

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

No. 57, Enero - Junio de 2025

ISSN 0120 - 3630

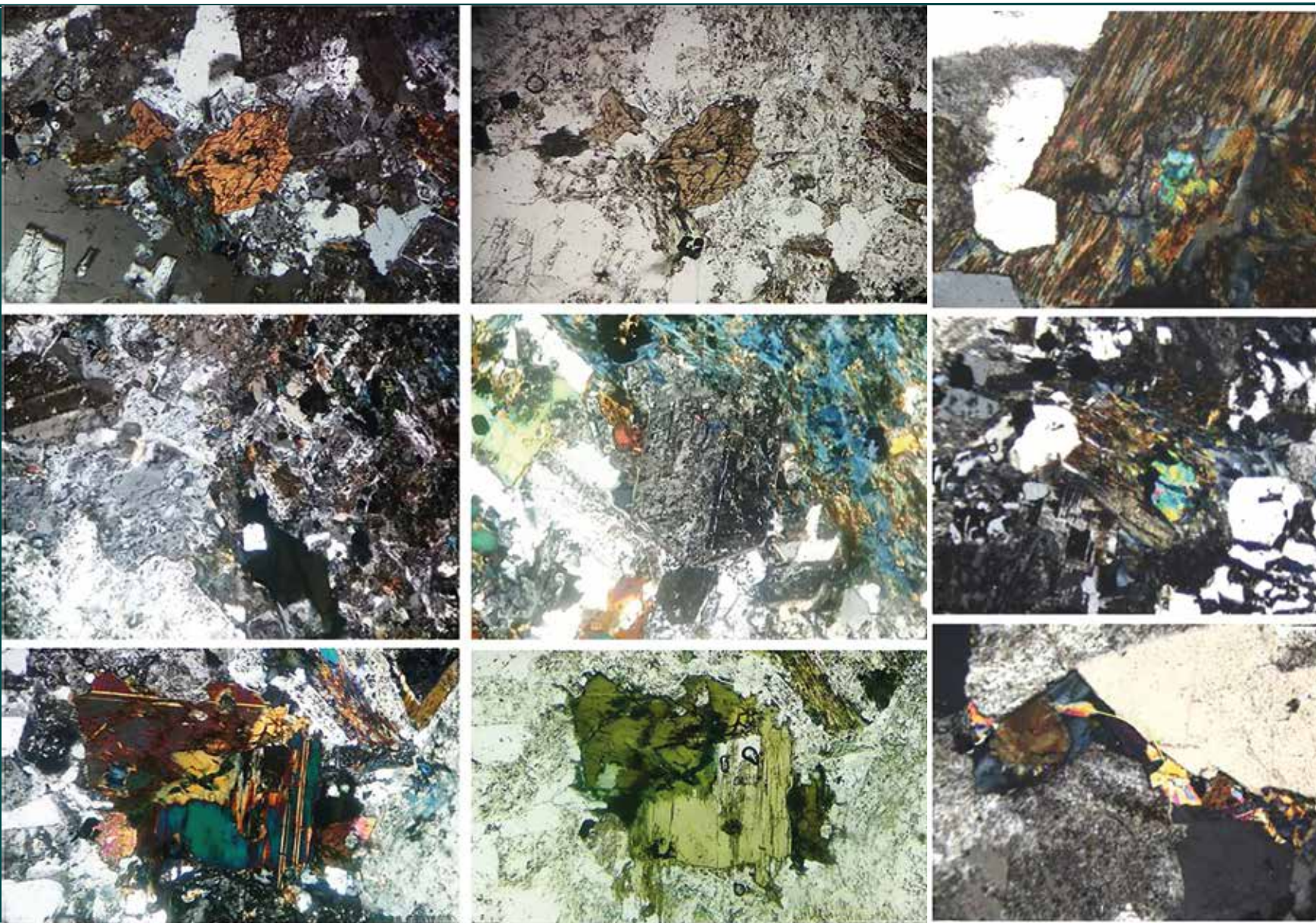


Imagen collage de artículo: Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo
(Lima – Perú); procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa

Facultad de Minas
Sede Medellín



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>

Número 57, Enero - Junio de 2025

Publicación de la Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
ISSN 0120 - 3630

Boletín de Ciencias de la Tierra es una publicación creada en 1978, en el Programa Curricular de Ingeniería Geológica, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La revista publicará artículos originales resultados de investigación en las diferentes áreas de las geociencias y pretende dinamizar la discusión científica en torno al conocimiento del territorio colombiano, sus recursos y restricciones. Se publicaran tanto artículos de análisis específicos como de interés regional, que promuevan el desarrollo de las Ciencias de la Tierra.

Boletín de Ciencias de la Tierra es una publicación dirigida a investigadores e interesados en las áreas de las geociencias y la ingeniería. Publica artículos sobre las siguientes áreas:

• Estratigrafía, sedimentología, estructura y evolución de cuencas	• Geología económica, metalogénesis, génesis y reservorios de hidrocarburos	• Geoquímica
• Geoquímica y geofísica	• Minería, mineralogía, metalurgia y extracción de recursos minerales	• Minería
• Vulcanología, petrología ígnea y metamórfica	• Paleontología, paleoclimatología, geología del Cuaternario y geoarqueología	• Metalurgia y extracción de recursos minerales
• Tectónica, modelamiento sísmico -tectónico y geodinámico	• Aplicaciones de software e inteligencia artificial en ciencias de la Tierra	• Recursos naturales y sostenibilidad
• Geomorfología, amenazas geológicas, geología ambiental, investigación de suelos, cambio climático y patrimonio geológico		• Recursos naturales y sostenibilidad
• Aprovechamiento y explotación de recursos minerales		• Hidrogeología, oceanografía y geotermia

Boletín de Ciencias de la Tierra publicará dos números en el año con editorial, artículos de investigación, ensayos, comunicaciones breves e imágenes diagnósticas. Los artículos enviados deberán ser siempre originales y no estar sometidos a otra publicación; todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros académicos de conocida idoneidad en el tema.

La orientación general para la presentación de artículos e información interesante se puede encontrar en la dirección electrónica:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/about/submissions#authorGuidelines>.

El correo electrónico de la revista es: rbct_med@unal.edu.co, Teléfono y Fax: (57-4) 425 53 43

Imágen de la carátula:

Imagen collage de artículo: Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Número 57, Enero - Junio de 2025
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
ISSN impreso: 0120 - 3630 ISSN en línea: 2357-3740

Periodicidad semestral: Enero - Junio y Julio - Diciembre
Tarifa Postal Reducida No. 2015-456 .
4-72 La Red Postal de Colombia, vence 31 de Dic. 2025

Carrera 80 No. 65 - 223
Facultad de Minas - Bloque M9 - Of.: 107
Medellín - Colombia
Teléfono: (57+4) 425 53 43
e-mail: rbct_med@unal.edu.co

Versión electrónica disponible en:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct>
<http://www.scielo.org.co/scielo.php>

Grupo Centro Editorial - Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD, Director
Mónica del Pilar Rada T., Coordinación Editorial
Catalina Cardona A., Asistente editorial
Manuela González C., Asistente editorial
Todográficas Ltda, Diagramación

© Copyright 2025. Universidad Nacional de Colombia

Se permite la reproducción total o parcial de textos con fines didácticos, siempre que se cite debidamente la fuente. A menos que se indique lo contrario.

Nota:

Todas las declaraciones, métodos, instrucciones e ideas son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente representan la visión de la Universidad Nacional de Colombia. El editor no se hace responsable de ninguna lesión y / o daño por el uso del contenido de esta revista. Los conceptos y opiniones expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores.

BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA Número 57, Enero - Junio de 2025

Es una edición de 100 ejemplares en papel y se terminó de imprimir en el mes de Junio de 2025
En Todográficas Ltda. Medellín - Colombia

Revista indexada en:

SCOPUS

Georef

SciELO - Scientific Electronic Library Online

Índice Actualidad Iberoamericana, del Instituto Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología de Chile.

Base de Datos Periódica de La Universidad Nacional Autónoma de México.

Redalyc, Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.

Emerging Sources Citation Index (ESCI) - Journal Citation Reports, Clarivate.

SE SOLICITA CANJE - EXCHANGE SOLICITED

Los pedidos de esta serie de publicaciones en Suscripción y/o Canje, pueden ser solicitados a:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Biblioteca Facultad de Minas - Bloque M5

Carrera 80 No. 64 - 223

Teléfonos: (57+4) 425 53 43, 430 97 86 Medellín - Colombia

Correo Electrónico: canje@unal.edu.co



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

BOLETÍN
DE
CIENCIAS DE LA TIERRA

CONSEJO DE LA FACULTAD DE MINAS

Decana

Eva Cristina Manotas, PhD

Vicedecano Académico

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

Vicedecano de Investigación y Extensión

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón, PhD

Director de Bienestar Universitario

Camilo Alberto Suárez Méndez, PhD

Secretaria Académica

María Constanza Torres Madroñero, PhD

Representante de Directores de Áreas

Curriculares

John Robert Ballesteros Parra, PhD

Representante de Directores de Áreas

Curriculares

Claudia Helena Muñoz Hoyos, PhD

Representante de Unidades Académicas

Básicas

Álvaro Jesús Castro Caicedo, PhD

Representante de Unidades Académicas

Básicas

Albeiro Rendón Rivera, PhD

Representante Profesores

Luis Hernán Sánchez Arredondo, PhD

Representante de estudiantes al Consejo de

Facultad

BleidysThamara Valderrama Casas

Representante de estudiantes de posgrado al

Consejo de Facultad

Sara Daniela Coronado Maju

COMITÉ EDITORIAL DE FACULTAD

Decana

Eva Cristina Manotas, PhD

Vicedecano de Investigación y Extensión

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón, PhD

Miembros

Luz Alexandra Montoya Restrepo, PhD

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

Enrique Posada Restrepo, MSc

Mónica del Pilar Rada Tobón, MSc

Miembros de apoyo

Francisco Montaña Ibáñez, MSc

Director Editorial UN

Andrés Pavas Martínez, PhD

Director Nacional de Bibliotecas UN

COMITÉ EDITORIAL

Editor

Néstor Ricardo Rojas Reyes, PhD

Departamento de Materiales y Minerales

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Editores

Gladys Bernal Franco. PhD.

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Carles Sanchis-Ibor, PhD.

Universitat Politècnica de València, España

Umberto Cordani, PhD.

Instituto de Geociências

Universidade de São Paulo, Brazil

Diego Villagómez Díaz, PhD.

Tectonic Analysis Ltd. Switzerland

Teresa Orozco Esquivel, PhD.

Centro de Geociencias

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Gretchen T. Lapidus Lavine, PhD.

Dpto. de Ingeniería de Procesos e Hidráulica

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México

Hugo Alfonso Rojas Sarmiento, PhD.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia -

UPTC, Colombia

Vanesa Bazán, PhD.

Departamento de Estudios de Postgrado de la Facultad

de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan,

Argentina

Asieh Hekmat

Departamento de Ingeniería Metalúrgica, PhD.

Universidad de Concepción, Chile

Juan María Menéndez Aguado, PhD.

Departamento de Explotación y Prospección de Minas,

Universidad de Oviedo, España

CONTENT

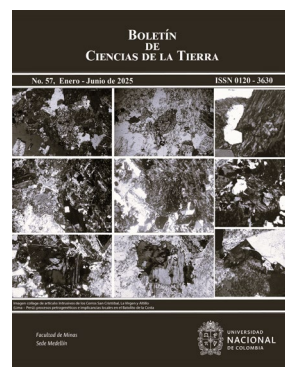
Intrusive rocks of San Cristóbal, La Virgen, and Altillo Hills (Lima, Peru): petrogenetic processes and their local implications in the Coastal Batholith John Franklin Cerrón-Sarcco	7
Application and evaluation of a methodology for productive reconversion in mining communities Oscar Jaime Restrepo-Baena, Alex Manuel Lemus-Madrid, Gustavo Adolfo Viana-Casas, Jhenny Muñoz-Hincapié & Jorge Iván Tobón	22
Methodology for hydrocarbon exploration through petrophysical and stratigraphic analysis of well logs in the Middle Magdalena Valley Jose Antonio Mahan-Gaviria	32
Impact of hydrometeorological events on environmental risks in the Pastaza Province Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Betsy Yessenia Chango-Salazar, Lupe Marina Coyago-Miranda, Teresa Brigitte Jacome-Vargas, Leydi Noemi Mina-Yanqui & María Beatriz Coro-Mullo	46

Our cover:

Collage image of article: Intrusive rocks of San Cristóbal, La Virgen, and Altillo Hills (Lima, Peru): petrogenetic processes and their local implications in the Coastal Batholith

Authors:

John Franklin Cerrón-Sarcco



CONTENIDO

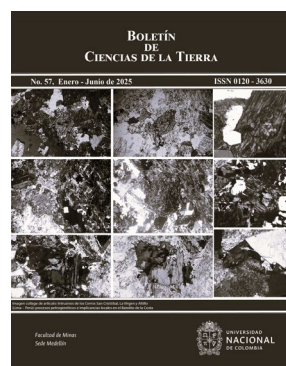
Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa John Franklin Cerrón-Sarcco	7
Aplicación y evaluación de una metodología para la reconversión productiva en comunidades mineras Oscar Jaime Restrepo-Baena, Alex Manuel Lemus-Madrid, Gustavo Adolfo Viana-Casas, Jhenny Muñoz-Hincapie & Jorge Iván Tobón	22
Metodología para la exploración de hidrocarburos mediante análisis petrofísico y estratigráfico a partir de registros de pozo en el Valle Medio del Magdalena Jose Antonio Mahan-Gaviria	32
Incidencia de los eventos hidrometeorológicos en los riesgos ambientales Provincia de Pastaza Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Betsy Yessenia Chango-Salazar, Lupe Marina Coyago-Miranda, Teresa Brigitte Jacome-Vargas, Leydi Noemi Mina-Yanqui & María Beatriz Coro-Mullo	46

Nuestra carátula:

Imagen collage de artículo: Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa

Fuente:

John Franklin Cerrón-Sarcco





Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa

John Franklin Cerrón-Sarcco

*Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
jcs12160005@gmail.com*

Recibido: 28 abril 2024. Recibido en formato revisado: 19 diciembre 2024. Aceptado: 13 enero 2025.

Resumen

Este estudio analizó los procesos petrogenéticos e implicancias locales de las rocas intrusivas en los cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima, Perú), pertenecientes a las Super Unidades Patap y Santa Rosa. Se realizó cartografiado geológico, y recolección de 23 muestras de rocas para análisis petrográfico, geoquímico y de Difracción de Rayos X. Los resultados confirmaron características regionales de las rocas ígneas, como alcalinidad, ambiente de subducción y tipo de arco magmático. Además, se interpretaron posibles procesos locales: 1) la Super Unidad Patap, formada por magmatismo oxidado en un ambiente de baja energía, presentó cristalización fraccionada, mezcla magmática y procesos neumatolíticos que generaron xenolitos con flogopitas; 2) la Super Unidad Santa Rosa, asociada a magmatismo reducido de alta energía, intensa asimilación cortical, nucleación rápida de cristales y emisión de fluidos hidrotermales, los cuales alteraron las rocas de la Super Unidad Patap, generando actinolita, clorita, epidota y trazas de pirita.

Palabras clave: Batolito de la Costa; difracción de Rayos X; geoquímica; petrografía; procesos petrogenéticos; Super Unidad Patap; Super Unidad Santa Rosa.

Intrusive rocks of San Cristóbal, La Virgen, and Altillo Hills (Lima, Peru): petrogenetic processes and their local implications in the Coastal Batholith

Abstract

This study analyzed the petrogenetic processes and local implications of intrusive rocks in the San Cristóbal, La Virgen, and Altillo hills (Lima, Peru), belonging to the Patap and Santa Rosa Super Units. Geological mapping was conducted, along with the collection of 23 rock samples for petrographic, geochemical, and X-ray diffraction analysis. The results confirmed regional characteristics of igneous rocks, such as alkalinity, subduction environment, and magmatic arc type. Additionally, possible local processes were interpreted: (1) the Patap Super Unit, formed by oxidized magmatism in a low-energy environment, exhibited fractional crystallization, magma mixing, and pneumatolytic processes that produced xenoliths with phlogopite; (2) the Santa Rosa Super Unit, associated with reduced, high-energy magmatism, showed intense crustal assimilation, rapid crystal nucleation, and the release of hydrothermal fluids, which altered the rocks of the Patap Super Unit, forming actinolite, chlorite, epidote, and traces of pyrite.

Keywords: Coastal Batholith; X-ray diffraction; geochemistry; petrography; petrogenetic process; Patap Super Unit; Santa Rosa Super Unit.

1 Introducción

El área de estudio se encuentra en los cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo, ubicados en el distrito del Rímac, departamento de Lima, Perú (Fig. 1).

La geomorfología observada corresponde a cerros testigos, considerados geoformas positivas, rodeados por depósitos cuaternarios del cono deyectivo del río Rímac.

Las rocas ígneas del área de estudio pertenecen al segmento Lima del Batolito de la Costa [21] y están

How to cite: Cerrón-Sarcco, J.F., (2025). Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 57, pp. 7-21. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n57.114144>

© The author; licensee Universidad Nacional de Colombia.



BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 57 Enero - Junio, 2025

<https://doi.org/10.15446/rbct.n57.114144>

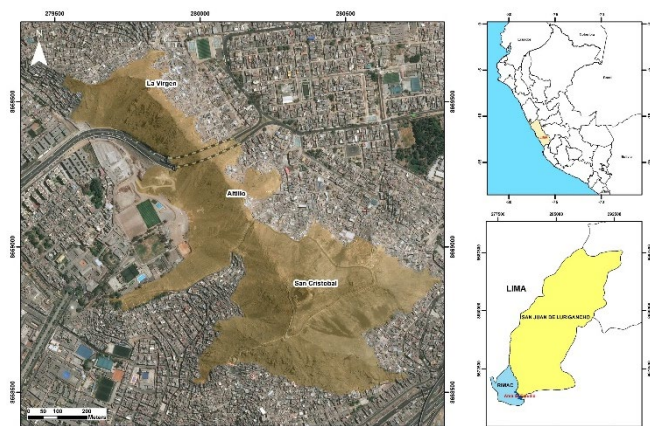


Figura 1. Ubicación del área de estudio.
Fuente: el autor.

catalogados como parte de las Super Unidades Patap y Santa Rosa [10,21,24] del Cretácico. La Super Unidad Patap son las rocas ígneas más antiguas, con edad estimada de ~101.4 Ma según dataciones cercanas de U-Pb por [16-17], y está compuesta por cuerpos ígneos de gabros a dioritas de grano medio a grueso con cristales idiomórficos con ocasionales xenolitos [18]. Por otro lado, la Super Unidad Santa Rosa son rocas más jóvenes e intruyen a Patap, pues presentan una edad estimada entre ~84.4 y 81.7 Ma según dataciones de U-Pb cercanas por [16-17], y está compuesta por dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos de grano medio con cristales subhedrales.

Se llevaron a cabo dos jornadas de cartografiado a escala 1:5000 y muestreo selectivo, recolectando muestras de roca para estudios de química analítica, petrografía y análisis mineralógico por Difracción de Rayos X.

El principal objetivo fue comprender los procesos petrogenéticos y las implicancias locales de los afloramientos intrusivos en los cerros San Cristóbal, La Virgen y Altito. Este estudio aportaría información geológica relevante para entender los procesos petrogenéticos que sucedieron localmente en el Segmento Lima del Batolito de la Costa, ya que la mayoría de las investigaciones previas se han centrado en estudios regionales y en sectores más alejados, como los realizados por [2] en los bordes norte y sur del Batolito de la Costa - Segmento Lima, o por [3] entre los paralelos 9° 30' y 10° 30' S.

2 Metodología

2.1 Trabajo de pre-campo y campo

El proceso de investigación comenzó con la recopilación de información bibliográfica, seguida por las jornadas de campo para la obtención de datos geológicos in situ usando planos topográficos e imágenes satelitales junto a equipo de geológico de campo para el cartografiado geológico a escala 1:5000. Adicionalmente, se realizó el muestreo de rocas según el tipo de estudio, considerando que no se genere cualquier tipo de contaminación, representativo y homogéneo, haciendo un seguimiento desde el muestreo, embolsado, transporte y obtención de los resultados.

2.2 Petrografía

Se obtuvieron 5 muestras de roca de 15cm de diámetro, marcando un área de 4cm x 6cm que será el área para la lamina delgada. Posteriormente, las muestras fueron enviadas para preparación de lamina delgada en los laboratorios de F.A. Ingenieros y EPCLab.

Los estudios petrográficos fueron realizados en las instalaciones de los laboratorios de F.A. Ingenieros y EPCLab utilizando microscopio óptico binocular de luz polarizada marca Leica y una cámara fotográfica para las capturas de las imágenes.

2.3 Difracción de Rayos X

Se obtuvieron 4 muestras de roca de 10cm de diámetro las cuales fueron preparadas en el laboratorio de F.A. Ingenieros pasando por un proceso de pulverización cristalina en un mortero con el fin de dejar polvo fino, posteriormente colocado en recipientes y luego introducidos en el Difractómetro de Rayos X, siguiendo la metodología de análisis de laboratorio generando los difractogramas de cada muestra con el porcentaje en peso de los minerales constituyentes.

2.4 Análisis químico

Se obtuvieron 14 muestras para análisis químico, utilizando el método de muestreo por esquirlas (≤ 2 cm) adquiriendo muestras con un peso de 2 a 3 kgs.

Estas muestras fueron enviadas al laboratorio de química analítica del INGEMMET, sometiendo al ensayo de roca total mediante ICP-OES (31 elementos) utilizando el método de digestión multiácida, y por ICP-MS (24 elementos) a través del método de fusión con borato de litio.

3 Resultados

3.1 Geología local

Los afloramientos intrusivos presentes en el Cerro San Cristóbal y al nor-oeste del Cerro La Virgen están asociados a la Super Unidad Patap, considerados las rocas más antiguas del área de estudio (Figs. 3 y 4). Macroscópicamente (Fig. 2A) son identificadas como rocas ígneas mesocratas de textura fanerítica con porcentaje mineralógico de plagioclasa subhedral a euhedral de 55 a 60%, cuarzo anhedral de 5 a 10% y con porcentaje variable de minerales ferromagnesianos anhedrales a subhedrales. La presencia de xenolitos fue variable con tamaños centimétricos a métricos subredondeados. Algunos minerales de plagioclasa y anfíbol se encontraron con leve argilización y cloritización, respectivamente.

Por otro lado, los afloramientos intrusivos en el Cerro Altito y parte de la Virgen son considerados parte de la Super Unidad Santa Rosa (Figs. 3 y 4) e intruyen a la Super Unidad Patap (Fig. 5C). Son catalogados, macroscópicamente (Fig. 2B), como rocas ígneas leucocratas de textura fanerítica con porcentajes mineralógicos de plagioclasa anhedral a subhedral de 15 a 25%, feldespato potásico anhedral a

subhedral de 45 a 60%, y con cuarzo o ferromagnesiano de porcentaje variable. Algunos minerales de plagioclasa y hornblenda se encontraron con leve cloritización y epidotización.

Además, se observa que el material cuaternario perteneciente al cono deyectivo del río Rímac recubre parcialmente el área, gradando desde gravas hasta arcillas, siendo esta la base sobre la cual se asienta gran parte de la población limeña.

El contexto estructural del área se caracteriza por fallas con orientaciones NW-SE que son cortadas y desplazadas por fallas dextrales de orientación NE-SW, y al final todas controladas y delimitadas por fallas sinestrales de orientación E-W, todas acompañadas de sistemas de diaclasas que responden a las mismas tendencias de fallas (Fig. 5D).

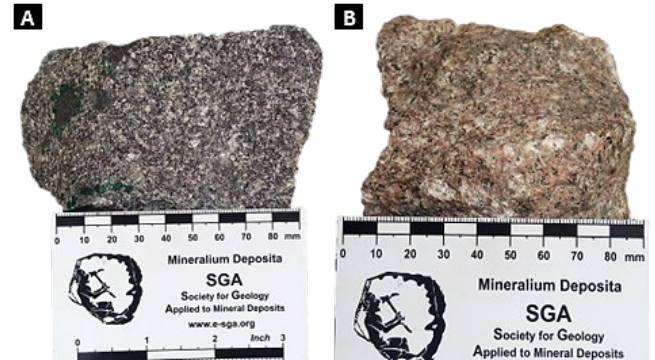


Figura 2. A) Muestra de mano de la Super Unidad Patap, B) Muestra de mano de la Super Unidad Santa Rosa. Fuente: el autor.

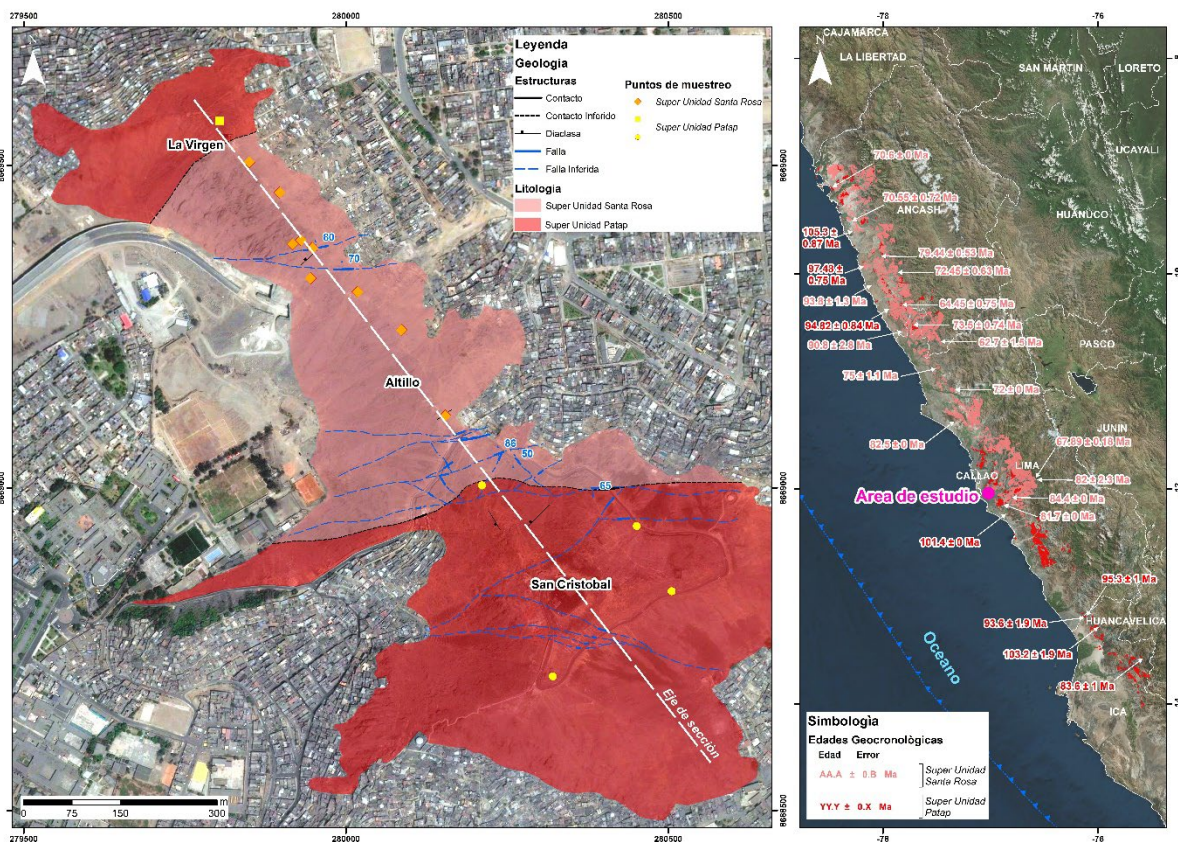


Figura 3. Litologías y estructuras en los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillio, y datos geocronológicos regionales del Super Unidad Patap y Santa Rosa. Fuente: datos geocronológicos [12].

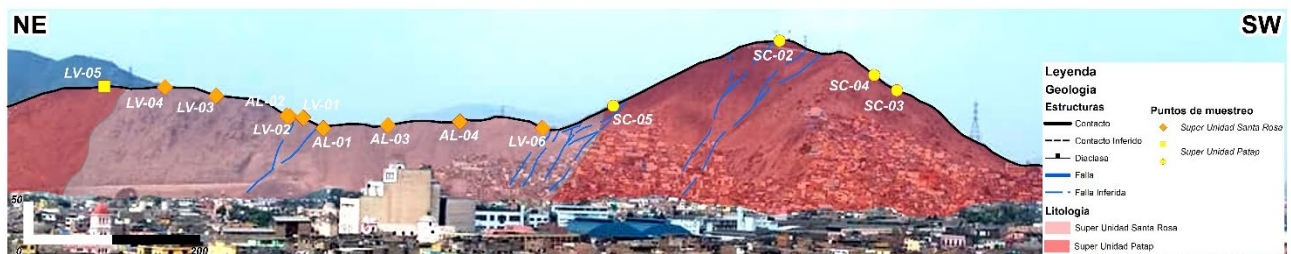


Figura 4. Sección del área de estudio. Fuente: el autor.

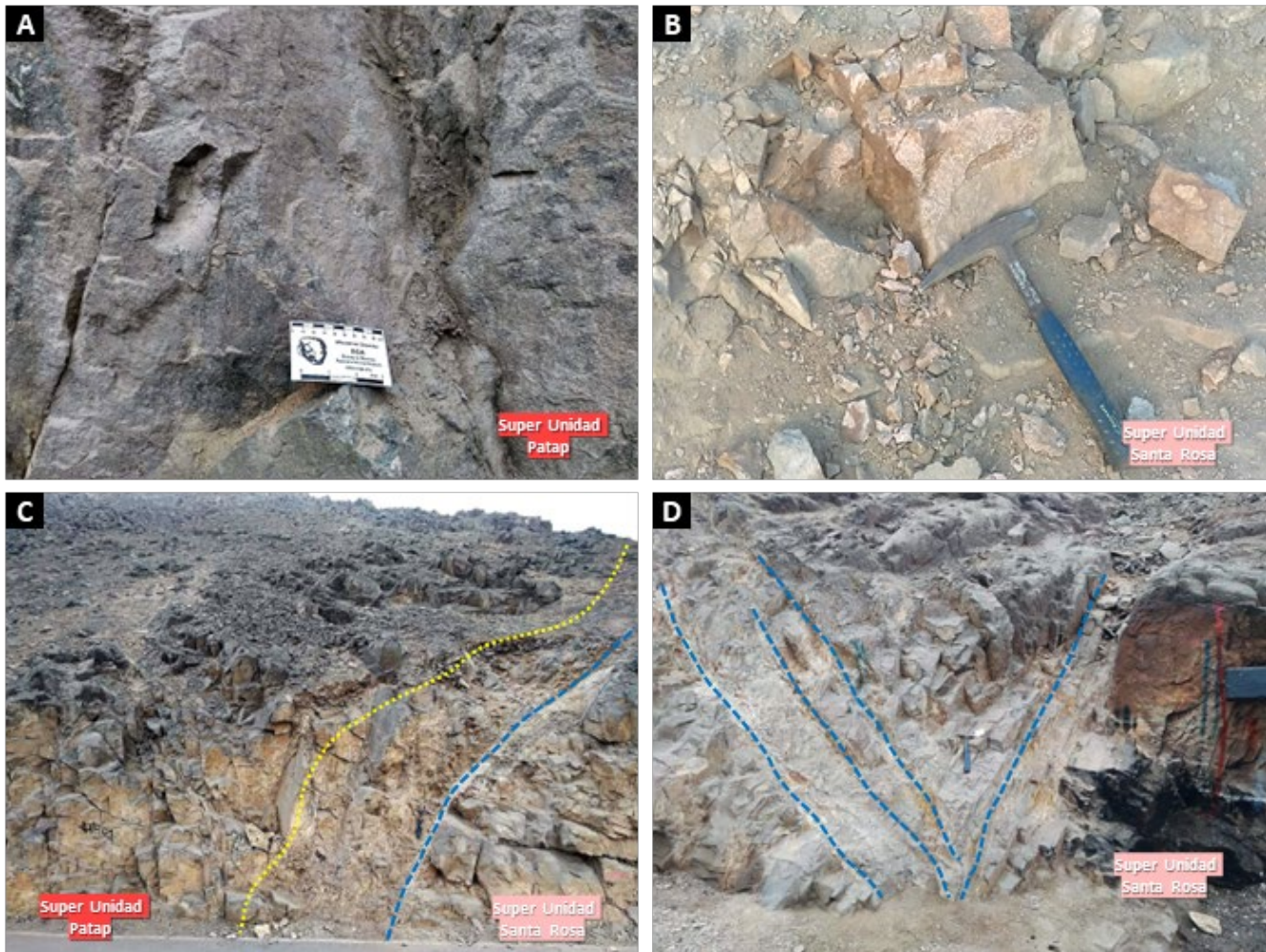


Figura 5. A) Afloramiento de dioritas de la Super Unidad Patap, B) Afloramiento de granitos de la Super Unidad Santa Rosa, C) Contacto irregular (líneas punteadas amarillas) de la Super Unidad Patap con la Super Unidad Santa Rosa, y evidencias de fallas de orientación E-W (líneas discontinuas azules), y D) Fallas NE-SW cortadas por fallas E-W en afloramiento de la Super Unidad Santa Rosa (líneas discontinuas azules).

Fuente: el autor.

3.1 Petrografía

3.1.1 Super Unidad Patap

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro San Cristóbal y en el extremo nor-oeste del Cerro La Virgen. Petrográficamente catalogadas como a dioritas a tonalitas holocristalinas de textura fanerítica hipidiomórfica, de grano medio a grueso. Las plagioclasas fueron subhedrales a euhedrales con macla polisintética y zonación concéntrica en ocasiones alterándose a epidotas. Los cuarzos anhedrales se encontraron ocasionalmente intercrecidos con los pocos feldespatos potásicos subhedrales existentes. Los piroxenos fueron anhedrales a subhedrales y los anfíboles, subhedrales con clivaje en 2 direcciones alterándose a cloritas y trazas de actinolita. Las biotitas se encontraron alteradas a cloritas. La presencia de minerales trazas fue de carbonatos, sericita, zircón, titanitas y minerales opacos, posiblemente pirita por algunas formas pseudo-cúbicas. Presentaron xenolitos de similar composición, de textura fanerítica hipidiomórfica,

equigranular, con contacto de recrystalización con la roca caja (Fig. 6A a 6F). Ver resumen de Tabla 1.

3.1.2 Super Unidad Santa Rosa

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro Altillio y Cerro La Virgen. Petrográficamente catalogadas como monzogranitos a sienogranitos holocristalinos de textura fanerítica hipidiomórfica gráfica simplectítica a granofídica, de grano medio. Las plagioclasas fueron subhedrales con macla polisintética, en ocasiones alterándose a epidotas. Los cuarzos anhedrales se encontraron intercrecidos a manera de cristales esqueléticos (intercrecimiento gráfico a mirmequítico) y en bordes (simplectítico) con los feldespatos potásicos subhedrales de gran tamaño. Las biotitas se encontraron alterándose a cloritas (clinocloro). La presencia de minerales trazas fue de carbonatos, sericita, titanitas y minerales opacos, posiblemente pirita por algunas formas pseudo-cúbicas ((Fig. 7A a 7F). Ver resumen de Tabla 1.

Tabla 1.

Resumen de las principales características observadas en las láminas delgadas.

Nº	1	2	3	4	5
Código Interno	AL-03	LV-01	LV-05	SC-04	SC-05
Ubicación	Alttillo	La Virgen	La Virgen	San Cristobal	San Cristobal
Este	280018	279930	279804	280321	280211
Norte	8669304	8669384	8669569	8668708	8669004
Elevación	286	300	329	390	320
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap
Patrón Textural	Holocristalina fanerítica, textura hipidiomórfica granofídica (combinación de textura gráfica y mirmequítica) por intercrecimiento eutéctico de cuarzo y feldespato alcalino, aproximadamente equigranulares y de grano medio a grueso.	Holocristalina fanerítica, textura hipidiomórfica simplectítica (intercrecimiento gráfico de cuarzo-feldespato), con cristales subidiomorfos y xenomorfos, equigranulares y de grano medio.	Holocristalina fanerítica, textura hipidiomórfica, presencia de cristales subidiomorfos, equigranulares y de grano medio a grueso	Holocristalina fanerítica, textura hipidiomórfica, presencia de cristales subidiomorfos, equigranulares y de grano medio a grueso. Presencia de xenolitos de grano fino.	Holocristalina fanerítica, textura hipidiomórfica, presencia de cristales subidiomorfos y xenomorfos, equigranulares y de grano medio a grueso.
Composición y características mineralógicas	Intercrecimiento gráfico cuarzo-feldespato y plagioclasas con notable macla polisintética. Presencia de hornblenda y biotitas.	Intercrecimiento del cuarzo y el feldespato potásico. Las plagioclasas con maclado polisintético y formas euhedrales a subhedrales tabulares. Además, se observa un cristal de titanita.	Intercrecimiento de plagioclasa con macla polisintética o zonadas, piroxenos, anfíbol con exfoliación en 2 direcciones y biotita.	Intercrecimiento de plagioclasa con macla polisintética o zonada, anfíbol, cuarzo y biotita. Contacto recrystalizado entre roca caja (derecha) y xenolito (izquierda) con minerales constituyentes como plagioclasa con macla polisintética, cuarzo y biotita.	Intercrecimiento de plagioclasas, cuarzo y feldespato potásico, con minerales de anfíbol y biotita, además, presencia de trazas de titanitas y zircones de gran tamaño. Las plagioclasas presentan macla polisintética
Alteración y mineralización	Reemplazamiento de clinocloro, carbonatos, sericita y arcillas. Además, presencia de minerales opacos pseudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clinocloro, carbonatos, sericita y arcillas. Además, presencia de minerales opacos pseudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clorita, epidota, actinolita, carbonatos y sericita con arcillas. Además, presencia de minerales opacos pseudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clorita, epidota, actinolita, carbonatos y sericita con arcillas. Además, presencia de minerales opacos pseudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clorita, epidota, carbonatos y sericita con arcillas. Además, presencia de minerales opacos pseudocúbicos, posiblemente pirita.
Clasificación Streckeisen	Sienogranito	Monzogranito	Gabro	Tonalita	Tonalita

Fuente: el autor.

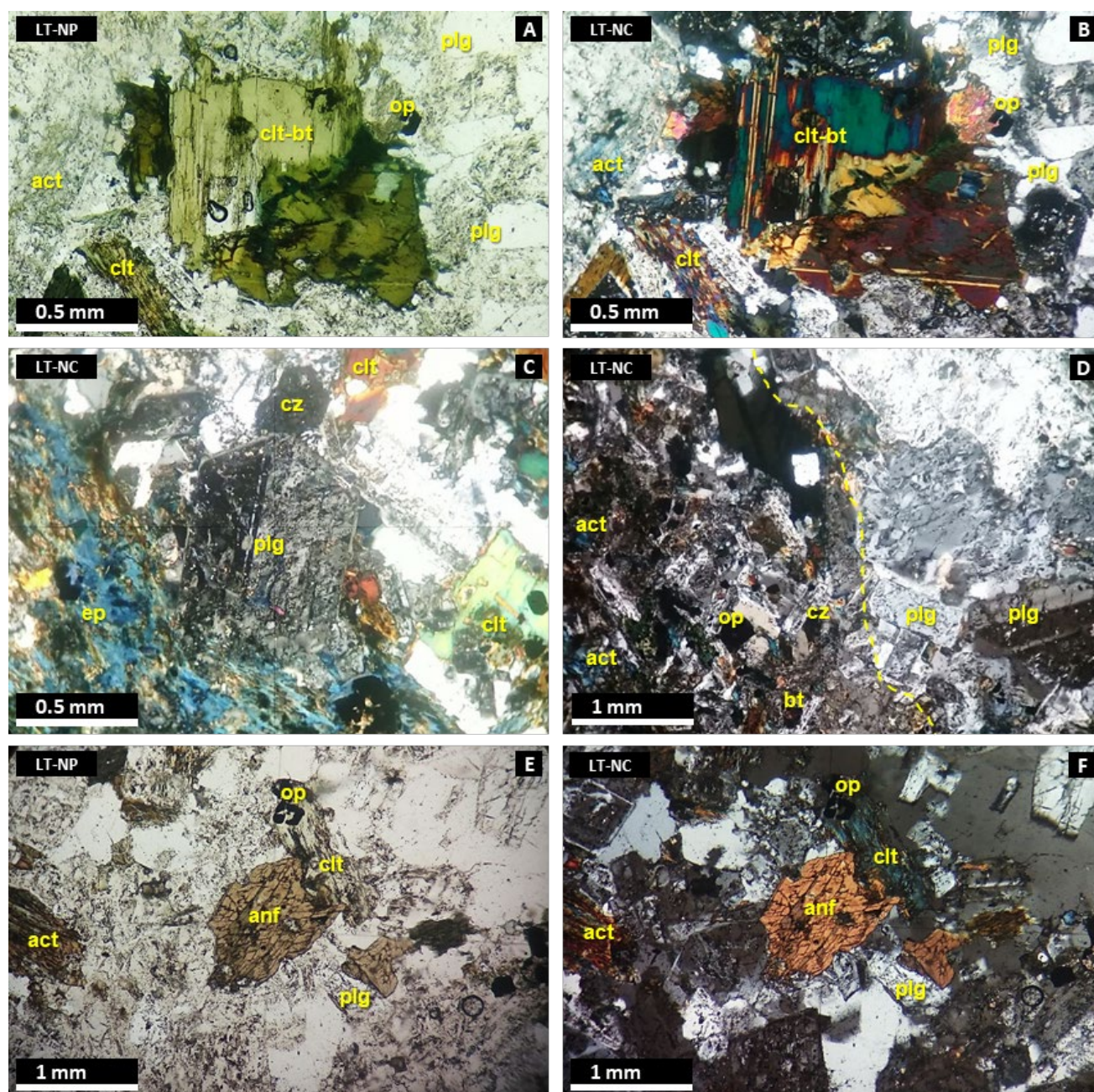


Figura 6. Muestra SC-04 (Super Unidad Patap), fotomicrografías A a F.- Vistas en LT-NP (A) y LT-NC (B) mostrando los principales minerales constituyentes, accesorios y de alteración de la roca. Intercrecimiento de plagioclasa (plg) y biotita (bt), y minerales de alteración hidrotermal como clorita (clt) y actinolita (act). (C) Vista en LT-NC en detalle de los minerales constituyentes como plagioclasa (plg) en macla polisintética y ocasionales de cuarzo (cz), y minerales de alteración hidrotermal como clorita (clt) y epidota (ep). (D) Vista en LT-NC en detalle de contacto recrystalizado entre roca caja (derecha) y xenolito (izquierda) con minerales constituyentes como plagioclasa (plg) con macla polisintética, cuarzo (cz) y biotita (bt), con minerales de alteración hidrotermal como actinolita (act). Vistas en LT-NP (E) y LT-NC (F) en detalle de los minerales constituyentes anfíbol (anf) y plagioclasa (plg) zonada, y minerales de alteración hidrotermal como actinolita (act) y clorita (clt). LT: Luz Transmitida, NP: Nícoles Paralelos, NC: Nícoles Cruzados.

Fuente: el autor.

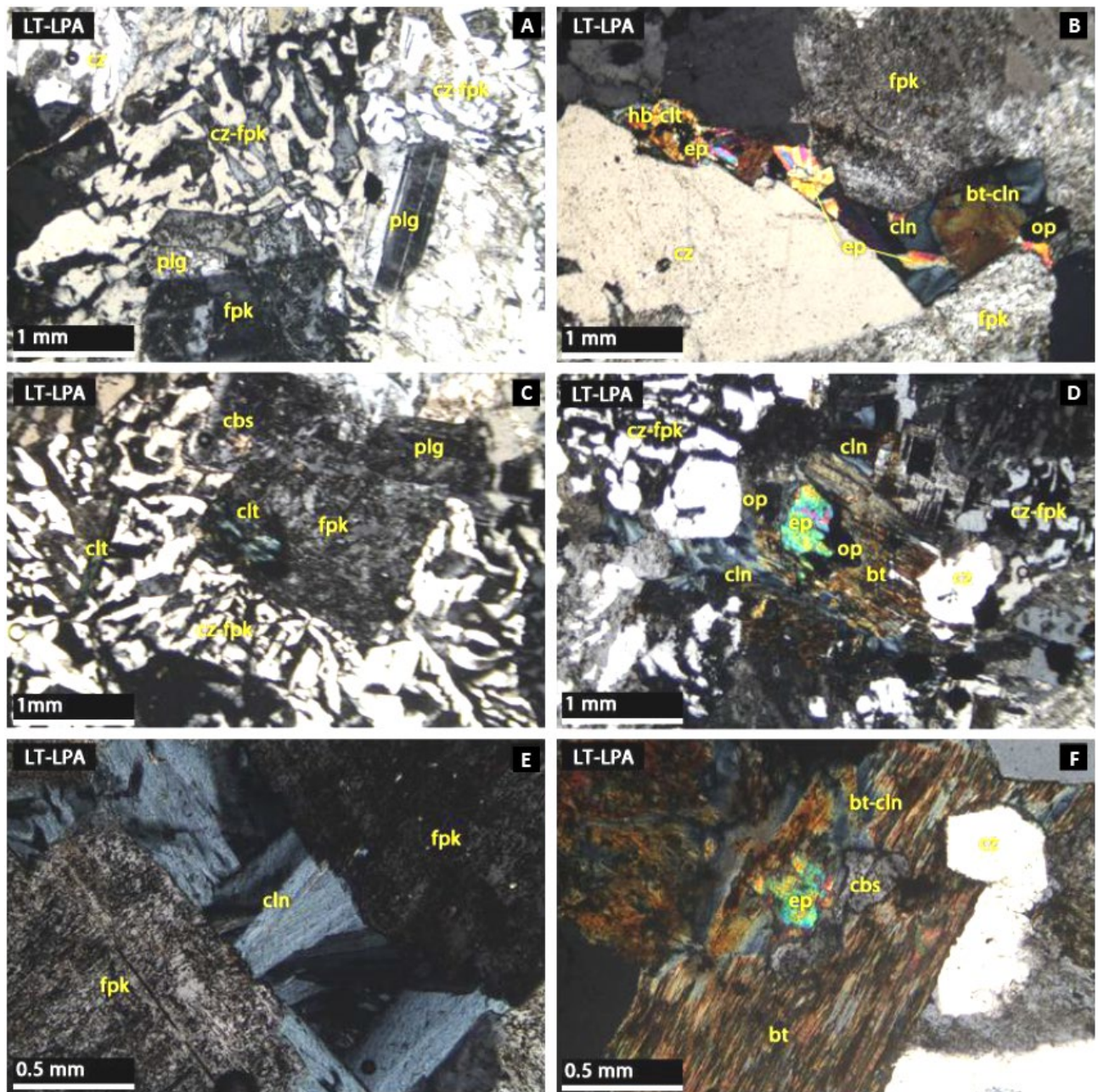


Figura 7. Muestra AL-03 (Super Unidad Santa Rosa), fotomicrografías A a F.- A) Vista en LPA de los principales constituyentes de la roca: intercrecimiento gráfico cuarzo-feldespato (cz-fpk) y plagioclasas (plg) con notable macla polisintética. B) Vista en LPA de los principales minerales accesorios alterados: hornblenda (hb) con alteración a clorita (clt), y biotitas con alteración propilitica en ensamble clinocloro (cln), epidota (ep), pirita (op). Los feldespatos potásicos (fpk) presentan fuerte reemplazamiento a arcillas, mientras que el cuarzo (cz) se exhibe limpio. C) Vista en LPA mostrando la textura granofidica típica de la roca estudiada: combinación de intercrecimiento gráfico con textura simplectítica del tipo mirmequítico rodeado un cristal de feldespato potásico (fpk). La clorita magnésica (clt) se diferencia aquí del clinocloro (cln) por su notable diferencia en birrefringencia. D, F) Detalles de la alteración de una biotita (bt) mostrando el ensamble mineralógico típico de una alteración propilitica. E) Detalle de una zona reemplazada por clinocloro (cln), se observa su típico hábito laminar y su interferencia anómala en color azul Berlin, aproximando su composición a la de una penninita. LT: Luz Transmitida, LPA: Luz Polarizada Analizada. LPNA: Luz Polarizada No Analizada.

Fuente: [20].

3.1 Litogeoquímica

Los resultados geoquímicos de los análisis de laboratorio son presentados en la Tabla 2 y Tabla 3 en el capítulo Anexos.

Los diagramas R1 ($4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)$) vs R2 ($6Ca+2Mg+Al$) según [6] en Fig. 8, y Zr/Ti vs Nb/Y modificado según [19] en Fig. 9, para clasificación de rocas ígneas por

elementos mayores y traza inmóviles, determinaron que las muestras de roca de la Super Unidad Patap de composición máfica a intermedia en el campo petrográfico de gabros (parte del Cerro La Virgen) gradando a tonalitas (Cerro San Cristóbal), mientras que las muestras de roca de la Super Unidad Santa Rosa de composición félsica estuvieron en el campo petrográfico de granodioritas a granitos (Cerro Altillio y parte del Cerro La Virgen).

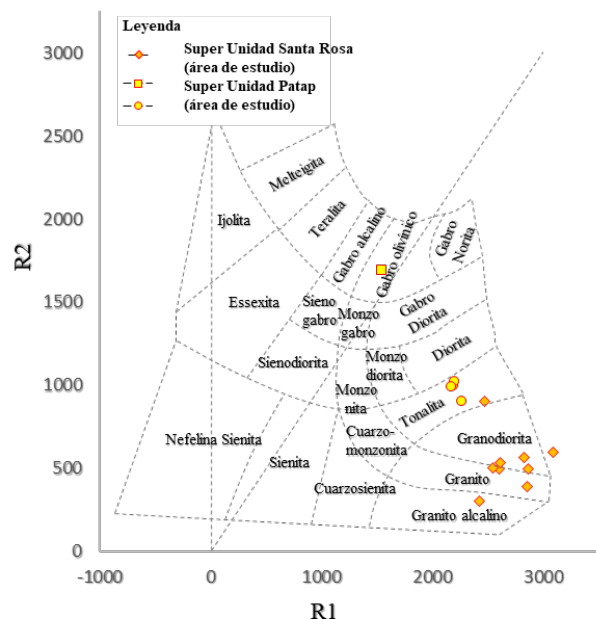


Figura 8. Diagrama R1 vs R2,
Fuente: modificado de [6].

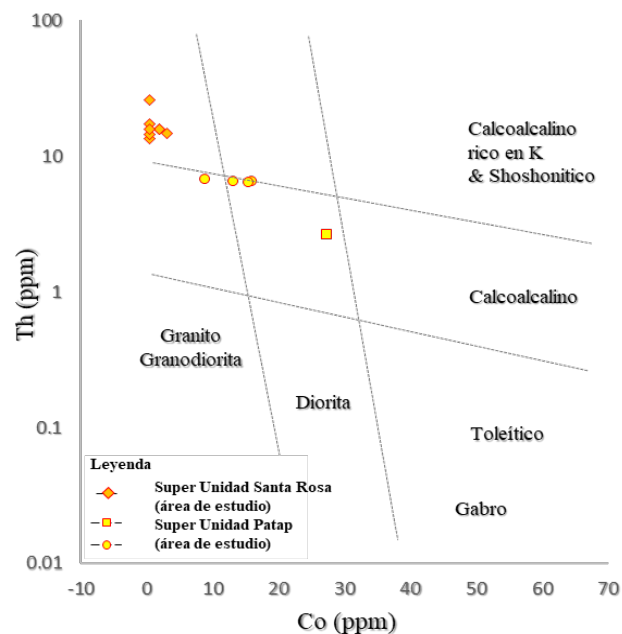


Figura 10. Diagrama Co vs Th,
Fuente: modificado de [8].

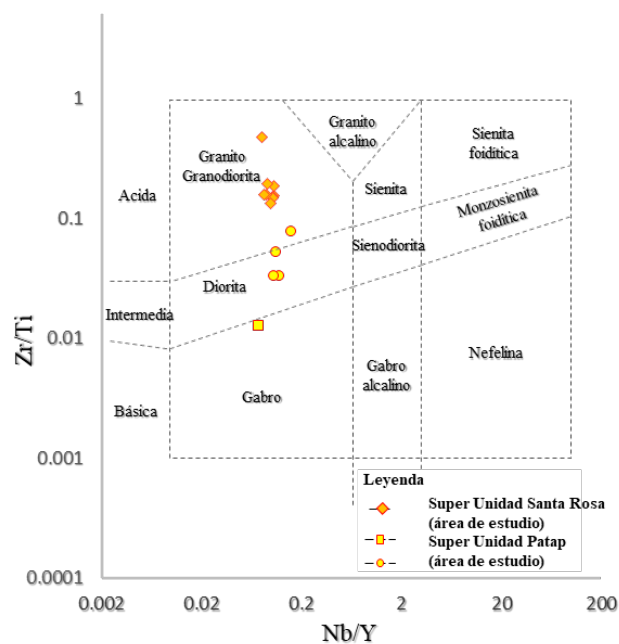


Figura 9. Diagrama Nb/Y vs Zr/Ti,
Fuente: modificado de [19].

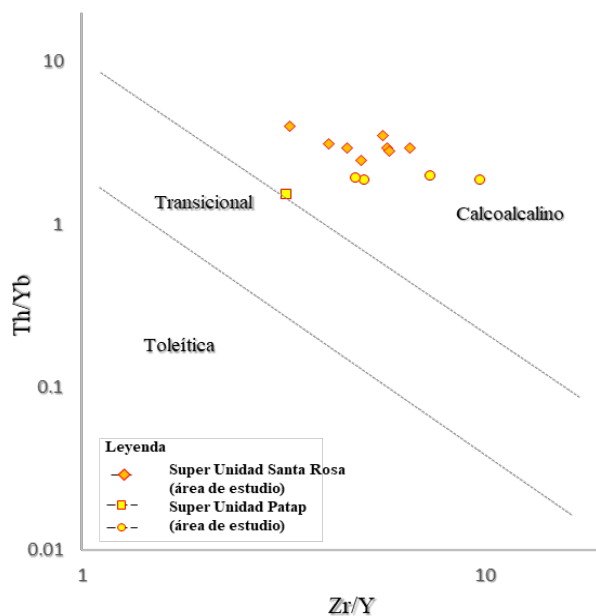


Figura 11. Diagrama Zr/Y vs Th/Yb,
Fuente: modificado de [22].

Los diagramas de Co vs Th [8] en Fig. 10, y Zr/Y vs Th/Yb [22] en Fig. 11, permitieron clasificar la serie magmática de las rocas determinando que las muestras de la Super Unidad Patap son de serie transicional a calcoalcalina. Las muestras de la Super Unidad Santa Rosa fueron clasificadas en la serie calcoalcalina a calcoalcalina rica en K+.

El diagrama de Al_2O_3/Na_2O+K_2O+CaO (mol) vs CaO/Na_2O+K_2O+CaO (mol) según [1] para determinar la saturación de alúmina, determinando que las muestras de la Super Unidad Patap fueron mayormente metaluminosas, mientras que para la Super Unidad Santa Rosa fueron metaluminosas a peraluminosas, y ocasionalmente peralcalino (cerca al contacto a la Super Unidad Patap en el Cerro La Virgen). Ver Fig. 12.

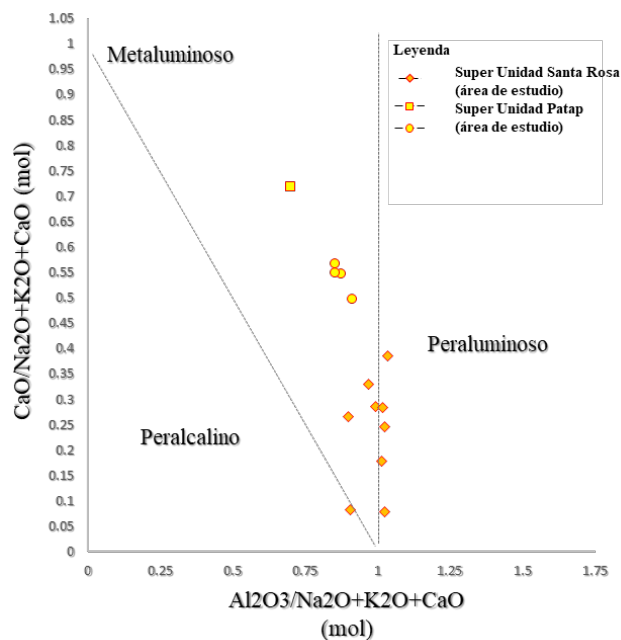


Figura 12. Diagrama $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$ (mol) vs $CaO/(Na_2O+K_2O+CaO)$ (mol). Fuente: modificado de [1].

El diagrama spider de tierras raras normalizados al condrito según [14] fue estudiado independientemente para cada super unidad. Las muestras de roca de la Super Unidad Patap presentaron un patrón sub-horizontal de las MREE a HREE entre 10 a 30 veces el valor del condrito, mientras que las LREE presentaron un patrón de pendiente negativa ligera en el rango de 30 a 70 veces, incluso llegando a 150 veces el valor del condrito (para el La), ver Fig. 13. Por otra parte, las muestras de roca de la Super Unidad Santa Rosa presentaron un patrón de pendiente negativa ligera de las LREE – MREE (25 a 50 veces el valor del condrito) a HREE (65 a 175 veces el valor del condrito), mientras que independientemente el Eu presentó anomalía negativa moderadamente pronunciada, ver Fig. 14.

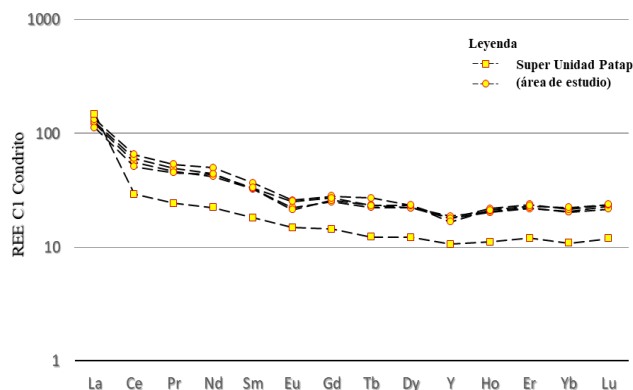


Figura 13. Diagrama spider de tierras raras de muestras de la Super Unidad Patap, normalizados [14]. Fuente: modificado de [14] con datos del autor.

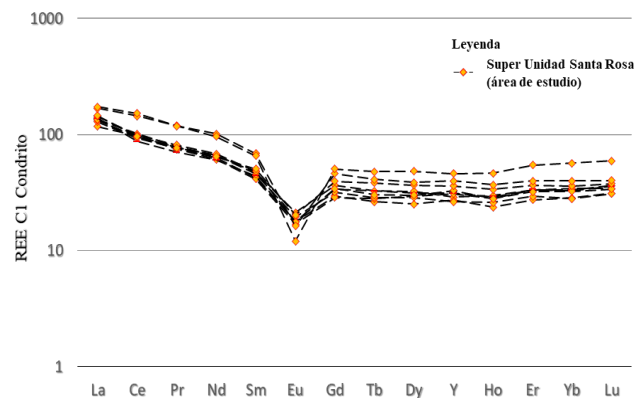


Figura 14. Diagrama spider de tierras raras de muestras de la Super Unidad Santa Rosa, normalizados [14]. Fuente: modificado de [14] con datos del autor.

El diagrama spider multielemental normalizado según [25] también fue estudiado independientemente para cada super unidad. Las muestras de la Super Unidad Patap evidenciaron al Cs y Rb con valores enriquecidos sobre las 100 veces del valor del manto, Ba, Th, U y K fueron muy variables, W con valores promedio y ocasionalmente algunos valores con anomalía moderadamente negativa, Nb y Ta presentaron anomalías negativas fuertes cerca de los valores promedio del manto, Sr no presentó anomalía, P presentó una ligera anomalía negativa, Zr y Hf presentaron mucha variabilidad, y el Ti presentó una débil a moderada anomalía negativa, ver Fig. 15. Las muestras de la Super Unidad Santa Rosa evidenciaron al Cs, Rb, Ba y K con mucha variabilidad en sus valores, Th y U presentaron anomalías positivas superiores a 150 veces el valor promedio del manto, W no presentaron valores anómalos salvo una muestra con anomalía negativa, Nb y Ta presentaron anomalías moderadas por debajo de las 10 veces el valor promedio del manto, Sr y P presentaron anomalías negativas fuertes a muy fuertes hasta debajo de los valores promedio del manto, Zr y Hf no presentaron variabilidad de los valores, y el Ti presentó anomalía negativa muy por debajo del valor promedio de manto, ver Fig. 16.

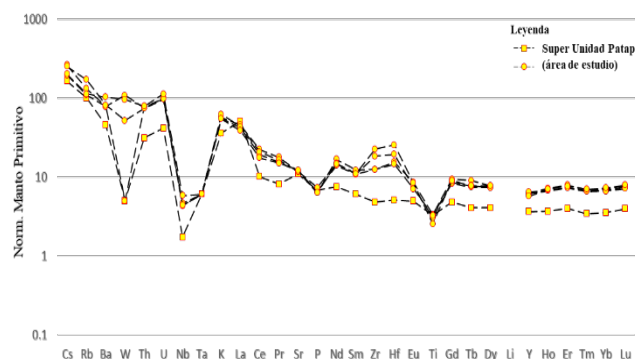


Figura 15. Diagrama spider multielemental de muestras de la Super Unidad Patap, normalizados [25]. Fuente: modificado de [25] con datos del autor.

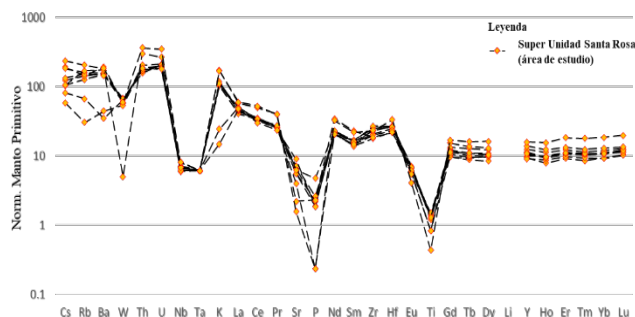


Figura 16. Diagrama spider multielemental de muestras de la Super Unidad Santa Rosa, normalizados [25].

Fuente: modificado de [25] con datos del autor.

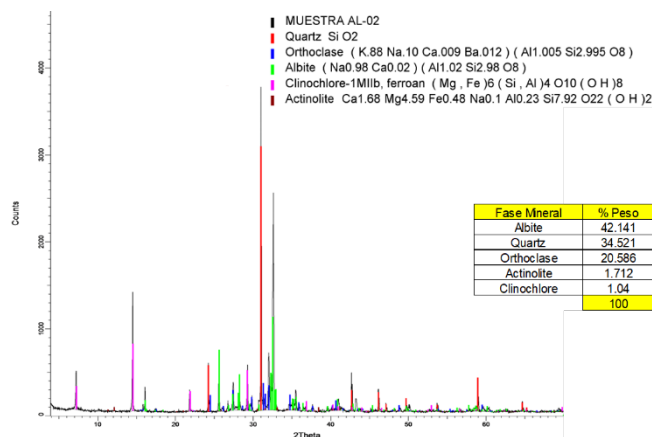


Figura 18. Difractograma de la muestra AL-02.

Fuente: el autor.

3.2 Difracción de Rayos X

Los resultados del análisis de difracción de Rayos X son presentados en la Tabla 4 en el capítulo Anexos.

3.2.1 Super Unidad Patap

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro San Cristóbal y en el extremo nor-oeste del Cerro La Virgen. Los estudios reflejaron rocas intrusivas con valores mineralógicos porcentuales de actinolita (12.81 a 61.18%), albita (20.59 a 22.46%), andesina (6.62 a 14.42%), clinocoro (1.25 a 3.525%), ortosa (22.85%), epidota (8.42%) y cuarzo (0.29 a 26.28%). El análisis de mineralógico de xenolitos presentó valores porcentuales dentro del rango de la matriz para actinolita, cuarzo y clinocloro, mientras que para albita llega a 34.17% y flogopita (21.42%), ver Fig. 17.

3.2.2 Super Unidad Santa Rosa

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro Altillio y Cerro La Virgen. Los estudios reflejaron rocas intrusivas con valores mineralógicos porcentuales de albita (42.14%), cuarzo (34.52%), ortosa (20.58%), actinolita (1.71%) y clinocloro (1.04%), ver Fig. 18.

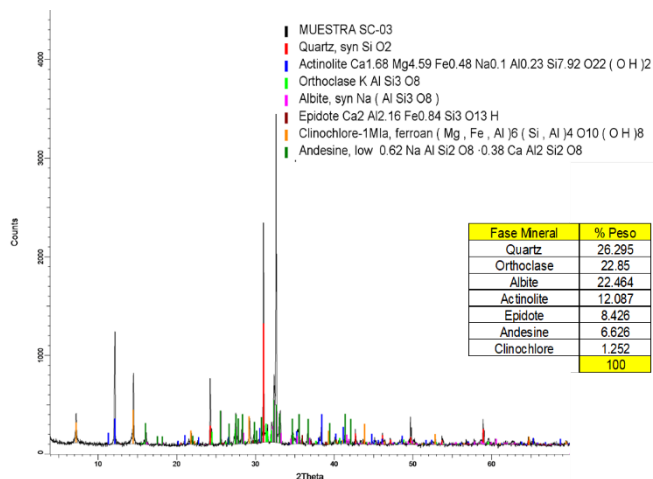


Figura 17. Difractograma de la muestra SC-03.

Fuente: el autor.

4 Discusión

Procederemos a discutir usando los resultados de campo y laboratorio de las muestras del Cerro San Cristóbal, Altillio y La Virgen.

Las muestras que correspondieron a la Super Unidad Patap fueron rocas intrusivas metaluminosas del tipo gabro (con conexión a la serie transicional toleítica-calcoalcalina) a diorita-tonalita (serie calcoalcalina) originadas en un ambiente de subducción. Estas se relacionaron a un magmatismo de arco primitivo, evidenciado por anomalías negativas moderadas de Nb, Ta, P y Ti, emplazado posiblemente a una edad cercana a ~104 Ma, datación cercana según [16]. Las condiciones de la cámara magmática presentaron variación rítmica en la temperatura y presión, evidenciado por la zonación oscilatoria de la plagioclasa, como propone [11]. Este magma moderadamente oxidado ($0.6 < \text{Eu}/\text{Eu}^* < 1$) (Fig. 19), presentó asimilación medianamente somera y fusión probablemente de clinopiroxeno (evidenciado por patrón plano a ligeramente listrico de los REE, con MREE-HREE sub-horizontal) originados a un espesor cortical menor a 34 km (Fig. 20), sin contaminación cortical con baja energía (no existió enriquecimiento de Th y U, menor ratio de U/Th) (Fig. 21). Además, predominaron procesos de diferenciación magmática por cristalización fraccionada (evidenciado por poco fraccionamiento de titanita, zircón, y feldespatos ocasional) y mezcla de magmas por presencia de xenolitos de composición tonalítica con bordes de recrystalización, relacionados a posibles procesos neumatólicos que generaron cristales de flogopita.

Estas fueron intruidas por rocas de la Super Unidad Santa Rosa, donde las muestras fueron rocas metaluminosas y peraluminosas (ocasionalmente peralcalinas) del tipo granodiorita a granito (calcoalcalina a calcoalcalina rica en K+) originadas en un ambiente de subducción. Estas se relacionaron a un magmatismo de arco más evolucionado, evidenciado por anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti, siendo emplazado posiblemente a una edad cercana de ~84.4 a 81.7 Ma, dataciones cercanas según [16]. El magma reducido ($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.6$) (Fig. 19), se originó por fusión de clinopiroxeno, evidenciado por el patrón plano a débilmente

lístico REE, con MREE-HREE sub-horizontal, en un espesor cortical menor a 34 km (Fig. 20). Dicho magma cristalizó mediante el predominio de procesos de diferenciación magmática por asimilación cortical presentando alta energía (enriquecimiento de Th y U, también influyendo en la tendencia a rocas peralcalinas) (Fig. 21), y por cristalización fraccionada (fraccionamiento de plagioclasas por anomalía negativa de Sr-Eu y feldespato

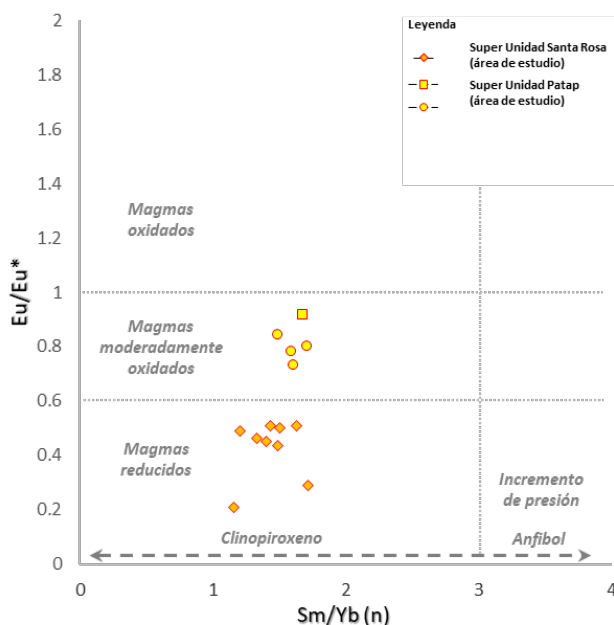


Figura 19. Diagrama Sm/Yb (n) vs Eu/Eu*, Fuente: modificado de [15].

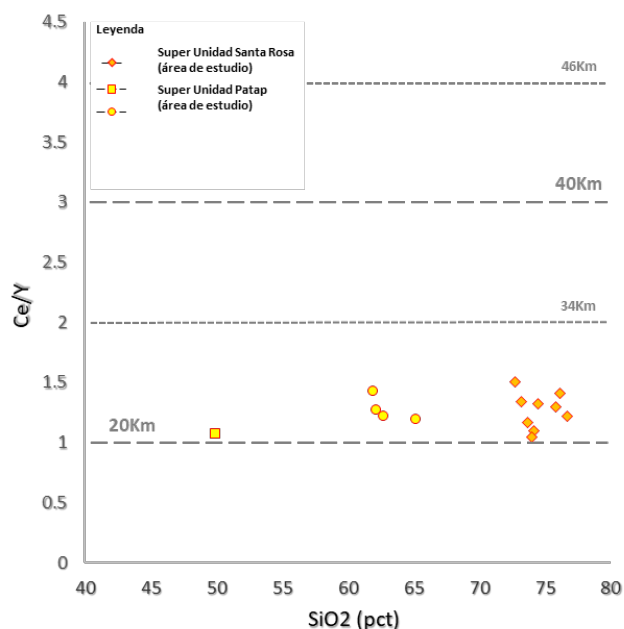


Figura 20. Diagrama SiO₂ (pct) vs Ce/Y, Fuente: modificado de [13].

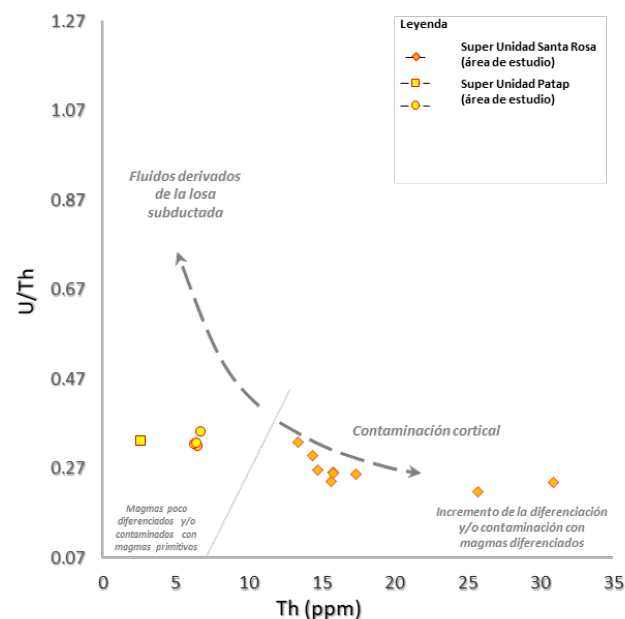


Figura 21. Diagrama Th vs U/Th, Fuente: modificado de [9].

potásico por variabilidad de Ba-K-Rb, fraccionamiento de Ti evidenciado por trazas de titanita). Además, esto permitió que se evidencien características de nucleación rápida de cristales en el magma con baja velocidad de enfriamiento y alta presión sobresaturando al magma en SiO₂, enriqueciéndolo de H₂O (evidenciado por intercrecimiento gráfico y textura simplectítica-mirmequítica, como detallan estudios de [14]), posteriormente escapando como fluido inmiscible. Lo último, podría explicar la presencia de algunos minerales generados por hidrotermalismo, pero sin carácter económico, como el caso de actinolita (con mayor reemplazamiento de los anfíboles de las muestras de roca correspondientes a la Super Unidad Patap, que en la Super Unidad Santa Rosa), carbonatos, clorita (clinocloro, por alteración de anfíboles y biotitas), epidota (alteración de plagioclasas) y pirita.

5 Conclusiones

Los estudios realizados corroboran las características composicionales, geoquímicas y tectono-magmáticas de las Super Unidades Patap (rocas metaluminosas del tipo gabro a diorita-tonalita, ambiente de subducción, serie toleítica a calcoalcalina y arco primitivo) y Santa Rosa (rocas metaluminosas-peraluminosas a peralcalinas, del tipo granodiorita a granito, ambiente de subducción, calcoalcalina a calcoalcalina rica en K⁺ y arco evolucionado) expuestos en trabajos previos, pero no ciertos procesos locales que pudieron suceder.

En el área de estudio, las rocas de la Super Unidad Patap (~104 Ma) se originaron por magmas moderadamente oxidados a un espesor cortical menor a 34 km, sufriendo condiciones de asimilación somera, fusión de clinopiroxeno, baja energía, cristalización fraccionada y mezcla de magmas con un desbalance en las condiciones de la cámara magmática originando rocas ígneas que engloban xenolitos

de la misma composición, pero que sufrirían procesos neumatolíticos con evidencias de flogopitas. Por otro lado, la intrusión de rocas de la Super Unidad Santa Rosa (~84.4 a 81.7 Ma) que se originaron por magmas reducidos a un espesor cortical menor a 34 km, evidenciaron procesos de asimilación cortical con alta energía, fusión de clinopiroxeno y cristalización fraccionada con nucleación rápida de cristales con baja velocidad de enfriamiento y alta presión dando un exceso de SiO₂ y expulsando posiblemente H₂O como fluido hidrotermal inmiscible de alta temperatura, alterando mayormente a los minerales de la Super Unidad Patap generando actinolita, clorita, epidota y trazas de pirita.

References

- [1] Barton, M., and Young, S., Non-pegmatitic deposits of beryllium; mineralogy, geology, phase equilibria and origin: Beryllium; mineralogy, petrology, and geochemistry. Edited by Grew, E.S., Reviews in Mineralogy and Geochemistry 50, pp. 591-691., 2002. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.14>.
- [2] Ccallo, W., López, Y., Weimin, G., Junan, L., Shizhong, Ch. y Zheng, D., Características litogeoquímicas y petrográficas en los bordes norte y sur del segmento Lima - batolito de la costa, comparada con el sureste de China. INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales, 35, 1 mapa, 2021, 69 P.
- [3] Ccallo, W., Mamani, Y., Guo, W., Junan, L., Shizhong, C., Zheng, D. y Choquehuanca, S., Geocronología y geoquímica del Batolito de la Costa entre 9° 30' y 10° 30' S. INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales, 39, 1 mapa, 2023, 125 P.
- [4] Cerrón, J., Romero, S., Quintana, P., Gutiérrez, Y. y Hernández, E., Caracterización litogeoquímica, petrográfica y análisis mineralógico por difracción de Rayos X de los afloramientos intrusivos en los Cerros San Cristóbal, Altillio y La Virgen, Lima-Perú. Primer Encuentro Nacional de Capítulo de Estudiantes de la SGA- Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), 2019.
- [5] Cobbing, E., The Coastal Batholith and other aspects of Andean Magmatism in Peru. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, pp. 5-20, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107298>.
- [6] De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., and Marchal, M., A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses—Its relationships with current nomenclature. Chemical Geology, 29, pp. 183-210, 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0).
- [7] Jacay, J., and Sempere, T., Emplacement levels of the Coastal Batholith in Central Peru. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts, 2005, pp. 397-399.
- [8] Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F., Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram, Journal of Petrology, 48(12), pp. 2341-2357, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>.
- [9] Keppler, H., and Wyllie, P.J., Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes. Nature, 348, pp. 531-533, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1038/348531a0>.
- [10] León, W. y De La Cruz, O. Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Mala (26-j), Lurín (25-j) y Lima (25-l), Escala 1:10000: INGEMMET, Memoria descriptiva, 2003, 15 P.
- [11] López, J.P. y Bellos, L.I., Texturas y estructuras de las rocas ígneas: significado petrológico e implicancias en las condiciones de formación de las rocas. INSUGEO, Miscelánea 15, pp. 7-57, 2006. ISSN 1514-4836 - ISSN 1668-3242.
- [12] Mamani, M., Carlotto, V., Rodríguez, J., Giraldo, E., Santos, A., Cueva, E., Aguilar, R., Peña, D., Rodríguez, F., Chávez, L., Cereceda, I., Flores, R. y Choquehuanca, S., Base de datos nacional de geocronología del Perú. XV Congreso Peruano de Geología, Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. (9), Cusco pp. 934-936, 2010.
- [13] Mantle, G.W., and Collins, W.J., Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth. Geology, 36, pp. 87-90, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1130/G24095A.1>.
- [14] McDonough, W.F., and Sun, S., The composition of the Earth: Chemical Geology, 120(3-4), pp. 223-253, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- [15] Montano, H., Caracterización geoquímica de magmas y su relación con la formación de yacimientos en el norte del Perú. Informe de suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2010.
- [16] Mukasa, S.B., and Tilton, G.R., Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru, In: Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J., and Beckinsale, R.D., eds., Magmatism at a plate, 1985. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5820-4_17.
- [17] Mukasa, S.B., Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru: implication and tectonic processes. Geological Society of America Bulletin, 97, pp. 241-254, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<241:ZUAOSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<241:ZUAOSI>2.0.CO;2).
- [18] Palacios, O., Caldas, J. y Vela, C., Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. INGEMMET. Boletín N°43, Serie A: Carta Geológica del Perú, 1992.
- [19] Pearce, J.A., A User's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D.A., Ed., Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration, Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12, pp. 79-113, 1996.
- [20] Pedemonte, G., Informe de Laboratorio: estudio petrográfico de 3 muestras. Documento IL-005-1217-M. EPC Lab - Investigaciones en Petrografía y Mineralogía, 2017.
- [21] Pitcher, W., Anatomía de un Batolito. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Tomo 60, 1977.
- [22] Ross, P.S., and Bedard, J.H., Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. Canadian Journal of Earth Sciences, 46(11), pp. 823-839, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1139/E09-054>.
- [23] Sempere, T., and Jacay, J., Anatomy of the Central Andes: distinguishing between western magmatic Andes and Eastern, tectonic Andes. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts, 2008, pp. 504-507.
- [24] Soler, P., Cronología y distribución espacial del Magmatismo en el Perú central durante el Cretáceo Superior y el Cenozoico - Relaciones con las modalidades de subducción de la Placa de Nazca (Farallón) debajo del Continente Sud-americano. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 81, pp. 81-86, 1990.

J.F. Cerrón-Sarcco, recibió su título en Ing. Geológica en 2017 en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. De 2017 hasta la actualidad ha trabajado en diversas empresas mineras privadas ligadas a exploración y explotación de Au, Ag, Pb, Zn, Cu y Mo en Perú, Ecuador y Colombia, y también desarrollando investigaciones independientes en geociencias expuestos en congresos y revistas de Perú, Ecuador, Chile y Argentina. Actualmente, es Jefe de Exploraciones *Brownfield* de una empresa minera privada en Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen: geoquímica, geofísica, exploración minera y cálculo de recursos minerales ORCID: 0000-0003-1640-3800.

ANEXOS

Tabla 2.

Resultados geoquímicos del análisis de laboratorio por ICP-OES e ICP-MS.

N°	1	2	3	4	5	6	7
Código Interno	AL-01	AL-02	AL-03	AL-04	LV-01	LV-02	LV-03
Ubicación	Alttillo	Alttillo	Alttillo	Alttillo	La Virgen	La Virgen	La Virgen
Este	279945	279948	280018	280086	279930	279917	279897
Norte	8669325	8669372	8669304	8669245	8669384	8660384	8669458
Elevación	290	293	286	293	300	298	313
Litología	Cuarzomonzonita	Monzogranito	Cuarzomonzonita	Cuarzosienita	Granodiorita	Granodiorita	Tonalita
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico superior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa
SiO₂ (%)	74.45	73.19	76.72	72.72	74.03	73.67	74.15
TiO₂ (%)	0.28	0.31	0.18	0.26	0.30	0.32	0.28
Al₂O₃ (%)	12.94	13.74	12.59	14.11	13.48	12.93	13.61
Fe₂O₃ (%)	2.96	3.00	1.63	2.96	3.09	2.73	3.41
MgO (%)	0.49	0.59	0.23	0.57	0.54	0.53	0.62
MnO (%)	0.05	0.05	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03
CaO (%)	2.05	1.81	1.21	2.16	2.53	2.10	2.79
Na₂O (%)	3.61	4.01	3.87	3.91	5.19	4.21	4.63
K₂O (%)	3.11	3.27	3.55	3.23	0.74	3.36	0.45
P₂O₅ (%)	0.05	0.04	0.01	0.05	0.06	0.10	0.04
LOI* (%)	1.58	1.24	1.00	1.72	1.12	1.04	1.24
Rb (ppm)	80.58	90.87	90.28	100.94	42.61	96.22	19.40
Sr (ppm)	117.62	117.81	84.51	137.80	149.92	131.14	189.62
Y (ppm)	45.29	42.72	48.59	41.35	56.54	51.86	48.89
Zr (ppm)	259.13	278.88	199.25	230.62	278.86	301.05	223.31
Nb (ppm)	4.77	4.46	5.10	4.26	4.98	4.40	4.79
Cs (ppm)	0.82	1.51	0.97	1.45	0.64	1.06	0.46
Ba (ppm)	1037.11	1099.54	1357.94	1094.79	242.51	1016.36	308.85
Hf (ppm)	8.19	7.96	6.80	7.58	8.35	8.15	7.24
Ta (ppm)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Pb (ppm)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Th (ppm)	15.82	13.42	17.37	15.82	14.41	14.74	15.70
U (ppm)	4.14	4.42	4.45	4.10	4.31	3.94	3.78
Cs (ppm)	0.82	1.51	0.97	1.45	0.64	1.06	0.46
V (ppm)	17.86	20.29	<10	20.27	17.93	19.07	15.07
Cr (ppm)	10.40	10.17	4.54	9.84	10.67	9.86	11.66
Ni (ppm)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Cu (ppm)	2.70	11.93	<2	6.88	50.27	8.39	2.57
Zn (ppm)	22.31	28.21	11.40	23.17	20.19	24.64	16.48
La (ppm)	27.79	30.52	31.45	31.90	34.59	33.90	32.60
Ce (ppm)	59.96	57.18	59.24	62.15	59.18	60.60	53.40

Nd (ppm)	30.37	29.04	27.91	30.30	29.49	31.27	27.51
Pr (ppm)	7.15	7.06	6.95	7.26	7.16	7.58	6.51
Sm (ppm)	7.06	6.35	6.13	6.77	7.52	7.17	6.51
Gd (ppm)	7.33	5.87	5.73	6.35	7.90	6.84	6.78
Tb (ppm)	1.19	0.95	1.02	1.04	1.39	1.10	1.18
Dy (ppm)	7.97	6.18	7.26	7.09	9.01	7.39	7.68
Ho (ppm)	1.62	1.29	1.54	1.42	1.84	1.53	1.59
Er (ppm)	5.30	4.40	5.34	4.69	5.87	5.16	5.35
Tm (ppm)	0.75	0.63	0.78	0.69	0.85	0.78	0.80
Yb (ppm)	5.37	4.59	5.55	4.52	5.83	5.24	5.31
Lu (ppm)	0.89	0.77	0.84	0.76	0.93	0.84	0.88

Fuente: el autor.

Tabla 3.
Continuación de la Tabla 2.

Nº	8	9	10	11	12	13	14
Código Interno	LV-04	LV-05	SC-01	SC-02	SC-03	SC-04	SC-05
Ubicación	La Virgen	La Virgen	San Cristobal	San Cristobal	San Cristobal	San Cristobal	San Cristobal
Este	279850	279804	280154	280451	280505	280321	280211
Norte	8669505	8669569	8669112	8668941	8668840	8668708	8669004
Elevación	323	329	290	308	343	390	320
Litología	Granito	Gabro	Sienogranito	Diorita/gabro	Diorita/gabro	Tonalita	Tonalita
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap
SiO₂ (%)	76.12	49.95	75.81	62.68	61.94	62.20	65.21
TiO₂ (%)	0.18	0.71	0.09	0.67	0.72	0.71	0.56
Al₂O₃ (%)	11.84	17.02	13.21	15.80	15.34	15.23	16.11
Fe₂O₃ (%)	1.98	11.25	1.25	7.52	8.38	8.40	5.74
MgO (%)	0.14	6.58	0.08	2.08	2.42	2.28	1.39
MnO (%)	0.03	0.18	0.03	0.11	0.11	0.10	0.07
CaO (%)	0.59	9.61	0.56	5.43	5.60	5.38	4.82
Na₂O (%)	3.87	3.46	3.86	3.88	3.63	3.65	4.31
K₂O (%)	5.19	1.09	5.10	1.68	1.72	1.89	1.65
P₂O₅ (%)	0.05	0.15	0.01	0.14	0.14	0.16	0.14
LOI* (%)	1.05	1.40	0.47	1.19	1.37	1.80	1.45
Rb (ppm)	107.93	63.78	130.30	69.58	83.79	108.82	71.65
Sr (ppm)	46.40	231.37	32.96	248.40	248.29	247.95	258.64
Y (ppm)	62.69	16.65	72.34	28.18	27.93	29.32	26.14
Zr (ppm)	206.12	53.68	261.68	207.00	140.78	139.96	254.63
Nb (ppm)	5.74	1.24	5.79	3.11	3.34	3.14	4.14
Cs (ppm)	0.83	1.30	1.87	1.55	2.07	2.00	1.61
Ba (ppm)	1214.89	319.46	1283.66	555.64	545.39	571.74	720.25
Hf (ppm)	6.73	1.57	10.32	6.01	4.79	4.51	7.91
Ta (ppm)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Pb (ppm)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Th (ppm)	25.76	2.66	30.90	6.52	6.48	6.34	6.74
U (ppm)	5.62	0.88	7.35	2.08	2.12	2.05	2.37
Cs (ppm)	0.83	1.30	1.87	1.55	2.07	2.00	1.61
V (ppm)	<10	271.93	<10	120.25	156.67	141.19	72.30
Cr (ppm)	5.32	94.64	3.75	30.99	34.94	35.39	24.14
Ni (ppm)	<5	21.13	<5	<5	<5	<5	<5
Cu (ppm)	5.89	6.13	3.70	47.62	53.97	87.74	10.65
Zn (ppm)	12.49	66.45	10.55	49.09	62.81	55.42	33.77
La (ppm)	39.85	35.11	41.08	28.79	31.53	29.81	26.60
Ce (ppm)	88.32	17.88	93.43	34.25	39.79	37.12	31.16
Nd (ppm)	46.30	10.17	43.97	19.05	22.70	20.11	19.95
Pr (ppm)	11.06	2.26	11.01	4.30	4.94	4.56	4.17
Sm (ppm)	10.15	2.69	9.72	4.81	5.44	4.84	4.92
Gd (ppm)	9.15	2.87	10.05	4.98	5.59	5.12	5.37
Tb (ppm)	1.48	0.44	1.74	0.80	0.98	0.84	0.84
Dy (ppm)	9.52	3.00	11.87	5.46	5.68	5.45	5.75
Ho (ppm)	2.02	0.61	2.55	1.10	1.19	1.13	1.16
Er (ppm)	6.39	1.91	8.76	3.50	3.80	3.56	3.69
Tm (ppm)	0.92	0.26	1.33	0.49	0.51	0.49	0.52
Yb (ppm)	6.42	1.74	9.12	3.30	3.46	3.28	3.60
Lu (ppm)	0.99	0.29	1.46	0.56	0.58	0.53	0.58

Fuente: el autor.

Tabla 4.
Resultados del análisis de difracción de Rayos X.

N°	1	2	3	4
Código Interno	AL-02	LV-05	SC-02 (Xenocrystal)	SC-03
Ubicación	Altillio	La virgen	San Cristobal	San Cristobal
Este	279948	279804	280451	280505
Norte	8669372	8669569	8668941	8668840
Elevación	293	329	308	343
Litología	Monzogranito	Gabro	Diorita	Diorita/gabro
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap
Actinolita (Wt%)	1.71	61.18	31.18	12.09
Albita (Wt%)	42.14	20.59	34.18	22.46
Andesina (Wt%)	-	14.42	-	6.63
Clinocloro (Wt%)	1.04	3.53	1.84	1.25
Cuarzo (Wt%)	34.52	0.29	11.39	26.3
Ortoclase (Wt%)	20.59	-	-	22.85
Flogopita (Wt%)	-	-	21.42	-
Epidota (Wt%)	-	-	-	8.43

Fuente: el autor.



Aplicación y evaluación de una metodología para la reconversión productiva en comunidades mineras

Oscar Jaime Restrepo-Baena, Alex Manuel Lemus-Madrid, Gustavo Adolfo Viana-Casas, Jhenny Muñoz-Hincapie & Jorge Iván Tobón

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Observatorio Ígnea, Medellín, Colombia. ojrestre@unal.edu.co, almlemusma@unal.edu.co, gaviana@unal.edu.co, jhennymh@gmail.com, jitobon@unal.edu.co

Recibido: 22 enero 2025. Recibido en formato revisado: 04 abril 2025. Aceptado: 07 abril 2025.

Resumen

En el marco del Convenio Interadministrativo N° ANM-608-2023, se tomó la “Metodología para la reconversión económica en minería de pequeña y mediana escala” [1], desarrollada por la Agencia Nacional de Minería (ANM) y se aplicó en 5 comunidades mineras que iniciaron el proceso de formalización mediante áreas de reserva especial (ARE) con terminación posterior. La implementación se realizó con el objetivo de validar la metodología formulada desde la ANM, identificando aciertos y dificultades asociadas con su ejecución que permitieron llegar a recomendaciones específicas sobre cada fase, así como a la propuesta de ajustes generales para su refinamiento y aplicación en procesos futuros de reconversión económica. Se encontró que resulta indispensable abordar la reconversión productiva y laboral de manera integral, apuntando a crear entornos donde se pueda dar el aprovechamiento de las vocaciones del territorio y se promueva el planteamiento de actividades económicas alineadas con las perspectivas de desarrollo a nivel municipal y regional.

Palabras clave: Área de Reserva Especial (ARE); comunidad minera; reconversión productiva; sostenibilidad.

Application and evaluation of a methodology for productive reconversion in mining communities

Abstract

Within the framework of Inter-Administrative Agreement No. ANM-608-2023, the "Methodology for economic reconversion in small and medium scale mining" [1], developed by the National Mining Agency (ANM), was adopted and applied in 5 mining communities that began the formalization process through special reserve areas (ARE) with subsequent conclusion. The implementation was carried out with the objective of validating the methodology formulated by the ANM, identifying successes and difficulties associated with its execution that allow for specific recommendations for each phase, as well as the proposal of general adjustments for its refinement and application in future economic reconversion processes. It was found that it is essential to address productive and labour reconversion in a comprehensive manner, aiming to create environments where the territory's vocations can be used and the approach of economic activities aligned with development prospects at the local and regional levels can be promoted.

Keywords: Special Reserve Area (SRA); mining communities; productive reconversion; sustainability.

1 Introducción

Los procesos de formalización minera de la pequeña minería pretenden generar un entorno en donde ésta pueda alcanzar el cumplimiento de todos los requisitos que establece la normatividad e implementar estándares mínimos operacionales. No obstante, los procesos de formalización no siempre se completan, ya que pueden surgir situaciones en los ámbitos técnico, ambiental, social, económico, legal,

político o de infraestructura, que crean barreras para su avance y finalización.

En este sentido, el Gobierno nacional ha orientado esfuerzos para crear una plataforma de acompañamiento a quienes desean vincularse a procesos de formalización minera a través de la Ley 2250 del 2022 y sus reglamentaciones. Uno de los puntos importantes de esta ley tiene que ver con el manejo de los impactos sociales para los casos en que los procesos de formalización no se completan,

How to cite: Restrepo-Baena, O.J., Lemus-Madrid, A.M., Viana-Casas, G.A., Muñoz-Hincapie, J. y Tobón, J.I., (2025). Aplicación y evaluación de una metodología para la reconversión productiva en comunidades mineras. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 57, pp. 22-31. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n57.118448>

pues dicha situación representa un reto especialmente importante para las personas que ya no podrán continuar con las labores de explotación en el área que venían desarrollándola., como menciona, por ejemplo, Hetmańczyk en [2] refiriéndose a los escenarios de transformación productiva de comunas carboneras en Polonia, donde resalta la importancia de una adecuada política estatal para mitigar los impactos sociales negativos asociados al fenómeno de clausura de minas, especialmente en lo relacionado con los procesos de transición laboral.

El tema de la reconversión de actividades mineras es abordado específicamente en el artículo 20 de la norma:

“Reconversión de actividades mineras: [...] los mineros cobijados por las figuras de formalización y legalización [...] que por temas sociales, económicos o ambientales no puedan continuar con el desarrollo de sus actividades, podrán optar por alternativas productivas diferentes a la minería. Para el efecto el Gobierno nacional reglamentará los lineamientos de estas actividades, donde se tendrá en cuenta la vocación del suelo, la economía de la región, instrumentos de planificación ambiental, duración de los proyectos a mediano y largo plazo, identificación fuentes de financiación, entre otros. [...]” [3]

Lo dispuesto en el anterior artículo ha dado pie a diversas iniciativas por parte de entidades del Estado, en especial dentro de la cartera minas y energía. Uno de estos casos, es el del Convenio Interadministrativo N° ANM-608-2023, que se celebra entre la Agencia Nacional de Minería (ANM) y la Universidad Nacional de Colombia y enmarca el proyecto ‘Estrategia de sistemas asociativos y programas de reconversión productiva en comunidades mineras’.

En el proyecto se establecen dos líneas de trabajo, una de estas orientada a la ejecución de cinco pilotos de reconversión productiva con las comunidades mineras asociadas a cinco áreas de reserva especial, que, por diversas razones, tuvieron una terminación posterior y no lograron completar su proceso de formalización.

En este contexto, resulta relevante la descripción formal de los conceptos de formalización minera, comunidad minera y programa de reconversión. El primero se expone en la Resolución 40195 del 2021 del Ministerio de Minas y Energía (MME), donde se plantea que la formalización “se enfoca en el cumplimiento por parte de las Unidades de Producción Minera (UPM) de los estándares legales, técnicos, ambientales, económicos, sociales y laborales que permiten que la pequeña minería sea una actividad económica legal, viable, rentable, segura, ambientalmente sostenible y que contribuya al desarrollo de las comunidades y sus regiones” [4]. El segundo término proviene del artículo 1 de la Resolución 41107 del 2016 del MME, donde se plantea la definición de “Comunidad Minera: para efectos de la declaratoria de áreas de reserva especial [...] se entiende por comunidad minera a la agrupación de personas que adelantan explotaciones tradicionales de yacimientos mineros en un área específica en común” [5]. A su vez, el tercer término se toma del artículo 6 de la Resolución 40279 del 2022, que expone el concepto de “Programa de reconversión: programa encaminado a identificar alternativas productivas diferentes a la actividad minera para los

pequeños mineros tradicionales [...]” [6].

El desarrollo de los pilotos, ejecutado por un equipo de trabajo de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, tiene por objeto la aplicación de las primeras cinco etapas de la “Metodología para la reconversión económica en minería de pequeña y mediana escala”, asimismo, se contempla su evaluación con base en los resultados de implementación y la propuesta de recomendaciones que pueda adoptar la ANM para la mejora y ajuste de esta. La metodología aplicada, los detalles de la ejecución de los pilotos de reconversión, los resultados alcanzados con el proyecto, así como algunas conclusiones a partir del ejercicio desarrollado, se describen en las siguientes secciones de este documento.

2 Descripción de la metodología

La “Metodología para la reconversión económica en minería de pequeña y mediana escala” fue diseñada por la ANM como un conjunto de herramientas, que, mediante su aplicación secuencial, configuran un entorno para apoyar la transición de pequeños explotadores mineros hacia otras actividades productivas, apoyándose en el marco normativo de la Ley 2250 del 2022 y siguiendo las premisas de: 1) Incluir bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, como son, el enfoque diferencial y la participación vinculante; 2) Focalizar los procesos de reconversión hacia comunidades que realicen minería de pequeña escala en zonas excluibles o con problemáticas ambientales, así como a mineros cuyas solicitudes de formalización hayan sido rechazadas; y, 3) Asumir la reconversión como un proceso particular para cada minero que requiere la manifestación de voluntad para su participación [1].

La metodología comprendió siete fases para su desarrollo, que se resumen a continuación [1]:

Fase 0. Identificación y definición de comunidades a intervenir: Consistía en el alistamiento de herramientas como manuales e instructivos, la selección de proyectos para intervenir, el mapeo de actores institucionales y entidades cooperación en los territorios, así como la programación de acciones a ejecutar que resultaba en un plan operativo y un cronograma de actividades.

Fase 1. Recolección de la información del territorio: Comprendía el levantamiento y análisis de información económica, social, ambiental, así como del ordenamiento territorial y los planes de desarrollo locales y regionales en la zona donde se encuentra la comunidad, siendo esta información articulada en una ficha de caracterización territorial. Asimismo, se revisó el expediente del proceso de formalización de la comunidad minera y se hizo un viaje a terreno junto con la primera interacción con actores institucionales y comunitarios que pudieran acompañar el proceso de reconversión.

Fase 2. Acercamiento a la comunidad minera y sensibilización: Consistía en generar una aproximación a la comunidad minera, estableciendo un canal de comunicación y realizando una jornada de sensibilización sobre los procesos de reconversión con sus miembros. Con base en lo anterior se construyó un informe sobre los compromisos y aptitudes de los responsables mineros (término con el que en

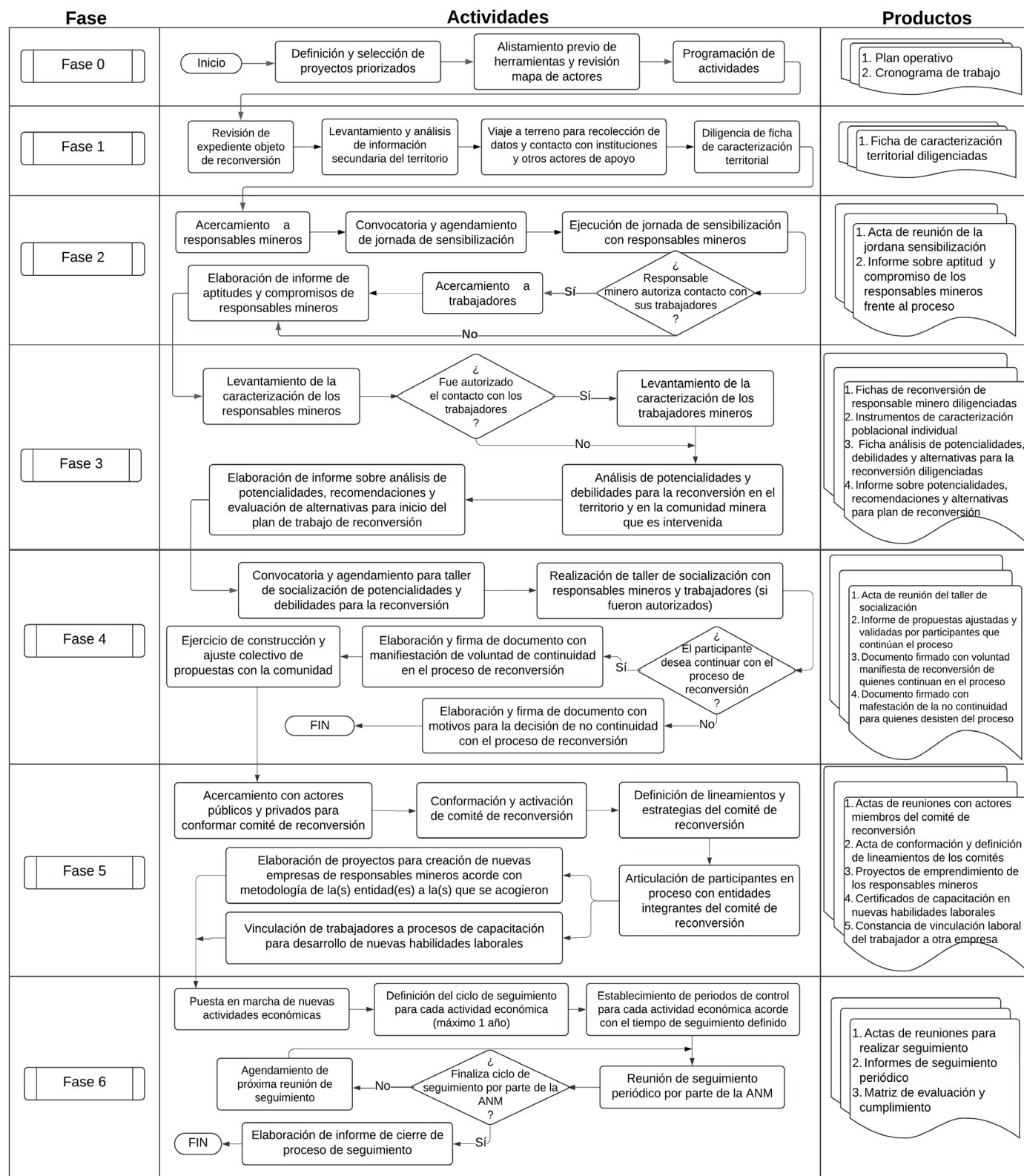


Figura 1. Esquematización de las fases de la metodología

Fuente: Los autores con base en [1]

adelante se hace referencia a los beneficiarios del ARE extinta) frente al proceso de reconversión y se estableció si se contaba, o no, con el permiso para iniciar un contacto con sus trabajadores.

Fase 3. Elaboración de análisis de potencialidades y alternativas para el inicio del plan de trabajo de reconversión: En esta se realizaba una caracterización, en territorio, de los responsables mineros y sus trabajadores, aplicando una ficha de caracterización específica por cada grupo. Luego, mediante el procesamiento de la información levantada, se construyó un análisis de potencialidades, debilidades y propuestas iniciales de alternativas para la reconversión, lo cual se consolidó en una ficha técnica y en un informe.

Fase 4. Validación y concertación del análisis de potencialidades con grupos de interés: Constaba de un ejercicio de socialización, abordado mediante un taller, donde se expuso el análisis construido de la fase anterior y se realizó una construcción y ajuste colectivo de las propuestas de iniciativas de reconversión, obteniendo un documento final validado. De igual manera, en este contacto con la comunidad se estableció si existía o no el deseo manifiesto de participar en el programa de reconversión por parte de cada responsable minero y trabajador, cuando existía el deseo de continuar se procedió con las últimas fases, y, en los casos en que no se deseara continuar el proceso, se finalizó dejando por escrito la decisión.

Fase 5. Configuración y dinamización del comité de reconversión: Se ejecutaba en los casos que se expresó la voluntad de continuar en el proceso de reconversión y contenía las acciones pertinentes de la configuración y activación de un comité de reconversión compuesto por actores de los sectores públicos y privados (como las alcaldías, las cámaras de comercio, el SENA, ONG presentes en la región), así como la definición de sus lineamientos y las estrategias que permitieran articular la participación de los responsables mineros y trabajadores en procesos de creación de nuevas empresas o de capacitación sobre nuevas habilidades laborales.

Fase 6. Seguimiento de los compromisos de reconversión: Se proyectaba una duración máxima de un año, de acuerdo con la sugerencia del experto de cada proyecto de reconversión aprobado, en el que la ANM desarrollaría seguimiento a los compromisos definidos por el comité, junto con la puesta en funcionamiento de las nuevas actividades económicas. Este ejercicio se materializaría en informes de seguimiento periódicos y la actualización de una matriz de evaluación que permite cerrar el programa al cumplirse el periodo de la fase.

En este orden de ideas, en la Fig. 1 se expone un esquema de la metodología, en el que muestra la secuencia de actividades por cada fase y los productos que se esperan obtener al completar cada una de ellas.

La metodología plantea unas fases secuenciales de intervención directa con las comunidades mineras que fueron seleccionadas y cierra con una fase de seguimiento en la que la ANM, con el apoyo del comité de reconversión conformado, se hizo un control periódico al avance las nuevas actividades económicas planteadas para la sustitución de la minería. En este sentido, en el alcance de las actividades planteadas para ejecutar con los pilotos propuestos dentro del Convenio Interadministrativo N° ANM-608-2023, se abordaron de manera completa las acciones y productos propuestos desde la fase 0 hasta la fase 4 de la metodología,

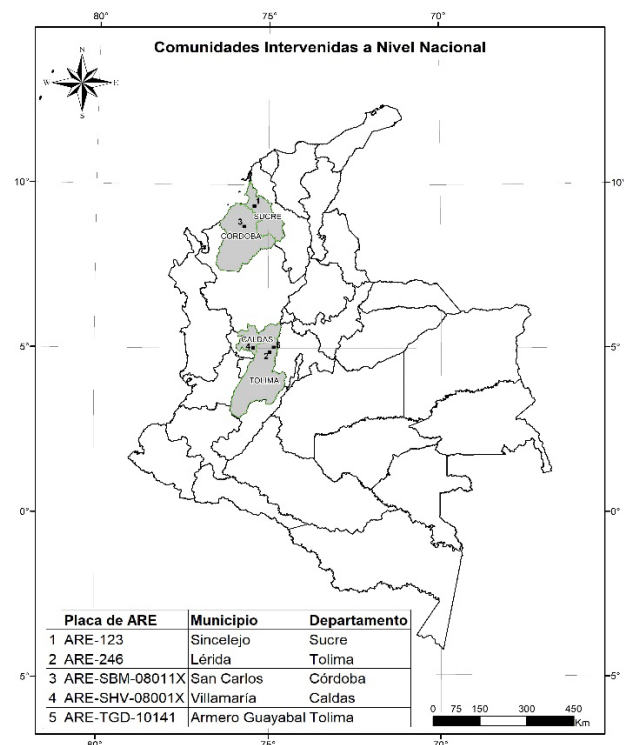


Figura 2. Distribución de las ARE seleccionada para los pilotos de reconversión en el territorio nacional

Fuente: Los autores con base en [7-11]

y se cerró en la fase 5, donde se estableció una preparación inicial de las actividades que se estipulaban para la conformación de los comités de reconversión.

1 Ejecución de los pilotos de reconversión productiva

Los pilotos de la metodología de reconversión se implementaron con las comunidades mineras de cinco ARE con terminación posterior, que fueron establecidas por la Agencia Nacional de Minería. Los números de expediente para las ARE intervenidas, el municipio y departamento donde se ubicaban las áreas delimitadas y su distribución en el territorio nacional se exhibe seguido en la Fig. 2.

1.1 Ejecución de la fase 0

La ANM realizó la selección de las comunidades mineras para la realización de los pilotos, indicando las comunidades a intervenir, preparó las herramientas de la metodología a implementar y estableció los perfiles mínimos profesionales incluyendo trabajador social y economista con enfoque en comunidades. La Universidad Nacional conformó el equipo de trabajo, que, una vez aprobado por la ANM, se encargó de construir el plan operativo y el cronograma de trabajo para la ejecución de los pilotos, validando mediante sesiones de retroalimentación con la ANM. Se estableció un periodo de 5 meses, entre agosto y diciembre del año 2023, para ejecutar los 5 pilotos definidos dentro del proyecto desarrollando desde la fase 1 hasta la fase 4, sumando una preparación inicial de las actividades contempladas para las fases 5 y 6.

1.2 Ejecución de la fase 1

Iniició con la revisión de los expedientes de cada ARE, con el objetivo de estudiar la evolución de cada proceso, encontrando que estos finalizaron entre noviembre del año 2021 y diciembre del año 2022 [6-10]. Asimismo, se buscó detectar otros datos relevantes como la cantidad de beneficiarios finales que tuvo la comunidad minera, cuál era el mineral o minerales que se explotaba dentro del ARE y entender los motivos para la finalización del proceso antes de que pudiese concretarse la firma del contrato especial de concesión (véase la Tabla 1).

Luego se procedió con la caracterización territorial de las zonas donde se encuentran ubicadas las ARE seleccionadas, contemplando la revisión de los planes de desarrollo municipales del periodo 2020 a 2023, los instrumentos de ordenamiento territorial y la información disponible en el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el Departamento Nacional de Planeación (DNP). Luego, se efectuaron visitas de campo en cada municipio, generando contacto con las alcaldías y las oficinas de SISBEN, donde se recolectó información socioeconómica adicional, y se realizaron también, recorridos en terreno en los sectores que estaban cubiertos por cada ARE.

En este ejercicio se obtuvo una visión integral y actualizada de las características geográficas, socioeconómicas y ambientales de las zonas de estudio, identificando aspectos relevantes como la estructura demográfica de las comunidades locales, la actividad económica predominante, los recursos naturales presentes, la infraestructura existente, entre otros elementos clave para comprender el contexto territorial de las ARE seleccionadas. Consolidando esta fase en Fichas de Caracterización Territorial de cada municipio donde se intervino, siendo estas una herramienta de la metodología.

1.3 Ejecución de la fase 2

Se contactó a los responsables mineros y se organizaron jornadas de sensibilización en cada municipio, apuntando a profundizar en la comprensión de la situación actual de estas y su conexión con el territorio.

El método para abordar cada jornada se adaptó de acuerdo con la cantidad de personas presentes en cada reunión, para las comunidades de Armero Guayabal y San Carlos, que eran más numerosas, la jornada se ejecutó en un formato de taller, mientras que, con las comunidades de Lérída, Sincelejo y Villamaría, al tener un pequeño número de miembros, las jornadas se abordó a manera de entrevistas orientadas, generando diálogo y retroalimentación entre el equipo de trabajo y los responsables mineros.

En las jornadas se abordaron temas clave como la reconversión productiva, la sostenibilidad ambiental, la inserción laboral y otras alternativas para el desarrollo económico de las comunidades mineras, creando un espacio de diálogo y reflexión donde los responsables mineros podían compartir sus experiencias, inquietudes y perspectivas sobre el futuro de sus actividades y su relación con el entorno. Destacando que, aunque habían sido notificados, buena parte de los responsables mineros no se encontraban conscientes sobre la finalización de sus procesos de formalización, y que muchos accedieron a participar del proceso de reconversión, pero expresaron que les interesaría explorar mecanismos alternativos para continuar con la actividad minera.

Esta fase se cerró con la consulta sobre la voluntad o no de avanzar en el proyecto por parte de cada responsable minero, así como de contactar a sus trabajadores, en los casos que tenían. Encontrando, salvo por una persona de comunidad del ARE-246 (Lérída, Tolima), respuesta positiva en todos los asistentes a las jornadas.

Tabla 1.
Resumen de revisión de los expedientes de las comunidades intervenidas

Expediente	Cantidad de personas	Comunidad minera	Mineral explotado	Motivo de finalización
ARE-123	02	Grupo de empresarios mineros de Sincelejo	Materiales de la construcción	La no presentación oportuna del PTO y el abandono injustificado de los trabajos mineros
ARE-246	02	Grupo de mineros de Lérída	Mármol	Renuncia de uno de los miembros del proceso de formalización por conflictos internos en la comunidad
ARE-SBM-08011X	07	Comunidad de mineros de Santa Rosa (San Carlos, Córdoba)	Materiales de la construcción	La no presentación oportuna del PTO e incumplir otros requerimientos ante la ANM
ARE-SHV-08001X	03	Grupo de areneros de Llanitos (Villamaría, Caldas)	Materiales de la construcción	La no presentación oportuna del PTO e incumplir otros requerimientos ante la ANM
ARE-TGD-10141	22	Comunidad de paleros de Armero Guayabal	Materiales de la construcción	La no presentación oportuna del PTO, con el vencimiento de términos en 2 ocasiones

Fuente: Los autores con base en [7-11]

1.1 Ejecución de la fase 3

Se coordinó con las comunidades mineras las fechas para encuentros en cada municipio donde se recopiló información

de cada uno de los responsables mineros y de las actividades que realizan, utilizando la “Ficha de reconversión de titular o responsable minero”, y con sus trabajadores, se aplicó el “Instrumento de caracterización poblacional - individual

trabajadores mineros”. Posteriormente, con la información recopilada, se procedió a computar una “Ficha de análisis de potencialidades, debilidades y alternativas de diversificación” para cada territorio y población específica. Cerrando con un diagnóstico de las potencialidades y de las alternativas para reconversión productiva, como insumo para establecer planes estratégicos integrales que buscan potenciar el desarrollo económico de las personas involucradas.

1.2 Ejecución de la fase 4

Se agendaron y realizaron talleres de socialización, sobre el análisis construido de la fase anterior, con la participación de cada comunidad minera, sumando a sus trabajadores. Luego, se tuvo un espacio para definir con cada participante si tenía la voluntad o no para ingresar a los programas de reconversión, encontrando unanimidad en el deseo de ser parte de los programas de reconversión en cada territorio.

Al contar con la voluntad de inserción de los asistentes, en el programa de reconversión, se procedió a la construcción, de manera conjunta, con los responsables mineros, de las propuestas de posibles alternativas de planes de reconversión productiva, que fueron consolidados en un informe para cada comunidad intervenida, permitiendo avanzar a la fase final de las actividades programadas.

1.3 Preparación de la fase 5

Para la finalización de las actividades en terreno se planteó confirmar que entidades y personas dentro de estas, estarían interesadas en participar en los comités de reconversión, teniendo en cuenta actores presentes en la jurisdicción municipal de cada comunidad, como alcaldías, asociaciones, SENA, fundaciones, entre otros.

En este orden de ideas, se convocó a entes públicos y privados y se agendaron reuniones presenciales en los cascos urbanos de cada municipio, donde se explicó la importancia de estos comités para garantizar la implementación efectiva y el control de los planes de reconversión, pues estos, viabilizan la coordinación de esfuerzos y la identificación de fuentes de recursos para la ejecución de los proyectos. Al final de estas reuniones, se levantaron actas como evidencia de la intención en ser parte de los comités, por parte de todas las personas que así lo manifestaron.

1.4 Preparación de la fase 6

Se construyó una base de datos con las instituciones y organizaciones que en cada territorio se sumaron a los comités de reconversión, esta información fue suministrada a la ANM como parte de los insumos generados. De igual manera, como parte del ejercicio de propiciar la conformación de comités, se expuso a los representantes de las entidades asistentes los lineamientos planteados por la metodología para el seguimiento a los compromisos de reconversión, enfatizando que el proceso de acompañamiento se contempla con una duración máxima de un (1) año, periodo en el cual se esperaría que las personas hayan adquirido la capacidad de continuar de manera autónoma con la ejecución de sus nuevas actividades económicas.

2 Resultados alcanzados en el proyecto

2.1 Población impactada

A través del ejercicio de implementación de la metodología construida por la ANM se logra impactar a una población de 35 responsables mineros, que decidieron de manera voluntaria sumarse al proceso de reconversión productiva resultante de la terminación posterior de su proceso de formalización mediante ARE.

Al completar las fases implementadas, estos logran tener una mejor comprensión de los motivos de finalización de sus procesos de formalización, así como nuevas perspectivas sobre actividades económicas alternativas para desarrollar.

En este sentido, con la guía y acompañamiento del equipo de trabajo, la población minera adelanta la construcción de 16 bocetos de proyectos productivos contemplando objetivos, justificación, recursos necesarios, cronograma, presupuesto y actividades.

Los bocetos de proyectos productivos son diversos, pues parten de las habilidades con las que cuenta cada persona, así como de los recursos económicos que tiene disponibles o considera que puede gestionar, en estos resultaron iniciativas como: proyectos de producción agropecuaria asociativa (café, porcícola y avícola); montaje de talleres de servicios metalmecánicos y eléctricos; creación de un taller para fabricación de calzado; proyectos para la parcelación de terrenos, la construcción de complejo de apartamentos y el alquiler de maquinaria amarilla en obras civiles; la consolidación de proyectos de ecoturismo; y, la apertura de restaurantes con el núcleo familiar.

Estos bocetos conforman un insumo importante para una futura etapa de acompañamiento por parte de los comités de reconversión, pues permiten trazar una ruta de trabajo con cada grupo de mineros una vez inicien el tránsito a la reconversión.

2.2 Comités de reconversión

Se consolida la preparación inicial para los comités de reconversión, reflejada en las actas de reuniones con los diferentes actores en cada municipio y en las constancias dejadas por escrito de su voluntad para participar y apoyar la activación de los futuros comités.

Este producto le permite a la ANM poder retomar la implementación de la metodología en sus fases más avanzadas para dar pie, de manera más rápida, al funcionamiento de las nuevas actividades económicas y sus ciclos de control, aprovechando el trabajo adelantado en los territorios intervenidos.

Se generaron compromisos con los actores involucrados en los procesos de reconversión, incluyendo a entidades que conformarán los comités en la asignación de recursos, colaboración interinstitucional, fomento de la participación comunitaria en la planeación a detalle de los nuevos proyectos para actividades económicas y en el acompañamiento para la formación en nuevas habilidades. De igual manera, se compromete a los responsables mineros y trabajadores de cada comunidad participar, disponiendo del tiempo y recursos propios para asistir a todas las actividades

Tabla 2.

Entidades con representantes en los comités de reconversión

Expediente de la comunidad minera	Municipio	Entidades con personas comprometidas a participar en comité de reconversión
ARE-123	Sincelejo	- Cámara de comercio - CAR Sucre - Secretaría de Desarrollo Económico - SENA Oficina de emprendimiento
ARE-246	Lérida	- Secretaría de Planeación - Alcaldía (electa para nuevo periodo)
ARE-SBM-08011X	San Carlos	- Secretaría de Desarrollo Económico - OCASANE - Asopez Cabuya
ARE-SHV-08001X	Villamaría	- Secretaría de Salud - Fundación Unidos
ARE-TGD-10141	Armero Guayabal	- Secretaría de Planeación - Alcalde electo

Fuente: Los autores

que surjan derivadas de la futura activación de los comités de reconversión, siendo esto una condición crucial para que puedan prosperar los programas de reconversión.

De este modo, en la Tabla 2 se presenta un resumen de las organizaciones en las que se identificaron los representantes dispuestos a participar en la creación y activación de los comités de reconversión de cada región.

2.3 Validación de instrumentos de la metodología

Se cumple el principal objetivo del convenio, que corresponde a la validación de la metodología desde su fase uno hasta su fase cuatro, que se desarrollaron de manera completa en los cinco pilotos.

Comenzando por la construcción de un panorama socioeconómico, que incluye la información primaria, sobre la realidad de los municipios donde se intervienen las comunidades mineras y sobre el estado actual de las zonas en las que estas desarrollaban su actividad bajo el amparo de los procesos de formalización, sumado a un mapa de actores que pueden funcionar como eje de apoyo para la transición de estas comunidades hacia nuevas actividades económicas. Esto se obtiene luego de la fase I, en el que la recolección de información secundaria que luego se valida con los entes territoriales permite obtener un mejor acercamiento a la realidad de los territorios, en donde se evidencia que las oficinas de SISBEN, suelen tener datos mucho más actualizados sobre la realidad socioeconómica que otros entes del orden nacional

En este aspecto la socialización de la iniciativa con las alcaldías logró vincular a funcionarios de estas para la conformación de los pilotos, fue un acierto, pues esto permite un empalme más eficiente con las nuevas administraciones que asumieran el poder luego de las elecciones regionales del 2023. Ya que no se puede dejar de lado el factor de la voluntad política de las autoridades locales como un apoyo y aliado estratégico para la convocatoria de los demás actores

y crear los espacios de colaboración donde se integren con los responsables mineros y trabajadores como participantes de los programas de reconversión que se desarrollen.

Asimismo, la recopilación de las evidencias de la participación de los responsables mineros y sus trabajadores, en las actividades de los pilotos de reconversión, son un insumo importante para sustentar los futuros proyectos o iniciativas de continuidad sobre el trabajo realizado en el marco del convenio interadministrativo entre ambas instituciones, evidencias que se recopilan a partir de la fase dos hasta la fase cuatro.

Finalmente, el producto más relevante en la validación de la metodología implementada es la revisión y análisis sobre los aciertos y oportunidades de mejora para la metodología, generado por el equipo de trabajo que desarrolló los pilotos el cual se consolidó en un informe final del proyecto que se dejó como un insumo para que la ANM pueda aplicar ajustes a la metodología, haciendo más eficiente su implementación y aumentando las posibilidades de su aplicación exitosa. Este documento incluye, además, un componente de valoración por parte de los responsables mineros y trabajadores, sobre cada una de las fases de la metodología en la que se vieron involucrados y las actividades en las que participaron, así como de las expectativas que les fueron generadas a partir del desarrollo del proyecto, permitiendo a la ANM obtener una perspectiva de la metodología por parte de la población directamente impactada.

3 Discusión

Dentro de los hallazgos y resultados de la implementación metodológica se obtienen reflexiones relevantes en los siguientes aspectos:

3.1 Procesos de formalización no completados

El 80% de los procesos de formalización de las ARE se finalizaron de manera prematura por la no presentación oportuna del Plan de Trabajos y Obras (PTO), además de incumplimiento por parte de las comunidades mineras ante otros requerimientos adicionales emitidos por la ANM.

El PTO es el instrumento técnico que presentan los beneficiarios de ARE durante su proceso de formalización, en el cual establecen las proyecciones de como desarrollarán su actividad minera, siendo su presentación y aprobación por parte de la ANM uno de los últimos hitos en la formalización mediante ARE, ya que una vez aprobado el PTO junto con la licencia ambiental temporal (que otorga la autoridad ambiental correspondiente a cada jurisdicción) se procede con la celebración de un contrato de concesión especial, que convierte a los beneficiarios del ARE en titulares mineros y consolida de manera exitosa el proceso de formalización, al menos en lo respectivo a la obtención de instrumento minero y ambiental.

Que las comunidades mineras no presenten su PTO de manera oportuna implica que se ha avanzado en el proceso de formalización hasta una de sus últimas etapas, pero que por razones como la falta de un asesoramiento adecuado sobre los tiempos de respuesta y requisitos ante la ANM o la falta de capacidad económica para adelantar estudios y contratar profesionales, no se logra completar la

formalización, perdiéndose recursos importantes tanto para los mineros como para el estado.

Resulta importante poner foco en los motivos que llevan a iniciar los procesos de reconversión, ya que en todas las comunidades mineras la mayoría de sus miembros no descartaban el volver a la actividad minera e incluso el explorar la posibilidad de otros mecanismos de formalización, evidenciando que existiría un interés remanente en continuar ejecutando labores de extracción.

3.2 Construcción participativa a partir de los contextos territoriales

Es de suma importancia garantizar la participación de las comunidades en los procesos de toma de decisión de sus territorios y de generar en estas capacidades para la participación efectiva, concluyen Silva et al en [12]. En este sentido, dos de los grandes aciertos que se identifican en la metodología planteada son:

En primer lugar, parte del levantamiento de una línea base del territorio de cada comunidad a intervenir, recopilando información secundaria y primaria que se sistematiza en un instrumento de caracterización. De igual forma, se recopila información socioeconómica sobre cada uno de los miembros de la comunidad minera y sus trabajadores (en los casos aplicables). Esto permite al equipo de facilitadores tener un contexto apropiado sobre el entorno y las potenciales capacidades de las personas que se vinculan a los procesos de reconversión.

En segunda instancia, dentro del despliegue metodológico se induce a que las personas de las comunidades mineras participen activamente en la construcción de propuestas para las nuevas actividades económicas (alternativas a la minería), contando con el acompañamiento y guía de facilitadores, pero generando desde las personas las ideas que dan forma a las iniciativas.

Lo anterior crea mayor una posibilidad de que se genere compromiso e interés desde quienes se involucran en el proceso de reconversión, pues la solución planteada ante la conclusión prematura del proceso de formalización minera se alinearía a la realidad y capacidades propias de cada persona, y, por ende, las probabilidades de concluir con éxito el desarrollo del programa de reconversión aumentarían.

No obstante, cabe mencionar sería esperable, que, para que un proceso de reconversión productiva, o reconversión laboral, genere motivación a las personas y sea sostenible en el tiempo, en este debería darse la circunstancia de que la nueva actividad económica genere una mayor cantidad de ingresos a la persona involucrada, o al menos, de que se genere la misma cantidad de ingresos que en su actual actividad (minería) pero el nuevo rubro represente un esfuerzo menor. Dado que, en otra situación, el incentivo a permanecer como minero, o alternar la minería con otras actividades, sería mayor que el incentivo para la reconversión.

3.3 Ajustes sugeridos a la metodología

A partir de la implementación y evaluación del proceso adelantado con cada piloto se generó una propuesta de ajustes a la metodología.

Para la fase dos se plantea generar dos esquemas para el desarrollo de las jornadas de sensibilización acorde con el tamaño de la comunidad minera que se desee intervenir. En grupos grandes (seis personas en adelante), realizando un taller donde se conformen equipos de trabajo; Mientras que en grupos pequeños (cinco personas o menos), la técnica más apropiada sería la generación de diálogo vinculante o incluso las entrevistas con preguntas orientadoras si se presenta la necesidad de abordar de manera individual a un miembro de la comunidad minera. En todos los casos, el objetivo es que se oriente a las personas hacia la identificación de productos o servicios de interés para su territorio acorde con sus dinámicas económicas, sociales y culturales, al igual que, al reconocimiento de sus capacidades individuales y colectivas en campos distintos a la minería.

Adicionalmente, dado que en esta fase se inician los acercamientos con actores del territorio que eventualmente conformarán los comités de reconversión, se sugiere el diseño e implementación de un ficha estandarizada para evaluar la idoneidad de estos en la conformación del comité, incluyendo, entre otros aspectos: misión y objetivos, trayectoria en el área de reconversión productiva o laboral, recursos disponibles, así como redes de colaboración y alianzas que puedan fortalecer la labor del comité.

En la fase tres se propone asociar la aplicación del instrumento de caracterización socioeconómica de los responsables mineros con los frentes de trabajo que se identifiquen dentro de la zona en la que la comunidad minera desarrollaba sus operaciones, y, en los casos donde se encuentre un frente único de trabajo, se identifique al líder de la comunidad para la aplicación del instrumento de manera representativa. Complementariamente, se sugiere que la ficha de caracterización poblacional individual, que se inicialmente se orienta solo a los trabajadores, se amplie también a los responsables mineros, con el fin de obtener un mejor conocimiento de las condiciones materiales de cada individuo que iniciaría el programa de reconversión.

Dentro de la fase cuatro se considera que el proceso de validación y concertación del análisis de las potencialidades se realice tanto para los responsables mineros como para los trabajadores, si los hay, de manera separada, ya que las expectativas, cuando se es trabajador, suelen ser diferentes a las manifestadas por los responsables mineros, y estos también son una población directamente afectada por finalización prematura del proceso de formalización. Adicionalmente, esto facilitaría a los trabajadores la opción de escoger sus alternativas de reconversión productivas propias.

Finalmente, para las fases cinco y seis se recomienda que luego de la articulación de los responsables mineros y sus trabajadores con las organizaciones integrantes de los Comités de Reconversión, y antes de la elaboración formal de los proyectos para reconversión, cada alternativa productiva sea validada con estudios de mercado, en la región o municipio, que permitan llevar a buen término el piloto del mínimo producto o servicio viable. De este modo, los comités deberían gestionar convenios con otras instituciones que garanticen se den los procesos de capacitación y asesoría en temas administrativos, financieros y comerciales, así como en emprendimiento y empresarismo, para las personas en

reconversión. Todo esto sumado al acompañamiento en la elaboración de planes de negocios y la supervisión del funcionamiento de las nuevas actividades productivas una vez estas comiencen a desarrollarse.

4 Conclusiones

Tras la ejecución de los pilotos contemplados en el convenio, se pueden extraer diversas conclusiones que arrojan luz sobre el proceso de reconversión productiva, aplicado en las ARE seleccionadas y que son resultado de la implementación de la metodología diseñada por la ANM y la experiencia adquirida durante el desarrollo de las actividades en los pilotos. Las más relevantes de estas se listan seguido:

- Se advierte que la razón más común, relacionada con la terminación prematura de los procesos de formalización, es la no presentación oportuna de PTO y el incumplimiento de otros requerimientos de los entonces beneficiarios de las ARE, ante la ANM, lo que lleva a preguntarse si es necesario hacer mayor difusión a las obligaciones, plazos y momentos de los diferentes mecanismos de formalización, así como a los programas de asistencia técnica que dispone la ANM para los procesos de formalización minera.
- Se identifica que la caracterización territorial es fundamental para comprender la realidad socioeconómica y ambiental de cada ARE objeto del estudio, lo que permite diseñar estrategias de reconversión más acertadas y adaptadas a las necesidades de sus integrantes. Además, se nota claramente la importancia de la participación de los responsables mineros en todas las etapas del proceso, lo que favorece la apropiación de las iniciativas de reconversión y su viabilidad a largo plazo.
- Se destaca la diversidad de oportunidades de reconversión identificadas en cada comunidad minera participante en los pilotos, que abarcan desde la promoción de actividades agropecuarias sostenibles hasta el impulso de emprendimientos turísticos y culturales. Esta diversificación productiva se revela como un factor clave para mitigar la dependencia económica de la actividad minera y fomentar la generación de empleo y prosperidad entre los responsables mineros y antiguos trabajadores de las ARE estudiadas.
- Se resalta la importancia de abordar la reconversión productiva y laboral de manera integral, involucrando a todos los actores relevantes y aprovechando el potencial de cada territorio para transitar hacia un desarrollo más sostenible y equitativo, pues la reconversión es un proceso complejo que requiere del acompañamiento constante de expertos, así como del apoyo de los entes de gobierno municipales y regionales.
- La creación de los comités de reconversión permitirá la coordinación de esfuerzos, la identificación de fuentes de recursos financieros y la generación de sinergias entre los actores involucrados. Además, la participación de las diferentes entidades y actores relevantes en este comité contribuirá a asegurar la sostenibilidad y el impacto positivo de las medidas de reconversión productiva en

los territorios mineros analizados, al establecer mecanismos de seguimiento y control para garantizar que se cumplan los compromisos adquiridos, en virtud del proceso de reconversión, por parte de los responsables mineros y trabajadores, manteniendo además, un entorno de acompañamiento que estimule la continuidad de las actividades económicas por al menos el primer año de su existencia, en el cual se suele presentar una alta tasa de mortandad en los nuevos emprendimientos.

- Vale la pena considerar mecanismos de colaboración remota, para sumar a los comités de reconversión, entidades que no tienen presencia física en las jurisdicciones municipales, lo cual permitirá ampliar el espectro de actores para dinamizar los comités y brindar un acompañamiento más robusto a los proyectos de reconversión que se ejecuten.

Referencias

- [1] Agencia Nacional de Minería. Metodología para la reconversión económica en minería de pequeña y mediana escala, 2023.
- [2] Hetmańczyk, P., Barriers and determinants of restructuring employment in the mining industry under the just transformation mechanism. Survey results, Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series, 170, pp. 99-117, 2023. DOI: <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.170.6>
- [3] Congreso de Colombia. Ley 2250, por medio de la cual se establece un marco jurídico especial en materia de legalización y formalización minera, así como para su financiamiento, comercialización y se establece una normatividad especial en materia ambiental. Diario oficial 52.092. Julio 2022.
- [4] Ministerio de Minas y Energía. Resolución 40195, por medio de la cual se adoptan los Lineamientos de Formalización para el Fomento Minero. Diario oficial 51.714. Junio 2021
- [5] Ministerio de Minas y Energía. Resolución 41107, por la cual se incluyen y modifican algunas definiciones en el Glosario Técnico Minero. Diario oficial 50.061. Noviembre 2016.
- [6] Ministerio de Minas y Energía. Resolución 40279, por medio de la cual se reglamentan los lineamientos de los programas de sustitución de actividades mineras y reconversión o reubicación laboral de los pequeños mineros tradicionales, ubicados en ecosistemas de páramos delimitados. Diario oficial 52.115. Agosto 2022.
- [7] Agencia Nacional de Minería. Resolución VPPF 123, por medio de la cual se da por terminada el Área de Reserva Especial ARE-123, declarada y delimitada mediante la Resolución VPPF No. 040 del 16 de marzo de 2020 y delimitada definitivamente a través de la Resolución VPPF No. 119 de 23 de julio de 2021, ubicada en el Municipio de Sincelejo en el Departamento de Sucre y se toman otras determinaciones. Diciembre 2022.
- [8] Agencia Nacional de Minería. Resolución VPPF 223, por la cual se acepta un desistimiento y se da por terminada el Área de Reserva Especial ARE-246 declarada y delimitada mediante Resolución VPPF No. 279 de 30 de septiembre de 2020 y delimitada definitivamente a través de la Resolución VPPF No. 111 de 16 de julio de 2021, ubicada en jurisdicción del municipio de Lérída, departamento de Tolima, y se toman otras determinaciones. Noviembre 2021.
- [9] Agencia Nacional de Minería. Resolución VPPF 106, por medio de la cual se da por terminada el Área de Reserva Especial declarada mediante Resolución VPPF No. 054 del 21 de marzo de 2018, delimitada definitivamente Resolución VPPF No. 124 de 30 de julio de 2021-ARE-SBM-08011X, ubicada en jurisdicción del municipio de San Carlos, departamento de Córdoba y se toman otras determinaciones. Octubre 2022.
- [10] Agencia Nacional de Minería. Resolución VPPF 124, por medio de la cual se da por terminada el Área de Reserva Especial ARE-SHV-08001X, ubicada en jurisdicción del municipio de Villamaría, departamento de Caldas, declarada y delimitada mediante Resolución

VPPF No. 284 del 19 de noviembre de 2018, delimitada definitivamente a través de la Resolución VPPF No. 118 de 23 de julio de 2021 y se toman otras determinaciones. Diciembre 2022.

- [11] Agencia Nacional de Minería. Resolución VPPF 118, por medio de la cual se da por terminada el Área de Reserva Especial ARE-TGD-10141 declarada y delimitada mediante Resolución No. 013 del 31 de enero de 2018, delimitada definitivamente a través de la Resolución VPPF No. 125 de 30 de julio de 2021, ubicada en jurisdicción de los municipios de Armero (Guayabal) y Falan, departamento de Tolima y se toman otras determinaciones. Diciembre 2022.
- [12] Silva, R., Demajorovic, J., and França, A., Socioeconomic reconversion of post-mining territories: stakeholder engagement in miner closure processes, *Interações (Campo Grande)*, 26, e26034458, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20435/inter.v26i1.4458>

O.J Restrepo-Baena, recibió su título en Ing. de Minas y Metalurgia en 1991, de la Universidad Nacional de Colombia, MSc. en Evaluación de Impactos Ambientales en 1995, de la Universidad de Málaga, España, y Dr. en Materiales en 1996, de la Universidad de Oviedo, España. Se vinculó a la Universidad Nacional de Colombia desde 1997, siendo actualmente, profesor titular en el Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas, es investigador senior en el Grupo del Cemento y Materiales de Construcción y director del Grupo Observatorio Ígnea. Sus intereses de investigación incluyen: procesos de alta temperatura; materiales cerámicos y vítreos; cementos; beneficio de minerales; caracterización de materiales; y nanotecnología.

ORCID: 0000-0003-3944-9369

A.M. Lemus-Madrid, recibió su título en Ing. de Minas y Metalurgia en 2015, de la Universidad Nacional de Colombia y MSc. en Minería en 2021 de la Universidad de Chile. Entre el 2015 y la actualidad, ha tenido experiencia en formulación y ejecución de proyectos en el sector minero, acompañamiento a entidades territoriales en iniciativas relacionadas con la actividad minera, así como en las áreas de comercialización y cumplimiento para cadenas de suministro de metales preciosos, desempeñándose actualmente como Ingeniero de Proyectos en Enlace Ingeniería SAS. Adicionalmente, desde el 2022 es profesor ocasional en el Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

ORCID: 0009-0000-7867-4142

G.A Viana-Casas, recibió su título en Ing. Mecánica en 2006 y MSc. en Recursos Minerales en 2021, todos ellos de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene 18 años de experiencia en la gestión, formulación, ejecución y evaluación de proyectos en el sector minero, incluyendo proyectos de: asistencia técnica; acompañamiento en procesos de formalización; fortalecimiento empresarial y organizacional; cierre de minas; diseño y apoyo a programas de capacitación; y fomento de la actividad minera. Además, se desempeña actualmente como profesor ocasional en el Instituto de Educación en Ingeniería de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia y gerente de la empresa Enlace Ingeniería S.A.S.

ORCID: 0009-0001-8190-8517

J. Muñoz-Hincapié, recibió su título en Economía en 1994, de la Universidad de Antioquia, Sp. en Economía del Sector Público en 1995 de la Universidad Autónoma Latinoamericana y Sp. en Gestión Ambiental en 1999 de la Universidad Nacional de Colombia. Cuenta con 30 años en el ejercicio profesional, combinando experiencia en asistencia técnica y fortalecimiento empresarial, así como en la formulación, gestión y ejecución de proyectos en el ámbito público y privado, en áreas como: minería, generación de energía, licenciamiento y gestión ambiental. Además, cuenta con amplia experiencia en el manejo de comunidades étnicas y campesinas en el territorio nacional, trabajando actualmente como consultora independiente en proyectos de investigación y desarrollo.

ORCID: 0009-0007-9787-5186

J.I. Tobón, recibió su título en Ing. Geológica en 1992, MSc. en Recursos Hidráulicos en 2003 y Dr. en Ciencia y Tecnología de Materiales en 2011, todos ellos de la Universidad Nacional de Colombia. Se encuentra vinculado a la Universidad Nacional de Colombia desde 1993, siendo actualmente profesor titular en el Departamento de Materiales y Minerales de la Facultad de Minas, es investigador senior de MinCiencias vinculado al Grupo del Cemento y Materiales de Construcción. Sus intereses de investigación incluyen: rocas y minerales industriales; mineralogía y petrografía aplicada; cementos; y prospección, exploración y evaluación de yacimientos.

ORCID: 0000-0002-1451-1309



Metodología para la exploración de hidrocarburos mediante análisis petrofísico y estratigráfico a partir de registros de pozo en el Valle Medio del Magdalena

José Antonio Mahan-Gaviria

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jamahan@unal.edu.co

Recibido: 6 julio 2024. Recibido en formato revisado: 12 abril 2025. Aceptado: 28 abril 2025.

Resumen

Este estudio presenta una metodología aplicada a un pozo ubicado en el sector norte del Valle Medio del Magdalena, Colombia, para la identificación de litologías en las primeras etapas de exploración de hidrocarburos. La propuesta se basa en la interpretación de registros de pozo para determinar la composición mineralógica predominante, mediante la estimación de propiedades petrofísicas como la porosidad, la saturación de agua y el volumen de arcilla. La identificación litológica se realiza con registros de porosidad, densidad y neutrón, complementado con datos de densidad electrónica y efecto fotoeléctrico. La clasificación con el registro Gamma Ray permite diferenciar intervalos arcillosos de zonas arenosas, que tienen mayor probabilidad de albergar fluidos móviles y formar yacimientos. La porosidad equivalente se calcula mediante crossplots densidad-neutrón, validada con registros sínicos. Bajo la suposición de zonas saturadas de agua, se generan gráficas de Pickett para estimar la resistividad del agua con la ecuación de Archie.

Palabras clave: identificación litológica; interpretación de registros de pozo; efecto fotoeléctrico; estimación de porosidad; resistividad del agua de formación; ecuación de Archie; registro Gamma Ray; gráficas de Pickett; Valle Medio del Magdalena; exploración de hidrocarburos.

Methodology for hydrocarbon exploration through petrophysical and stratigraphic analysis of well logs in the Middle Magdalena Valley

Abstract

This study presents a methodology applied to a well located in the northern sector of the Middle Magdalena Valley, Colombia, for the identification of lithologies during the early stages of hydrocarbon exploration. The proposed approach is based on the interpretation of well logs to determine the predominant mineralogical composition by estimating petrophysical properties such as porosity, water saturation, and clay volume. Lithological identification is carried out using porosity, density, and neutron logs, complemented by data from electronic density and the photoelectric effect. The classification with the Gamma Ray log allows differentiation between clay intervals and sandy zones, the latter being more likely to host mobile fluids and form reservoirs. Effective porosity is calculated using density-neutron crossplots, validated with sonic logs. Under the assumption of water-saturated zones, Pickett plots are generated to estimate water resistivity using Archie's equation.

Keywords: lithology identification; well log interpretation; photoelectric effect; porosity estimation; formation water resistivity; Archie's equation; Gamma Ray log; Pickett plot; Middle Magdalena Valley; hydrocarbon exploration.

1 Introducción

La petrofísica constituye una disciplina esencial dentro de las ciencias geológicas aplicadas a la industria de los hidrocarburos, enfocada en el estudio detallado de las propiedades físicas de las rocas del subsuelo y los fluidos que contienen. Su objetivo principal es caracterizar el medio

poroso de los reservorios, permitiendo evaluar parámetros como la porosidad, la saturación de agua (S_w), el volumen de arcillas (V_{sh}) y la permeabilidad, entre otros. Estos parámetros son fundamentales para la estimación de reservas, la caracterización de yacimientos y la planificación técnica y económica de las actividades de exploración y producción.

El análisis petrofísico se apoya principalmente en los

How to cite: Mahan-Gaviria, J.A., (2025). Metodología para la exploración de hidrocarburos mediante análisis petrofísico y estratigráfico a partir de registros de pozo en el Valle Medio del Magdalena. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 57, pp. 32-45. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n57.115613>

registros de pozo, los cuales permiten inferir propiedades de las rocas a partir de la respuesta de las formaciones ante estímulos eléctricos, radiactivos y sónicos. Estos registros, como los de resistividad, porosidad, densidad, gamma ray (*GR*), potencial espontáneo (*SP*) y factor fotoeléctrico (*Pe*), constituyen una herramienta crítica para diferenciar litologías, estimar la saturación de fluidos y definir la calidad del reservorio. En particular, el registro *Pe* aporta información sobre la densidad electrónica de las rocas, facilitando la distinción entre litologías similares y la identificación de minerales que pueden alterar el comportamiento del yacimiento.

De igual forma, el contenido de arcillas es un indicador clave en la evaluación de la calidad del reservorio, ya que una alta arcillosidad puede reducir significativamente la porosidad efectiva y la permeabilidad. La caracterización litológica y la determinación de contactos fluido-fluido, como el contacto agua-aceite (CAA) o gas-aceite (CGA), son posibles gracias a la integración de los registros eléctricos con modelos petrofísicos como la ecuación de Archie y el gráfico de Pickett. Estas herramientas permiten calcular con mayor precisión la saturación de agua (*Sw*), uno de los parámetros fundamentales para determinar la presencia y el volumen de hidrocarburos.

En este trabajo, se propone una metodología de análisis petrofísico integrada, que combina la interpretación de registros de pozo con datos geológicos (geología de superficie y los núcleos del pozo de investigación), así como datos sísmicos e ingenieriles, con el fin de identificar intervalos potencialmente prospectivos para hidrocarburos. Este método fue aplicado en un pozo exploratorio ubicado en el extremo norte del Valle Medio del Magdalena (VMM), una región con escasa información exploratoria reciente. La perforación, denominada en este estudio como Pozo de Estudio-1, fue inicialmente considerado de bajo interés para fines exploratorios. Sin embargo, los resultados del análisis aquí presentado sugieren una nueva interpretación litológica, contrastando con clasificaciones previas que asociaban las rocas perforadas al Grupo Real (Mioceno Medio a Superior) y a la Formación Noreán (Jurásico Inferior a Medio).

Este ejercicio permitió identificar, a partir de los registros y su interpretación integrada, la presencia de depósitos cuaternarios de tipo abanico aluvial y terrazas aluviales, así como una intrusión ígnea de textura granítica holocristalina, posiblemente correspondiente al Jurásico Superior. Esta reinterpretación

destaca la importancia del análisis petrofísico como herramienta para refinar modelos geológicos y mejorar la comprensión del potencial hidrocarburífero en áreas poco estudiadas.

2 Marco teórico

Los análisis realizados a los registros en los pozos de exploración de hidrocarburos, conllevan a la identificación general de la litología predominante de las unidades geológicas estudiadas, las cuales permiten, a través de una serie de relaciones empíricas, estimar propiedades físicas tales como: la porosidad (\emptyset), la saturación de agua (*Sw*) y el volumen de arcilla (*Vsh*), entre otras [1] (Mahan J. A., 2019). La identificación de la litología, requiere una comparación de las respuestas de los registros de porosidad, densidad y neutrón, teniendo en cuenta las matrices para las cuales estos datos fueron calculados [2] (Glover, P. W. J., 2000), con base en las mediciones de densidad de las rocas y del índice de neutrones, (Fig. 1).

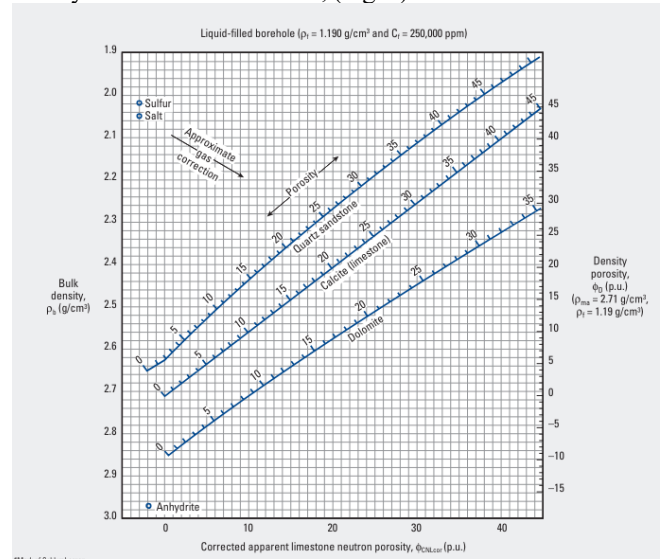


Figura 1. Gráfico POR-12 de porosidad y determinación de litología a partir de registros de lito-densidad y registros de neutrón compensado (CNL), correlacionando con densidad-neutrón.

Fuente: Schlumberger Log Interpretation Charts.

Tabla 1.

Valores del índice de Registro del efecto fotoeléctrico para una lista de minerales y fluidos, donde: (*Pe*) = Efecto fotoeléctrico, (*U*) = adsorción fotoeléctrica volumétrica, ρ_b = density bulk, ρ_e y ρ_a = densidades corregidas, ρ_{oil} y ρ_{gas} = densidades de petróleo y gas.

Mineral	Fórmula	Peso Molecular	P_e	Z (Equiv.)	ρ_b	ρ_e	ρ_a	U
Anhidrita	CaSO_4	136.15	5.055	15.69	2.960	2.957	2.957	14.93
Barita	BaSO_4	233.37	266.82	47.2	4.500	4.01		1070
Biotita			6.30				3.34	21.03
Calcita	CaCO_3	100.09	5.084	15.71	2.710	2.708	2.710	13.77
Dolomita	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184.42	3.142	3.74	2.870	2.864	2.877	9.00
Feldespatos K			2.86				2.62	7.51
Glauconita			5.32				3.95	21.00
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172.18	3.420	14.07	2.320	2.372	2.350	9.37
Halita	NaCl	58.45	4.169	15.30	2.165	2.074	2.031	9.68
Hematita	Fe_2O_3	159.70	21.48	23.45	5.240	4.987		107
Limonita			13.00				3.59	46.67
Magnetita	MgCO_3	231.55	22.24	23.65	5.180	4.922		113
Moscovita			2.40				3.29	7.90
Pirita	FeS_2	119.98	16.97	21.96	5.000	4.834		82.1

Quarzo	SiO ₂	60.09	1.806	11.78	2.654	2.650	2.648	4.79
Siderita	FeCO ₃	115.86	1.69	21.09	3.940		3.89	55.9
Silvina	KCl	74.6	8.510	18.13	1.984	1.916	1.862	15.83
Circón	ZrSiO ₄	183.31	69.10	32.45	4.560	4.279		311
Arcilla	-		3.42	14.07	2.650	2.645	2.642	
Arenas arcillosas	-		2.70				2.41	6.52
Antracita	-		0.161	6.02	1.700	1.749	1.683	
Carbón Bituminoso	-		0.180	6.21	1.400	1.468	1.383	
Agua Pura	H ₂ O	18.02	0.358	7.52	1.000	1.110	1.000	0.398
Agua Salada	120,000 ppm NaCl		0.807	9.42	1.086	1.185	1.080	0.850
Petróleo	(CH ₂) _n		0.119	5.53	0.850	0.948	0.826	0.136x
Metano	CH ₄	16.04	0.095	5.21	0.250		0.15	0.119xρ _{gas}

Fuente: Tomado y modificado de Glover, P. W. J., Course Notes, pag 142. Department of Geology and Petroleum Geology. University of Aberdeen, 2000.

No obstante, una clasificación más detallada de la litología se puede obtener del registro efecto fotoeléctrico (Pe), que indica de forma directa una relación con la densidad electrónica de la unidad o formación geológica. La tabla 1 presenta una selección de los valores del Pe característicos de algunos minerales, rocas y fluidos [2].

Una vez determinadas las litologías predominantes, se correlaciona la información con el registro Gamma Ray, el cual indica el nivel de arcillosidad, para detectar si se encuentran zonas “limpias”, susceptibles de alojar fluidos móviles (agua y/o hidrocarburos). También se extrae información de los registros de porosidad, para comprobar si existe acumulación de fluidos en la formación. Si cumple con las anteriores características, se considerará al intervalo como un potencial yacimiento hidrocarburífero [3] (Schlumberger, 2009).

A las zonas identificadas como potenciales yacimientos, se les aplica un cálculo de porosidad equivalente, con base en el gráfico cruzado (cross plot) densidad-neutrón y con la información del registro sísmico, para la verificación de los rangos de porosidad. Suponiendo que es una zona saturada de agua se lee del registro de resistividad profunda y se toma como la resistividad no alterada de la formación geológica. Con esto, es posible generar gráficos como el de Pickett (fig. 2) para determinar la resistividad del agua de la formación, y estimar los valores de saturación de fluidos con base en la ecuación de Archie (Ec. 1).

$$S_w = \left(\frac{a \cdot R_w}{R_t \cdot \phi^m} \right)^{1/n} \quad (1)$$

Ec. 1. Ecuación de Archie, donde:

S_w = Saturación de agua de una zona no invadida,

R_w = Resistividad de agua de formación a temperatura de formación,

R_t = Resistividad de formación verdadera,

ϕ = Porosidad,

a = Factor de tortuosidad,

m = Exponente de cementación,

n = Exponente de saturación.

El gráfico de Pickett, corresponde a un arreglo doble logarítmico, que permite la medición de la resistividad en el eje X contra la medición de la porosidad en el eje Y . Debe su nombre a G. R. Pickett y se basa en la obtención del logaritmo de la ecuación de Archie. Los puntos de Saturación de agua

constante (S_w), se representan en una línea recta con pendiente negativa de valor m . (Fig. 2). Las zonas de agua definen la línea inferior extrema de la gráfica. Dado que para $S_w = 1$, la resistividad del agua puede ser determinada a partir de un punto de la línea. Una vez establecida la línea de agua, se pueden trazar otras paralelas para diferentes S_w , asumiendo una constante n (generalmente de valor 2). Luego, se pueden graficar e interpretar otros datos en función de S_w [4,5] (Niz V. E., 2003 & Pickett G.R., 1966). La misma técnica se puede aplicar a la zona lavada, utilizando las mediciones para esa misma zona [6] (Crain E. R., 1999).

Inicialmente, y de acuerdo a la Primera Ley de Archie, se pueden suponer valores para $a=1$ y para $m=n=2$, que son los valores por defecto para este tipo de cálculos petrofísicos [7] (Schlumberger, 2024), los cuales corresponden a los valores del factor de tortuosidad (a), exponente de cementación (m) y exponente de saturación (n), pero se pueden suponer también otros valores, dependiendo de la naturaleza de la formación geológica (en el caso de encontrarse con una formación consolidada o no consolidada, fracturada o no fracturada, arcillosa o no arcillosa), Archie estableció que m se encuentra entre 1,8 y 2,0 para las areniscas consolidadas y 1,3 para las areniscas pobremente consolidadas. Por otro lado, la fórmula de Humble supone que $m=2,15$ y que $a=0,65$ [8] (Krygowski, D. A. & Cluff R. M., 2012).

Gráfico de Pickett ($m = 2.0/n = 2.0$)

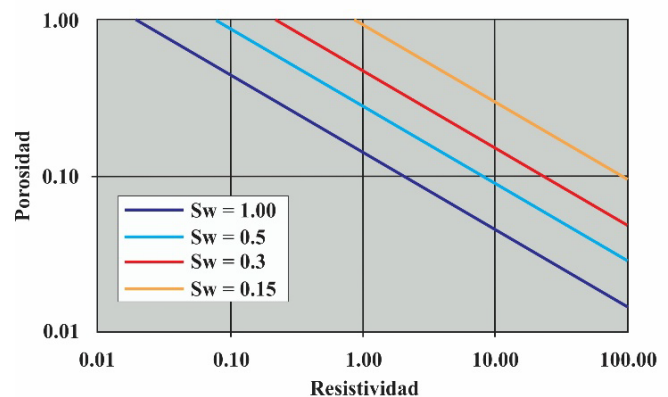


Figura 2. Gráfico de Pickett que muestra el decrecimiento de la Saturación de Agua (S_w) en un arreglo doble logarítmico de Resistividad contra Porosidad.

Fuente: Crain E. R., 1999.

Sin embargo, la aplicación metodológica desarrollada en diversos estudios de petrofísica aplicada a la exploración de hidrocarburos ha evidenciado, que las variaciones en los parámetros de a , m y n , no resultan significativamente relevantes a escala de exploración regional [9] (Caita C., L., 2024). Otra propiedad fundamental es la Permeabilidad (K), la cual se puede calcular a partir de la ecuación de Timur (Ec. 2), aunque debe aclararse, que esta es una de muchas expresiones que se utiliza para estimar permeabilidad. Aunque existen múltiples correlaciones empíricas para estimar la permeabilidad a partir de la porosidad y la saturación de agua irreducible, diversos estudios han demostrado que estas aproximaciones pueden diferir del valor real en un rango de hasta una cuarta parte o cuatro veces, dependiendo de la heterogeneidad de la roca y la calidad de los datos disponibles [10] (Tiab D. & Donaldson, 2015).

$$K = \left(\frac{93 \cdot \phi^{2.2}}{Swirr} \right)^2 \quad (2)$$

Ec. 2. Ecuación de Permeabilidad de Timur, donde:

K = Permeabilidad en milidarcys (md),

ϕ = Porosidad,

$Swirr$ = Saturación de agua (Sw) en una zona de saturación de agua irreducible.

La permeabilidad se mide en darcys (d) o en milidarcys (md), donde de forma general, un darcy es una medida que describe la permeabilidad de una roca porosa que permite que un fluido viscoso como el agua, fluya a través de ella bajo una presión diferencial específica [11] (Ahmed T., 2018), o siendo más precisos, una roca de 1 darcy produce un gradiente de presión de una atmósfera por centímetro cuando se deja pasar un caudal de un centímetro cúbico por segundo de un fluido de viscosidad 1 cP.

Los tipos de permeabilidad [12] (Dake, 1983), son los siguientes:

- Permeabilidad absoluta, corresponde a una roca completamente saturada con un solo tipo de fluido.
- Permeabilidad efectiva, corresponde a la permeabilidad relativa a un tipo de fluido cuando varios tipos de fluidos están presentes en la roca.
- Permeabilidad relativa, es la proporción de permeabilidad efectiva de un fluido respecto a la permeabilidad absoluta

Los factores que afectan la permeabilidad son los siguientes: El tamaño y la conectividad de los poros, indicando que las rocas con poros grandes y bien conectados tienen mayor permeabilidad. Las fracturas y fisuras, las cuales pueden aumentar considerablemente la permeabilidad. La composición mineralógica, ya que algunos minerales pueden obstruir los poros y reducirla. La cementación y la compactación, las cuales reducen la conectividad entre los poros. [13] (Gluyas & Swarbricks, 2013).

Al igual que con la saturación del agua (Sw), la importancia de la permeabilidad (K) en la exploración y producción de hidrocarburos es necesaria, ya que permite evaluar el potencial prospectivo de los yacimientos. La permeabilidad también influye en la toma de decisiones de

ingeniería para el diseño y perforación de los pozos. Cumple además un papel crítico, en el modelado de fluidos para predecir la producción y planificar la recuperación mejorada de hidrocarburos [14] (Terry & Rogers, 2014).

Respecto a la estratigrafía, el sector norte del VMM exhibe una historia geológica compleja con una evolución tectónica y sedimentaria significativa. Las unidades litoestratigráficas presentes en este sector de la cuenca incluyen:

- Gneis de San Lucas, unidad metamórfica de alto grado que aflora en la Serranía de San Lucas, ubicada en el sector norte del Valle Medio del Magdalena. Estas rocas se caracterizan por su composición heterogénea, incluyendo gneises de composición granítica y tonalítica. Se estima que su formación ocurrió durante el Mesoproterozoico (~900 a 1500 millones de años), representando algunas de las rocas más antiguas de la región. Estas rocas han sido sometidas a múltiples eventos tectonotérmicos, reflejando una compleja historia geológica. [15] (Ordoñez-Carmona, O., Frantz, J.C. et al. 2009).
- Gneis de Bucaramanga, es una unidad metamórfica de alto grado que forma parte del basamento del Macizo de Santander, en la región nororiental de Colombia. Estas rocas incluyen gneises, esquistos y migmatitas, y se consideran de edad Precámbrica (Paleoproterozoico a Mesoproterozoico con una edad aproximada de ~1040 a 1500 millones de años), representando algunas de las rocas más antiguas del área. El Gneis de Bucaramanga ha sido afectado por varios eventos de metamorfismo regional y deformación, lo que ha resultado en una compleja historia estructural y metamórfica. [16] (Urueña-Suárez, Zuluaga C., A., 2016).
- Formación La Virgen, compuesta por rocas metamórficas de bajo a muy bajo grado, incluyendo filitas, metarenitas e intercalaciones de metaconglomerados, indicando una historia de metamorfismo regional de facies sub-esquistos verdes a esquistos verdes. La edad de esta formación corresponde del final del Neoproterozoico al Mesoproterozoico tardío (~1300 – 900 ma). [17] (Avellaneda-Cáceres, W.D.; Anaya-Arias, C.A. et al., 2020).
- Formación Noreán, Esta unidad está compuesta por una secuencia volcano-sedimentaria que incluye lavas andesíticas a riolíticas y depósitos piroclásticos. Se interpreta que su depósito ocurrió en un ambiente de arco magmático continental. Su edad se ubica en el Jurásico Temprano (Sinemuriano-Toarciano, entre 192 y 175 ma.) [18] (Correa, M., A. M. et al., 2019).
- Granitoides de San Lucas, corresponden a intrusivos ígneos plutónicos, principalmente granodioritas con variaciones a cuarzdioritas y cuarzomonzonitas. Estas rocas intruyen a las unidades más antiguas (Fm. Noreán y Fm. La Virgen). La edad obtenida mediante el método Rb-Sr fue de 166 ma., y están relacionadas con eventos tectono-magmáticos ocurridos en el Jurásico Medio [19] (Clavijo J., Mantilla., L. et al. 2008).
- Formación Río Negro, compuesta principalmente por depósitos siliciclásticos: areniscas subarcóicas, sublíticas, cuarzoarenitas de grano medio a

conglomeráticas. Conglomerados arenosos de guijos y guijarros y lodolitas arenosas, de tonos rojisos a púrpuras. Con una edad entre los 130 y 112 ma. (Cretácico Inferior). Esta unidad representa una fase inicial de sedimentación clástica antes del establecimiento de plataformas carbonatadas [20] (González, H., et al., 2008).

- Formación Cogollo, Secuencia de calizas micríticas y bioclásticas, con intercalaciones de margas y lutitas calcáreas de edad Cretácico Medio (~112 – 93 ma.). Se asocia a un ambiente deposicional de plataforma marina carbonatada somera, con condiciones favorables de acumulación de carbonatos biogénicos, marcando un cambio de sedimentación siliciclástica a carbonatada. [21] (Villamil, T., 1999).
- Grupo Real, compuesto principalmente por secuencias de conglomerados, areniscas y lutitas. Estas rocas sedimentarias presentan una variación lateral y vertical significativa en su granulometría y composición, reflejando diferentes ambientes de depósito y fuentes de sedimentos. Se le atribuye una edad del Paleoceno al Eoceno (66 – 34 ma.). Los depósitos del Grupo Real se interpretan como formados en ambientes fluviales y deltaicos, asociados a sistemas de abanicos aluviales y planicies de inundación. Esto sugiere una dinámica sedimentaria influenciada por procesos tectónicos y cambios en el nivel del mar durante el Paleoceno y Eoceno. [20, 22] (González, H., et al., 2008 y Van der Hammen, T, 1958).
- Formación Zambrano-Sedimentitas de Arjona, esta unidad está compuesta principalmente por areniscas calcáreas con bancos de calizas, sugiriendo una depositación en ambientes marinos someros, posiblemente asociado a plataformas carbonatadas. Su edad se ubica entre el Jurásico Medio y el Jurásico Superior (~174 - 145 ma.) [20].
- Depósitos Cuaternarios, Estos depósitos están constituidos principalmente por aluviones recientes, terrazas fluviales, depósitos coluviales y materiales de origen palustre. Incluyen gravas, arenas, limos y arcillas, reflejando procesos de erosión, transporte y sedimentación asociados a dinámicas fluviales y de ladera. Corresponden a materiales no consolidados que se formaron durante el Cuaternario desde hace aproximadamente 2.58 millones de años hasta el presente. [20].

Sedimentológicamente, se evidencia una evolución desde ambientes marinos hacia sistemas predominantemente fluviales y aluviales. Esta configuración ha condicionado la distribución y continuidad lateral de las litofacies, controlando directamente el desarrollo de trampas, la conectividad de reservorios y la efectividad de los sellos.

Existen varios estudios geológicos previos que clasifican a las rocas del sector de investigación, como pertenecientes al Grupo Real del Mioceno Medio a Superior y a la Formación Noreán del Jurásico Inferior a Medio [23] (Contreras R., et al., 2016), sin embargo, una nueva revisión de los datos bibliográficos de ese sector de la cuenca del VMM, contrastados con los resultados de los análisis petrofísicos, sugieren que las rocas estudiadas corresponden

realmente a un depósito Cuaternario de tipo abanico y de terrazas aluviales, así como a un intrusivo plutónico de textura granítica holocristalina de posible edad Jurásico Superior. Los depósitos cuaternarios de esta zona, estarían conformados por sedimentos multivariados provenientes del Grupo Real [24] (INGEOMINAS-UIS, 2006).

3 Metodología

Para la implementación de esta metodología de trabajo, se recopiló la información técnica disponible, incluyendo registros de pozo, gráficos compuestos, informes geológicos e ingenieriles, y secciones sísmicas de reflexión 2D. A esta información se le aplicó un riguroso control de calidad con el fin de verificar la completitud y consistencia de los datos requeridos para los análisis petrofísicos y la interpretación estratigráfica. Particularmente, se priorizó la disponibilidad de registros que incluyeran curvas de resistividad, porosidad, densidad, neutrón, Gamma Ray, potencial espontáneo (SP) y efecto fotoeléctrico (Pe), presentados preferiblemente en una escala de trabajo 1:200. La integración de estos datos con las secciones sísmicas 2D permitieron correlacionar unidades litológicas, identificar contactos estratigráficos y definir con mayor certeza los intervalos prospectivos para hidrocarburos.

3.1 Identificación de intervalos prospectivos

Se deben incluir los intervalos prospectivos que, basados únicamente en la información de registros, se puedan identificar como tales, incluyendo, pero no limitados a los dos siguientes casos:

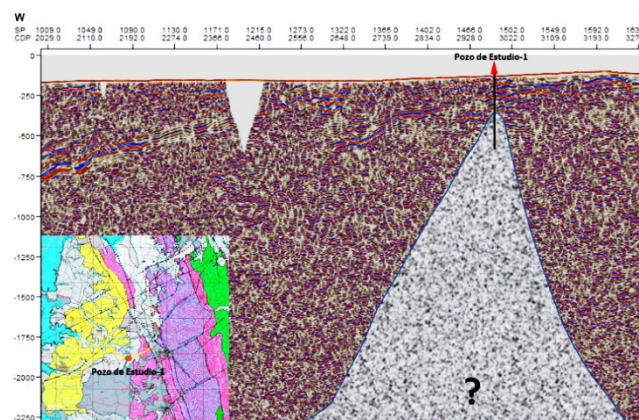
- a. Zonas de baja arcillosidad, con porosidad en al menos uno de los registros y litología correspondiente a la roca almacén, debido a su potencial como yacimiento de tipo convencional.
- b. Zonas identificadas con la presencia de mantos de carbón, debido a su potencial de gas asociado al carbón o CBM (*Coal Bed Methane*) por sus siglas en inglés.

En este segundo caso, es importante tener presente, que para la identificación de yacimientos no convencionales de tipo *Oil Shale*, *Gas Shale* y *CBM*, se requerirá información complementaria de otras fuentes, tales como el tipo y contenidos de materia orgánica (*MO*), Contenido Total de Carbono (*TOC*), valores de Azufre, poder calorífico y Reflectancia de la Vitrinita (*Ro*), entre otros datos de geoquímica orgánica contenidos en la formación a evaluar.

Con el propósito de difundir esta metodología para la identificación de posibles intervalos prospectivos de hidrocarburos, se tomó para el análisis un pozo exploratorio ubicado en el extremo norte del Valle Medio del Magdalena (VMM), que por tratarse de una perforación que arrojó poco interés exploratorio de hidrocarburos, fue tomado y nombrado para este artículo como *Pozo de Estudio-1*, debido a que pudiera existir algún tipo de confidencialidad de la información, y adicionalmente, fue seleccionado para este estudio, por tratarse de una perforación ubicada en una zona de la cuenca que cuenta con muy poca investigación exploratoria.

3.3 Geología del Pozo de Estudio-1

Infrayaciendo a esta unidad cuaternaria de abanicos y terrazas aluviales, se encuentra la Formación Noreán (192-175 ma.) [18], que corresponde a una secuencia volcanoclástica de más de 4500 metros de espesor, que se extiende de manera regional desde la Serranía de San Lucas hacia el sector occidental de la Cordillera Oriental, constituyendo el basamento de las unidades cretácicas que yacen discordantes y que se puede constatar, en afloramientos localizados a lo largo de la Serranía de norte a sur, y que luego se profundiza hacia el oriente por debajo del Neógeno y el Cuaternario, siendo estas últimas rocas las que conforman el relleno del Valle Medio del Magdalena [25] (Clavijo, J. T et al., 1995). Clavijo subdividió la Formación Noreán en cuatro conjuntos: Clástico - piroclástico (Jncp), piroclástico - epiclástico (Jnpe), efusivo dacítico (Jned) e hipoabisal andesítico (Jnha). En algunos sectores hacia el norte de la Serranía de San Lucas, se observan rocas granitoides (Granitoide de San Lucas), que intruyen los sedimentos basales de la Fm Noreán [26] (Mantilla et al., 2006a). Adicionalmente, en este sector aparecen intercalaciones de paquetes, al parecer interdigitados, de arenitas calcáreas en capas delgadas y laminadas entre la secuencia volcanoclástica [27] (Sarmiento et al., 2015).



Fuente: Autor.

Para la unidad conglomerática, de los depósitos aluviales (Qcal), donde se emplaza el pozo (Fig. 4) [29] (SGC, 2006), la permeabilidad absoluta calculada a partir de la Ecuación de Timur

(Ec. 2), muestra un rango promedio de 9.8 mD, llegando a lecturas de hasta 14.9 mD con una dispersión moderada de datos. El cálculo de porosidad total, a partir del método combinado Densidad-Neutrón, permitió definir un promedio del 38%.

Finalmente, del análisis de los registros Gamma Ray y de Resistividad del Pozo de Estudio-1, contrastados con los análisis de núcleos del mismo pozo, se pudo obtener la siguiente interpretación:

4 Estratigrafía del Pozo de Estudio-1

De los 0 pies (ft.) a los 835 ft. de profundidad, se encontraron una serie de depósitos cuaternarios no consolidados, posiblemente de tipo abanico aluvial, compuestos

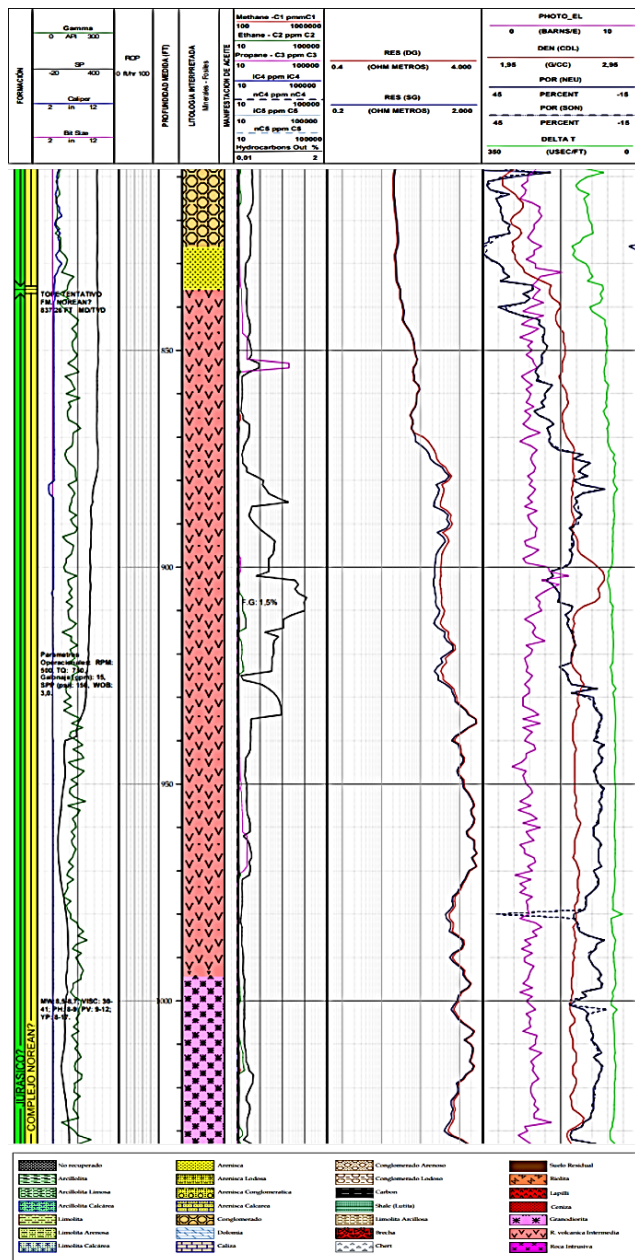


Figura 4. Registro Gráfico Compuesto (RGC) Pozo de Estudio-1, intervalo 840-1040 ft. de profundidad. Escala 1:200
Fuente: RGC del pozo de Estudio-1, ANH-Serviminas, 2016.

principalmente por conglomerados matriz soportados y clasto soportados, con variaciones a conglomerados arenosos, arenitas conglomeráticas, limolitas y variaciones con arcillas, presentando intervalos conglomeráticos areno-limosos de grano medio a fino y arcillosos con presencia de nódulos ferrosos, carbonatos, fragmentos calcáreos, materia orgánica y fósiles de conchas; adicionalmente, se encontraron gránulos y cantos, compuestos de rocas volcánicas e ígneas, de tipo granodiorita y riolita, así como cherts (Figs. 4 y 5).

A partir de los 835 ft. de profundidad, se encontró una roca ígnea granítica fracturada de composición media a ácida, que al parecer, está intruyendo a la Formación Noreán, J1-2n (Fig. 3, 4, 6 y 7), la cual se clasificó como una monzonita feldespática, que podría variar hasta una cuarzo-dacita, cuya descripción corresponde a una roca masiva, de textura fanerítica, hipidiomórfica, holocristalina, dura, de color naranja rojizo moderado, con algo de color amarillo pálido, negro verdoso, ocasionalmente blanco lechoso, hialino, compuesta principalmente por 40% de feldespatos rosados, 50% feldespatos marrón amarillos (posiblemente ortoclasa o microclina alterada por óxidos/hidróxidos de hierro), 5% cuarzo blanco lechoso, con micas (biotita), piroxenos de color verde oliva a negro y plagioclasas alteradas, presentando micro-venas rellenas de carbonato de calcio; la roca presenta un nivel bajo de meteorización. Hacia la base de esta secuencia se encontraron diques con presencia de clorita, sobre los cuales se observó una ligera meteorización y la roca se hace más granito-feldespática masiva, muy dura, moderadamente fracturada de textura fanerítica, en algunas zonas de textura porfídica, heterogranular de color marrón rojizo moderado, un poco translúcido, blanco sub-translúcido, amarillo verdoso pálido, ocasionalmente verde oscuro y negro, se observó monzonita con fenocristales de feldespato, compuesta por un 60% feldespato potásico (Dando un aspecto rosado a la roca), 30% de cuarzo, 10% de Plagioclasas, con trazas de biotita y piroxenos y micro-fracturas rellenas de carbonato de calcio [30] (ANH – Serviminas, 2016).



Figura 5. Imágenes que muestran parte del intervalo sedimentario (entre 0 – 835 ft. de profundidad), correspondiente a depósitos arenoso-conglomeráticos y arcillosos del Cuaternario.

Fuente: Tomado del reporte de núcleos, ANH – Serviminas, 2016.

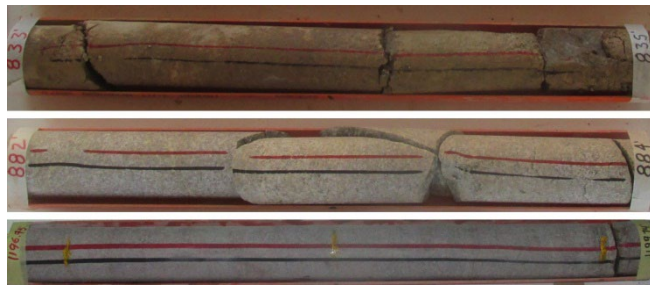


Figura 6. Imágenes que muestran parte del intervalo ígneo plutónico (entre los 835 ft. y el final de la perforación del pozo), correspondiente a una roca granítica holocristalina de edad Jurásico Superior.

Fuente: Tomado del reporte de núcleos, ANH – Serviminas, 2016.

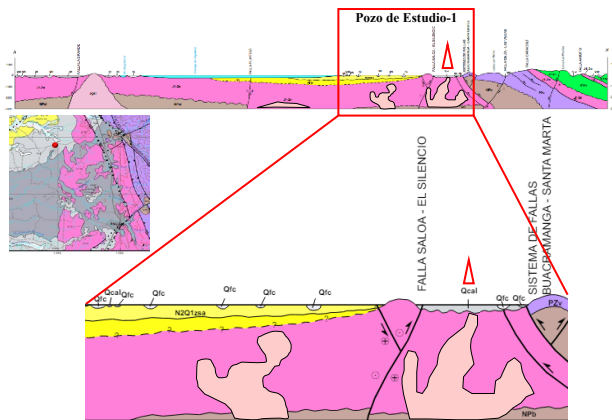


Figura 7. Ubicación del Pozo de Estudio-1 y el detalle estratigráfico-estructural de la misma sección (parte inferior). N2Q1z-sa: Fm. Zambrano-Sedimentitas de Arjona, N1r: Grupo Real, J1-2n: Formación Noreán, NPb: Neis de Bucaramanga, Qcal-Qfc: Depósitos de abanicos, terrazas y depósitos fluviales. En color rosado claro, posibles intrusiones plutónicas graníticas jurásicas.

Fuente: Tomado y modificado de la geología de la Plancha 55-El Banco SGC, 2006.

Así las cosas, el análisis estratigráfico indicaría que en el sector donde fue perforado el Pozo de Estudio-1, la geología del subsuelo correspondería realmente a un depósito cuaternario (Qcal-Qfc) de un poco más de 830 ft. de espesor y no a rocas del Grupo Real (N1r). Estos depósitos de abanicos y de terrazas están suprayaciendo rocas plutónicas graníticas de textura fanerítica ricas en feldespatos, que intruyen a la Formación Noreán (J1-2n) (Fig. 7).

Los registros de pozo mostraron diferencias bien marcadas en zonas de alta radiactividad (desplazamiento de la curva GR), quizás asociadas a minerales ricos en potasio (K) generados por acumulación de arcillas o por acumulación de elementos radiactivos como U, Th y K en zonas de alteración hidrotermal por contacto con rocas volcánicas o graníticas; las curvas de densidad y neutrón tienden a tomar direcciones opuestas, a su vez, el Gamma Ray (GR) aumentó y la resistividad lo hizo considerablemente hacia la parte basal del pozo, debido a que se encontró una litología asociada a rocas ígneas. Si bien las respuestas de los registros de pozo pudieron estar alterados por la presencia de diferentes litologías, la respuesta mostró altas resistividades, atribuible quizás a lo compacto de las rocas, a la alta radiactividad asociada a minerales traza, a la baja porosidad

y a unos valores de factor fotoeléctrico (P_e) altos, que se pueden relacionar a la presencia de minerales como el cuarzo y el feldespato potásico.

La permeabilidad absoluta para esta unidad geológica de rocas graníticas, calculada a partir de la ecuación de Timur (Ec. 2), presentó un rango promedio de 0.45, llegando a lecturas confiables de 1.1 milidarcys (mD), con una dispersión de los datos de moderada a alta. El cálculo de porosidad total a partir del método combinado (Densidad – Neutrón), para estas rocas en el Pozo de Estudio-1, arrojó un resultado promedio de 5.9%; al comparar las lecturas, se observó la afectación sobre los registros en algunas zonas, por posibles procesos hidrotermales [31] (Moxham R. M. et al., 1965) es de anotar, que, en algunos casos, los registros de porosidad no se encontraban corregidos por compactación. A continuación, se presenta la Tabla 2 con los resultados obtenidos:

Una roca o depósitos sedimentarios con una permeabilidad de 4.9 a 10.9 mD indica que es relativamente permeable y tiene una buena capacidad para permitir el flujo. La porosidad entre el 31% y el 38% sugiere que la roca tiene una cantidad significativa de espacios vacíos que pueden contener fluidos como agua, petróleo y/o gas. Estos valores son prometedores en términos de su capacidad para actuar como un reservorio de hidrocarburos, ya que la combinación de una porosidad relativamente alta y una permeabilidad moderada sugiere que la roca tiene el potencial de contener y producir cantidades significativas de fluidos. Por otro lado, una roca con una permeabilidad de 0.45 a 1.1 mD indica que es relativamente impermeable y tiene una baja capacidad para permitir el flujo de fluidos. La porosidad del 5.9% sugiere que la roca tiene una cantidad limitada de espacios vacíos. Estos valores sugieren que la roca tiene limitada capacidad para actuar como un reservorio de hidrocarburos, ya que la combinación de una baja porosidad y una permeabilidad baja indica que es poco probable que contenga cantidades significativas de fluidos o que permita un flujo de manera eficiente.

Estos rangos se utilizan frecuentemente en estudios de reservorios (Tabla 3) para diferenciar entre reservorios productivos, con porosidad $\geq 10\%$ y permeabilidad > 1 mD y para no reservorios y reservorios pobres, con permeabilidad y porosidad bajas, generalmente, < 0.1 mD y entre 0.1-1.0 mD y porosidades $< 5\%$ y entre 5-10% [10] y [32] (Dullien, 1992).

Luego de la valoración de los registros de pozo, especialmente del Grafico Compuesto (RGC) y de los respectivos análisis petrofísicos, a partir de las lecturas de Gamma Ray, porosidades densidad y neutrón, de la resistividad y del factor fotoeléctrico, se obtuvieron las interpretaciones de todos los intervalos a lo largo de la perforación, de los cuales, algunos fueron definidos como

Tabla 2.

Unidades litoestratigráficas analizadas en el perfil de roca entre los 0 – 1199 ft. de profundidad (24 muestras), con sus respectivos valores calculados de permeabilidad y porosidad promedio.

Geología	Unidad/Miembro	Permeabilidad (Milidarcys o mD)	Porosidad (%)
Abanico Aluvial (Qcal)	Arenitas,	4.9 - 10.9	31
	Lodolitas, Conglomerados	9.8 - 14.9	38
Rocas Graníticas (Jg)	Unidades ígneas	0.45 – 1.1	5.9

Fuente: Autor

prospectivos para hidrocarburos (concentrados en los depósitos sedimentarios neógenos y cuaternarios), Estos intervalos, diferenciados del resto en color verde, pueden visualizarse en la Tabla 4. Es importante mencionar, que estos resultados fueron posteriormente contrastados con las imágenes de los núcleos de perforación y con el informe de descripción litológica de corazones realizados por el geólogo de pozo, evidenciándose una gran coherencia entre la interpretación petrofísica y las rocas presentes en la sección perforada.

5 Determinación de propiedades petrofísicas de los intervalos prospectivos

Considerando, que no se disponía de los valores de resistividad del agua de formación para el Pozo de Estudio-1, fue necesario utilizar el gráfico de Pickett para extrapolar a un valor de a^*R_w , suponiendo que $a=1.0$, e infiriendo la resistividad del agua. La línea usada para la extrapolación corresponde a una

Tabla 3.

Clasificación general de calidad de reservorios.

Categoría del reservorio	Porosidad (%)	Permeabilidad (mD)	Comentarios
Reservorio Excelente	> 25	> 100	Alta capacidad de Almacenamiento y excelente flujo
Reservorio Bueno	15-25	10-100	Buena capacidad de almacenamiento y flujo
Reservorio Regular	10-15	1-10	Aceptable para producción limitada
Reservorio Pobre	5-10	0.1-1	Capacidad reducida, posible zona de transición
No Reservorio	< 5	< 0.1	Sello o roca impermeable, sin valor como reservorio convencional.

Fuente: Autor.

Tabla 4.

Intervalos caracterizados en el Pozo de Estudio-1, en color verde se resaltan los identificados como prospectivos, se destacan los valores mínimos y máximos del Gamma Ray (GR), Porosidades Neutrón y Densidad (POR-NEU-DEN) corregidas, el Efecto fotoeléctrico (P_e) y la interpretación geológica. NR: Indica que no se reporta en el registro.

Tope (ft)	Base (ft)	GR (API) Min-Max	POR (DEN) SS Min-Max	POR (NEU) SS Min-Max	P_e (Barns/Elec) Min-Max	Resistividad (Ohm-m) Min-Max	Observaciones/Interpretación
0	30	41-99	NR	NR	1.8-9.9	NR	Arcilla arenosa y conglomerados
30	37	95-138	39-40	44-(-4)	2.1-3.1	NR	Depósitos arcillosos y arenosos
37	44	54-109	40-36	-4-(-11)	2.0-2.3	51-73	Arenita arcillosa
44	53	99-135	38-29	4-(-6)	1.9-208	18-49	Arcillas y arenitas
53	105	56-97	29-18	53-34	2.1-3.5	9.2-31	Arcillas arenosas
105	117	31-73	40-30	53-43	1.9-2.7	16-35	Arcillas arenosas y conglomerados
117	184	55-91	38-21	53-38	2.0-2.9	7-62	Conglomerado arenoso
184	193	32-56	42-31	43-35	1.9-2.1	11-56	Arenas y conglomerados
193	228	49-101	38-21	50-43	2.1-3.1	7-22	Conglomerado y arenitas
228	238	39-61	39-28	41-35	1.9-2.2	16-20	Arena arcillosa
238	335	53-92	45-19	44-32	2.3-3.2	8-22	Limos arcillosos
335	339	71-87	20-9	42-34	2.9-5.7	6.4-10	Arcillas y calizas
339	391	51-88	39-19	44-31	2.0-2.9	4-14	Conglomerado en matriz areno arcillosa
391	432	29-59	NR	NR	NR	NR	Conglomerado en matriz areno arcillosa
432	528	61-83	39-20	42-25	2.4-3.6	8-39	Arcilla limosa
528	536	51-83	26-23	34-27	2.1-3.4	28-36	Arenita arcillosa y limosa
536	570	49-87	29-20	41-26	2.2-3.7	16-35	Conglomerado en matriz arcillosa
570	584	31-53	44-18	69-23	2.1-3.9	23-39	Arenita arcillo-limosa calcárea
584	622	61-103	37-21	43-22	2.3-3.8	15-39	Conglomerado limo-arenoso
622	658	44-68	53-35	43-28	2.2-3.7	21-30	Arcilla limo-arenosa
658	769	53-102	35-16	47-19	2.5-3.9	21-51	Conglomerado en matriz areno arcillosa
769	827	66-89	47-25	58-33	2.7-3.9	20-34	Conglomerado arcillo-limoso calcáreo
827	836	79-119	31-17	40-19	2.9-4.0	11-24	Arenita conglomerática arcillosa
836	1199			Rocas ígneas			Granito-Monzonita-Granodiorita-Sienita-Riolita porfírica

Fuente: Autor

pendiente de 0.5 ($m=2.0$), la cual se trazó uniendo los puntos ubicados en zonas con arcillosidad relativamente baja. Luego se compararon los valores de resistividad del agua de formación entre los intervalos, para verificar que tuvieran una coherencia física (los sólidos totales disueltos deberían aumentar con la profundidad y, por consiguiente, la resistividad se obligaría a disminuir con la profundidad a temperatura constante).

La porosidad empleada en el gráfico de Pickett fue calculada como el promedio aritmético de las lecturas de porosidades de neutrón y de densidad. No obstante, en situaciones excepcionales que requieran una corrección más precisa, como una gran separación entre las dos curvas (lo cual podría indicar una zona de gas, una arcillosidad moderada a alta, la presencia de minerales pesados o la intercalación de rocas de baja densidad, entre otros factores), se consideraron ajustes adicionales.

La resistividad obtenida del agua se utiliza para calcular la saturación de agua (S_w) en una parte limpia del intervalo que muestre una lectura de resistividad profunda relativamente alta.

Dependiendo del valor de saturación calculado y de la incertidumbre, debido a los valores desconocidos del factor de tortuosidad, el exponente de cementación y del exponente de saturación (a, m, n), se determinará si se trata de una zona de hidrocarburos o de agua. Si es una zona de hidrocarburos, se verificará si hay un cruce entre los registros de densidad y neutrón o una disminución en el Factor Fotoeléctrico (Pe) teórico para la litología interpretada. En ese caso, se concluirá que el fluido es gas; de lo contrario, será aceite [33] (Olivella J.B., 1992). Luego, se construyeron los gráficos de Pickett para los intervalos definidos como prospectivos.

Para un mayor entendimiento de la metodología, se detallan los cálculos para el primer intervalo (como una guía), y se presenta una tabla resumen para los demás. El primer intervalo potencial se encuentra entre los 105 y 117 pies de profundidad, y el gráfico de Pickett se construyó como se muestra en la Fig. 8.

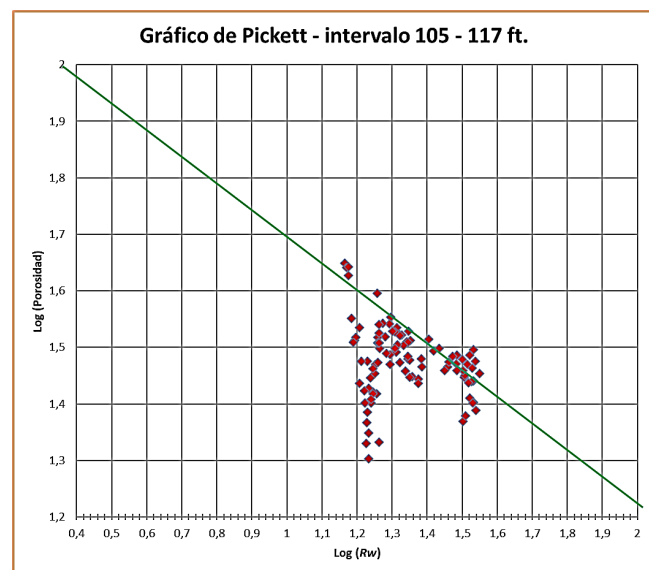


Figura 8. Gráfico de Pickett y dispersión de puntos de porosidad para el intervalo 105 – 117 ft. De profundidad.

Fuente: Autor.

Tabla 5.

Intervalos identificados como prospectivos al norte del Valle Medio del Magdalena para el Pozo de Estudio-1. (a, m, n) Factor de tortuosidad, exponente de cementación y exponente de saturación respectivamente. Resistividades, saturaciones e interpretación geológica.

Intervalo (tope a base, ft)	Porosidad Densidad- Neutrón Promedio	Rango de resistividad profunda (ohm-m)	a, m, n	Log (R_w) de Pickett
105 - 117	0.322	16 - 35	1, 2, 2	0.42
184 - 193	0.391	11 - 56	1, 2, 2	0.37
228 - 238	0.418	16 - 20	1, 2, 2	0.15
570 - 584	0.362	23 - 39	1, 2, 2	0.31
622 - 658	0.458	21 - 30	1, 2, 2	0.30

Intervalo (tope a base, ft)	Resistividad agua de Formación (R_w , ohm-m)	Valor más alto de R_t (ohm-m)	Saturación calculada (S_w)	Interpretación geológica
105 - 117	2.63	35	0.851	Zona de agua
184 - 193	2.34	56	0.523	Zona de agua
228 - 238	1.41	20	0.636	Zona de agua
570 - 584	2.04	39	0.616	Zona de agua
622 - 658	2.00	30	0.563	Zona de agua

Fuente: Autor.

La dispersión de puntos muestra un rango estrecho de valores de porosidad (logaritmo entre 1.3 y 1.7) y de resistividad (R_w) (logaritmo entre 1.1 y 1.6). La línea con pendiente media ($\frac{1}{2}$) (en color verde) se trazó a través de los puntos con resistividad media-alta, representando los valores medios de resistividad. Al extrapolar a un logaritmo de porosidad de 2.0 (100 unidades de porosidad), se obtiene un valor del logaritmo de $aR_w = 0.42$, lo que corresponde a una resistividad del agua de 2.63 ohm-m. Utilizando la ecuación de Archie con $R_w = 2.63$, $m = n = 2.0$ y $a = 1.0$, y aplicando el valor más alto tomado de una zona limpia del registro de resistividad profunda (que, según la tabla de identificación de litología, es de 35 ohm-m) y una porosidad promedio densidad-neutrón del 32% (0.322 de porosidad densidad-neutrón promedio), se determinó que la mínima saturación de agua en el intervalo analizado es del 85% (0.851 de S_w calculada). Esto sugiere que el intervalo está saturado con agua y que la saturación de agua reducida se debe a pequeños cambios locales de porosidad o a incertidumbres en los parámetros de la ecuación de Archie (Ec. 1).

Siguiendo el mismo procedimiento, se realizaron los cálculos para los demás intervalos prospectivos (intervalos en color verde de la Tabla 4), cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.

6 Cálculo promedio de Saturación de agua (S_w) de formación

La resistividad del agua, inferida de los gráficos de Pickett, mostraron una tendencia a disminuir con la profundidad, excepto en el intervalo de 228 a 338 pies, donde se observó una caída significativa en los valores de resistividad en comparación con los otros intervalos (1.41 ohm-m). Esta disminución podría deberse a un efecto litológico de la formación, compuesta principalmente por conglomerados de textura clástica gruesa, incluyendo cantos y guijos de diversas rocas ígneas y metamórficas en una matriz limo-arcillosa.

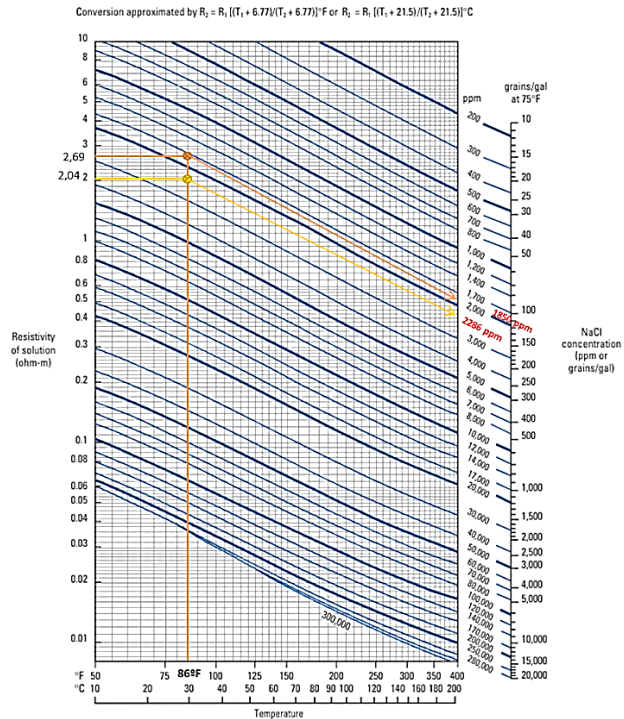


Figura 9. Lectura sobre la gráfica GEN-6 de concentración de NaCl-Resistividad / Temperatura.

Fuente: Schlumberger Log Interpretation Charts.

La temperatura registrada varió entre 83.7 °F y 87.4 °F, medida desde los intervalos más superficiales hasta los más profundos, con un promedio constante de 86 °F (30 °C). Basándose en esta temperatura y en los valores de resistividad inferidos, se estimó la concentración de cloruros o la salinidad equivalente de la salmuera.

Al calcular estos valores, se obtuvo una concentración de 1,850 ppm para el intervalo más somero (105-117 ft.) y de 2,286 ppm para el intervalo más profundo (622-658 ft.) (Fig. 9).

7 Resultados

La interpretación de los fluidos, reveló que los intervalos de profundidad: 105 - 117 ft., 184 - 193 ft., 228 - 238 ft., 570 - 584 ft. y 622 - 658 ft. Corresponderían a zonas de agua. Sin embargo, el intervalo 184 - 193 presentó valores de saturación de agua (S_w) que varían entre el 39% y el 56%, adicionalmente, en el subintervalo 184 - 186,2, considerando la incertidumbre en la resistividad del agua de la formación y otros parámetros de la ecuación de Archie, existe una gran posibilidad de que dicho subintervalo contenga saturación de hidrocarburos; En tal caso, correspondería a petróleo (aceite), debido a que no se observó en los registros, la huella característica de gas en esa zona (que se observaría en el registro gráfico compuesto, como el cruce de los registros densidad y neutrón). En el caso de gas se leería una baja densidad, por lo que la porosidad sería alta. Al tiempo, leería bajo contenido de hidrógeno, en comparación con una roca saturada de líquido, por lo cual leería una porosidad baja, haciendo que las curvas de porosidad se separen

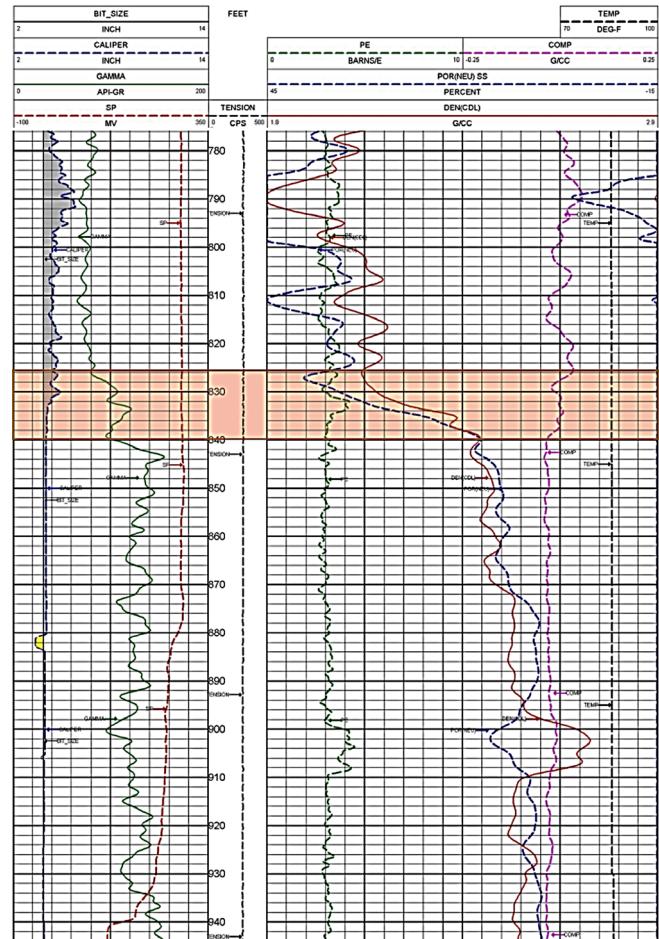


Figura 10. Registros eléctricos que muestra el cambio de litologías sedimentarias a ígneas (área naranjada), de los depósitos aluviales (QCal) a posibles intrusivos graníticos que intruyen a la Formación Noreán (J1-2n). Fuente: ANH, registro gráfico compuesto escala 1:200 del Pozo Estudio-1.

abruptamente. Sería recomendable, por consiguiente, realizar la determinación de propiedades eléctricas de la formación en estas unidades geológicas, para acotar valores más probables de Saturación de agua (S_w).

Los intervalos prospectivos analizados para este artículo, se centraron en los depósitos sedimentarios del abanico aluvial (Qcal) donde fue perforado el Pozo de Estudio-1, desde superficie hasta los 835 ft. de profundidad. En esta unidad fueron definidos los intervalos prospectivos, entre los 105 ft. y los 658 ft.

A partir de los 835 ft. y hasta el final de la perforación del pozo (1199 ft.), se detectó en los registros eléctricos, unas zonas de alta radiactividad quizás asociadas a minerales traza, cuyo origen sugeriría un proceso de posible alteración hidrotermal [31] y/o metamorfismo incipiente; las curvas de densidad y neutrón tomaron posiciones opuestas, a su vez el Gamma Ray (GR) y la resistividad aumentaron considerablemente hacia la base del pozo, también la baja porosidad y los valores elevados del Factor Fotoeléctrico (Pe) indicaron la presencia de rocas ígneas (Formación Noreán e intrusivo granítico), como puede observarse en la Fig. 10.

Las concentraciones de cloruros muestran un incremento de los intervalos más someros a los más profundos, pasando de 1850 ppm a 2286 ppm.

El incremento de la salinidad de la salmuera en un yacimiento de hidrocarburos es importante porque afecta directamente las propiedades eléctricas de las formaciones geológicas, lo que a su vez influye en la interpretación de los registros de resistividad [10].

Una mayor salinidad de la salmuera aumenta la conductividad, reduciendo la resistividad del agua de formación, produciendo un mayor contraste con el hidrocarburo, que no conduce bien la electricidad, por lo que su resistividad y la de la roca que lo contiene sería alta, lo que puede complicar la diferenciación entre las zonas de agua y las zonas de petróleo y gas. Además, la salinidad elevada puede impactar la viscosidad y densidad de los fluidos, así como las interacciones químicas entre la salmuera y las rocas del yacimiento. Entender estos cambios es muy importante para una evaluación precisa de la saturación de agua, para la identificación de zonas productivas y la estimación de reservas, así como para el diseño de técnicas de recuperación mejorada de petróleo o EOR.

Gracias al contraste realizado entre los registros eléctricos y la interpretación de los núcleos de perforación del Pozo de Estudio-1, fue posible determinar que la unidad sedimentaria perforada hasta cerca de los 835 ft. de profundidad, corresponde a depósitos inconsolidados que podrían ser clasificados como abanicos aluviales y terrazas aluviales (QCal) de edad cuaternaria, constituidos principalmente por sedimentos y detritos de origen volcano-sedimentario de diversas edades geológicas.

A partir de los 835 ft. de profundidad, y hasta el final del pozo, los valores observados en los registros de factor fotoeléctrico, densidad y resistividad del Pozo de Estudio-1, permitieron inferir la existencia de rocas ígneas plutónicas de textura granítica que parecen estar intruyendo a la Formación Noreán en ese sector de la cuenca, esto pudo verificarse con la interpretación de la línea sísmica 2D ANHMvc-2015-12 del programa Pailitas 2D-2015 (Figura 3) y contrastarse con la información de los núcleos de pozo descritos para la ANH por la empresa Serviminas.

8 Discusión

De acuerdo con [34] (Serra O., 1985) “El trabajo de un geólogo consiste en la observación y descripción completa y objetiva de las rocas, así como de los fenómenos geológicos ocurridos en el pasado y los que se desarrollan en el presente. En el caso de las rocas sedimentarias, esta interpretación debe predecir su génesis y aquellas zonas más favorables para la acumulación de hidrocarburos, agua y minerales, su extensión, la evaluación de sus volúmenes y la predicción de la presencia, la naturaleza y la distribución espacial de las barreras de permeabilidad existentes en los reservorios.”

Es normal, que los elevados costos de adquisición de registros de pozo con nuevas herramientas tecnológicas o la falta de resolución de las mismas, haga difícil la detección de reservorios, así como un reconocimiento confiable de su contenido de fluidos, dificultando igualmente, una precisa interpretación cuantitativa y un correcto cálculo de reservas.

Muchos perfiles o registros estándar de porosidad y resistividad leen valores representativos para capas con espesores mayores a 50 cm. Si las capas son más delgadas, las respuestas del registro corresponden a un valor promedio, llevando a la subestimación o a ignorar por completo un reservorio de gas o aceite.

La metodología planteada en este artículo, propende por facilitar a los geólogos, geocientíficos e ingenieros de yacimientos la obtención de la porosidad (ϕ), la saturación de agua (S_w), la arcillosidad (V_{sh}) y la permeabilidad (K), a través de la lectura del registro gráfico compuesto (RGC), priorizando el del factor fotoeléctrico (Pe) para la aplicación de los análisis estadísticos, con el fin de obtener intervalos prospectivos de hidrocarburos, que de otra manera pasarían desapercibidos en la investigación petrofísica tradicional.

Este tipo de análisis permite identificar litologías en el subsuelo que de otra manera serían invisibles al ojo del geólogo, ya sea, porque no fueron cartografiadas en los mapas geológicos de superficie, por no estar aflorando, o porque los modelos estratigráficos previos o históricos no las identificaron, pasando el error de una generación de exploradores de hidrocarburos a la siguiente. Es por esto, que este tipo de datos e información es esencial para la construcción de modelos precisos del subsuelo, optimizando el beneficio de los recursos y minimizando los riesgos y los costos operativos.

Tal es el caso, que mediante la comparación entre los registros eléctricos y la descripción de núcleos del Pozo de Estudio-1, se identificó que la unidad sedimentaria perforada hasta aproximadamente los 835 pies de profundidad corresponde a depósitos no consolidados, interpretados como abanicos y terrazas aluviales (QCal) de edad cuaternaria y que a partir de esa profundidad, y hasta el final de la perforación, se encontraron rocas de textura granítica las cuales se interpretan como cuerpos plutónicos que intruyen y afectan a la Formación Noreán del Jurásico (J1-2n).

Finalmente, Comprender estas variaciones resulta fundamental para estimar con precisión la saturación de agua, reconocer zonas con potencial productivo y calcular adecuadamente las reservas, además de ser clave en la planificación de estrategias de recuperación mejorada de petróleo (EOR).

9 Conclusiones

Con un sencillo análisis petrofísico, los profesionales de la industria de exploración de hidrocarburos (también aplicable a la exploración de aguas subterráneas, hidrógeno natural y almacenamiento de CO_2), a partir de los registros de pozo pueden analizar e identificar la litología presente en un yacimiento con base en una serie de relaciones empíricas y supuestos teóricos que permitirán estimar las propiedades físicas y geológicas, tales como la porosidad, la saturación de agua y el volumen de arcillas, entre otras importantes.

Para la identificación de la litología es posible comparar las respuestas de los registros de porosidad, densidad y neutrón, de acuerdo a las matrices para las cuales fueron calculadas, con base en las mediciones de densidad de la roca y los índices de neutrones; no obstante, a través de los datos suministrados por el registro del Efecto fotoeléctrico (Pe), se

logra una determinación más precisa de la litología, la cual está más relacionada con la densidad electrónica de la formación rocosa.

Este ejercicio permite diferenciar las litologías predominantes en el subsuelo, y al correlacionarla con la información del registro Gamma Ray (*GR*) indicar el nivel de arcillosidad de la formación, con el propósito de identificar las zonas dispuestas para alojar fluidos móviles (aceite, gas y agua). Además, es posible también extraer de los registros de porosidad, información de la acumulación de fluidos. Finalmente, es muy útil para la identificación y caracterización de intervalos con potencialidad de acumulación de hidrocarburos (yacimientos), a los cuales se les debe aplicar el cálculo de porosidad equivalente con base en el cross plot o gráfica Densidad-Neutrón, conjuntamente con la información del registro sísmico o acústico (un registro *DT* por ejemplo), con el propósito de refinar los rangos de porosidad y suponiendo zonas saturadas de agua que se obtienen del registro de resistividad profunda, y comparándola con la resistividad no alterada de la formación geológica, se pueden generar los gráficos de Pickett con los que se determinarán las resistividades del agua de la formación, con las cuales se estiman los valores de saturación de fluidos a partir de la ecuación de Archie (Ec. 1).

Es recomendable realizar la determinación de las propiedades eléctricas de la formación geológica en estas unidades litoestratigráficas, acotando los valores más probables de saturación de agua (*Sw*).

Este procedimiento es muy útil en los trabajos exploratorios para cualquier cuenca petrolífera, ya que permitirá identificar los diferentes tipos de fluidos presentes en un yacimiento (gas, petróleo y/o salmuera), utilizando registros de pozo, facilitando la identificación de los mejores intervalos productores de hidrocarburos contenidos en la secuencia sedimentaria, a partir de la Saturación de Agua (*Sw*), cuyos resultados, deben complementarse con los de la saturación de hidrocarburos (*Sh*) y el de los registros de resistencia eléctrica y de neutrón-densidad.

Los resultados arrojados por esta investigación, sugieren la acumulación de fluidos hidrocarbúferos, en trampas sedimentarias del Cuaternario. Estas acumulaciones recientes, se podrían relacionar con las emanaciones de aceite existentes en esta zona del VMM. Indicando, además, la existencia de un sistema petrolífero funcional cercano.

Este trabajo de investigación, permitió, además, identificar las unidades estratigráficas atravesadas por la perforación del Pozo de Estudio-1, definiéndose desde superficie y hasta los 835 ft. aproximadamente, un depósito sedimentario inconsolidado del Cuaternario, reposando discordantemente sobre rocas graníticas holocristalinas, que se extienden hasta el final de la perforación, indicando probablemente la existencia de intrusivos plutónicos de una posible edad Jurásico Superior, que intruyen a las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Noreán.

Finalmente, respecto a la caracterización de yacimientos no convencionales de tipo *oil* o *gas shale* (petróleo o gas de lutita, respectivamente), a parte de los análisis de registros aquí examinados, se requiere información y análisis de la materia orgánica (*MO*) contenida en las rocas, ya que esto es crucial para determinar el potencial y la viabilidad de la

explotación de este tipo de recursos. Estos análisis incluyen el Contenido Total de Carbono (*TOC*), la pirólisis *Rock-Eval*, la Reflectancia de la Vitrinita (*Ro*) y los isótopos de carbono.

Agradecimientos

Agradezco especialmente al Servicio Geológico Colombiano - SGC y a la Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH, por facilitar y permitir el uso de la información utilizada para este artículo. Al Doctor Eider Niz-Velásquez de la compañía China National Petroleum Corporation (CNPC-R&D) por su orientación y enseñanzas respecto a los análisis petrofísicos, y a la Doctora Astrid Blandón Montes de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, por sus invaluable tutorías, revisiones, comentarios, sugerencias y aportes geocientíficos.

Bibliografía

- [1] Mahan, J.A., Modelo Geológico - Geofísico de la Formación Umir y su potencial de generación de hidrocarburos en la región Norte del Valle Medio del Magdalena. Trabajo Final de Maestría. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2019, 129 P.
- [2] Glover, P.W.J., Petrophysics. MSc Course notes. Department of Geology and Petroleum Geology. University of Aberdeen. Scotland UK. [online]. 2000, 142 P. Available at: <https://pdfcoffee.com/formation-evaluation-by-paul-glover-pdf-free.html>
- [3] Schlumberger, Log interpretation charts. Sugar Land, Texas, USA, [online]. 2009. Available at: www.slb.com,
- [4] Niz, V.E., Una ecuación de balance de materiales para yacimientos de doble porosidad con capa de gas inicial. MSc. Tesis, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander-UIS, Santander, Colombia, 2003.
- [5] Pickett, G.R., A review of current techniques for determination of water saturation from logs, Journal of Petroleum Technology, pp. 1425-1435. 1966. DOI: <https://doi.org/10.2118/1446-PA>
- [6] Crain, E.R., CPH. Crain's Petrophysical Pocket Pal. [online]. 1999. Available at: www.spec2000.net.
- [7] Schlumberger. Oilfield Glossary. Evaluación de formaciones. Gráfica de Pickett. [en línea]. [consultado en mayo de 2024]. Disponible en: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/pickett_plot.aspx
- [8] Krygowski, D.A., and Cluff R.M., Pattern recognition in a digital age: a gameboard approach to determining petrophysical parameters., AAPG, 2012, pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1190/urtec2013-266>
- [9] Caíta, CL., Petrofísica aplicada a la exploración de hidrocarburos. Curso de apropiación social del conocimiento. Proyecto CAB. Minciencias-Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2024.
- [10] Tiab, D. and Donaldson, E.C., Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties, 4th ed., Gulf Professional Publishing, 2015.
- [11] Ahmed, T., Reservoir Engineering Handbook, 5th ed., Gulf Professional Publishing, 2018.
- [12] Dake, L.P., Fundamentals of reservoir engineering. Elsevier Science. 1983.
- [13] Gluyas, J., and Swarbrick, R., Petroleum Geoscience, 2nd ed., Wiley-Blackwell. 2013.
- [14] Terry, R.E., and Rogers, J.B., Applied petroleum reservoir engineering, 3rd ed., Pearson, 2014.
- [15] Ordóñez-Carmona, O., Frantz, J.C., Chemale, F., and Londoño, C., Serranía de San Lucas: mineralizaciones auríferas, intrusiones de 1500 Ma, metamorfismo Grenville y magmatismo Jurásico. XII Congreso Colombiano de Geología, 2009.
- [16] Urueña-Suárez, C.L., and Zuluaga, C.A., Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas – Santander. Geología Colombiana, 36(1), pp. 37–56, 2011.
- [17] Avellaneda-Cáceres, W.D., Anaya-Arias, C.A., Ayala, A.C., Mantilla-Figueroa, L.C., Bernal-Olaya, R. y Velandia, F., Contribuciones al

- conocimiento de la edad de los cuerpos ígneos plutónicos, hipoabisales y volcanoclásticos aflorantes en el área del municipio de Pailitas (Cesar, Colombia). *Boletín de Geología*, 42(2), pp. 105-127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020006>
- [18] Correa Martínez, A.M., Rodríguez, G., Arango, M.I., and Zapata, G., Petrografía, geoquímica y geocronología U-Pb de las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), pp. 53-70, 2019.
- [19] Clavijo, J., Mantilla, L., Pinto, J., Bernal, L., and Pérez, A., Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(2), pp. 45-60, 2008.
- [20] González, H., Núñez, A., Martínez, J., and Rodríguez, G., Mapa Geológico de Colombia. Plancha 055 - El Banco. Servicio Geológico Colombiano (SGC), escala 1:100.000, 2008.
- [21] Villamil, T., Chronology, relative sea level history and a new sequence stratigraphic model for Cretaceous basins of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(4), pp. 331-355, 1999.
- [22] Van der Hammen, T., Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiense en el sur de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín Geológico*, 6(1-3), INGEOMINAS, 1958. DOI: <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol6.1-3.1958.309>
- [23] Contreras, R.C., Pérez, K., y Villamizar, V., Muestreo del subsuelo mediante la perforación de pozos estratigráficos someros tipo Slim Hole, con recuperación de núcleos de roca y toma de registros eléctricos para los proyectos 1 Sector Norte y 1 Sector Sur. ANH-Serviminas. Reporte Final, 2016.
- [24] Ingeominas - Universidad Industrial de Santander – UIS. Memoria explicativa Plancha 55, El Banco, sur del departamento de Bolívar y Cesar. 2006, pp. 25-26.
- [25] Clavijo, J.T., et al., Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, Mapa Geológico de Colombia, Memoria Explicativa de la Plancha 75 – Aguachica, escala 1:100.000, 1995.
- [26] Mantilla, L.C., Clavijo, J., Pinto, J.E., Paez, L.E., Pérez, A., Quintero, I.,... Cuellar, M., Cartografía geológica de 9.600 Km² de la Serranía de San Lucas: Planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco De Loba), 85 (Simítí) y 96 (Bocas Del Rosario). Aporte a su evolución geológica. Memoria Explicativa de la Plancha 55 – El Banco. Ingeominas, 2006.
- [27] Sarmiento, G., Puentes, J., y Sierra, C., Evolución geológica y estratigrafía del sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, 2015, 59 P.
- [28] INGEOMINAS. Memoria explicativa del Mapa Geológico del Departamento del Cesar (Escala 1:250.000). Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS, 2003.
- [29] Servicio Geológico Colombiano – SGC. Geología de la Plancha 55 El Banco, escala 1:100.000, 2006.
- [30] ANH-Serviminas. Registro gráfico compuesto e informe final de Pozo, 2016.
- [31] Moxham, R.M., Foote, R.S. y Bunker, C.M., Estudios con espectrómetro de rayos gamma de rocas hidrotermalmente alteradas. *Economic Geology*, 60 (4), pp. 653-671, 1965. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.60.4.653>
- [32] Dullien, F.A.L., Porous media: fluid transport and pore structure, 2nd ed., Academic Press. 1992 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-223651-8.X5000-3>
- [33] Olivella, J.B., Perfiles Eléctricos, Una herramienta para la evaluación de formaciones. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, ACGG, XVI-4, 16.1.4, 1992.
- [34] Serra, O., Análisis de ambientes sedimentarios mediante perfiles de pozo. Schlumberger, 1985, 7 P.
- J.A. Mahan-Gaviria**, obtuvo el título en Ingeniería Geológica en 2004 y MSc. en Ingeniería - Recursos Minerales en 2019. Actualmente es candidato a Dr. en Ciencia y Tecnología de Materiales en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Ha trabajado como geocientífico en Schlumberger (2004–2015) en proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos en Colombia, Ecuador y Perú. Entre 2016 y 2018 realizó consultorías geológicas, y de 2018 a 2022 con el Servicio Geológico Colombiano en cartografía tectónica e hidrogeológica, así como en estudios de neotectónica. Entre 2023 y 2024 participó en proyectos de evaluación geológica e hidrogeológica para la Universidad Nacional y la ANH. Actualmente, es profesional especializado en la Vicepresidencia Técnica de la ANH. Sus intereses de investigación incluyen el modelado geológico y geofísico de cuencas sedimentarias para la exploración de hidrocarburos, hidrógeno, minerales estratégicos y aguas subterráneas, integrando análisis petrofísicos, geoquímicos y sísmica 2D/3D. ORCID: 0000-0003-1200-3375



Incidencia de los eventos hidrometeorológicos en los riesgos ambientales Provincia de Pastaza

Ricardo Vinicio Abril-Saltos ^a, Betsy Yessenia Chango-Salazar ^b, Lupe Marina Coyago-Miranda ^c, Teresa Brigitte Jacome-Vargas ^d, Leydi Noemi Mina-Yanqui ^e & María Beatriz Coro-Mullo ^f

^a Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador. rvabril@uea.edu.ec

^b PDI- CONFENIA-WWF, Pastaza, Ecuador. betsychango@hotmail.com

^c Secretaría Técnica de Circunscripción Territorial Amazónica, Pastaza, Ecuador. lumalcomi@gmail.com

^d Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza, Pastaza, Ecuador. telechita96@gmail.com

^e Construcción y Consultoría, Pastaza, Ecuador. ladmi.17@gmail.com

^f Profesional independiente, Pastaza, Ecuador. mariacoro_9321@yahoo.com

Recibido: 9 septiembre 2024. Recibido en formato revisado: 6 mayo 2025. Aceptado: 14 mayo 2025.

Resumen

Los riesgos ambientales son elementos para considerarse en el desarrollo de las sociedades, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar los principales riesgos ambientales de origen hidrometeorológico de la provincia de Pastaza. Se aplicó una encuesta en comunidades de los cantones Pastaza y Santa Clara y se revisó la base de datos abiertos de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. Se realizó un análisis de frecuencias para determinar los principales eventos y afectaciones generadas. Los eventos más recurrentes en las encuestas fueron, deslizamientos y sismos mientras que en la base de datos de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos fueron las inundaciones y deslizamientos que también indicaron más afectaciones en personas, familias, infraestructura educativa, vial, tierras de cultivo y animales perdidos. Se concluye que los eventos hidrometeorológicos, generaron mayor cantidad de afectados en personas e infraestructura en la provincia de Pastaza.

Palabras clave: afectados deslizamiento; encuesta; inundación; vendaval.

Impact of hydrometeorological events on environmental risks in the Pastaza Province

Abstract

Environmental risks are elements to be considered in the development of societies, the objective of this work was to determine the main environmental risks of hydrometeorological origin in the province of Pastaza. A survey was applied in communities in the Pastaza and Santa Clara cantons and the open database of the National Secretariat for Risk Management was reviewed. A frequency analysis was carried out to determine the main events and effects generated. The most recurrent events in the surveys were landslides, earthquakes and snake bites and in the database, floods and landslides indicated more damage to people, families, educational infrastructure, roads, farmland and lost animals. It is concluded that hydrometeorological events generated a greater number of people and infrastructure affected in the province of Pastaza.

Key Words: affected landslide; survey; flood; windstorm.

1 Introducción

El riesgo ambiental, es una situación en la que las poblaciones se encuentran amenazadas por factores ambientales de origen natural y antrópico. La visión de la vulnerabilidad, plantea que los desastres son fenómenos socio-naturales donde intervienen factores socio-históricos por lo tanto, son condiciones que varían con el tiempo, y afectan

diferencialmente a la población y están asociadas a la incapacidad de un sistema de gobernanza para afrontar los efectos adversos de fenómenos extremos. Estos consideran el nivel de exposición, resistencia, capacidad de recuperación, dados por condiciones sociales y políticas. Los principales factores de riesgo provienen de la interrelación entre las amenazas físicas y las vulnerabilidades de las comunidades [1]

Los riesgos hidrometeorológicos se relacionan con eventos

How to cite: Abril-Saltos, R.V., Chango-Salazar, B.Y., Coyago-Miranda, L.M., Jacome-Vargas, T.B., Mina-Yanqui, L.N. y Coro-Mullo, M.B., (2025). Incidencia de los eventos hidrometeorológicos en los riesgos ambientales Provincia de Pastaza. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 57, pp. 46-53. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n57.116540>

generados por fenómenos atmosféricos, como ciclones, lluvias torrenciales, inundaciones pluviales, fluviales, tormentas de nieve, granizo, electricidad, heladas, ondas cálidas, gélidas y tornados, estos afectan principalmente a la infraestructura, representando rubros importantes para su rehabilitación. [2]

El concepto de vulnerabilidad plantea la inseguridad a riesgos provocados por eventos de origen socioeconómica o natural y la carencia de recursos y estrategias poder manejarlos, está relacionada con factores demográficos y socioeconómicos que incrementan o atenúan los impactos de los eventos de riesgo en las poblaciones locales. A partir de esto se plantea el concepto de “resiliencia”, el cual indica la capacidad de un sistema para adaptarse o mitigar nuevas fuentes de riesgo, donde también se aplica este principio a la familia, enfocándose en el control de las fuerzas que puedan afectarla, lo cual estará ligado a la posesión y control de recursos con los cuales afrontar estos riesgos [3].

La Provincia de Pastaza ubicada en la región amazónica ecuatoriana, es la más extensa del país, cuenta con cuatro cantones, diecisiete parroquias rurales y se asientan aquí siete nacionalidades indígenas: (Achuar, Shiwiar, Kichwa, Waorani, Shuar, Zápara y Andoas) [4].

Cuenta con tres cuencas hidrográficas que son: Cuenca del Río Pastaza, Cuenca del Río Tigre, Cuenca del Río Napo. La Cuenca del Río Pastaza, tiene una superficie de 2.346.927 Ha, de los cuales 830.500 Ha se encuentra dentro de la Provincia de Pastaza. La Cuenca del Río Tigre, tiene una superficie de 8.678 Km² dentro de la Provincia de Pastaza. Los ríos Anzu, Arajuno, y Curaray que nacen en la Provincia de Pastaza, son afluentes importantes del río Napo, que se encuentra en la Provincia de Napo. La Cuenca del Río Napo, tiene una superficie de 10.051.800 Ha, de los cuales 1.254.600 Ha se encuentra dentro de la Provincia de Pastaza. [4]

El presente trabajo, tuvo como objetivo determinar los principales riesgos ambientales de origen hidrometeorológico en la provincia de Pastaza

2 Materiales y métodos

La provincia de Pastaza se encuentra ubicada en la amazonia ecuatoriana, con altitudes que van desde los 2700 msnm hasta los 200 msnm. Sus características climáticas de los diferentes cantones se muestran en la Tabla 1, cuenta con una extensa red hídrica, donde destacan los ríos Pastaza, Anzu Bobonaza, Copataza, Corrientes, Conambo, Curaray entre los principales [4] donde también se presentan lluvias de intensidades que pueden llegar a sobrepasar los 200mm /en 24 h [5].

En el presente estudio se comparó información de dos fuentes, la primera correspondiente a una encuesta desarrollada en campo en el año 2018 en las comunidades Boayacu, San

Francisco, San Vicente, de la parroquia Teniente Hugo Ortiz, Simón Bolívar de la parroquia Fátima, estos en el cantón Pastaza, Unión de Llandia, Rey del Oriente y San Jorge en el cantón Santa Clara en el 2019, estas fueron seleccionadas al encontrarse en la cuenca alta del río Napo y que fueron incluidas dentro del proyecto de investigación: “Gestión De Riesgo Socioambiental De Comunidades Localizadas En La Cuenca Alta Del Río Napo, Región Amazónica Ecuatoriana Frente Al Cambio Climático Global”, desarrollado por la Universidad Estatal Amazónica. En esta encuesta se detalló las características socioculturales del encuestado, características de vivienda y memoria de desastres

Como segunda fuente se utilizó la base de datos de la secretaría nacional de gestión de riesgos para la provincia de Pastaza, para los periodos 2010-2022 [7].

3 Aplicación de encuesta

Se aplicó una encuesta estructurada de los siguientes bloques: datos generales, aspectos socioeconómicos, datos estructurales de la vivienda, servicios básicos, infraestructura comunitaria, memoria de desastres y/o eventos adversos,

Se aplicó la encuesta en las viviendas que al momento de ejecución se encontraban habitadas. Se determinó el número de familias en cada comunidad con base a lo reportado en los planes de ordenamiento territorial de los Gobiernos Autónomos descentralizados parroquiales de Fátima [8] y Teniente Hugo Ortiz [9] y cantonal de Santa Clara [10], donde se reporta el número de habitantes de cada comunidad y se dividió para el número de miembros promedio por vivienda de la provincia de Pastaza [11], se consideró un promedio de 4,5 personas por vivienda para el cantón Santa Clara y 4,2 personas /vivienda para el cantón Pastaza. El tamaño de muestra se obtuvo a través de la fórmula para poblaciones finitas (Ecuación 1) [12] considerando un nivel de confianza del 90%, al desarrollarse la encuesta en campo, se aplicó al mayor número de viviendas posible y el número de encuestas ejecutadas en campo, se muestran en la Tabla 2.

$$n = \frac{Nz^2pq}{d^2(N-1) + Z^2pq} \quad (1)$$

n = tamaño de la muestra (para poblaciones finitas)

N = tamaño de la población

Z = valor de Z crítico, calculado en las tablas del área de la curva normal. Llamado también nivel de confianza.

p = proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia (Para el caso en estudio 0,9)

q = proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en estudio (Para el caso en estudio 0,1) (1 - p).

d = nivel de precisión absoluta (+/- 0,1)

Las encuestas fueron aplicadas a una persona por familia,

4 Análisis estadístico

Se tabularon los datos en una matriz de Excel en la cual se ingresó la información derivada de la aplicación de las

Tabla 1

Características meteorológicas de los cantones de la provincia de Pastaza

Cantón	Altitud	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Arajuno	799 -389**	24***	3000 a 3500***
Mera	2270-545**	20- 22*	4562.9*
Pastaza	1144-284**	19 – 23*	5580.4*
Santa Clara	799 – 545**	18 – 24*	3703*

Fuente: Adaptado de *Abril et al., 2019, **Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza, 2020, ***Gobierno autónomo Descentralizado Cantonal de Arajuno, 2020.

Tabla 2.
Población y tamaños de muestra

Comunidades	Total, viviendas	Tamaño de muestra calculado	No de encuestas ejecutadas
Unión de Llandia	42	16	24
Boayacu	43	16	20
Simón Bolívar	78	19	23
San Francisco de Llandia	75	19	28
San Jorge	32	14	12
San Vicente	15	10	12
Rey del Oriente	27	13	13
Total	312	107	132

Fuente: Autores

Tabla 3.
Categorización usada para la interpretación de datos

Categoría	Edad (años)	Tiempo de residencia (años)
1	Menos de 20	Menos de 5
2	21 a 30	5 a 10
3	31 a 50	11 a 20
4	50 a 70	21 a 30
5	Mas de 70	Mas de 30

Fuente: Autores

encuestas por cada uno de los encuestados en las zonas estudiadas. Los datos fueron cargados y procesados con el Programa SPSS v.22. Primero se determinó las frecuencias de respuesta para cada pregunta establecida, a través de un análisis multivariado de correspondencia múltiple con análisis bidimensional [13]. Se obtuvo el coeficiente de Alfa de Cronbach aplicado al bloque memoria de desastres, para establecer la adecuación de muestreo. Previo al análisis se realizó una categorización de datos en edad y tiempo de residencia (Tabla 3)

Se realizó un análisis de frecuencias para determinar los eventos más reportados, tanto a nivel de las encuestas como los repostados en la matriz de datos de la secretaria nacional de gestión de Riesgos del Ecuador

5 Resultados

Las características del encuestado (Fig. 1), muestran que la mayoría son de sexo femenino, principalmente se autoidentifican como mestizos y kichwa con instrucción primaria y mayoritariamente entre 21 a 70 años. Su tiempo de residencia (Fig. 2), presenta 2 grupos que predominan con residencias entre 1 a 5 años y 21 a 30 años, en su mayoría los entrevistados fueron amas de casa, teniéndose como actividad económica la Agricultura y producción pecuaria.

En las características de vivienda (Fig. 3), la mayoría de encuestados reportan ser los propietarios de la vivienda, la cual es tipo casa con paredes y piso de madera y techo de zinc. En cuanto al agua (Fig. 4), las viviendas disponen de agua a través de tubería, en San Vicente a través de camión, mientras que en Unión de Llandia se abastecen a través de agua lluvia. En la disposición de aguas servidas, en la comunidad de San Vicente, no dispone de servicio higiénico y las aguas residuales en la mayoría de los casos se depositan en el alcantarillado, en San Vicente, San Jorge y rey del Oriente, en pozo séptico en Unión de Llandia y Simón Bolívar y en un estero cercano en San Francisco.

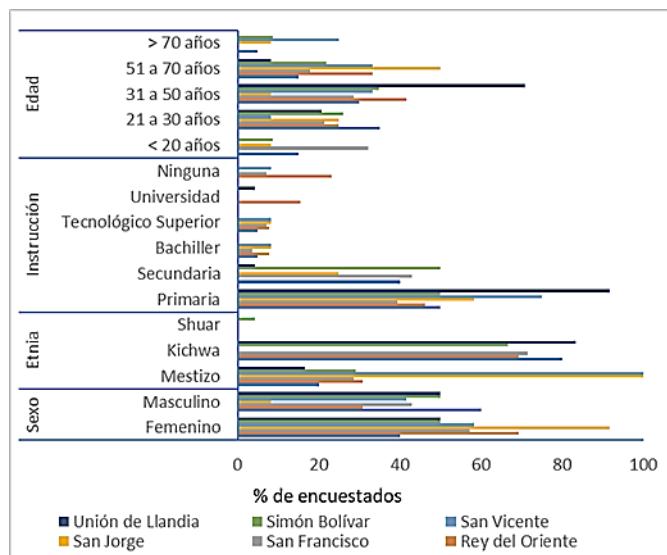


Figura 1. Características del encuestado

Fuente: Autores

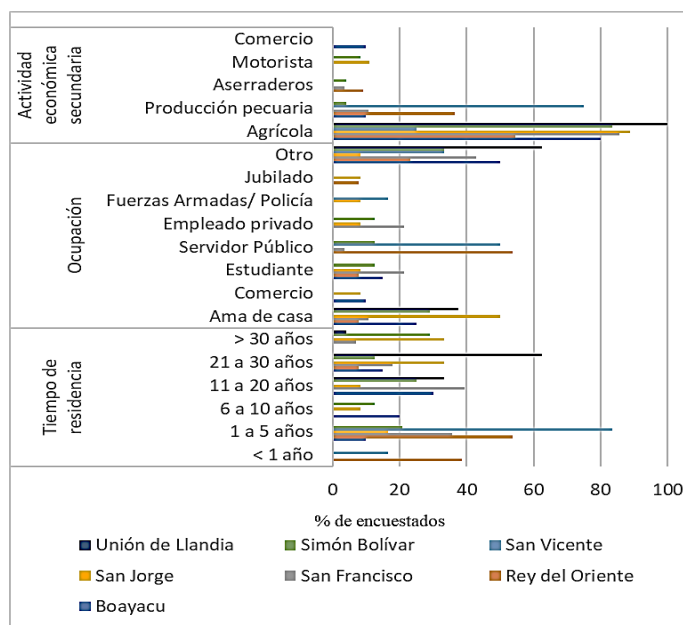


Figura 2 Tiempo de residencia y ocupación de los encuestados

Fuente: Autores

En la disponibilidad de servicios básicos (Fig. 5), la comunidad de Boayacu, dispone de servicio telefónico convencional, mientras que, en el resto de las comunidades, principalmente se comunican a través de teléfono celular, a excepción de Unión de Llandia y Boayacu que presentan acceso con vías lastradas, el esto reporta vías asfaltadas. En la infraestructura comunitaria (Fig. 6) Rey del oriente cuenta con los seis servicios encuestados, San Jorge no cuenta con puesto de policía, Simón Bolívar no cuenta con puesto de policía y mercado, Boayacu reporta centro educativo, espacios públicos y mercado, San Vicente dispone de centro de salud, centro educativo y mercado y San Francisco dispone de Centro educativo y espacios públicos.

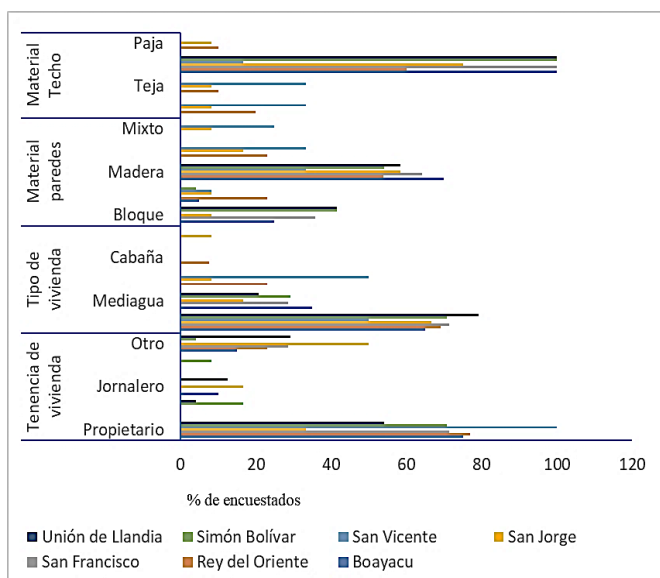


Figura 3 Características de la vivienda del encuestado
Fuente: Autores

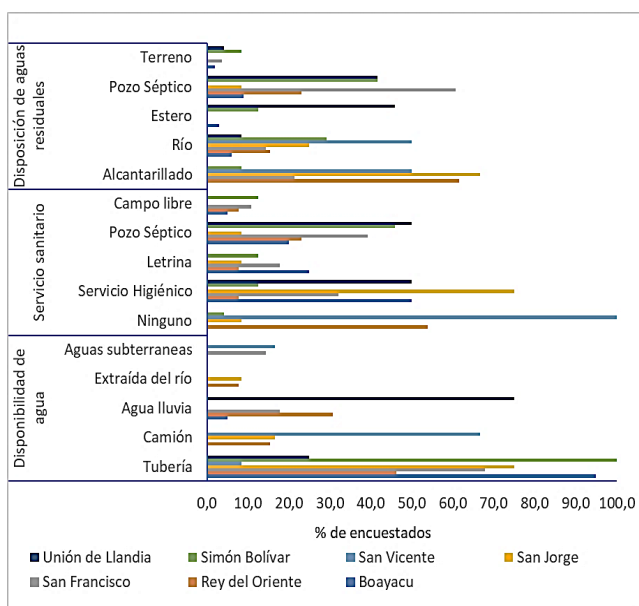


Figura 4 Disponibilidad de agua y disposición de aguas residuales
Fuente: Autores

En la memoria de ventos de desastres o afectaciones (Fig. 7), las inundaciones se encuentran presentes en todas las comunidades, y dentro de los eventos con mayor número de reportes, se registran sismos, deslizamientos y mordeduras de serpiente.

En el número de eventos reportados en la provincia de Pastaza (Fig. 8) observamos que el cantón Pastaza, tiene el mayor número de reportes, seguido por Mera, en el caso del primero muestra una tendencia a incremento en el lapso de los 12 años de reportes. En el caso de los reportes por evento (Fig. 9), Deslizamientos, inundaciones, incendios y vendavales son los eventos más reportados en la provincia.

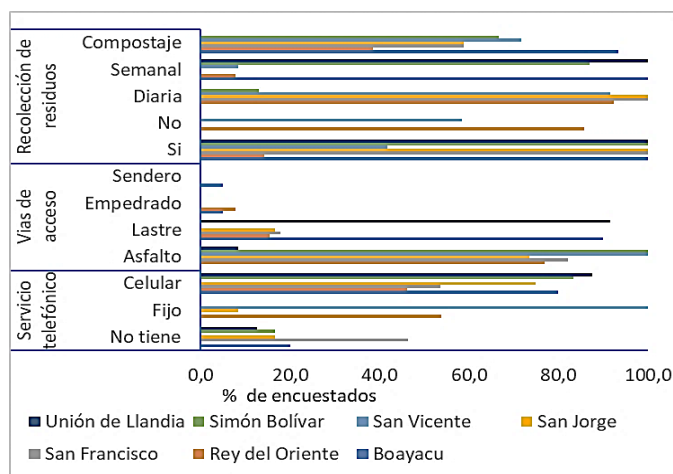


Figura 5 Servicios básicos
Fuente: Autores

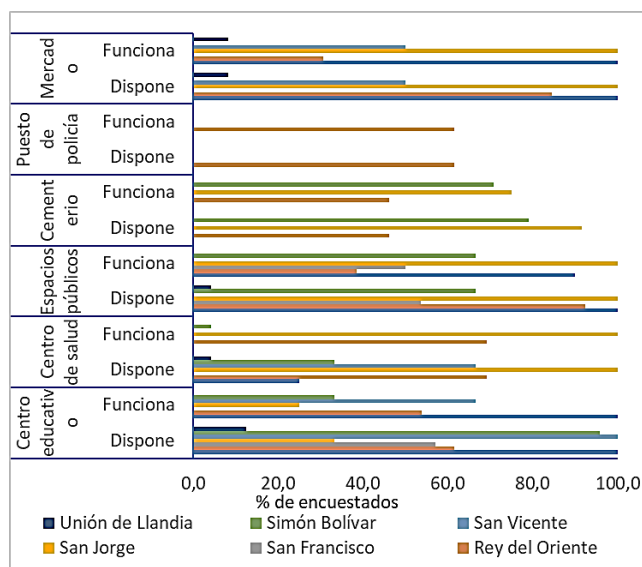


Figura 6. Infraestructura comunitaria
Fuente: Autores

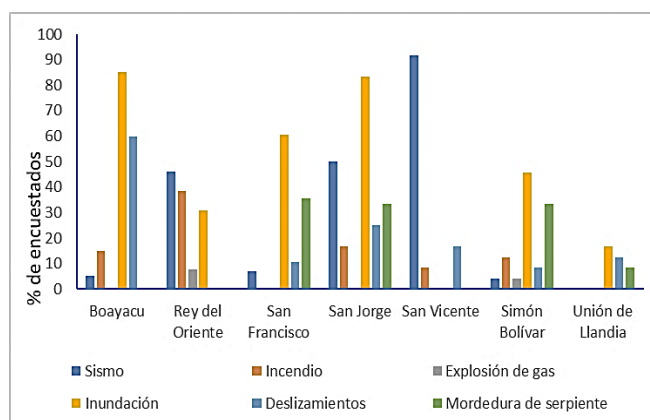


Figura 7. Memoria de eventos
Fuente: Autores

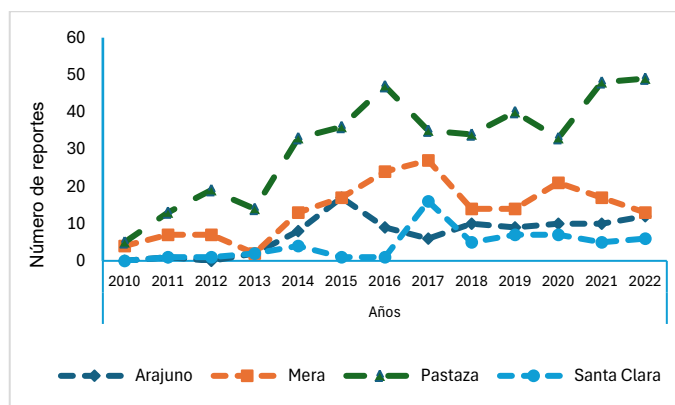


Figura 8. Número de reportes de eventos en base de datos de secretaria nacional de gestión de riesgos en la provincia de Pastaza

Fuente: Adaptado de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, 2022.

En los afectados por eventos hidrometeorológicos, (Tabla 5) los cantones Pastaza y Arajuno son los que reportan mayor número de afectados directos, siendo las inundaciones la causa del mayor número de afectados tanto en personas como en familias también en personas evacuadas, en Mera y Pastaza se reportan fallecidos por Inundaciones, deslizamientos y en Pastaza por socavamiento. En la infraestructura afectada, las inundaciones son las que reportan mayor cantidad de viviendas afectadas en los cuatro cantones, mientras que los deslizamientos tienen una mayor afectación en las vías

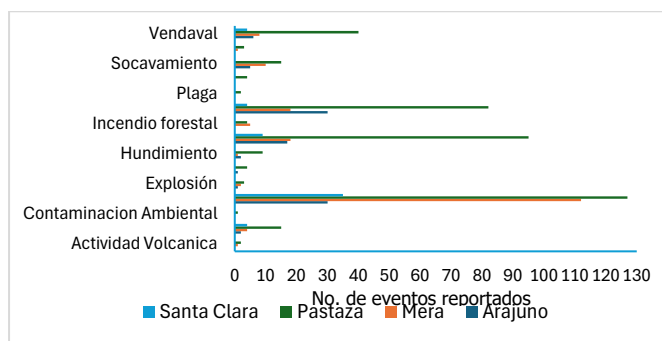


Figura 9. Número de reportes por eventos

Fuente: Adaptado de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, 2022. En la afectación en la actividad agropecuaria (Tabla 4), las inundaciones son las que ocasionaron mayor cantidad de afectaciones en área de cultivo y animales muertos

Tabla 4.

Producción agropecuaria afectada

Cantón	Evento	Ha de cultivo afectadas	Ha. De cobertura vegetal quemada	Animales afectados	Animales muertos
Arajuno	Inundación	388,75			
Mera	Inundación	13,50			24020
	Deslizamiento	14,00			
Pastaza	Inundación	470,25		67	51862
	Vendaval	0,75			
Santa Clara	Inundación	5,00			

Fuente: Adaptado de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, 2022.

Tabla 5.

Personas e infraestructura afectados por eventos hidrometeorológicos

		Fallecidos	Heridos	Desaparecidos	Afectados directos	Evacuados	Familias afectadas	Viviendas afectadas	Viviendas destruidas	Establecimientos educativos afectados	Centros de salud afectados	Puentes afectados	Puentes destruidos	Bienes públicos afectados	Bienes públicos destruidos	Bienes privados afectados	Metros lineales de vías afectadas
Arajuno	Colapso estructural								4			1					
	Inundación				10625	21	2595	380	3	2		2		1			54
	Deslizamiento									1							11649
	Vendaval				38		12	12	2						1		
	Socavamiento																160
Mera	Colapso estructural		1		1	1	1		1			1		3	1		
	Inundación	1	8		1219	24	303	23	2					5			80
	Deslizamiento	2	1		43		11	12		1				2		4	2978
	Vendaval				93		23	19								2	
	Socavamiento											6		1			61
Pastaza	Colapso estructural	2	12	0		9	1	3	1								
	Inundación	2	6	1	17302	839	4189	1114	76	10	1	30		6		4	64
	Deslizamiento	1	2	0	1331	105	331	22	5					4		2	6771
	Vendaval		14	0	1236		460	99	19	5				1	1	3	500
	Socavamiento	1						1				5		1		1	187
Santa Clara	Tormenta eléctrica				21		5	44		1				1			
	Colapso estructural				3146		786	1				1	1	3			10
	Inundación	0			297	0	74	20	1					1			
	Deslizamiento	0			201	0	50	1	1					1			2895
	Vendaval							2								1	1035

Fuente: Adaptado de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, 2022.

Tabla 6.

Persona e infraestructura afectadas por otro tipo de eventos no asociados a fenómenos hidrometeorológicos

Cantón	Evento	Fallecidos	Heridos	Desaparecidos	Afectados directos	Evacuados	Familias afectadas	Viviendas afectadas	Viviendas destruidas	Establecimientos educativos afectados	Centros de salud afectados	Puentes afectados	Bienes públicos afectados	Bienes privados afectados	Bienes privados destruidos	Metros de vía afectados
Araújo	Epidemia				32											
	Explosión		1		1										2	85
	Incendio estructural		4		23	11	3	4	12							
	Hundimiento											1				10
	Incendio estructural	1	2		14	7	3	4	14							
Pastaza	Incendio forestal				6											
	Contaminación ambiental				72											
	Epidemia	1			145		4									
	Explosión		1		3		1	2	1				1			504
	Hundimiento							1	1	1						
Santa Clara	Incendio estructural	6	2		152	14	26	33	67	1				1	12	15
	Plaga				220											
	Sismo				89		10	10		2	1		2			
	Incendio estructural	1			10	4	2	2	6					1		

Fuente: Adaptado de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, 2022.

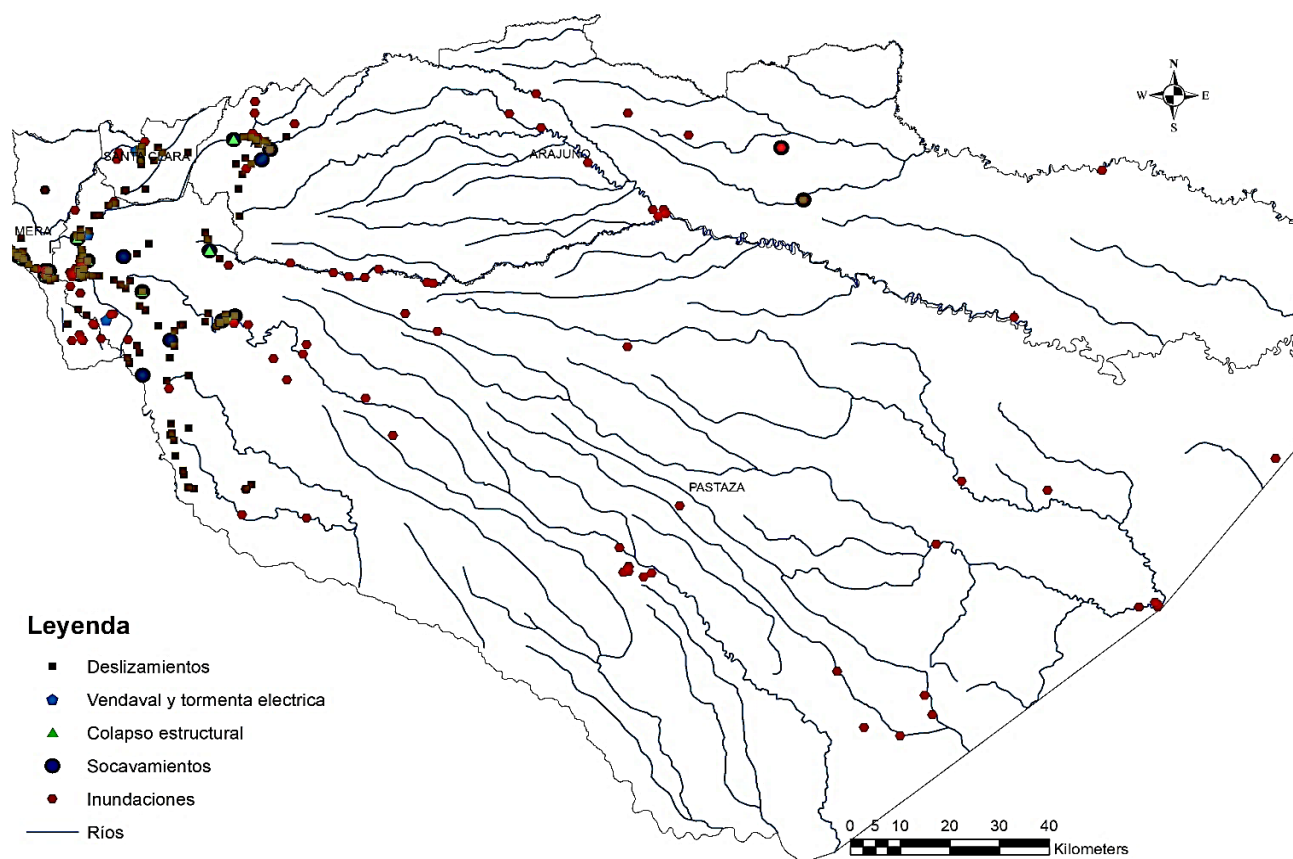


Figura 10. Ubicación geográfica de los eventos registrados

Fuente: Adaptado de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador, 2022.

En cuanto a las personas e infraestructura afectadas por otro tipo de eventos Tabla 6, el cantón Pastaza reporta con mayor número de afectados a epidemia, plaga e incendio estructural, Arajuno reporta a epidemia e incendio estructural, mientras que en Santa Clara lo es el colapso estructural, los incendios estructurales, también son los de mayor número de viviendas afectadas en los cuatro cantones. En los metros de vías afectada son explosiones, hundimientos, incendios y colapsos estructurales, los que generaron afectación en las vías.

Los reportes de la base de datos de la secretaria nacional de gestión de riesgos indican dentro de epidemias la presencia de sarampión y paludismo, mientras que en las plagas reportadas se identifica el “moco del plátano”.

La ubicación geográfica de los eventos registrados (Fig. 10), muestra en las zonas de las cuencas altas de los ríos un mayor reporte de los eventos: deslizamientos, vendavales, colapsos estructurales y socavamiento, mientras que en las cuencas bajas se reportan mayor cantidad de inundaciones.

1 Discusión

El análisis de correspondencia múltiple reportó un coeficiente de Alfa de Cronbach de 0,89, lo cual demuestra una buena consistencia interna de la encuesta [1]

La Organización Panamericana de la Salud, plantea, que la justicia ambiental, la pobreza y falta de gobernanza, aumentan la vulnerabilidad, principalmente en poblaciones de bajos ingresos y en zonas donde existe el riesgo del desarrollo de fenómenos hidrometeorológicos, lo cual queda en evidencia cuando se presentan eventos donde existe la pérdida de vidas, presencia de enfermedades, destrucción de infraestructura, transporte y servicios y afectación del medio natural, también provocando pérdidas del patrimonio económico y productivo, donde las pérdidas a nivel mundial alcanzan entre 250,000 millones y 300,000 millones de dólares americanos al año. [14]. En la región, los diez desastres más importantes registrados ocasionaron el 34 854 muertes del total de víctimas mortales y el 39 200 millones de dólares de las pérdidas económicas. De estos, las crecidas generaron el 59 % de desastres, una mortalidad del 77 % y las pérdidas económicas más cuantiosas (58 %) en el período de 50 años analizado. [15]

Del año 1998 al 2017 a nivel mundial el 82% de desastres están asociados a eventos hidrometeorológicos, como inundaciones, tormentas, temperaturas extremas y sequías, afectando a 4323 millones de personas, causando 562 677 muertes, generando 2 171 000 000 000 de dólares en pérdidas, donde estas se han concentrado en poblaciones de ingresos medios bajos y bajos [16]

Los eventos de naturaleza climática, en especial las inundaciones, son las amenazas más frecuentes en América Latina y el Caribe, teniéndose entre el 2000 a las 2019 548 inundaciones, que afectaron alrededor de 41 millones de personas y generando cerca de 261 mil millones de dólares en pérdidas [17].

En la región, países como Costa Rica, reportan a los eventos hidrometeorológicos con un 78,8 % de los eventos asociados a desastres, teniéndose entre los años 2000 al 2017 el mayor número de muertos y heridos, siendo los eventos de

deslizamientos e inundaciones los de mayor frecuencia [18].

También se han reportado daños asociados a la presencia del fenómeno del Niño, en los años 1982-1983 (3,8 millones de damnificados) en Bolivia, Ecuador y Perú, 1997-1998 (600 muertos y 270 000 damnificados) en Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela, Costa Rica y en 2007-2008 (20 000 viviendas destruidas y 80 000 familias afectadas) En Ecuador, Perú y Bolivia [19].

A nivel de la amazonía ecuatoriana, existen reportes del año 2014 al 2021 en el cantón Gonzalo Pizarro, provincia de Sucumbios, donde los eventos con mayor reporte son deslizamientos (72 reportes), Incendio estructural (23 reportes), Fuertes vientos (14 reportes), socavamiento (13 reportes) e inundaciones (12 reportes) [20].

Al presentar la región de Latinoamérica y el Caribe, una alta incidencia de desastres relacionados con eventos hidrometeorológicos teniendo a Honduras, Haití, Puerto Rico, Dominicana y Nicaragua entre los diez países más afectados por fenómenos climáticos a nivel global, donde dos tercios de los daños causados a las viviendas, están asociados con desastres por eventos hidrometeorológicos, ha promovido que: México, Guatemala, Costa Rica, Jamaica, Colombia, Perú, Bolivia, Argentina, Brasil y Chile adopten la Gestión de Riesgos de desastres dentro de sus políticas públicas de desarrollo sostenible [21]

También en la región la agricultura se ve afectada por desastres asociados a eventos hidrometeorológicos, Las sequías, ondas de calor, inundaciones, huracanes, heladas y granizadas, afectan la disponibilidad de alimentos, lo que genera inestabilidad en los precios de estos, por lo cual considerando los riesgos climáticos la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y Agricultura desarrolló sistemas informáticos como Sistema del Índice de Estrés Agrícola (ASIS), AgroMetShell (AMS), Sistema de Modelos para evaluar los Impactos Agrícolas ante el Cambio Climático (MOSAICC), para mitigar el impacto de los fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos en la producción agrícola [22]

Conclusiones

Los riesgos ambientales asociados a eventos hidrometeorológicos, son los de mayor reporte en las encuestas y en la base de datos de la secretaria nacional de gestión de riesgos, además de ser los que tiene mayor número de personas afectadas y también mayores daños en infraestructura y capital agropecuario.

El presente estudio aporta en la cuantificación de las principales amenazas naturales a las cuales se encuentra expuesta la población y territorios de la provincia de Pastaza

Referencias

- [1] Abril, R., Ruiz, T.E., Alonso, J., Torres, V., & Cabrera, G. Prospección de especies vegetales en la provincia de Pastaza, Ecuador. Cuban Journal of Agricultural Science, 50 (4), pp. 649-671. 2016. Disponible en: <https://scielo.sld.cu/pdf/cjas/v50n4/cjas14416.pdf>
- [2] Rodríguez, J.M. y Morán, J.D. La gestión integral del riesgo hidrometeorológico en México: avances y limitaciones en: Morales, J.C. González, E., Welsh, C.M. y Martínez, O.F. Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas

- socio-ecológicos. AM editores y Clave Editorial México. 2021. pp. 25-39
- [3] Soares, D. y Sandoval, C. Familia, Vulnerabilidad Y Pobreza En Una Comunidad Rural De Yucatán en: Audefroy, J.F. y Padilla, R. Desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018. Pp. 203-227
 - [4] Gobierno autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza GADPPz. "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza 2019-2023", Gobierno autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza, Pastaza, Ecuador. 2020 469 pp.
 - [5] Abril, R., Yanez, Y., Villarroel C., Idrovo I., Caicedo E., Vargas MopM., Tapia A., and Valle M. Influence of land use and geomorphology on the flow of the Pindo river, Ecuador, Journal of Environmental Hydrology, 27 (9). 2019. Available in: <http://www.hydroweb.com/journal-hydrology-2019-paper-9.html>
 - [6] Gobierno Autónomo descentralizado cantonal de Arajuno GADCA. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Arajuno 2019-2023, Gobierno Autónomo descentralizado cantonal de Arajuno 2020.
 - [7] Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos del Ecuador (2022). "Registro de Eventos Peligrosos 2010-2022". Obtenido de: <https://nube.gestionderiesgos.gob.ec/index.php/s/T7szwdk77gsBxz8> O el 20 de Abril del 2023.
 - [8] Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Fátima GADPF. "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Fátima 2015-2019", Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Fátima, Pastaza, Ecuador. 2019 342pp.
 - [9] Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Teniente Hugo Ortiz GADPTHO. "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Teniente Hugo Ortiz 2015-2019". Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Teniente Hugo Ortiz, Pastaza, Ecuador. 2015 172pp.
 - [10] Gobierno Autónomo Descentralizado Cantonal de Santa Clara GADCSC. "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Clara 2015-2019", Gobierno Autónomo Descentralizado Cantonal de Santa Clara, Santa Clara, Ecuador. 2014 352pp.
 - [11] Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos INEC. "Resultados del Censo 2010 del población y vivienda en Ecuador, Fascículo Provincial Pastaza". Instituto nacional de Estadísticas y Censos, Quito, Ecuador. 2010 8 pp.
 - [12] Aguilar-Barojas, S. Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Salud en Tabasco, 11 (1-2), pp.:333-338, 2005. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206>
 - [13] Cuadras, C. M. Nuevos Métodos de Análisis Multivariado. CMC, 2014
 - [14] Olín, L. A., Méndez, J. J., y Adame, S. Acercamiento teórico y conceptual de la vulnerabilidad y los fenómenos hidrometeorológicos. In: Impactos ambientales, gestión de recursos naturales y turismo en el desarrollo regional. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores, Ciudad de México. 2019 Pp. 309-324.
 - [15] Organización meteorológica Mundial OMM. Los desastres de índole meteorológica han aumentado en los últimos 50 años y han causado más daños, pero menos muertes. 2021. Disponible en: <https://wmo.int/es/media/news/los-desastres-de-indole-meteorologica-han-aumentado-en-los-ultimos-50-anos-y-han-causado-mas-danos>
 - [16] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters; Oficina de Naciones Unidas para Riesgo y Desastre. Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017, 2017. Disponible en: <https://www.eird.org/america/docs/perdidas-economicas-pobreza-y-desastres.pdf>
 - [17] OCHA. (2020). Global Humanitarian Overview 2019. OCHA. Available at: <https://www.unocha.org/sites/unocha/files/GHO2019.pdf>
 - [18] Orozco-Montoya, R.A., Brenes-Maykall, A. & Sura-Fonseca, R. Inventario Histórico de Desastres en Costa Rica en el Periodo 1970 2020. Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 6 (1) pp. 66-82. 2022. DOI: <https://doi.org/10.55467/reder.v6i1.85>
 - [19] Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. Informe de evaluación regional sobre el riesgo de desastres en América Latina y el Caribe, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) 2021. 149 pp.
 - [20] Morales, J. Evaluación del peligro, vulnerabilidad y riesgos provocados por vientos fuertes en Gonzalo Pizarro – Ecuador. Ingeniería y sus Alcances, Revista de Investigación septiembre-diciembre, 6 (16). pp. 214-226. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i16.101>
 - [21] Trejo-Rangel, M.A., Ramos-Ribeiro, R.R., Fernández-Lopera, C.C., Mota-Ferreira, A., Esquivel-Gómez, N.N. & Liera-Martínez, C.C., Enfoques Hegemónicos en la Gestión del Riesgo de Desastres Asociados a Eventos Hidrometeorológicos: Análisis del Contexto de Latinoamérica y el Caribe. Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 6 (1). pp. 25-34. 2022. DOI: <https://doi.org/10.55467/reder.v6i1.82>
 - [22] Origel-Gutiérrez G., Sánchez-Martínez O., Oscar Rojas O., Torres-Rodríguez V., Montilla-León G., Martínez-Sánchez J. N., & Blancas-Reza M., Plataforma IXIM para el análisis de multirriesgo agroclimático en: Morales Hernández J.C., González-Sosa E., & Welsh Rodríguez C.M. Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos 1ra ed. México, Clave Editorial 2021, pp 165-178.
- R.V. Abril-Saltos**, recibió su título de Dr en Ciencias Agrícolas en 2016 en la Universidad Agraria de la Habana. Su título de Magister en sistemas de gestión Ambiental en la Universidad de las fuerzas Armadas en el año 2013 y el de Ingeniero Agrónomo en el año 2003 en la Universidad Técnica de Ambato. Profesor titular Universidad Estatal Amazónica, Investigador registrado en el registro nacional de Investigadores, colabora y dirige proyectos en las áreas de ambiente, biodiversidad y agricultura. ORCID: 0000-0003-1544-4360
- B. Y. Chango-Salazar**, recibió su título de Máster Universitario en Sistemas Integrados de Gestión de la Prevención de Riesgos Laborales, la Calidad, el Medio Ambiente y Responsabilidad Social Corporativa en el año 2024 y su título de Ingeniera Ambiental en 2018, Especialista de conservación y restauración World Wildlife Fund Inc. ORCID: 0009-0001-6850-0234
- L.M. Coyago-Miranda**, recibió su título de Master en Ingeniería Ambiental en la Universidad Estatal Amazónica en el año 2022, se tituló de Ingeniería Ambiental en el año 2013 en la Universidad Estatal Amazónica, Analista de proyectos de inversión: Secretaría Técnica de la Circunscripción Territorial Especial Amazónica - STCTEA ORCID: 0009-0005-5996-3009
- L.N. Mina-Yanqui**, recibió su título de Ingeniería Ambiental en el año 2020 en la Universidad Estatal Amazónica, profesional de Medio Ambiente, Salud y Seguridad (EHS) en la empresa ALLKYSA S.A ORCID: 0009-0003-4721-6706
- T.B. Jacome-Vargas** recibió su título de Magister en Administración Pública con mención en Desarrollo Institucional por la Universidad Estatal de Milagro en el año 2025, y el de Ingeniera Ambiental en 2020 por la Universidad Estatal Amazónica. Actualmente se desempeña como Analista de Calidad Ambiental en el Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza. Es además militante activa del Movimiento Semilla, donde colabora y lidera iniciativas en los ámbitos ambiental, social y político, contribuyendo a la articulación de propuestas orientadas al desarrollo sostenible y a la participación ciudadana. ORCID: 0009-0007-4919-3199
- M.B. Coro-Mullo**, recibió su título de Ing Ambiental en 2018 en la Universidad Estatal Amazónica de Pastaza ORCID: 0009-0009-3406-8875



BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA No. 57

Es una edición de 100 ejemplares en papel
y se terminó de imprimir en el mes de junio de 2025
En Todográficas Ltda. Medellín - Colombia

La portada fue impresa en Propalcote C1S 250 g,
las páginas interiores en Bond 90 g.
Las fuentes utilizadas son Times New Roman, Imprint MT Shadow

Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa

John Franklin Cerrón-Sarcco

Aplicación y evaluación de una metodología para la reconversión productiva en comunidades mineras

Oscar Jaime Restrepo-Baena, Alex Manuel Lemus-Madrid, Gustavo Adolfo Viana-Casas, Jhenny Muñoz-Hincapie & Jorge Iván Tobón

Metodología para la exploración de hidrocarburos mediante análisis petrofísico y estratigráfico a partir de registros de pozo en el Valle Medio del Magdalena

Jose Antonio Mahan-Gaviria

Incidencia de los eventos hidrometeorológicos en los riesgos ambientales Provincia de Pastaza

Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Betsy Yessenia Chango-Salazar, Lupe Marina Coyago-Miranda, Teresa Brigitte Jacome-Vargas, Leydi Noemi Mina-Yanqui & María Beatriz Coro-Mullo

Intrusive rocks of San Cristóbal, La Virgen, and Altillo Hills (Lima, Peru): petrogenetic processes and their local implications in the Coastal Batholith

John Franklin Cerrón-Sarcco

Application and evaluation of a methodology for productive reconversion in mining communities

Oscar Jaime Restrepo-Baena, Alex Manuel Lemus-Madrid, Gustavo Adolfo Viana-Casas, Jhenny Muñoz-Hincapie & Jorge Iván Tobón

Methodology for hydrocarbon exploration through petrophysical and stratigraphic analysis of well logs in the Middle Magdalena Valley

Jose Antonio Mahan-Gaviria

Impact of hydrometeorological events on environmental risks in the Pastaza Province

Ricardo Vinicio Abril-Saltos, Betsy Yessenia Chango-Salazar, Lupe Marina Coyago-Miranda, Teresa Brigitte Jacome-Vargas, Leydi Noemi Mina-Yanqui & María Beatriz Coro-Mullo