, 69

**Geophysical Prospecting:** 25

**Gold:** 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44

## M

**Metal Detecting:** 25, 27

**Minerais:** 48, 51, 58, 60, 65, 66, 67, 68, 69, 70

**Minería Aurífera:** 8

## Q

**Química:** 22, 45, 48, 51, 58, 61, 63, 67, 68

## R

**Rochas:** 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 64, 70

## S

**Sistemas de Información Geográfica:** 8

**Southern Espinhaço Range:** 24, 25, 26, 27, 28, 42



científica digital



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS

