

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Caracterización geológica y geoquímica del sector minero Bella Rica  
(Ponce Enríquez)

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniería en Geología**

Presentado por:

Pierina Lisbeth Mendoza Arteaga

Melanie Annabela Menoscal Menoscal

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2022

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto en primer lugar a las personas más importantes en mi vida, mis padres Wiston Menoscal González y Jessenia Menoscal Chilán, por todo el apoyo brindado ya que gracias a ellos he logrado todas mis metas. A mis hermanas Mayra, Mabel y Melissa que siempre me han impulsado a soñar en grande. A mi tía Monserrate por estar presente en mi vida como una segunda mamá. A Marcos Choez y a mis sobrinos Amy, Elian y Matthew. A Max. A mis mejores amigas Ana y Lucía. Y a los amigos en Pisa que estuvieron acompañándonos durante el proceso, gracias.

Melanie Menoscal

Este proyecto se lo dedico a mis padres, hermanos y Frida por ayudarme y motivarme día a día para cumplir mis metas. A mi tutor PhD. Maurizio Mulas por su apoyo incondicional durante la carrera. A mi alma máter por formarme con excelencia abriéndome un futuro lleno de oportunidades. Y a mis amigos por hacer más llevadero mi tiempo durante los estudios.

Pierina Mendoza

## AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos a nuestra alma máter que nos ha formado y enriquecido con conocimientos permitiéndonos elaborar este proyecto como beneficio a la exploración e investigación del sector minero del Ecuador. Agradecemos a nuestros padres por su apoyo incondicional. A los profesores y técnicos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral y de la Università di Pisa por brindarnos siempre su ayuda para la elaboración del proyecto. Un agradecimiento especial a nuestro tutor Maurizio Mulas por confiar en nosotras y por motivarnos a lograr nuestros objetivos. A nuestros co-tutores Anna Gioncada, Paolo Fulignati y Nelson Jiménez por los conocimientos ofrecidos. Y a Erwin Larreta, Michelle Villalta y Silvia Fornasaro por todo el apoyo y aprendizaje compartido en la práctica.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Pierina Lisbeth Mendoza Arteaga y Melanie Annabela Menoscal Menoscal damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Pierina Mendoza

Pierina Lisbeth  
Mendoza Arteaga

Melanie Menoscal

Melanie Annabela  
Menoscal Menoscal

# EVALUADORES

.....  
**MSc. Mishelle Muthre**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**PhD. Maurizio Mulas**

PROFESOR TUTOR

.....  
**PhD. Anna Gioncada**

PROFESOR COTUTOR

.....  
**PhD. Paolo Fulignati**

PROFESOR COTUTOR

.....  
**Ing. Nelson Jiménez**

PROFESOR COTUTOR

## RESUMEN

Bella Rica está ubicada en el distrito minero Ponce Enríquez y se caracteriza como un depósito de pórfidos cupríferos, motivo por el cual han incrementado las actividades de minería artesanal legal. Para comprender la presencia de las vetas mineralizadas es importante tener una base de datos actualizada que pueda indicar las asociaciones mineralógicas presentes y su ambiente de formación porque desde los inicios de las actividades, las mineras han basado sus labores en estudios generales realizados hace 20 años. Este proyecto tiene como objetivo caracterizar la petrografía y geoquímica de del sector minero Bella Rica determinando la génesis de las rocas y de las mineralizaciones mediante técnicas de microscopía óptica, SEM, EPMA, ICP-OES, ICP-MS y analizador de mercurio. Para lograr la caracterización se llevó a cabo: petrografía y mineralización mediante observación de láminas delgadas, análisis químico de las rocas con información de elementos mayores y en traza, análisis de los sedimentos mediante estadística de datos y análisis del ambiente de formación mediante geotermómetros con clorita. Se recolectaron 21 muestras en campo que se determinó corresponden a basaltos toleíticos, pero también hay presencia de basaltos andesíticos/andesitas de afinidad calco-alcalina. Los resultados identificaron a Bella Rica como un depósito epi-mesotermal con asociaciones de minerales como pirita, calcopirita, pirrotita, esfalerita, digenita, vetas de cuarzo y calcita. La epidota y clorita encontradas sugieren una alteración propilítica con temperatura de formación del mineral entre 281 y 288 °C. Además, se observan anomalías no naturales de Hg, Mo, Ni, Cu y Zn hacia la zona norte.

**Palabras Clave:** anomalías, análisis geoquímico, análisis petrográfico, minería.

## **ABSTRACT**

*Bella Rica is located at the Ponce Enríquez mining district and is characterized as a porphyry copper deposit, which is why legal artisanal mining activities have increased. To understand the presence of mineralized veins, it is important to have an updated database that indicate the mineralogical associations present and their environment of formation because, since the beginning of the activities, mining companies have based their works on general studies carried out 20 years ago. This project aims to characterize the petrography and geochemistry of Bella Rica mining sector by determining the genesis of rocks and mineralization using optical microscopy techniques, SEM, EPMA, ICP-OES, ICP-MS and mercury analyzer. To achieve the characterization, the following analysis were carried out: petrography and mineralization through the observation of thin sections, chemical analysis of the rocks with the information of mayor and trace elements, analysis of sediments through statistics data and analysis of the environment of formation using chlorite geothermometers. 21 samples were collected in the field where results indicated that most of the samples are toleitic basalts, but there is also the presence of andesitic basalts/andesites of calc-alkaline affinity. The results determined that Bella Rica is an epi-mesothermal deposit with mineral associations such as pyrite, chalcopyrite, pyrrotite, sphalerite, digenite, veins of quartz and calcite. The epidote and chlorite found suggest a propylitic alteration in rocks with a formation temperature between 281 and 288 °C. In addition, unnatural anomalies of Hg, Mo, Ni, Cu and Zn are observed mostly in the north region.*

**Keywords:** *anomalies, geochemical analysis, petrographic analysis, mining.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Antecedentes .....	1
1.2    Descripción del problema .....	2
1.3    Justificación del problema .....	2
1.4    Objetivos .....	3
1.4.1    Objetivo General.....	3
1.4.2    Objetivos Específicos.....	3
1.5    Definiciones Generales .....	4
CAPÍTULO 2.....	12
2.    Área de Estudio .....	12
2.1    Descripción General.....	12
2.1.1    Actividades Productivas.....	13
2.2    Geología Regional.....	14
2.2.1    Unidad Pallatanga (Cretácico) .....	14
2.2.2    Formación Yunguilla (Cretácico Superior, Maastrichtiense) .....	15
2.2.3    Grupo Saraguro (Oligoceno – Mioceno Temprano).....	15
2.2.4    Cuaternario .....	17



2.2.5	Intrusivos .....	17
2.3	Geología Local .....	18
2.4	Marco Estructural .....	19
2.4.1	Fallas transversales .....	19
2.4.2	Fallas longitudinales .....	20
CAPÍTULO 3.....		21
3.	DATOS y MÉTODOS .....	21
3.1	Equipos .....	21
3.2	Metodología.....	25
3.2.1	Fase 1: Recolección de Datos .....	26
3.2.2	Fase 2: Técnicas de Laboratorio.....	30
3.2.3	Fase 3: Generación Modelo de Propuesta .....	39
CAPÍTULO 4.....		40
4.	Resultados.....	40
4.1	Petrografía y Mineralización .....	40
4.1.1	Microscopio petrográfico.....	40
4.1.2	Microscopio electrónico de barrido .....	44
4.2	Química de las rocas.....	47
4.2.1	Elementos mayores .....	47
4.2.2	Elementos en traza .....	49
4.2.3	Mapas de concentración de las rocas.....	54
4.3	Química de clorita y epidota .....	56
4.3.1	Clorita .....	56
4.3.2	Epidota.....	59
4.4	Química de sedimentos.....	60
CAPÍTULO 5.....		63
5.	Discusión .....	63

5.1	Tipología de roca.....	63
5.2	Mineralizaciones y alteraciones.....	64
5.3	Indicadores geotérmicos .....	66
5.4	Anomalías naturales y anomalías no naturales .....	66
CAPÍTULO 6.....		67
6.	Conclusiones Y Recomendaciones .....	67
6.1	Conclusiones.....	67
6.2	Recomendaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....		70
APÉNDICES.....		75

## ABREVIATURAS

CISUP	Center for Instrument Sharing of the University of Pisa
DEM	Digital Elevation Model
DMA-80	Direct Mercury Analyser
EPMA	Electron Probe Microanalyzer
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEG-SEM	Field Emission Gun - Scanning Electron Microscope
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FRX	Fluorescencia de Rayos X
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
LOI	Loss of Ignition
UNIMI	Università degli Studi di Milano
UNIFI	Università di Pisa
UTM	Universal Transverse Mercator

## SIMBOLOGÍA

°C	Grados Celsius
Ag	Plata
As	Arsénico
Au	Oro
Ca	Calcio
Cd	Cadmio
Ce	Cerio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
ESE	Este-Sureste
E-W	Este-Oeste
Fe	Hierro
Hg	Mercurio
Kg	Kilogramos
Km	Kilómetros
L	litros
La	Lantano
m	metros
Ma	Millones de años
Mg	Magnesio
mg	miligramos
Mo	Molibdeno
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NE	Noreste
ng	nanogramos
Ni	Níquel
N-S	Norte-Sur
NW	Noroeste
Pb	Plomo
Po	Polonio

Rb	Rubidio
S	Azufre
Sb	Antimonio
SE	Sureste
SW	Suroeste
Te	Telurio
Th	Torio
U	Uranio
V	Vanadio
WNW	Oeste-Noroeste
Zn	Zinc
µg	microgramos
µm	micrómetros

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa de ubicación del distrito minero Bella Rica. ....	13
Figura 2.2 Mapa geológico del área de estudio. ....	17
Figura 2.3 Mapa estructural en el sector Bella Rica, Ponce Enríquez. ....	20
Figura 3.1 Diagrama de la metodología implementada. ....	25
Figura 3.2 Trabajo de campo en el sector minero Bella Rica. ....	28
Figura 3.3 Labores durante el muestreo de rocas. (a) Etiquetado de las muestras. (b) Toma de coordenadas de las estaciones. ....	28
Figura 3.4 Mapa de ubicación de las muestras recolectadas. ....	30
Figura 3.5 Láminas delgadas elaboradas en laboratorio. ....	31
Figura 3.6 Reposo de las rocas pegadas en la lámina. ....	32
Figura 3.7 Preparación de las secciones delgadas. (a) Reducción del espesor de la sección delgada. (b) Pulido de la sección con abrasivos. ....	32
Figura 3.8 Resultado de microanálisis químico. ....	33
Figura 3.9 Preparación de los polvos. (a) Pulverización con el molino de mandíbulas. (b) Pulverización con el molino de bolas planetarias. ....	35
Figura 3.10 Pulverización de la muestra con las bolas grandes de ágata. ....	35
Figura 3.11 Pulverización de la muestra con las bolas pequeñas de ágata. ....	36
Figura 3.12 Envasado de las muestras de roca pulverizadas. ....	36
Figura 3.13 Proceso de calentado de la disolución de las muestras para análisis químico .....	37
Figura 3.14 Muestras elegidas para el análisis de Hg. ....	38
Figura 3.15 Toma del peso de las muestras. ....	39
Figura 4.1 Inclusiones fluidas en veta de cuarzo (Qz). ....	41
Figura 4.2 Fotografías de las secciones delgadas observadas al microscopio petrográfico con luz transmitida y luz reflejada. (a) y (b) muestra PE-03 con presencia de cuarzo y sulfuros. (c) y (d) muestra PE-06 con presencia de anfíboles y óxidos de hierro. (e) y (f) muestra PE-10 con anfíbol. (g) y (h) muestra PE-12 con plagioclasa. (i) y (j) muestra PE-13C con óxido de hierro. (k) y (l) muestra PE-16 con mineralización de epidotas en veta. (m) y (n) muestra PE-18 con mineralización de cloritas y anfíboles. (o) y (p) muestra PE-19 con veta de calcita, mineralización de cloritas y óxidos. ....	43

Figura 4.3 Imágenes obtenidas del análisis FEG-SEM. (a) PE-03: Cristales de Calcopirita (Ccp) sobre superficie de Epidota (Ep). (b) PE-12: Cristales de Pirrotita (Po) sobre superficie de Digenita (Dg). (c) PE-12: Superficie de Digenita (Dg) con presencia de Titanita (Ttn) y Pirrotita (Po). (d) PE-12: Calcopirita (Ccp) y Calcocita (Cct). (e) PE-11: Digenita (Dg) y Calcopirita (Ccp). (f) PE-13C: Veta de Epidota (Ep) con cristales de Pirita (Py), Esfalerita (Sp) y Pirita Arsenífera (Py Arsenífera). (g) PE-16: Cristales de Pirita (Py) y Cobaltita – Gersdorffite. (h) PE-16: Cristales de Titanita (Ttn) y Cuarzo (Qz). (i) PE-16: Cristales de Pirita (Py) y Esfalerita (Sp). (j) PE-24: Cristal de Oro (Au) sobre base de Pirita (Py) y Calcopirita (Ccp). .....	46
Figura 4.4 Diagrama TAS de clasificación de las muestras según Le Bas et al. (1986). .....	48
Figura 4.5 Diagrama Zr/Ti vs Nb/Y para rocas volcánicas según Pearce (1996). .....	49
Figura 4.6 Diagrama Th (ppm) vs Co (ppm) según Hastie et al. (2007). .....	51
Figura 4.7 Diagrama de REE normalizado a condritas según Nakamura (1974) a partir de muestras pulverizadas. ....	52
Figura 4.8 Diagrama de manto primitivo normalizado al N-MORB según Sun & McDonough (1989) a partir de muestras pulverizadas. ....	53
Figura 4.9 Mapas de concentraciones químicas de elementos en las rocas de Bella Rica: (a) Plata. (b) Cromo. (c) Cobre. (d) Mercurio. ....	54
Figura 4.10 Mapas de concentraciones químicas de elementos en las rocas de Bella Rica: (a) Molibdeno. (b) Níquel. (c) Plomo. (d) Zinc. ....	55
Figura 4.11 Diagrama de clasificación de la Clorita para la muestra PE-07 según Hey (1954). ....	57
Figura 4.12 Diagrama de clasificación de la Clorita para la muestra PE-10 según Hey (1954). ....	58
Figura 4.13 Diagrama de clasificación de la Clorita para la muestra PE-15 según Hey (1954). ....	58
Figura 4.14 Mapas de concentraciones químicas de elementos en Bella Rica: (a) Plata. (b) Cobre. (c) Cromo. (d) Mercurio. ....	61
Figura 4.15 Mapas de concentraciones químicas de elementos en Bella Rica: (a) Molibdeno. (b) Níquel. (c) Plomo. (d) Zinc. ....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de Pendientes.....	12
Tabla 2.2 Coordenadas del área de estudio.....	12
Tabla 3.1 Equipos y sus especificaciones .....	21
Tabla 3.2 Clasificación concentraciones de elementos químicos en sedimentos.....	27
Tabla 3.3 Detalle de las muestras recolectadas en campo. Coordenadas en UTM WGS84 17S .....	28
Tabla 4.1 Descripción de las muestras al microscopio petrográfico con luz transmitida y luz reflejada. ....	40
Tabla 4.2 Minerales de mena, ganga y sulfuros reconocidos al FEG-SEM.....	44
Tabla 4.3 Composición (%) de elementos mayores de la roca total mediante análisis ICP- OES.....	47
Tabla 4.4 Análisis geoquímico de los elementos en traza (ppm) de las muestras pulverizadas por medio de ICP-MS y analizador de Hg. ....	49
Tabla 4.5. Resultados del EPMA para las muestras PE-15, PE-10 y PE-07, obtención de la temperatura de la Clorita con 4 diferentes geotermómetros. ....	56
Tabla 4.6 Resultados obtenidos del EPMA para la Epidota y recálculo de la fórmula estructural.....	59



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Desde la era pre-Hispánica, Ecuador se ha sustentado económicamente mediante las actividades mineras, en especial por la extracción de oro. Durante los años 80, se iniciaron las explotaciones en el sur del Ecuador durante la denominada “fiebre del oro”. El distrito minero de Camilo Ponce Enríquez (Azuay) fue uno de los objetivos de los mineros e inversionistas y, hasta la actualidad, sigue siendo uno de los mayores productores de oro y cobre. Hoy en día, la minería es una actividad económica reconocida que puede presentarse como minería a gran escala, minería a mediana escala, minería a pequeña escala y minería artesanal (Alegria, 2014).

Los primeros trabajos realizados sobre el sector se enfocaron en el estudio de mineralizaciones y de la geología de la Cordillera Occidental debido a los diferentes depósitos minerales encontrados a lo largo de la región. En 1994, la Misión Belga y el Instituto Ecuatoriano de Minería (INEMIN) realizaron una investigación geológico-minera interesados en el potencial minero de Ponce Enríquez. Mas adelante PRODEMINCA (1998) con apoyo de Swedish Environmental Systems, analizaron la composición de las aguas superficiales para un estudio ambiental y de calidad de las aguas debido a las actividades mineras desarrolladas en la región. Para el año 2000, el Ministerio de Energía y Minas publicó la “Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador” enfocándose con más detalle en la caracterización estratigráfica, estructural y mineralógica de Camilo Ponce Enríquez. Esta nueva información incentivó a Kerr et al. (2002) a realizar un estudio geoquímico y tectónico de los terrenos oceánicos acrecionados en la Cordillera Occidental identificando yacimientos minerales de interés económico.

En la actualidad, el cantón Camilo Ponce Enríquez es uno de los mayores generadores de empleo en el país debido a sus actividades mineras. La

minería de metales y no metales se realiza en el sector conocido como Bella Rica la cual en 1983 fue fundada como 'Cooperativa Minera Bella Rica' especializada principalmente en la minería de oro. Esta cooperativa debe su eficiente actividad minera a la gran concentración de bocaminas que se encuentran en actividad. Se reconocen en funcionamiento 28 operadores mineros que guían sus actividades a la exploración y extracción de minerales a partir de las vetas presentes en la región (Cooperativa Minera Bella Rica, 2015).

## **1.2 Descripción del problema**

En las últimas décadas, en el sector minero aurífero de Bella Rica ubicado en el cantón Camilo Ponce Enríquez (Azuay), las actividades de minería artesanal legal han incrementado debido al hallazgo de vetas mineralizadas en las principales estructuras de la región. Las labores realizadas por las pequeñas y medianas mineras se basan en estudios generales de la región elaborados hace más de 20 años, por lo tanto, no brindan suficiente información acerca del entorno geológico y mineralógico que les permita conocer sobre los minerales y vetas recientemente hallados en el sector.

Debido a la gran demanda en el sector minero, las actividades se han ido expandiendo a lo largo de la región siguiendo las vetas ya exploradas y debido a la escasez de información, se han deforestado innecesariamente hectáreas de bosque sin resultado alguno, trayendo consigo consecuencias de impacto ambiental a la población de Bella Rica como la contaminación de recursos naturales y la variación en la morfología del sector motivo por el cual en los últimos años se han incrementado los casos de desprendimientos de suelo.

## **1.3 Justificación del problema**

La extracción de metales y no metales en el sector minero de Bella Rica se da en las principales vetas y mineralizaciones presentes a lo largo de la región. Para poder comprender la presencia de las vetas mineralizadas en el sector, es importante tener una base de datos con información sobre la geología que indique la génesis de las rocas y el ambiente de formación de

los minerales ya que, con esto, se puede aportar a la discriminación de los metales y/o metaloides de origen natural en el sector de estudio.

Hasta el momento, Bella Rica cuenta con estudios geológicos y de caracterización de sus depósitos minerales, sin embargo, estudios detallados de petrografía y de geoquímica de las rocas y/o minerales, aportarían significativamente a la exploración de yacimientos y a la investigación del sector minero del Ecuador.

Además, con la identificación de las asociaciones mineralógicas y su distribución se lograría establecer sectores para la recuperación de los metales de interés lo cual conllevaría a una reducción del impacto ambiental generado por la extracción de los metales sin un conocimiento previo de la zona. Esta información favorecería a las labores realizadas por la Concesión Minera Bella Rica de forma que puedan establecer medidas de protección a los recursos hídricos y proponer un mejor manejo ambiental, generando empleos e ingresos económicos a los habitantes de la región.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Caracterizar la petrografía y la geoquímica en el sector minero Bella Rica determinando la génesis de las rocas y de las mineralizaciones mediante técnicas de microscopía óptica, SEM, EPMA, ICP-MS, ICP-OES y analizador de mercurio.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Definir las asociaciones mineralógicas mediante microscopía óptica de láminas petrográficas para caracterizar los cuerpos mineralizados.
- ✓ Determinar las concentraciones en metales y no metales de las rocas mediante técnicas geoquímicas.
- ✓ Especificar la ubicación de las anomalías químicas de diferentes elementos mediante análisis de distribución espacial.

## 1.5 Definiciones Generales

*Fluidos hidrotermales.* – Son soluciones naturales de agua calentada donde se da la disolución de varios elementos, compuestos y gases. Son generados por diferentes procesos geológicos de la corteza y el manto como la interacción de fluidos de la cuenca, diferenciación magmática y la desgasificación del manto (Sharma & Srivastava, 2014). Este fluido atraviesa la roca suprayacente y en algunos casos logra alcanzar la atmósfera o la hidrosfera (Ridley, 2013).

*Inclusiones fluidas.* – Se las conoce como burbujas microscópicas (de tamaño de micrómetro a nanómetro) atrapadas en los minerales como pequeños sistemas geotermobáricos y geoquímicos, que a su vez representan el régimen del fluido que intervino durante la formación y evolución del mineral (Sharma & Srivastava, 2014), desde altas temperaturas a profundidad hasta bajas temperaturas cerca de la superficie. Estas inclusiones son gases, líquidos o cristales, atrapados de forma singular (una fase) o como una mezcla heterogénea de más de una fase (multifase) en una sola cavidad. Dependiendo del tiempo de entrapamiento de los líquidos en los cristales, las inclusiones fluidas se clasifican como primaria, secundaria o pseudosecundaria (Randive et al., 2014).

*Alteración propilítica.* – Se denomina a la alteración de los minerales por la circulación convectiva de agua meteórica o por fluidos de origen magmáticos que contribuyen al reensamblaje mineral. La alteración se divide en subzonas que son: actinolita-epidota-clorita, epidota-clorita y clorita reemplazando a minerales de composición máfica. Los minerales que se encuentran en este tipo de alteración son: epidota, clorita, cuarzo, pirita, carbonates de Mg-Fe-Ca, feldespatos, albita, biotita y anfíboles. Es común encontrar vetas y brechas rellenando las fracturas (Neal et al., 2018).

Se desarrolla generalmente alrededor de depósitos porfídicos y se pueden extender varios kilómetros de los depósitos con una intensidad de desarrollo progresivamente decreciente lejos del cuerpo mineralizado (Ridley, 2013).

*Stockwork.* – Es un sistema de vetas complejas que se encuentran ramificadas y con orientación aleatoria. La mineralización de este tipo se ve influenciado por un proceso magmático de ebullición retrógrada en el que la presión genera fracturas en la roca de caja permitiendo el ascenso de soluciones hidrotermales que depositan su carga metálica rellenando los espacios fracturados. Por lo general estas vetas están constituidas por oro y sulfuros que son de gran interés para la minería económica (Begbie & Craw, 2006).

*Veta mineralizada.* – Las vetas en un ámbito estructural son fisuras de roca rellenas por mineral. En otras palabras, las vetas mineralizadas son depósitos minerales que se forman cuando una fractura o fisura en la roca caja es llenada por nuevo material mineral. Las vetas pueden tener un origen epigenético al formarse después de la litificación de la roca caja, o singenético, al formarse al mismo tiempo que la roca caja (Haynes, 1993).

Presenta una forma tubular y su composición es diferente al de las rocas alrededor. Generalmente se forman a partir de la roca fundida por medio de la separación de los minerales de sustancias que favorecen el estado líquido como el agua, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido borácico, etc. Posteriormente, son llevadas a un punto de enfriamiento donde se solidifican (Michaud, 2016).

*Depósito epi-mesotermal.* – Es un depósito formado por eventos sucesivos donde se superpone, generalmente, los rasgos epitermales de los mesotermales. Presentan características típicas de depósitos epitermales someros a temperaturas deposicionales  $>300^{\circ}\text{C}$  y profundidades de formación  $>1$  Km. Comprende skarns, “stockworks” exógenos y reemplazamientos, brechas hidrotermales y sistemas de vetas (PRODEMİNCA, 2000).

*Elementos mayores.* – Son los elementos que conforman proporciones significativas de los sitios en las fases consideradas. Para comprender la distribución de los elementos mayores se hace uso de diagramas de fase

durante la cristalización fraccionaria los cuales pueden ayudar a comprender el proceso de la fusión parcial, obtener información cuantitativa, y relacionar los diagramas de fase entre sí. A diferencia de los elementos traza, estos tienen un rango definido de abundancia en un líquido para un coeficiente de distribución de la reacción de intercambio ( $K_d$ ), el cual indica la relación de dos diferentes elementos en la misma fase, dado por la estequiometría de los minerales presentes en el sistema (Hanson & Langmuir, 1978).

En la composición de los elementos mayores, los volcánicos de arco de isla no difieren mucho de otras rocas volcánicas. Comparadas con el MORB, la diferencia principal es simplemente que la composición silícea es mucho más común entre los volcánicos de arco de isla. Por otro lado, las series magmáticas difieren en el contenido de Fe y Fe/Mg, la serie toleítica presenta mayor contenido de Fe y Fe/Mg, y menor contenido de K a diferencia que la calco-alcalina.

*Elementos en traza.* – Son los elementos que siguen la ley de Henry (Hanson & Langmuir, 1978). Para sistemas ígneos y metamórfico, el término se define como aquellos elementos que no son constituyentes estequiométricos de fases en el sistema de interés, en otras palabras, son aquellos “elementos mayores” que aparecen de repente como constituyente de fases.

Se clasifican en: atmófilo, litófilo, siderófilo y calcófilo. Los elementos atmófilos son generalmente volátiles y se concentran en la atmósfera e hidrósfera, en la tabla periódica se identifican como gases nobles. Los elementos litófilos son aquellos que muestran una afinidad a fases silicatadas y se concentran en la parte silicatada de la tierra, ocurren generalmente al final de la tabla periódica. Los elementos siderófilos tienen afinidad a fases líquidas metálicas, se encuentran en poca cantidad en la porción silicatada de la tierra y concentrados en el núcleo, en la tabla periódica suelen ser los elementos del grupo 8, 9 y 10, y sus vecinos. Por último, los elementos calcófilos tienen una afinidad a la fase líquida de sulfuro y se encuentran empobrecidas en la tierra silicatada, y podrían concentrarse en el núcleo al igual que los elementos

siderófilos, en la tabla periódica son principalmente los elementos del grupo 11, 12 y 13-16 (White, 2020).

*Valor de fondo (Background).* – El valor de fondo en un contexto geoquímico se refiere al valor natural para un medio dado que no está afectado por actividades antropogénicas (Gough, 1993). Por otro lado, según los geoquímicos de exploración, el background es la concentración de elementos no anómalos (Plumlee, 1999), lo cual coincide con la definición dada por Bates y Jackson en 1984, esta indica que el background representa la concentración normal de un elemento dado en un material bajo investigación, como una roca, suelo, plantas y agua, lo que brinda un nivel de referencia para concentraciones de elementos anómalos en un depósito mineral.

*Desviación estándar.* – Es la raíz cuadrada de la varianza de una población o de una variable aleatoria que la representa (Espejo, 2017). Este valor se usa para determinar un intervalo de confianza o límite de dispersión (Cervantes, 2008).

Según Abraira (2002) la desviación estándar es una medida de la dispersión de los datos, si la desviación estándar es mayor quiere decir que la dispersión es alta, y si no hubiera ninguna variación en los datos la desviación estándar sería cero.

*Mediana.* – Es el valor medio de una serie cuando los valores se ordenan de menor a mayor. En otras palabras, es la división de la serie total de tal forma que el 50% de los valores son menores al valor medio y el otro 50% son valores mayores. Este valor no depende de la magnitud de los valores de las colas de la distribución. Si el número de datos es impar, el valor coincide con el valor central, y cuando es par, el valor se encuentra entre los dos valores centrales (Alperin, 2013).

*Anomalía geoquímica.* – Una anomalía geoquímica se distingue mediante técnicas geoquímicas por ser diferente al entorno general y generalmente tiene un valor económico. La determinación de anomalías geoquímicas es un

campo de investigación muy importante en la exploración de recursos naturales (Chen et al., 2018).

Los depósitos minerales pueden ser considerados como anomalías geoquímicas y su detección, así como su impacto con el ambiente, debe ser evaluado con técnicas geoquímicas (Kyser et al., 2015).

Para determinar las anomalías y variaciones espaciales en un sistema de información geográfico generalmente se utiliza el método de kriging y ponderación de distancia inversa con lo que se crea contornos y superficies (Chen et al., 2018).

*Umbral (Threshold).* – En el contexto de geoquímica de exploración, un umbral es un valor o característica que separa muestras o áreas anómalas del fondo o background. El valor de fondo se utiliza para separar los datos en subpoblaciones que aparecen por diferentes causas o en respuesta a diferentes procesos (Sinclair, 1991).

El umbral se puede obtener por tres diferentes técnicas: experiencial, objetivo basado en modelos y subjetivo basado en modelos. Este último aplica modelos matemáticos o estadísticos al conjunto de valores geoquímicos, el más común es seleccionar la media más dos desviaciones estándar ya que es sencillo de utilizar cuando no hay evidencia de procesos de mineralización (Sinclair, 1991).

*Microscopio Petrográfico.* – La petrografía es la disciplina de la geología que se encarga de la descripción y clasificación de las rocas. Este método implica el uso del microscopio petrográfico de polarización con la finalidad de determinar los minerales, interpretar y describir las relaciones entre los cristales que forman la roca (Castro, 2015).

Para observar las propiedades ópticas de los diferentes minerales y componentes de la roca se utiliza un polarizador o nícol que permite obtener luz polarizada. Las ondas en este tipo de luz vibran en paralelo en un mismo



plano que se forma por la trayectoria de la luz y la dirección de vibración. Cuando se interpone un segundo filtro polarizador (analizador) y las direcciones de los planos de vibración de ambos coinciden (nícoles paralelos), el haz de luz puede atravesar el analizador. Cuando los planos de vibración de los dos filtros están perpendiculares, las ondas no atraviesas los filtros y a esto se lo denomina “nícoles cruzados” (Acero Salazar et al., 2013).

Cuando se interpone una lámina mineral fina entre ambos filtros polarizadores perpendiculares, la luz podrá atravesar y causará fenómenos de interferencia entre las ondas polarizadas que la atraviesan. Debido a esto, el observador podrá observar luz y color ya que algunas ondas que atraviesan los minerales de la lámina estarán alineadas con la dirección del analizador (Acero Salazar et al., 2013).

*Analizador de Mercurio (DMA-80).* – El principio del analizador directo de mercurio se basa en la descomposición termal, amalgamación y absorción atómica.

Primero el equipo calienta las muestras a 750°C - 800°C, provocando que los materiales orgánicos se descompongan y que el mercurio se vaporice como gas con oxígeno. Este gas lleva el mercurio vaporizado al amalgamador donde se deposita en una lámina molecular de oro. El mercurio luego es expulsado durante el calentamiento del amalgamador y transportado al espectrómetro, este utiliza una lampara de vapor de mercurio como fuente de luz. La luz de la lámpara primero se dirige por un filtro de excitación y luego irradia el mercurio vaporizado contenido en una cubeta de cuarzo (Billets, 2004).

El resultado que muestra el equipo depende de la masa calculada desde un inicio en la balanza y refleja el contenido de mercurio en  $\mu g/kg$ , nanogramos (ng), absorbancia ( $A$ ) y el Peso ( $g$ ) de la muestra el cuál se ingresó manualmente en el equipo (Billets, 2004).

*FEG-SEM.* – Como fuente utiliza electrones de emisión de campo (FEG) y se basa en un gradiente potencial para permitir los haces de electrones. El FEG presenta un solo filamento de tungsteno con una punta afilada como fuente de electrones, debido a esta característica es posible la formación de una pequeña onda de electrones, llegando hasta 0,5 nm, dando así una imagen de mejor resolución que incluso el SEM.

Cuando el haz de electrones impacta con la muestra se producen electrones secundarios (SE), electrones retrodispersados y raros X característicos, que luego son detectados con los respectivos detectores para luego ser mostrados en el monitor (Abd Mutalib et al., 2017).

*ICP-MS.* – Es una técnica analítica multielemental que se utiliza para determinar más de 60 elementos en una gran variedad de matrices.

Está conformado por un plasma, un analizador de masa y el detector. La muestra se ingresa en estado líquido y es transportada por la bomba peristáltica hasta el nebulizador y la cámara de nebulización donde se transforma en aerosol para luego entrar en el plasma. El plasma puede llegar hasta 10.000 K lo que permite que se disocien compuestos y se ionicen los átomos. El analizador de masas separa los iones, filtra las masas y trasmite de forma selectiva los iones según su relación masa/carga, los cuales llegan después al detector. Este último también se lo denomina “multiplicador de electrones” ya que cuando los iones impactan generan una cadena de electrones. Lo que se mide es el número de iones que llegan al detector el cual es proporcional a la concentración de ese isótopo en la solución original.

*EPMA.* – Este equipo utiliza una combinación de las capacidades del microscopio electrónico de barrido (SEM) y un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (FRX), además de un enfoque de punto fino, imágenes de microscopio óptico y posicionamiento de muestras automatizado. Desde sus inicios, el EPMA se ha utilizado para analizar ubicaciones puntuales cuantitativamente como para ubicar el mineral huésped del elemento valioso o para comprobar la homogeneidad, la pureza o la abundancia de elementos

traza de una fase o fases químicas concretas. Actualmente se puede obtener la concentración elemental absoluta y la distribución espacial de la concentración elemental (Pownceby et al., 2007).

# CAPÍTULO 2

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Descripción General

La Cooperativa Bella Rica se encuentra en el cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia de Azuay al sur del Ecuador, y se ubica en el flanco oeste de la Cordillera Occidental. El sector de Bella Rica presenta una topografía con elevaciones que van desde los 1400 msnm hasta los 60 msnm de las planicies costeras. Sus pendientes se caracterizan por ir de moderada a abruptas (Tabla 2.1) siendo esta una de las principales causas de los deslizamientos en la época lluviosa. Se encuentra situada en dos cuencas hidrográficas: la cuenca del Río Siete hacia el Sur y la cuenca del Río Guanache en el Norte. El Río Siete presenta una escorrentía en dirección E-W que desemboca en el Océano Pacífico.

**Tabla 2.1 Clasificación de Pendientes**

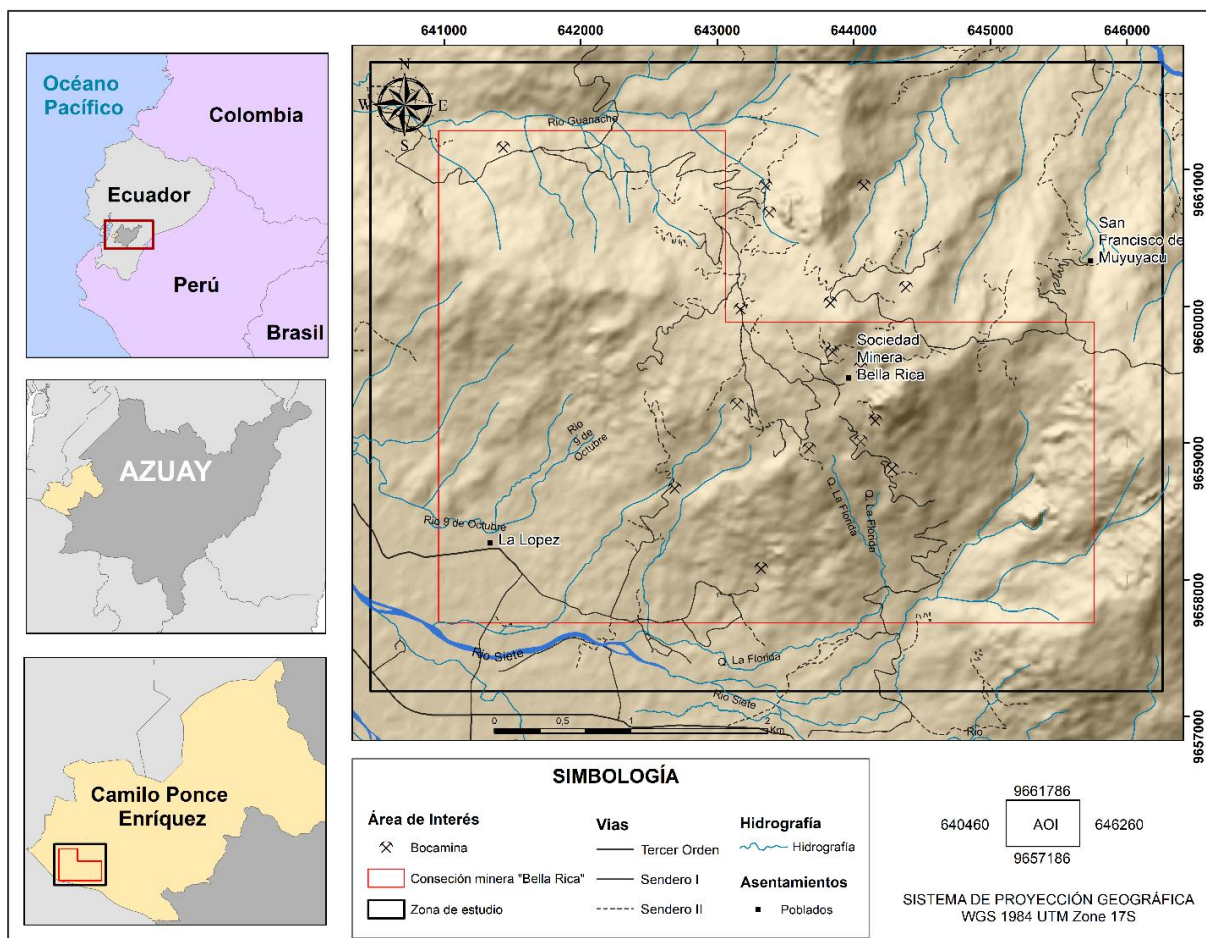
CLASE	PENDIENTE (%)	DESCRIPCIÓN
I	< 2	Pendiente débil, terreno casi plano
II	3 – 7	Pendiente de inclinación regular
III	8 – 15	Pendiente irregular, relieve inclinado
IV	16 –30	Pendiente moderada, colinada
V	31 - 70	Pendiente fuerte, terreno escarpado
VI	> 70	Pendiente abrupta, relieve montañoso

Fuente: Van Zuidam (1986)

El área de estudio está localizada dentro de las siguientes coordenadas UTM-WGS 1984 (Tabla 2.2) (Figura 2.1):

**Tabla 2.2 Coordenadas del área de estudio**

PUNTO	LATITUD	LONGITUD
1	9661786	640460
2	9661786	646260
3	9657186	646260
4	9657186	640460



**Figura 2.1 Mapa de ubicación del distrito minero Bella Rica.**

### 2.1.1 Actividades Productivas

Según el último censo poblacional elaborado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2010), el cantón Camilo Ponce Enríquez cuenta con un total de 21.998 pobladores, de los cuales un 3,6% son hombres y 2,6% mujeres.

Las actividades principales del cantón son la explotación minera y de canteras con un porcentaje de 42,60%, agricultura y ganadería con un 30,20%, comercio al por mayor y menor 4,20%, construcción 3,70% y el restante 19,30% se dedica a actividades de alojamiento, transporte y almacenamiento (Dirección de Planificación Urbana y Rural, 2019).

La intensa actividad minera se desarrolló como trabajo alternativo de la agricultura y ganadería entre 1982 y 1983, esto debido los efectos que dejó

el fenómeno del Niño durante estos años. Casi al finalizar el fenómeno, los pobladores hallaron en las quebradas y ríos la presencia de oro lo que los motivó a iniciar las actividades para poder subsistir. Se enfocaron en el río Guanache y Quebrada la Florida hasta que descubrieron vetas mineralizadas en el cerro Bella Rica, donde posteriormente se asentó el distrito minero (Sánchez, A, s. f.).

## **2.2 Geología Regional**

Bella Rica pertenece al sector minero de Camilo Ponce Enríquez que comprende los terrenos de la Unidad Pallatanga, Unidad Yunguilla y del Grupo Saraguro (Figura 2.2) presente en la Cordillera Occidental. Durante el Cenozoico, el magmatismo de composición calco-alcalina y la sedimentación, provenientes de los terrenos Pre-Cretácicos (Loja, Alao, Chaucha y Pallatanga) dominaron la extensa zona en donde, actualmente, sus productos se presentan en la mayoría de los afloramientos (PRODEMINTA, 2000).

Los mapas geológicos de Azuay y de la Cordillera Occidental del Ecuador propuestos por el Programa de Información Cartográfica y Geológica (PRODEMINTA) en el año 2000, Pratt et al. (1997) y Egüez et al. (2017), detallan las características de las unidades descritas a continuación.

### **2.2.1 Unidad Pallatanga (Cretácico)**

Esta unidad con edad entre 145 – 66 Ma corresponde a una asociación ofiolítica y está comprendida por una secuencia de basaltos oceánicos almohadillados, pillow lavas, hialoclastitas y doleritas masivas. En su mayoría, los basaltos y doleritas encontradas presentan textura afanítica. El material encontrado presenta características geoquímicas de terrenos oceánicos ígneos acrecionados que incluyen material calco-alcalino, secuencia de arco de islas y material de plateau oceánico similar a las rocas del Plateau Caribe en Colombia (Kerr et al., 2002).

Se observa intrusión de cuerpos granodioríticos a lo largo de la Unidad y en las lavas basálticas se ha observado presencia de alteración

hidrotermal. Es posible observar afloramientos al norte a lo largo de la carretera Ibarra – San Lorenzo, hacia el sur del valle del río Jubones y principalmente al este de la Cordillera Occidental. A estas rocas se superponen los depósitos volcanoclásticos del Grupo Saraguro de forma discordante (Pratt et al., 1997).

### **2.2.2 Formación Yunguilla (Cretácico Superior, Maastrichtiense)**

Esta formación corresponde a una secuencia de abanico turbidítico constituido por limolitas, areniscas de tipo cuarzo feldespáticas y cuarzoarenitas (Duque, 2000). Según Thalmann (1946), esta formación presenta una potencia mayor a 1000 metros. Estudios han determinado según la presencia de fósiles que esta formación tiene una edad de aproximadamente 72,1 Ma (Vallejo, 2007).

### **2.2.3 Grupo Saraguro (Oligoceno – Mioceno Temprano)**

Este grupo se encuentra en gran parte del distrito Azuay con una potencia de alrededor de 3 km constituida de tobas. Lo conforman en su mayoría ignimbritas, pero también hay presencia de lavas con rocas sedimentarias. Estudios realizados por Pratt et al. (1997), indican 3 diferentes composiciones de ignimbritas en la región: andesíticas verdosas rica en plagioclasas, dacíticas ricas en feldespatos y lapilli pomíceos, y riolíticas blancas con textura vitro-clástica.

El Grupo Saraguro se presenta indiferenciado, sin embargo, PRODEMINTA (2000) dividió al grupo en 2 secuencias: secuencia inferior (Unidad Portovelo y Fm. Las Trancas), en donde predomina la composición andesítica-dacítica, y la secuencia superior (Fm. Plancharumi, Fm. La Fortuna, Fm. Jubones y Fm. La Paz), constituida por ignimbritas riolíticas.

- La Unidad Portovelo, de edad Oligoceno (33,9 – 23,03 Ma) está comprendida por lavas andesíticas, basálticas e ignimbritas andesíticas. Por lo general, se encuentran al norte de la Falla Piñas-

Portovelo. Se ha observado alteración propilítica asociada al ambiente de depositación.

- La formación Las Trancas, de edad Oligoceno (33,9 – 23,03 Ma) y está comprendida por ignimbritas de composición andesíticas-dacíticas, conglomerados, argilitas, y areniscas ricas en cuarzo, feldespatos y muscovita. Se localiza al suroccidente de Bella Rica y yace sobre la Unidad Pallatanga.
- La formación Plancharumi, del Oligoceno (33,9 – 23,03 Ma), está constituida por ignimbritas riolíticas estratificadas, brechas riolíticas y lavas con intercalaciones de cenizas, areniscas y argilitas. Se encuentra sobreyacida por la Fm. Jubones.
- La formación La Fortuna, del Mioceno Temprano (aproximadamente 13,82 – 5,33 Ma), se encuentra al norte de la falla Jubones y está comprendida por ignimbritas con bajo contenido en cristales. Tiene un espesor máximo de 600 metros, y el punto de emisión parece común a lo de la Fm. Jubones.
- La formación Jubones, de edad Mioceno Temprano (aproximadamente 13,82 – 5,33 Ma) y se encuentra al tope del Grupo Saraguro. Corresponde a ignimbritas ricas en cristales de cuarzo, biotita y plagioclasas. Se ha identificado un espesor de alrededor de 500 metros encontrándose espesores de mayor longitud cercanos a Pachagmama y el Río Minas.
- La formación La Paz, de edad Mioceno Temprano (aproximadamente 13,82 – 5,33 Ma) y corresponde a ignimbritas ricas en plagioclasas con presencia de cristales de cuarzo. Se la encuentra encima de la Fm. Jubones, en su mayor parte presenta un ambiente de deposición continental, pero en la parte basal los niveles de deposición turbidíticos sugieren un ambiente marino.



## 2.2.4 Cuaternario

Debido a su morfología, los rellenos cuaternarios son comunes en los valles en depósitos de tipo coluviales y aluviales por donde drenan los principales canales, y en las zonas menos elevadas cercanas a la llanura costera.

## 2.2.5 Intrusivos

Se observan gabros y microgabros con textura variolítica en la Unidad Pallatanga. En el Grupo Saraguro se suele encontrar stocks subvolcánicos de riolita afírica y andesita porfirítica concentrados en la caldera Jubones y a lo largo del Cinturón Gañarín. Las cuarzdioritas y granodioritas/tonalitas se encuentran distribuidas intruyendo la secuencia inferior del Grupo Saraguro (Unidad Portovelo y Fm. Las Trancas) (Egüez et al., 2017).

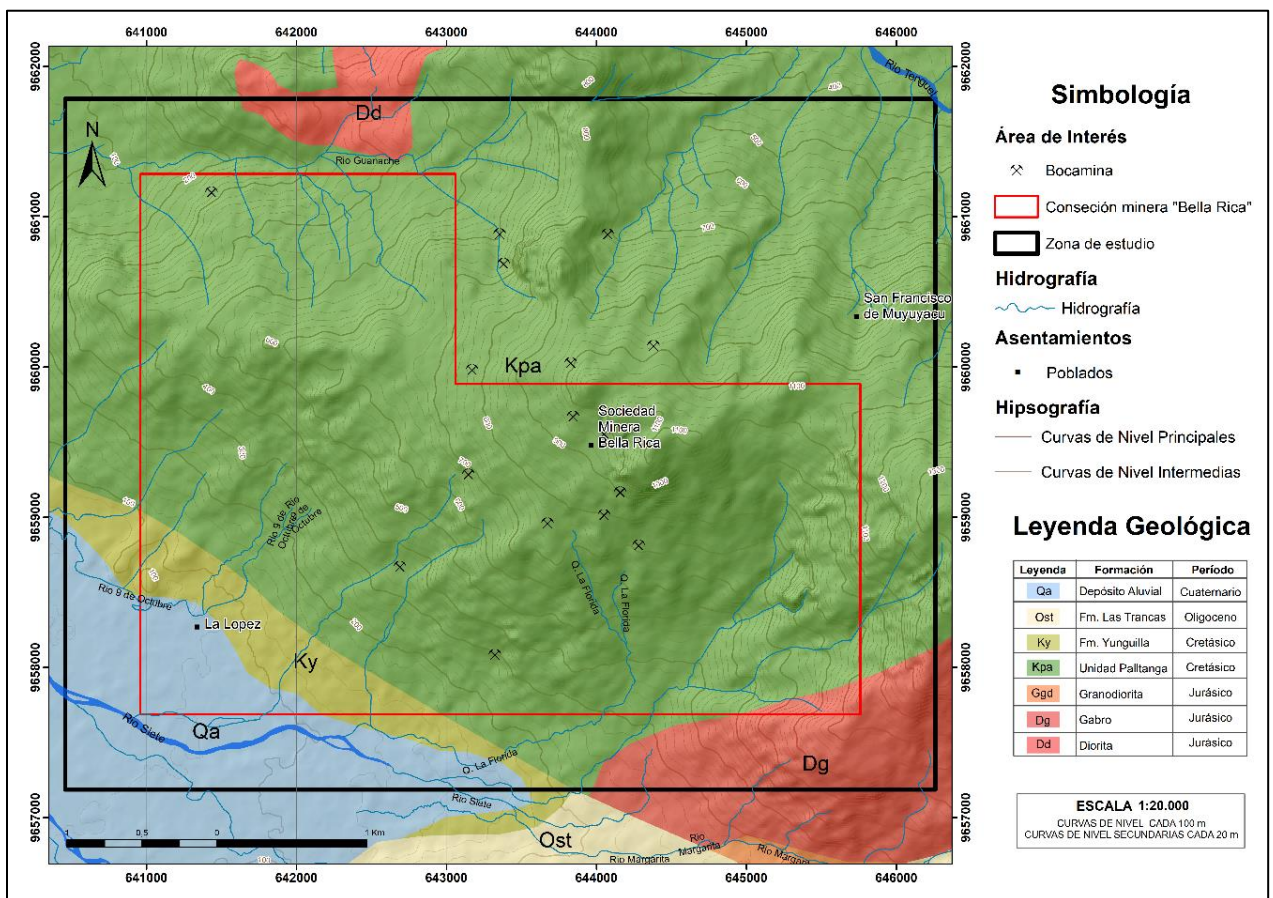


Figura 2.2 Mapa geológico del área de estudio.

### 2.3 Geología Local

Bella Rica es una de las principales concesiones mineras en el distrito de Camilo Ponce Enríquez y es caracterizadas por mineralización de Au-Cu-Mo. Las rocas presentes en la zona en su mayoría consisten en andesitas basálticas con textura afanítica de color gris verdoso oscuro. Además, se pueden presentar andesitas de textura porfírica con fenocristales de plagioclasas angulosos de tamaños milimétricos o cercanos al centímetro (Cuervas-Mons, 2015).

El sector es un depósito epi-mesotermal en rocas de origen volcánico, se la relaciona directamente con pórfidos y sus rocas se caracterizan por presentar brechas, vetas y mineralizaciones en stockwork. Se observa la presencia de pórfido feldespático en el sector de Guanache a lo largo de las fallas de dirección WNW (PRODEMINCA, 2000). El pórfido hornbléndico se localiza al norte de Bella Rica y está constituido por fenocristales euhedrales de hornblenda y plagioclasas. Según Schütte et al. (2012), el pórfido Gaby-Papa Grande, datado de una edad de  $20,54 \pm 0,08$  millones de años, se ubica al norte de Bella Rica y es un sistema de brecha-pórfido de Au-Cu de gran importancia debido a la presencia de vetas auríferas en asociaciones de cuarzo-pirrotina-calcopirita-pirita-oro y en sulfuros. Las brechas hidrotermales han generado leyes de oro destacadas por lo cual las asociaciones mineras se encuentran explotando esta región.

La mineralización en el área de Bella Rica, en su mayoría, se da con orientación N-S en estructuras de fallas transversales y en vetas con buzamiento al Este debido a una paleosutura existente que ha dado paso a una mineralización hidrotermal de temperaturas medias a bajas. Se han identificado minerales como pirrotina, pirita, galena, hematita, esfalerita, calcopirita, magnetita, molibdenita, calcita, clorita, entre otros (AMBIENCONSUL, 2017).

## **2.4 Marco Estructural**

En el sector de Bella Rica, las rocas pertenecientes a la Unidad Pallatanga se observan fracturadas por distintos tipos de fallas (Figura 2.3) cuyo origen estimado es del Cenozoico (PRODEMINCA, 2000). Debido al fenómeno de subducción, los esfuerzos compresivos de dirección E-W dieron lugar a fallas inversas y estructuras de cabalgamiento que luego se vieron afectados por el emplazamiento de intrusivos en la zona provocando fracturación en las rocas. La fracturación inició la mineralización que en la actualidad presenta diversas orientaciones pudiendo ser de N-S, NW-SE o WNW-ESE. A continuación, se detallan los sistemas de fallas encontrados:

### **2.4.1 Fallas transversales**

Existe un sistema de fallas que presentan inclinación hacia el Norte y rumbo con dirección E-W y NW-SE. Hacia el Noreste de Ponce Enríquez se encuentra la falla del Río Tenguel y hacia el Suroeste se observa la falla Margarita, que separa a los basaltos de Bella Rica (Unidad Pallatanga) de los sedimentos turbidíticos (Fm. Yunguilla). Otra es la falla Guanache que se encuentra inclinada hacia el norte entre 50°-80° y se ubica paralela al Río Guanache (Figura 2.2), en esta falla se ubica la veta Eloy Calderón (Dunkley y Gaibor, 1997).

El otro sistema de fallas presenta rumbo E-W y NE-SW como la falla Los Ratones que se inclina entre 60°-90° hacia el NW, hacia el NE se observa una falla mineralizada en el sector de Muyuyacu que probablemente pueda ser su continuación. La falla Río 9 de Octubre se inclina hacia el SE y se extiende hasta el complejo porfídico de Papa Grande (PRODEMINCA, 2000).

## 2.4.2 Fallas longitudinales

Este sistema de fallas son las que contienen en su mayoría a las vetas mineralizadas o se encuentran paralela a estas. La falla Tres de Mayo presenta dirección N-S y buza hacia el Este. Esta falla se encuentra desplazada por las fallas transversales de la región y presenta un ligero levantamiento que ha dado paso a la formación de un abanico extensional donde se observa mineralización. Otro sistema de fallas cuyas vetas mineralizadas presentan rumbo E-W, se encuentra cerca del complejo Papa Grande. La concentración de vetas mineralizadas en el sector de Bella Rica ha promovido al desarrollo de actividades mineras para aprovechar los recursos (PRODEMINCA, 2000).

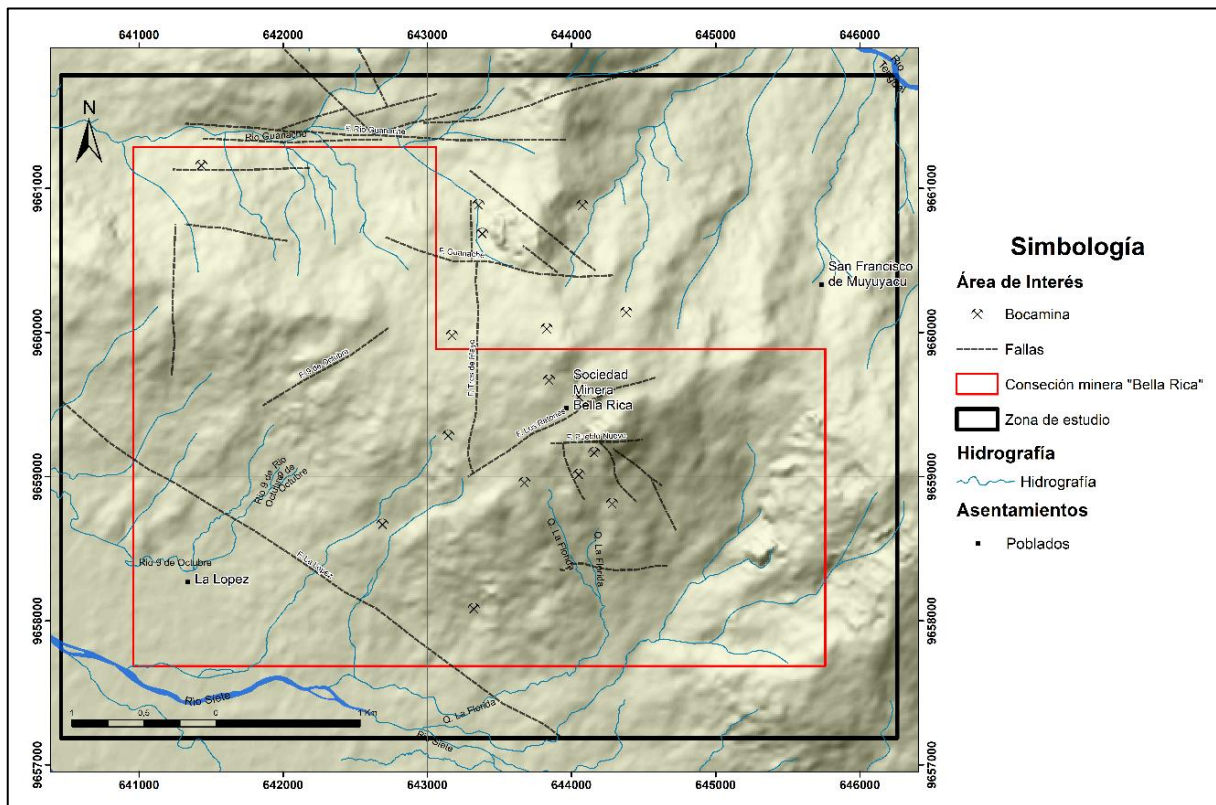


Figura 2.3 Mapa estructural en el sector Bella Rica, Ponce Enríquez.


# CAPÍTULO 3




## 3. DATOS Y MÉTODOS

### 3.1 Equipos


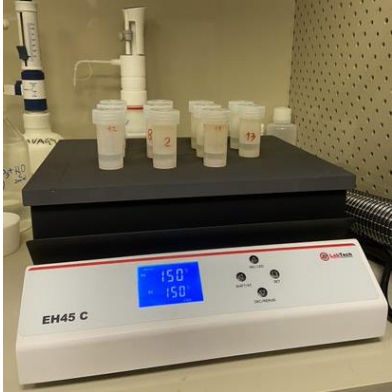


La instrumentación y los equipos empleados para el proyecto fueron proporcionados, junto con las debidas medidas de seguridad, por los laboratorios de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y la Universidad de Pisa (UNIPi- Italia). A continuación, se detallan cada uno de los equipos usados:

**Tabla 3.1 Equipos y sus especificaciones**

Equipos	Modelo y Especificaciones	Laboratorio
 <p><i>Equipo de corte y rectificado</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kemet Geoforn</li> <li>➤ Equipo para corte y rectificado de secciones delgadas con bomba de precisión, micrómetro digital y cortadora de diamante. 220V, 50/60 Hz, sin sistema de recirculación. Resolución de 2 <math>\mu\text{m}</math>.</li> </ul>	<p>Laboratorio de Petrografía – ESPOL, Laboratorio de preparación de láminas delgadas y lúcidas – UNIPi</p>
 <p><i>Equipo con sistema de prensa hidráulica</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Enerpac PATG1102N</li> <li>➤ Es operado fácilmente a mano o por pedal. Presenta una presión máxima de funcionamiento de 700 bar.</li> </ul>	<p>Laboratorio de Granulometría y Molienda - UNIPi</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ FRITSCH pulverizadora</li> <li>➤ Es un equipo de trituración rápida y uniforme, la</li> </ul>	<p>Laboratorio de Granulometría y Molienda – UNIPi</p>

 <p><b>Molino de mandíbulas</b></p>	<p>granulometría final se presenta entre 0.3 a 15 mm, equipo de alta presión y fácil limpieza. Tritura materiales robustos incluso muy duros.</p>	
 <p><b>Molino de bolas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ FRITSCH pulverizadora 5</li> <li>➤ Para pulverizar las muestras en jarros de ágata mediante rotación de bolas planetarias a 400 rpm.</li> </ul>	<p>Laboratorio de Granulometría y Molienda – UNIFI</p>
 <p><b>Microscopio electrónico de barrido (SEM)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ FEI Quanta FEG 450</li> <li>➤ Equipo de escaneo de electrones de alta resolución de imágenes que permite caracterizar metales, aleaciones, materiales orgánicos e inorgánicos. Cuenta con un software de fácil interfaz que permite recolectar los datos según la zona especificada para el análisis de la muestra. Resolución menor a 1nm a 30 kV.</li> </ul>	<p>Laboratorio de CISUP – UNIFI</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Carl Zeiss Axioplan Fluorescence Microscope</li> <li>➤ Microscopio que permite trabajar con luz transmitida</li> </ul>	<p>Laboratorio de Petrografía – UNIFI</p>

 <p><b>Microscopio Óptico</b></p>	<p>y reflejada mediante los diferentes objetivos (40x, 20x, 10x, 2.5x). Se complementa con una cámara digital Sony junto con un software de visualización para la toma de fotografías. Este equipo permite controlar la intensidad de la luz, ajustar el foco y almacenar las imágenes. Resolución con objetivos de 2.5x, 10x, 20x y 40x.</p>	
 <p><b>Analizador directo de Mercurio</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Milestone DMA-80</li> <li>➤ Equipo analizador de Hg mediante descomposición térmica de la muestra. Trabaja con 110/60V y 57 decibeles. El tiempo de análisis es de 5 minutos. Resolución menor a 1% @10 ng Hg.</li> </ul>	<p>Laboratorio de Geoquímica – UNIPI</p>
 <p><b>Espectrómetro ICP-MS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Perkin-Elmer NexION 300x</li> <li>➤ Analiza detalladamente la composición elemental de una muestra mediante espectrometría de masa. La temperatura del entorno debe estar entre 15° a 30° C, humedad entre 20% y 80%. Las muestras se preparan según el análisis que se vaya a realizar. Resolución menor a 3% de la desviación estándar relativa en una solución entre 1 y 10 µg/L.</li> </ul>	<p>Laboratorio de ICP-MS – UNIPI</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mettler-Toledo NewClassic MS,</li> <li>➤ Equipo de medición de pesos con alta precisión para espacios interiores</li> </ul>	<p>Laboratorio de Geoquímica – UNIPI, Laboratorio de ICP-MS – UNIPI</p>

 <p><b>Balanza analítica</b></p>	<p>cerrados de 10° a 30° C. Resolución de 0,001 g.</p>	
 <p><b>Placa calefactora</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ LabTech EH45C</li> <li>➤ Esta placa presenta una superficie calefactora de granito, calienta de forma uniforme y alcanza una temperatura máxima de 450°C. Resolución de ± 2°C</li> </ul>	<p>Laboratorio de Petrografía – ESPOL Laboratorio de ICP-MS – UNIFI</p>
 <p><b>Microanalizador de sonda de electrones</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Jeol 8200 Super Probe</li> <li>➤ Brinda datos químicos cuantitativos de los elementos mayores y traza (&gt;100 ppm). Detecta elementos con un rango de 4Be a 92U y longitud de onda de 0.087 a 9.3 nm.</li> </ul>	<p>Laboratorio de EPMA – UNIMI</p>
 <p><b>ICP-OES</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Varian 720-ES</li> <li>➤ Genera espectros de emisión atómicos de líneas características</li> </ul>	<p>Laboratorio Actlabs – Ontario, Canadá</p>



### 3.2 Metodología

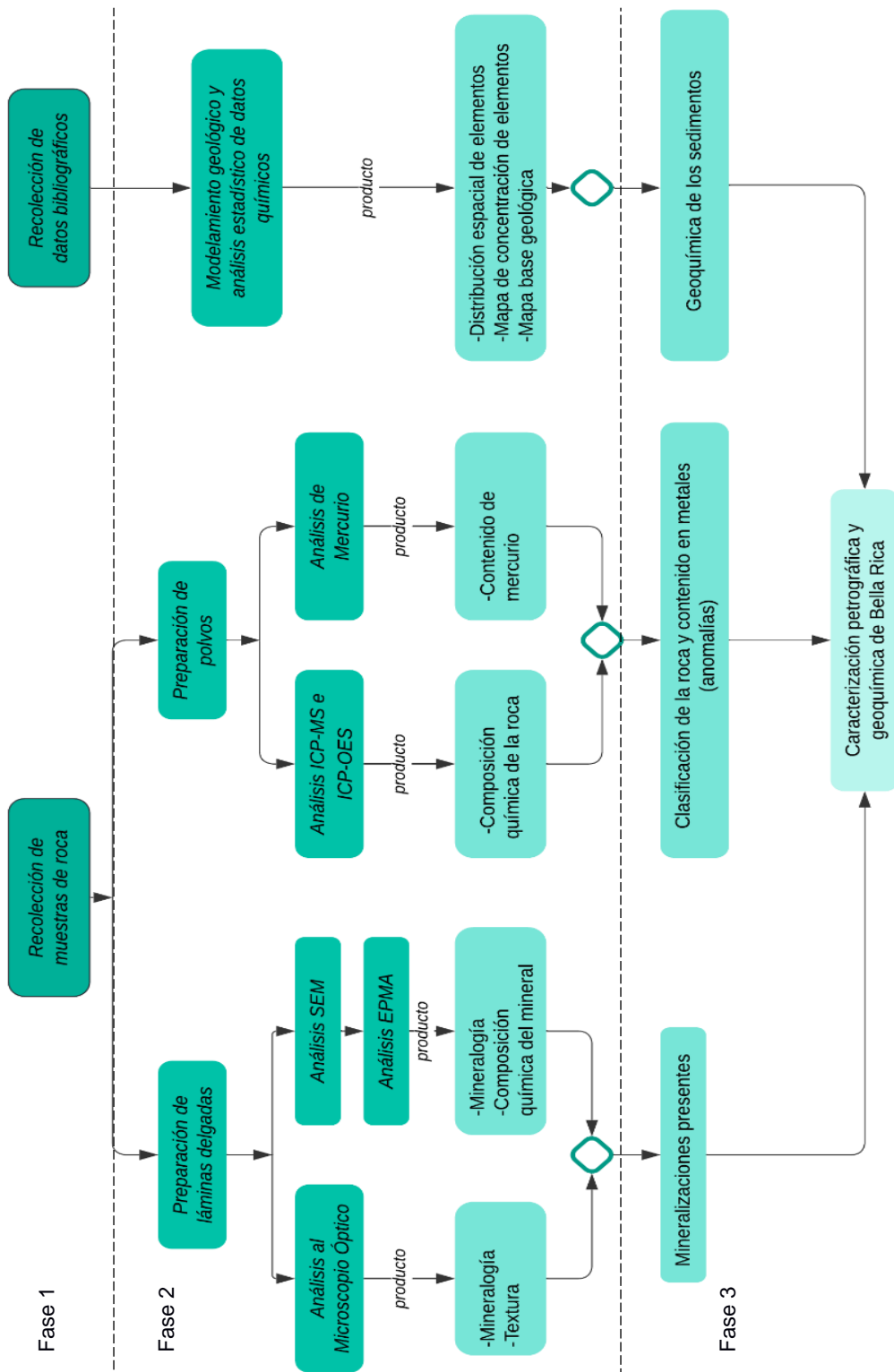


Figura 3.1 Diagrama de la metodología implementada.

El proyecto tiene como objetivo caracterizar el área de estudio de forma que se obtenga la información geológica, mineralógica y química de las rocas; para ello se propuso una metodología (Figura 3.1) de fase exploratoria siendo así que se consideró dividirla en 3 fases que se detallan a continuación:

### **3.2.1 Fase 1: Recolección de Datos**

#### **3.2.1.1 Datos bibliográficos**

Esta primera fase consistió en búsqueda bibliográfica de información geológica y de estudios previos que se han realizado en el distrito minero de Ponce Enríquez. La búsqueda de la geología del área de estudio se basó y recopiló información de:

- Mapa Geológico de Azuay (PRODEMINCA, 2000)
- Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3° - 4° escala 1:200000 (Pratt et al., 1997)
- Mapa Geológico de la República del Ecuador escala 1:1000000 (Egüez et al., 2017)

Con la información recopilada se analizó la topografía del terreno generando un DEM y se identificaron las principales estructuras en la zona, con el fin de determinar puntos tentativos de muestreo tomando en cuenta los drenajes, las fallas, las vías principales de acceso y las pendientes.

Por otro lado, datos geoquímicos de sedimentos fueron obtenidos del trabajo de Jiménez-Oyola et al., 2021. El estudio consistió en analizar las concentraciones de As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en las muestras de suelo y evaluar los efectos que estos pueden traer a la salud humana según el índice de peligro (HI) y el cáncer total de riesgo (TRC). En total se analizaron 785 muestras y de estas se obtuvo la concentración de 36 elementos junto a su ubicación. Están distribuidas en una zona más extensa que el área de estudio, pero varias muestras se encuentran

dentro de la zona de interés por lo que son consideradas para la elaboración del proyecto.

Los datos recopilados fueron filtrados para el análisis estadístico de las concentraciones químicas de Ag, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en la región. Para ello, se consideró obtener un valor de fondo (background) de los elementos con el objetivo de tener un valor de referencia con el cual se logró clasificar en rangos cada concentración de los elementos (Tabla 3.2). Siguiendo estas consideraciones se obtuvo la siguiente clasificación por colores:

**Tabla 3.2 Clasificación concentraciones de elementos químicos en sedimentos.**

Background	Threshold	Anomalía Baja	Anomalía Media	Anomalía Alta
Mediana	Mediana + Desviación estándar	Mediana + 2*Desviación Estándar	Mediana + 3*Desviación Estándar	Mediana + 4*Desviación Estándar

Con esta clasificación se elaboraron mapas de concentraciones por elementos en los cuales se distribuyeron los datos para la identificación de las anomalías.

### 3.2.1.2 Datos en Campo

Durante el trabajo de campo (Figura 3.2) se recolectaron muestras de roca, se tomaron sus respectivas coordenadas geográficas y se realizó una descripción de la zona y de la roca in situ. Las muestras se colocaron en fundas plásticas y se etiquetaron según el orden de muestreo (Figura 3.3).



**Figura 3.2 Trabajo de campo en el sector minero Bella Rica.**



**Figura 3.3 Labores durante el muestreo de rocas. (a) Etiquetado de las muestras. (b) Toma de coordenadas de las estaciones.**

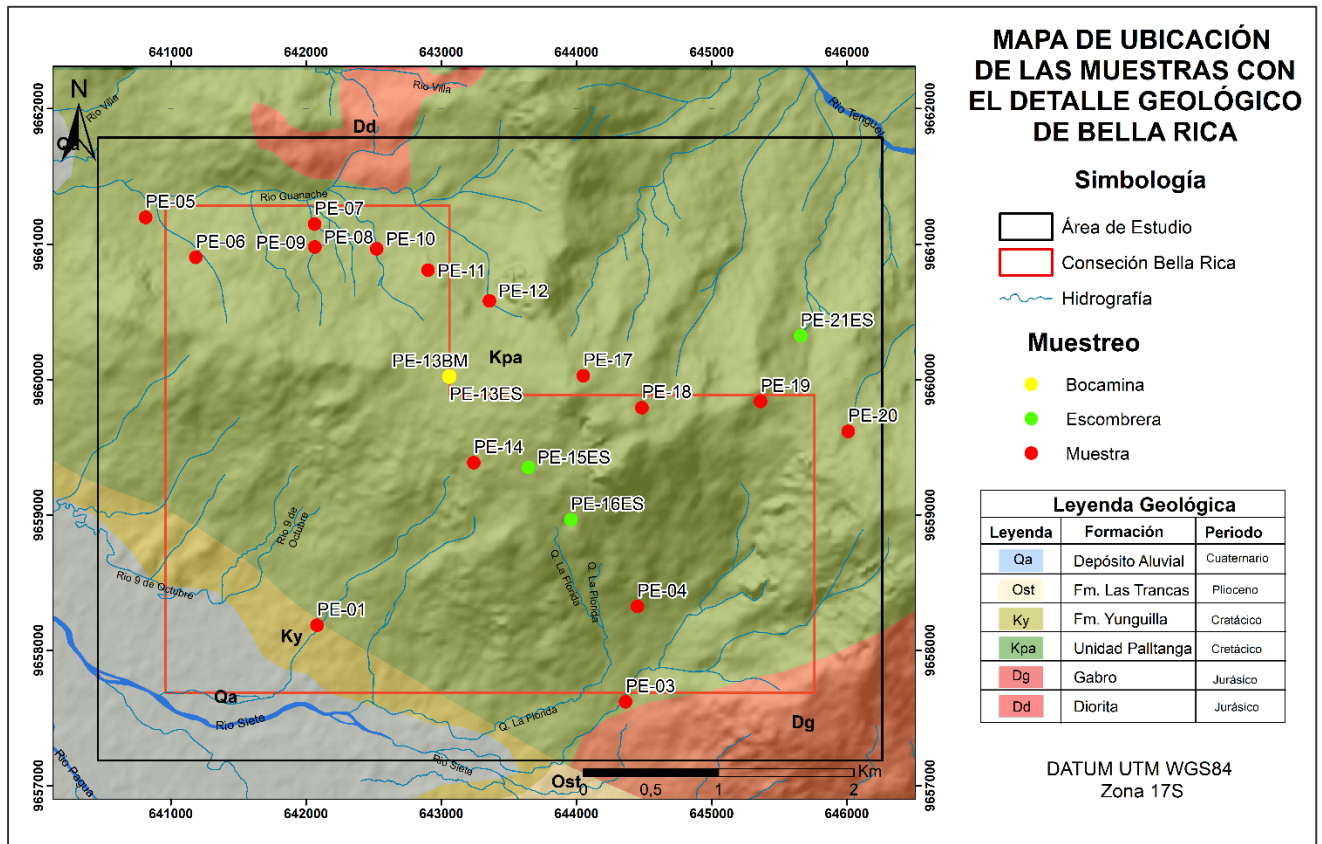
La salida de campo (Figura 3.4) permitió la recolección de 21 muestras de roca y del archivo de rocas de la ESPOL se obtuvieron 7 muestras. Con ello se obtuvo la siguiente información:

**Tabla 3.3 Detalle de las muestras recolectadas en campo. Coordenadas en UTM WGS84 17S**

MUESTRA	X (m)	Y (m)	DESCRIPCIÓN
PE-01	642081	9658184	Andesita basáltica grisácea de textura afanítica. Bloque de depósito coluvial ubicado a un lado de la quebrada.
PE-02	643756	9656744	Andesita basáltica grisácea de textura afanítica. Bloque de aproximadamente 6 metros a un lado de la carretera, se encuentra meteorizado y con presencia de vegetación en la parte superior.

PE-03	644363	9657618	Bloque ubicado en la quebrada de rodados centimétricos. Roca de color gris azulado con presencia de vetillas.
PE-04	644451	9658323	Roca verdosa oscura de textura afanítica, ubicada a un lado de la carretera cerca de una falla.
PE-05	640814	9661198	Roca gris azulada de textura afanítica. Bloque de dureza irregular con alto grado de meteorización ubicado a un lado de la carretera en una intersección de dos caminos (V).
PE-06	641184	9660903	Bloque con mucha meteorización de color rojiza, bastante vegetación y humedad.
PE-07	642063	9661148	Roca gris de textura porfirítica con cristales alargados oscuros y semiredondeados claros.
PE-08	642065	9660978	Roca de textura porfirítica recolectada en quebrada a un lado de la muestra PE-09.
PE-09	642065	9660978	Roca de textura porfirítica recolectada a un lado de la muestra PE-08.
PE-10	642523	9660965	Roca recolectada un lado de quebrada.
PE-11	642902	9660808	Roca tomada a una distancia aproximada de 120 metros dentro de la mina San Miguel (abandonada). Punto de ubicación proyectado a 120 m en 113 SE.
PE-12	643357	9660580	Roca gris azulada de textura afanítica. Ubicado a un lado de la carretera con presencia de musgo.
PE-13	643060	9660020	Roca recolectada de la escombrera de la Sociedad Estrella de Oro.
PE-14	643240	9659385	Roca de peña de la Mina Bonanza.
PE-15	643645	9659351	Roca recolectada en escombrera de Mina SOMINUR.
PE-16	643959	9658964	Roca tomada en escombrera de Pueblo Nuevo.
PE-17	644051	9660027	Roca de color gris verdosa tomada a un lado de la carretera, presencia de vegetación.
PE-18	644484	9659792	Roca grisácea con minerales magnéticos, presenta punto de fractura y vetillas mineralizadas.
PE-19	645361	9659838	Roca con alteración. La parte superior contiene carbonato, es de color gris oscura, el mineral se raya con la uña y se observa bandeamiento negro. La roca base presenta cambios en su aspecto.
PE-20	646011	9659616	Roca in situ bastante alterada, a un lado de la carretera con vegetación seca.
PE-21	645658	9660323	Roca recolectada en escombrera de Sociedad Minera en Pequeña Escala "Cristo de Oro".
PE-22	642475	9663916	Muestra del nivel 4 en Mina Jerusalén
PE-23	642475	9663916	Muestra del nivel 4 en Mina Jerusalén
PE-24	642475	9663916	Muestra del nivel 4 en Mina Jerusalén
PE-25	642500	9662000	Roca de la Mina El Mirador – Muestra Tesis Duque (Cod. R001 C003)
PE-26	642500	9662000	Roca de la Mina El Mirador – Muestra Tesis Duque (Cod. R001 C001)
PE-27	642500	9662000	Roca de la Mina El Mirador – Muestra Tesis Duque (Cod. R002 C004)

PE-28	680454	9669640	Muestra Chaucha
-------	--------	---------	-----------------



**Figura 3.4** Mapa de ubicación de las muestras recolectadas.

Los datos registrados (Tabla 3.3) permitieron la ubicación de las muestras sobre el mapa base elaborado, localizando las estructuras cercanas y los principales afluentes. Se observan las 21 muestras recolectadas, que son las que fueron tomadas en campo dentro del área de estudio. Es importante recalcar que el muestreo se realizó en afloramientos a un lado de la carretera, en bocamina y en escombreras (Figura 3.4).

### 3.2.2 Fase 2: Técnicas de Laboratorio

La fase se clasificó según el tipo de resultado obtenido, estos pueden ser datos petrográficos o geoquímicos:

### 3.2.2.1 Análisis Petrográfico

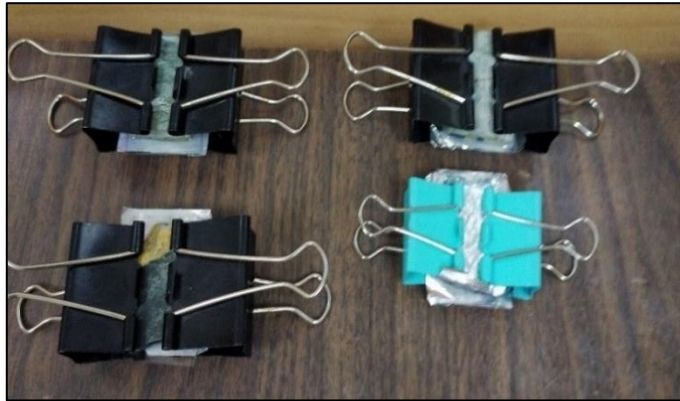
Para determinar las asociaciones mineralógicas se realizaron 23 láminas petrográficas de las 21 muestras de rocas recolectadas en el sector minero Bella Rica (Figura 3.5). La preparación de las muestras se realizó en el laboratorio de petrografía de FICT-ESPOL. Las láminas delgadas se prepararon a aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espesor adheridas a un portaobjetos de dimensiones 4,7 cm x 2,7 cm x 0,1 cm. El espesor de las secciones debe ser lo suficientemente delgado como para permitir que la luz del microscopio petrográfico pase a través de los minerales transparentes que conforman la roca (D'Orazio, 2021).



**Figura 3.5 Láminas delgadas elaboradas en laboratorio.**

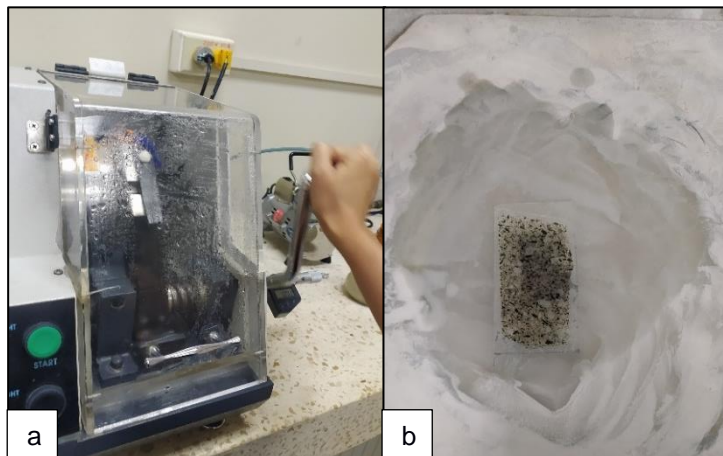
Se comenzó cortando la muestra de roca de forma paralelepípeda (aproximadamente 4,5 cm x 1-3 cm x 2,5 cm) con una sierra de diamante. Se utilizaron abrasivos para redondear los bordes del portaobjetos y eliminar las irregularidades, así mismo se alisó una de las caras de la muestra de roca la cual se pegó al portaobjetos.

Para pegar el portaobjetos a la muestra de roca se utilizó un pegamento bicomponente. El portaobjetos, la roca y el pegamento se ubicaron sobre una placa calefactora y cuando la mezcla estaba lista se extendió sobre la superficie lisa de la roca, y por encima de esta se colocó el vidrio. Se deslizó constantemente el vidrio sobre la roca para evitar burbujas de aire, posteriormente se dejó asentar entre 20 – 24 horas (Figura 3.6).



**Figura 3.6 Reposo de las rocas pegadas en la lámina.**

Para continuar reduciendo el espesor, se utilizó la máquina de corte y rectificando de forma progresiva (Figura 3.7a). Las muestras fueron pulidas manualmente con polvos abrasivos de malla 600, 800, 1200, 2000 y 4000 (Figura 3.7b). Finalmente, se empleó alúmina de 0,3  $\mu\text{m}$  para pulido fino y lucidez de las láminas.



**Figura 3.7 Preparación de las secciones delgadas. (a) Reducción del espesor de la sección delgada. (b) Pulido de la sección con abrasivos.**

Para la descripción de los minerales contenidos en la lámina se alternó el uso de nícoles paralelos y nícoles cruzados con la finalidad de observar las diferentes propiedades (forma, color, pleocroísmo, tipo de exfoliación, relieve, índice de refracción, colores de interferencia, maclas, zonaciones) y determinar el mineral contenido en cada muestra.



Así mismo, se varió el uso de la luz transmitida y la luz reflejada. Con la luz reflejada fue posible observar los minerales opacos mientras que las otras propiedades del mineral se observaron con la luz transmitida.

### 3.2.2.2 Química de los minerales

Para un microanálisis químico mediante análisis SEM, se requiere recubrir las láminas delgadas preparadas previamente con un material conductor, en este caso, se recubrió con carbón ya que es el mejor método para evitar que la muestra se cargue y no interfiere en los detalles de la imagen. Las láminas se colocaron en el equipo y reflejaron en el computador un resultado cuantitativo en formato de tabla (Figura 3.8) de los elementos que componen una sección de la muestra y el contenido porcentual, los cuales permitieron corroborar el contenido mineralógico.

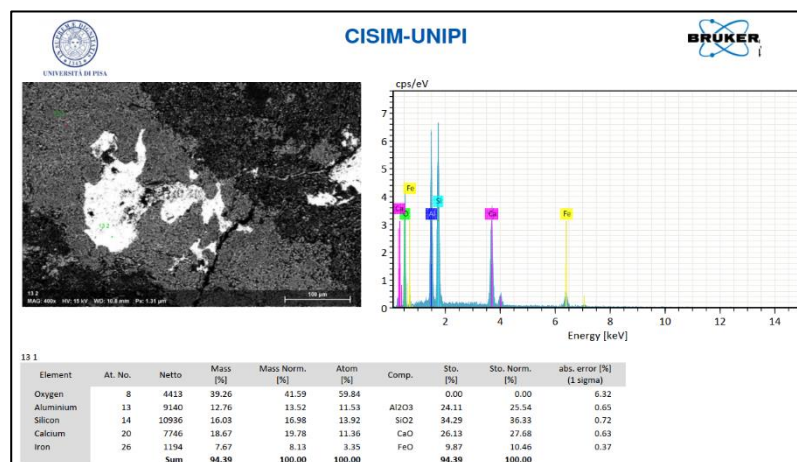


Figura 3.8 Resultado de microanálisis químico.

Además, se realizó análisis EPMA en donde se cuantificó la composición de Na, Mg, Si, Al, K, Ca, Ti, Cr, Mn y Fe en minerales principales como el anfíbol, clorita, epidota y feldespato. Lo que se obtuvo de este análisis fue una tabla con los valores de la fórmula estructural de cada mineral analizado.

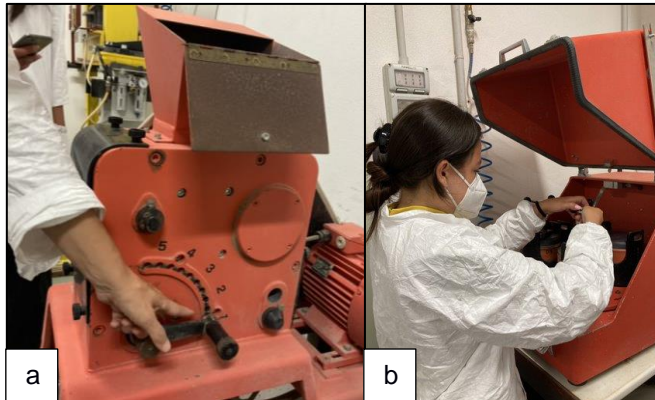
### 3.2.2.3 Elementos mayores y en traza

Para la determinación de los elementos mayores parte de las muestras fue enviada al laboratorio Actlabs en Canadá para ser analizada por medio de ICP-OES. Las muestras que se analizaron fueron de roca total y la información que se obtuvo fue la composición en peso porcentual (wt%) de los elementos mayores en unidades de ppm.

Los datos luego fueron recalculados considerando la sumatoria total de pesos al 100% sin los datos de LOI (loss of ignition), es decir, en base anhidra que permiten el análisis de los resultados por medio de diagramas. Para ello se empleó el diagrama de clasificación de TAS según Le Bas et al. (1986) que solo permite la clasificación de las muestras con LOI <3% determinando la composición de las rocas desde rocas ultrabásicas hasta rocas ácidas.

Sin embargo, también fue posible emplear los datos netos considerando el LOI para realizar el diagrama de Zr/Ti vs Nb/Y según Pearce (1996) que permite la clasificación de la muestra según su composición comprobando que los resultados del diagrama según Le Bas et al. (1986) tuvieran coherencia.

Por otro lado, para la obtención de los elementos en traza fue necesario preparar las muestras. Primero, los cubos de roca fueron aplastados con la prensa hidráulica y los restos de roca que se obtuvieron se clasificaron según la alteración. Lo que se buscaba en este caso era la roca limpia, esté o no con mineralización. Luego, los restos de roca son pulverizados en el molino de mandíbulas para disminuir su tamaño y así puedan ser llevados al molino de bolas planetarias (Figura 3.9).



**Figura 3.9 Preparación de los polvos. (a) Pulverización con el molino de mandíbulas. (b) Pulverización con el molino de bolas planetarias.**

Los jarros fueron previamente pulidos con sílice pulverizada y, luego, se colocó entre 3 a 4 cucharadas de la roca triturada junto a 3 bolas grandes de ágata en cada uno de los jarrones (Figura 3.10) y se configuró la máquina para que trabaje durante 20 – 25 min.



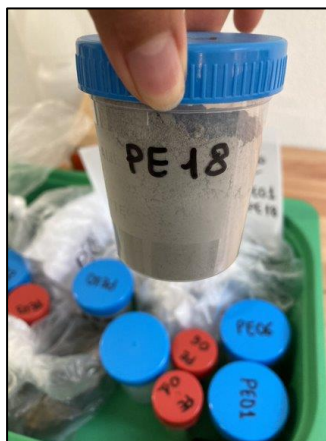
**Figura 3.10 Pulverización de la muestra con las bolas grandes de ágata.**

Luego se retiran las bolas grandes y se colocan 6 bolas pequeñas de ágata en los jarrones (Figura 3.11), las bolas pulverizan la muestra durante 20min.



**Figura 3.11 Pulverización de la muestra con las bolas pequeñas de ágata.**

La muestra pulverizada (Figura 3.12) luego es utilizada para dos tipos de análisis geoquímicos. El primer análisis es para determinar la cantidad de mercurio que contiene la muestra mediante el equipo DMA-80, y el segundo para obtener los elementos que la componen con el uso del ICP-MS. Este último equipo analiza muestras en estado líquido, por esta razón, se procede previamente a preparar la disolución del polvo.



**Figura 3.12 Envasado de las muestras de roca pulverizadas.**

Para la preparación de la disolución, las muestras en polvo se pesaron en una balanza analítica de alta precisión a una medida entre 50 y 60 mg. Esta cantidad de roca pulverizada se colocó en envases de Teflón los cuales tienen la capacidad de resistir altas temperaturas, es

importante etiquetar cada envase y tapa con el código correspondiente para cada muestra. Se disolvió la muestra con 4 ml de ácido fluorhídrico y 1 ml de ácido nítrico. Luego se colocó el envase tapado sobre un plato caliente a 150°C (Figura 3.13). Las muestras deben ser calentadas por lo menos 48 horas.



**Figura 3.13** Proceso de calentado de la disolución de las muestras para análisis químico

Una vez cumplido el tiempo, se procedió a abrir la tapa cuidadosamente y se colocó 2 ml de ácido nítrico, y se tapó el envase. Se calentó a 110°C por una noche. Luego se abrió la tapa para colocar 3 ml de ácido nítrico con agua. Finalmente, en un vial de polietileno con hasta 50 ml de agua se colocó la muestra.

La roca en disolución luego es llevada al ICP-MS para obtener la composición elemental de las muestras y determinar las concentraciones de los elementos en traza. Lo que se obtuvo es una tabla con los datos cuantitativos de los elementos minoritarios y elementos traza, cuyo contenido es representado en ppm. Con estos datos se realizaron diagramas estadísticos como el de Hastie et al. (2007) donde se relaciona el Th y Co para discriminar las series en rocas volcánicas.

Se hizo también el diagrama de Nakamura (1974) para las REE con la finalidad de conocer el tipo de génesis de las rocas y se correlacionó los elementos traza de mayor interés con el Cu, ya que este elemento es el

mineral más abundante e importante de la zona. Y el diagrama multielemental de manto primitivo normalizado al N-MORB según Sun & McDonough (1989).

#### 3.2.2.4 Concentración de Mercurio (DMA-80)

Las muestras fueron elegidas según su ubicación de muestreo de forma que se encontraran espaciadas a una distancia similar con la finalidad de obtener una idea general del área de estudio (Figura 3.14), así mismo se tomó en consideración las diferentes texturas de las rocas y abundancia de mineralización.



Figura 3.14 Muestras elegidas para el análisis de Hg.

La cantidad mínima que se utilizó para el análisis fue de 5 mg y se tomó en cuenta que al repetir el proceso se haga con un peso aproximado, para esto se utilizó una balanza digital (Figura 3.15). Las muestras fueron llevadas al analizador de mercurio donde comienza el proceso de análisis. El contenido de mercurio en  $\mu g/kg$  sirvió para realizar un análisis estadístico de la composición de las rocas.



**Figura 3.15 Toma del peso de las muestras.**

### **3.2.3 Fase 3: Generación Modelo de Propuesta**

Con los resultados obtenidos de la Fase 2, se procede a interpretar y analizar los datos. La determinación de los minerales presentes se llevó a cabo con la información proporcionada del análisis al microscopio petrográfico y de los equipos FEG-SEM y EPMA. Luego, se clasificó la roca mediante diagramas de correlación de los elementos químicos: elementos mayoritarios mediante ICP-OES y elementos en trazas mediante ICP-MS. Además, también se determinó el contenido de Mercurio.

Los resultados de la geoquímica de roca total también se utilizaron para la elaboración de mapas de concentraciones de la zona de estudio empleando el mismo análisis estadístico, clasificación y elementos químicos de la geoquímica de sedimentos. Sin embargo, para este caso se empleó una interpolación mediante Kernel en el software de ArcGis que permitió realizar un modelo superficial de concentraciones identificando las anomalías en las rocas de la región.

Por último, se correlacionó los resultados obtenidos de la elaboración de mapas de concentraciones químicas en sedimentos con mapas de concentraciones químicas de roca para el estudio de las anomalías.

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Petrografía y Mineralización

#### 4.1.1 Microscopio petrográfico

Se realizó el análisis petrográfico de las muestras por medio del microscopio tanto a luz reflejada o luz transmitida. La descripción de las láminas delgadas se encuentra en la Tabla 4.1 en donde se detallan las características de las muestras de interés según su contenido mineralógico. Para el detalle de las demás muestras revisar Apéndice A.

**Tabla 4.1 Descripción de las muestras al microscopio petrográfico con luz transmitida y luz reflejada.**

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA		
Muestra	Luz transmitida	Luz reflejada
PE-03	Veta de cuarzo. Los opacos se pueden ver en la misma veta. Las inclusiones fluidas son de dos fases en su mayoría (líquido y vapor) (Figura 4.1). La textura es porfírica con matriz de epidotas.	Se observan dos diferentes tipos de sulfuros, uno de color gris y otro más blanquecino (Figura 4.2b).
PE-06	No se ven muchos minerales opacos, no tiene sulfuros. El único opaco podría ser hematita. Presencia de anfíboles (Figura 4.2c). Se observa alteración.	Presencia de óxidos de hierro (Figura 4.2d).
PE-10	Fenocristal completamente sustituido por opacos y tal vez minerales arcillosos. Los minerales que se observan pueden ser anfíbol o tremolita (Figura 4.2e). Los minerales opacos se encuentran más en la matriz.	Los sulfuros se encuentran a lo largo de la veta (Figura 4.2f).
PE-12	Los feldespatos se ven alterados (Figura 4.2g). Presenta textura isotrópica, radial. La matriz es de plagioclasas. No hay veta.	Se ven minerales con textura "corona" (Figura 4.2h).
PE-13C	Muy alterada de sulfuros, colores de interferencia altos.	Se observa posiblemente óxido de hierro (Figura 4.2j).
PE-16	Veta de epidota y calcita. Entre los minerales presentes están la epidota, cuarzo y sulfuros (Figura 4.2k). Los sulfuros, tal vez pirita, están un poco oxidados.	Observaciones más detalladas se hicieron al FEG-SEM debido al tamaño micrométrico de las partículas
PE-18	La mineralización está diseminada. Los sulfuros están en la veta y en la matriz. La mayoría de los sulfuros son opacos. Se observa pirrotina. Los cristales se ven que se dirigen hacia la veta (Figura 4.2m). Los minerales presentes son cloritas, opacos, sulfuros y pirrotina.	Mineral cruzando la veta, tal vez anfíbol (Figura 4.2n). La pirrotina está en la veta pero también diseminada en la roca.



PE-19	Está llena de minerales opacos. Presenta una veta de cloritas y calcitas con cuarzos pequeños (Figura 4.2o). La textura es afanítica.	Los opacos son brillantes de dos colores distintos, uno gris y el otro amarillento (Figura 4.2p).
-------	---	---

Como se observa en la Figura 4.1, la muestra PE-03 fue la única que presentó inclusiones fluidas las cuáles eran de dos fases y en su mayoría dominaba el líquido. La sección delgada presentaba una veta de cuarzo y una matriz de epidotas.

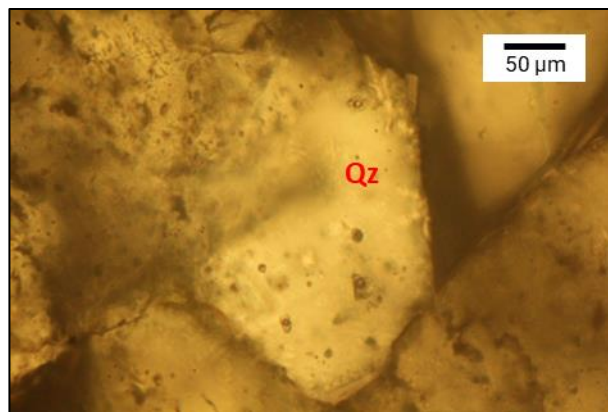
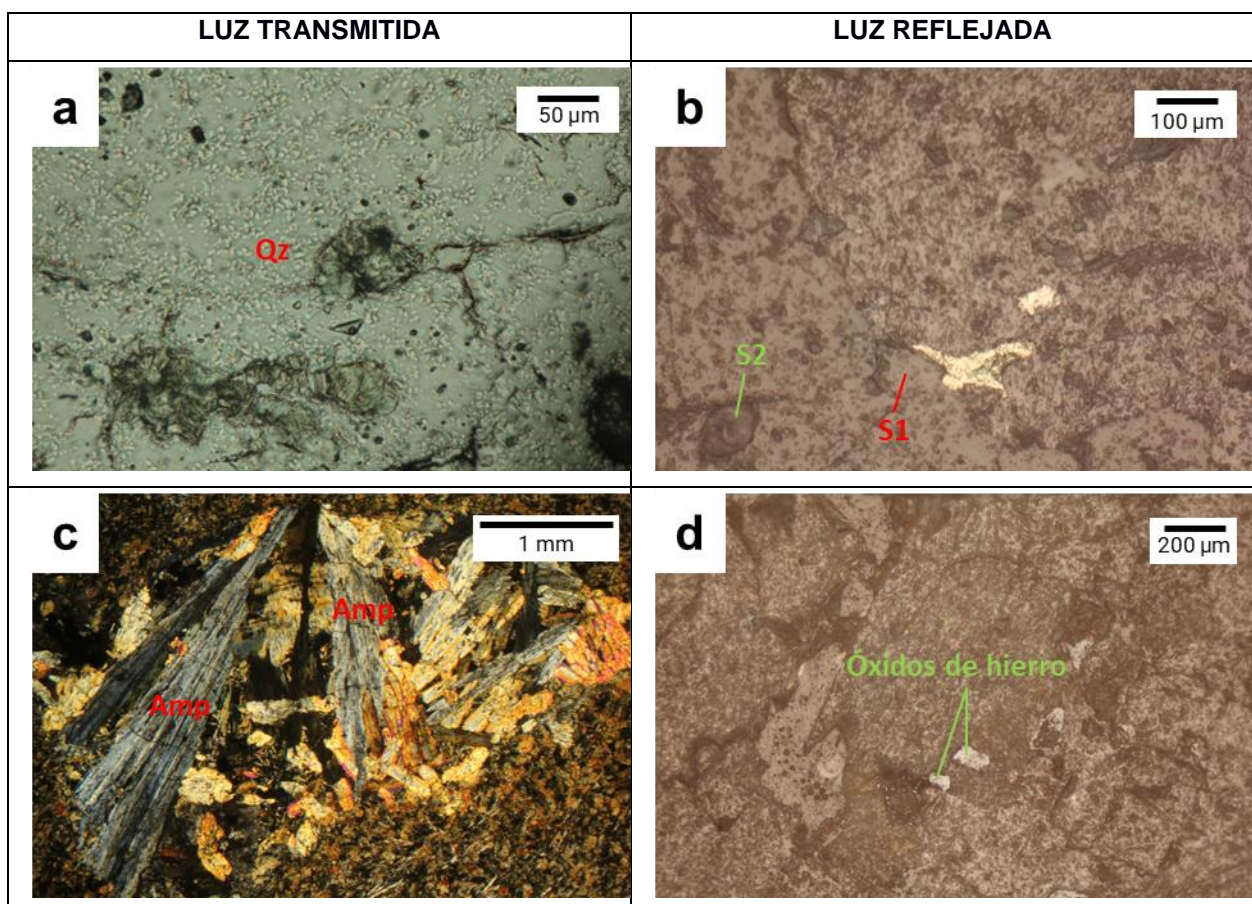
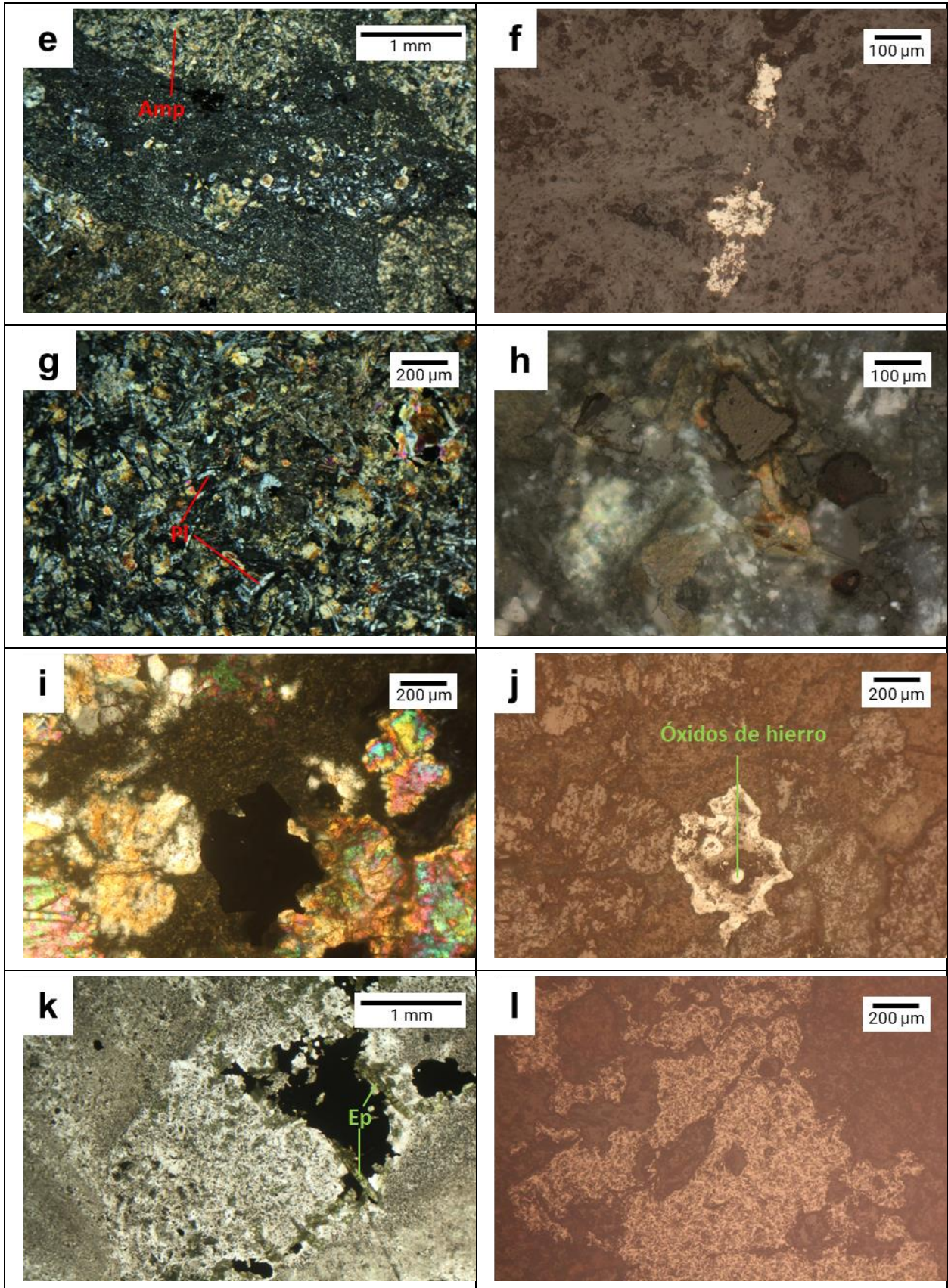
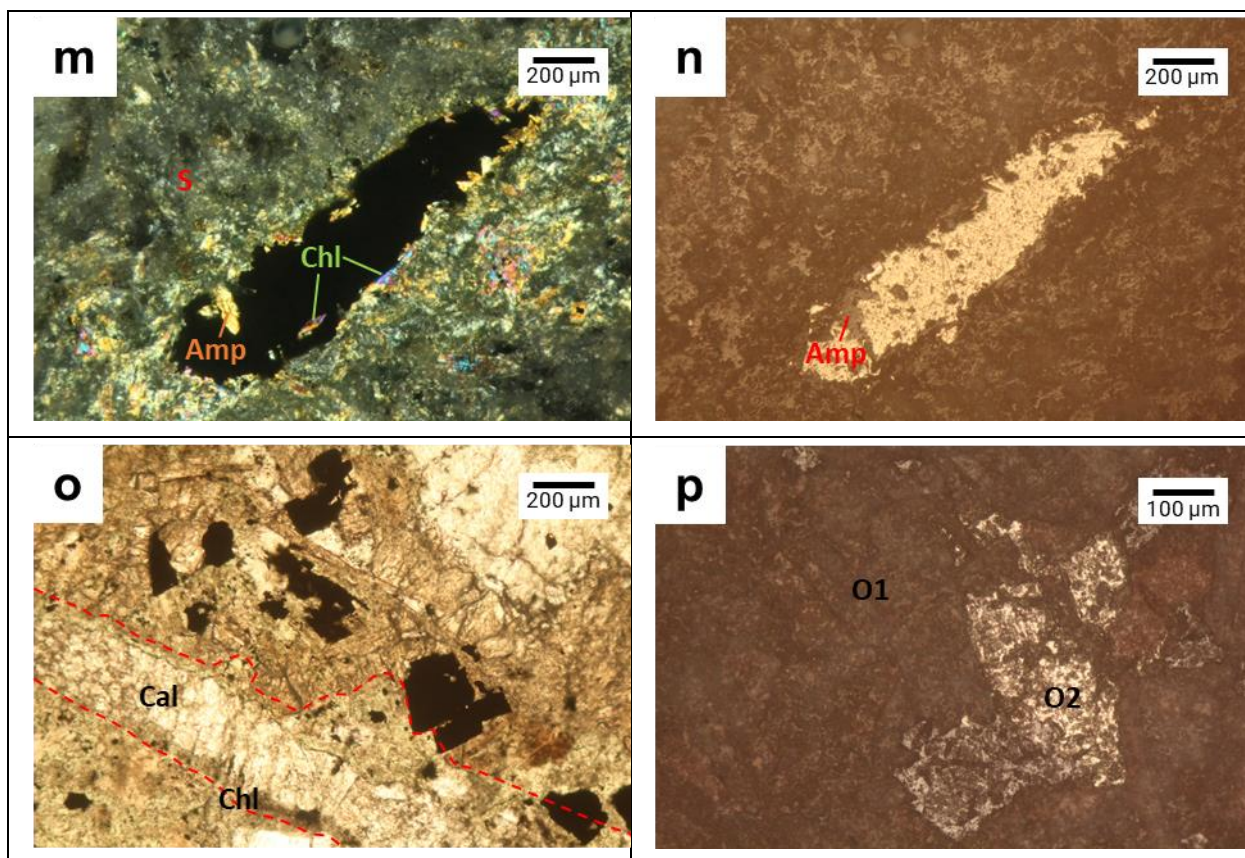


Figura 4.1 Inclusiones fluidas en veta de cuarzo (Qz).







Qz: Cuarzo S1: Sulfuro 1 S2: Sulfuro 2 Amp: Anfíbol Pl: Plagioclasa  
 Ep: Epidota Cal: Clacita Chl: Clorita O1: Opaca 1 O2: Opaco 2

**Figura 4.2** Fotografías de las secciones delgadas observadas al microscopio petrográfico con luz transmitida y luz reflejada. (a) y (b) muestra PE-03 con presencia de cuarzo y sulfuros. (c) y (d) muestra PE-06 con presencia de anfíboles y óxidos de hierro. (e) y (f) muestra PE-10 con anfíbol. (g) y (h) muestra PE-12 con plagioclasa. (i) y (j) muestra PE-13C con óxido de hierro. (k) y (l) muestra PE-16 con mineralización de epidotas en veta. (m) y (n) muestra PE-18 con mineralización de cloritas y anfíboles. (o) y (p) muestra PE-19 con veta de calcita, mineralización de cloritas y óxidos.

La observación al microscopio permitió identificar muestras de interés en donde se encontraron vetas con contenido en epidota y cloritas, sulfuros y otros minerales. Con ayuda de la descripción de las muestras y su distribución en el área de estudio, se procedió a seleccionar el análisis que fue realizado a cada muestra (Apéndice B).

#### 4.1.2 Microscopio electrónico de barrido

Por medio del análisis SEM se identificaron los minerales de mena, ganga, metales y grupos de sulfuros que constituyen las muestras de roca de la región de Bella Rica (Tabla 4.2). El análisis se realizó en 7 muestras significativas debido a la presencia de vetas y sulfuros en la muestra de mano.

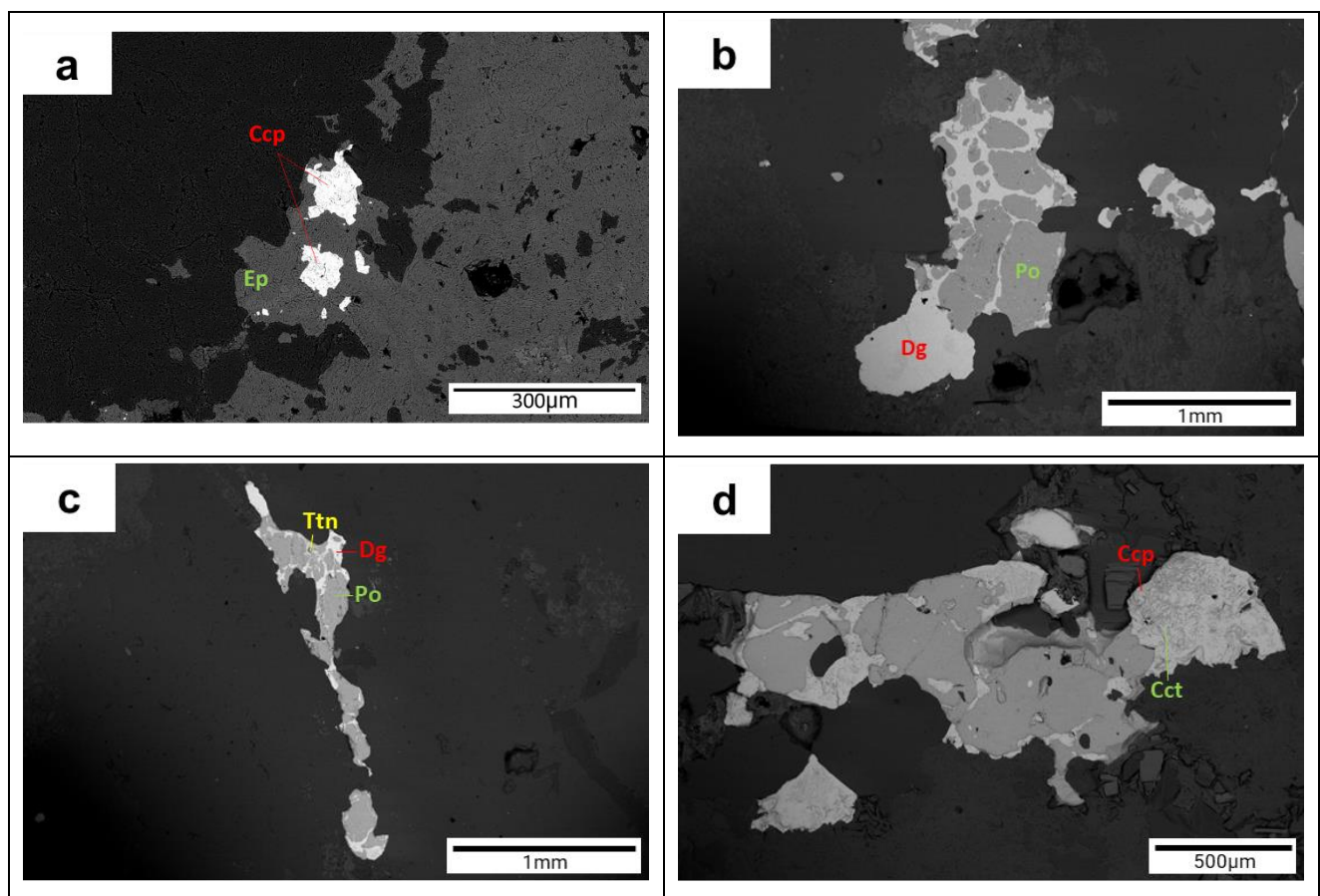
**Tabla 4.2 Minerales de mena, ganga y sulfuros reconocidos al FEG-SEM.**

MENA Y OTROS SULFUROS	PE-03	PE-11	PE-12	PE-13C	PE-16	PE-18	PE-24
Electro							X
Au							X
Ag-Te-Au							X
Ag-Te							X
Gn	X						X
Sp				X	X		X
Ccp	X	X	X		X	X	X
Py	X			X	X	X	X
Apy							X
Po	X		X				
Py Arsenífera				X			X
Sulfuro de Antimonio							X
S-Sb-Pb							X
Grupo Cobaltita					Ulmanita; Serie Cobaltita- Gersdorffite; Cobaltita		
Minerales Ganga	Cal, Ep, Qz, Ttn	Dg	Ttn, Dg, Cct	Ep, Chl			Qz
Otros				Sp-Cu	S-Fe-Ni		

Gn: Galena Sp: Esfalerita Ccp: Calcopirita Apy: Arsenopirita Py: Pirita  
Po: Pirrotita Qz: Cuarzo Cal: Clacita Ep: Epidota Ttn: Titanita Chl: Clorita  
Au: Oro Dg: Digenita Cct: Calcocita

Según la Tabla 4.2, minerales como la pirita y la calcopirita se encuentran presentes en la mayoría de las muestras. Esto se observa claramente en la Figura 4.3a en donde la calcopirita se encuentra rodeada de epidota, así como en las muestras PE-12 y PE-11 (Figura 4.3d y Figura 4.3e, respectivamente) donde se encuentra relacionada con sulfuros de cobre como la digenita y calcosina, siendo estas las únicas muestras con este tipo de sulfuros. En la muestra PE-13C se observó la presencia de un tipo de pirita arsenífera (Figura 4.3f) a diferencia de las piritas encontradas en el

resto de las muestras (Figura 4.3g, i y j). También se observó la presencia de minerales como galena en las muestras PE-03 y PE-24. La esfalerita se presentó en las muestras PE-13C y PE-16 como se observa en la Figura 4.3i y f. La muestra PE-24 se caracteriza por presentar asociaciones de Ag-Te-Au, Ag-Te, S-Sb-Pb y electro. Para esta muestra, en la Figura 4.3j se pudo observar un cristal de oro. Por otro lado, la muestra PE-16 presentó minerales del grupo de la cobaltita (ulmanita, serie cobaltita-gersdorfite, cobaltita) como se observa en la Figura 4.3g y de titanita como se observa en la Figura 4.3h. Entre los minerales de ganga fue muy común encontrar cuarzo, epidota y en el caso de la muestra PE-13C se encontró clorita. Otras asociaciones no muy comunes en la muestra PE-13C fue la de Sp-Cu y en la PE-16 la asociación de S-Fe-Ni.



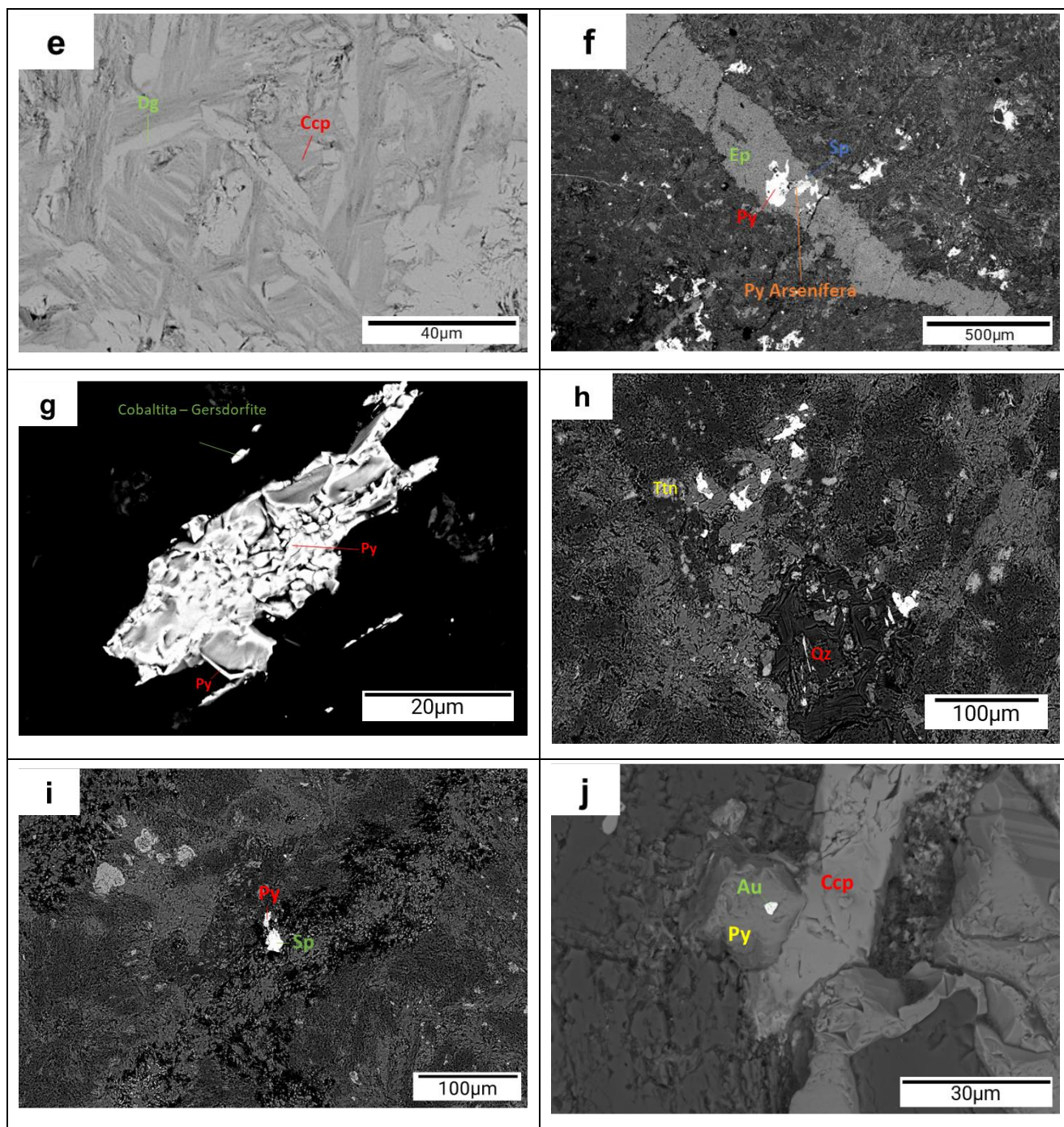


Figura 4.3 Imágenes obtenidas del análisis FEG-SEM. (a) PE-03: Cristales de Calcopirita (Ccp) sobre superficie de Epidota (Ep). (b) PE-12: Cristales de Pirrotita (Po) sobre superficie de Digenita (Dg). (c) PE-12: Superficie de Digenita (Dg) con presencia de Titanita (Ttn) y Pirrotita (Po). (d) PE-12: Calcopirita (Ccp) y Calcocita (Cct). (e) PE-11: Digenita (Dg) y Calcopirita (Ccp). (f) PE-13C: Veta de Epidota (Ep) con cristales de Pirita (Py), Esfalerita (Sp) y Pirita Arsenífera (Py Arsenífera). (g) PE-16: Cristales de Pirita (Py) y Cobaltita – Gersdorfite. (h) PE-16: Cristales de Titanita

(Ttn) y Cuarzo (Qz). (i) PE-16: Cristales de Pirita (Py) y Esfalerita (Sp). (j) PE-24: Cristal de Oro (Au) sobre base de Pirita (Py) y Calcopirita (Ccp).

## 4.2 Química de las rocas

A partir del análisis petrográfico se seleccionó las muestras para el análisis geoquímico y se agregaron muestras para una mejor distribución de resultados en la zona de estudio.

### 4.2.1 Elementos mayores

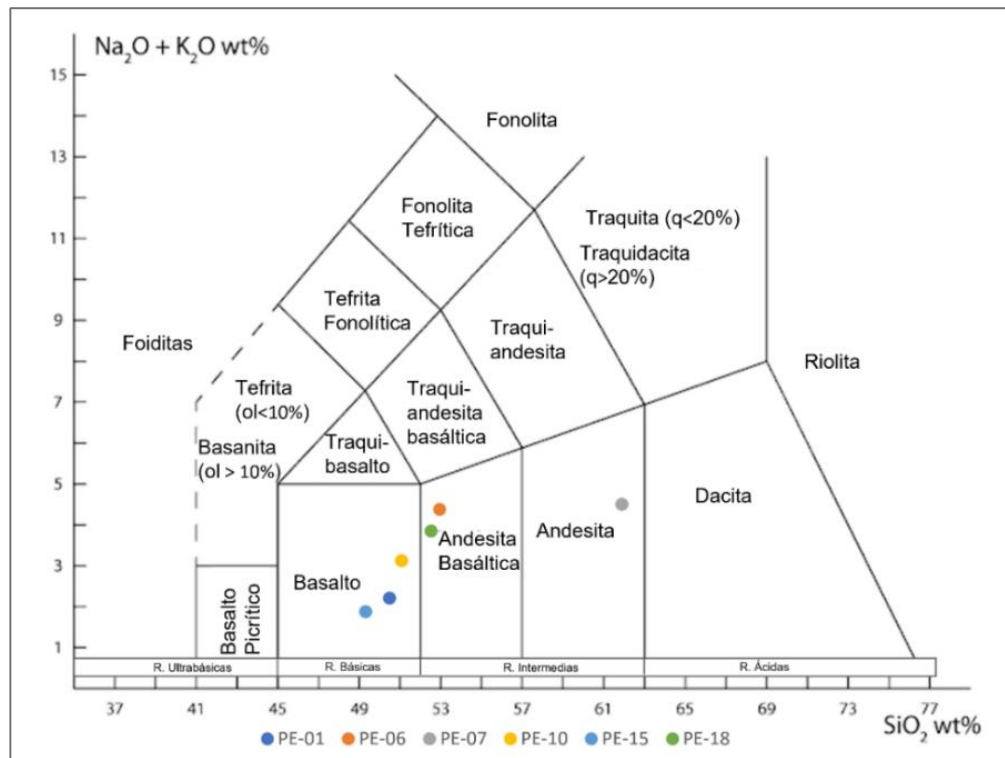
Para la roca total se realizó en primer lugar el análisis ICP-OES con el fin de identificar la composición porcentual de los elementos mayores.

**Tabla 4.3 Composición (%) de elementos mayores de la roca total mediante análisis ICP-OES.**

Muestras	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
PE-01	49,31	14,1	12,55	0,185	7,71	10,6	2,11	0,05	0,977	0,07	2,65
PE-03	50,18	12,63	12,93	0,184	6,33	11,09	2,18	0,2	1,191	0,1	<b>3,15</b>
PE-06	51,31	13,89	10,8	0,18	6,89	8,67	4,16	0,07	0,845	0,07	2,63
PE-07	60,08	16,47	6,03	0,114	3,19	6,11	4,2	0,16	0,569	0,11	2,27
PE-10	50,36	14,47	11,75	0,188	7,77	9,9	2,82	0,26	1,000	0,08	1,73
PE-13C	51,04	14,12	11,88	0,248	7,46	5,67	1,9	0,06	0,994	0,08	<b>6,48</b>
PE-15	48,62	12,79	14,11	0,199	8,34	11,71	1,77	0,09	0,895	0,07	2,05
PE-16	48,99	12,19	15,44	0,216	10,11	3,78	0,48	0,04	0,903	0,07	<b>8,34</b>
PE-18	51,69	13,41	12,13	0,207	6,44	9,42	3,67	0,11	1,223	0,11	2,1
PE-19	48,05	12,78	13,9	0,151	5,58	7,35	1,02	0,06	1,465	0,12	<b>10,37</b>

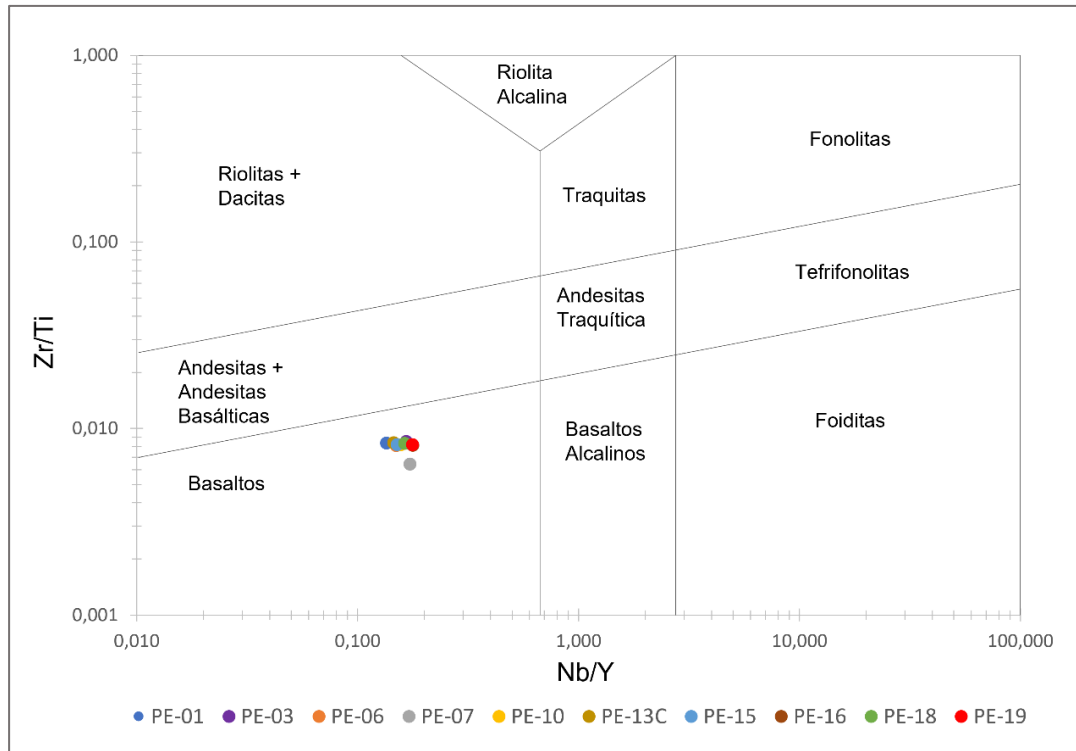
Los resultados encontrados en la Tabla 4.3 son los datos netos en donde se considera el contenido de agua en las muestras (LOI) observando que para PE-03, PE-13C, PE-16 y PE-19 presentan un contenido porcentual mayor a 3 indicando que las rocas se encuentran con alteraciones. Debido a la presencia de estas alteraciones se decidió realizar 2 tipos de diagramas

para la clasificación de las muestras. Para el diagrama de clasificación TAS (Le Bas et al., 1986) los resultados fueron recalculados sobre una base anhidra. Y para el diagrama de Zr/Ti vs Nb/Y según Pearce (1996) se emplearon los datos directos de la Tabla 4.3 aún con las concentraciones de LOI presente.



**Figura 4.4 Diagrama TAS de clasificación de las muestras según Le Bas et al. (1986).**





**Figura 4.5 Diagrama Zr/Ti vs Nb/Y para rocas volcánicas según Pearce (1996).**

En el diagrama de TAS (Figura 4.4.) se aprecia que las muestras PE-01, PE-15 y PE-10 corresponden a basaltos, las muestras PE-06 y PE-18 corresponden a rocas de composición andesítica-basáltica y la muestra PE-07 corresponde a una andesita. Mientras que el diagrama Zr/Ti vs Nb/Y (Figura 4.5) indicó que todas las muestras presentan composición basáltica.

#### 4.2.2 Elementos en traza

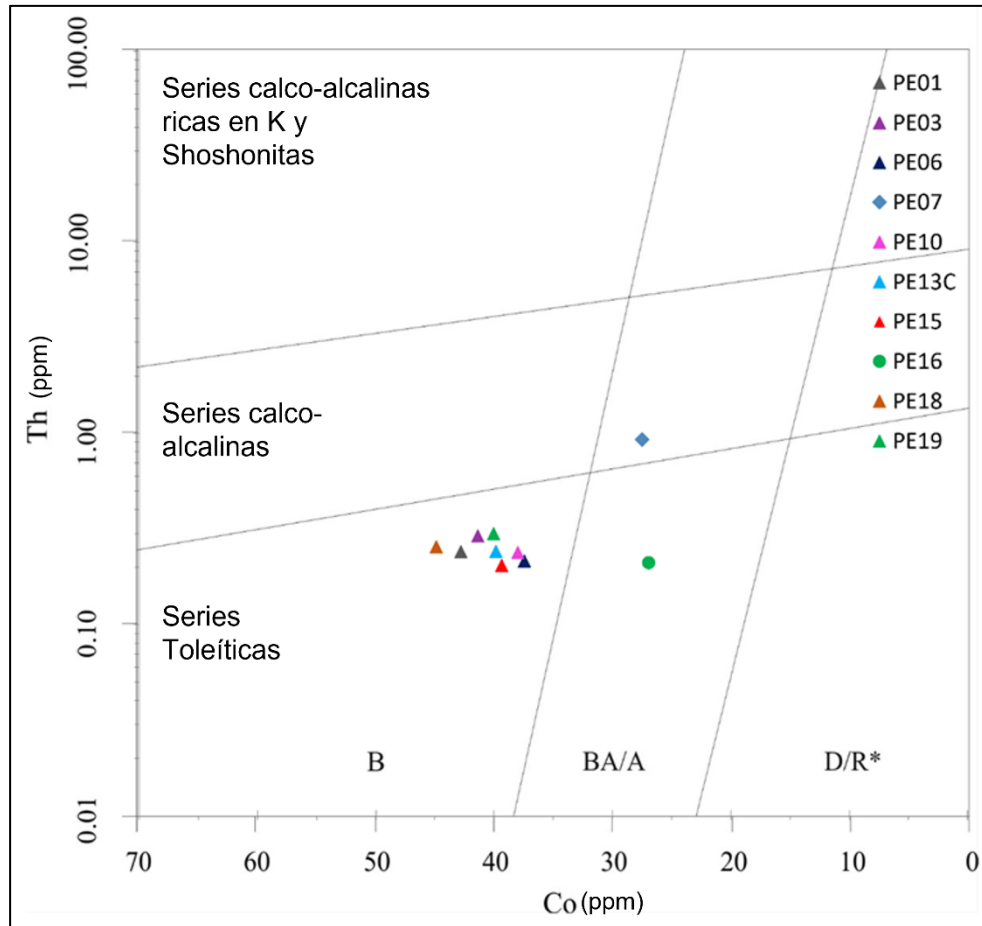
El análisis ICP-MS, realizado con las disoluciones de las muestras en polvo, permitió obtener la composición elemental de las muestras en unidades de partes por millón (ppm), mientras que para obtener el contenido en Hg (ppm) se empleó el analizador directo de mercurio DMA-80. Los resultados se muestran en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Análisis geoquímico de los elementos en traza (ppm) de las muestras pulverizadas por medio de ICP-MS y analizador de Hg.**

ELEMENTO	PE-01	PE-03	PE-06	PE-07	PE-10	PE-13C	PE-15	PE-16	PE-18	PE-19
Li	6,8	9,4	4,8	4,7	4,9	13,7	4,6	25,1	4,0	12,8

Be	0,26	0,30	0,23	0,59	0,24	0,23	0,22	0,21	0,34	0,39
V	331	381	303	154	327	318	305	299	366	374
Cr	231	101	189	53	232	225	212	212	111	113
Co	43	41	37	28	38	40	39	27	45	40
Ni	102	77	96	15	103	102	97	89	83	84
Cu	122	147	61	122	94	116	22	191	207	151
Zn	80	91	76	40	93	1358	54	163	80	87
Ga	14,6	14,6	15,4	15,6	14,4	14,2	15,3	13,8	15,1	14,9
Rb	0,42	3,79	0,28	3,66	5,93	0,71	1,41	1,38	1,12	2,98
Sr	84	75	126	242	81	61	80	14,5	100	94
Y	23,7	24,8	19,6	16,9	21,2	22,0	20,6	16,5	25,2	24,9
Zr	48	57	41	43	45	45	41	40	38	66
Nb	3,2	4,1	2,93	2,91	3,3	3,2	3,1	2,93	4,1	4,1
Mo	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6
Ag	0,26	0,31	0,20	0,31	0,40	0,46	0,19	0,65	0,22	0,32
Cd	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,50	4,62	<0,2	0,34	<0,2	<0,2
Sn	0,51	0,58	0,45	0,36	0,58	0,53	0,59	0,77	0,56	0,61
Sb	<1,6	3,5	1,12	<1,6	8,9	18,0	19,7	6,9	<1,6	3,7
Cs	0,11	0,28	0,07	0,39	1,17	1,54	0,96	1,15	0,30	4,55
Ba	12,7	9,7	25,8	118	21,7	16,0	8,2	2,8	21,8	31
La	2,84	3,4	2,51	6,4	2,58	3,1	2,69	1,98	3,43	3,5
Ce	7,0	9,0	6,4	13,6	6,9	8,1	6,9	5,3	9,0	9,5
Pr	1,14	1,43	1,01	1,93	1,11	1,27	1,08	0,83	1,41	1,52
Nd	5,7	7,4	5,2	8,6	5,8	6,4	5,6	4,3	7,2	7,8
Sm	1,93	2,48	1,74	2,16	1,99	2,15	1,87	1,50	2,44	2,58
Eu	0,75	0,93	0,79	0,71	0,82	0,84	0,95	0,53	0,96	0,89
Gd	2,80	3,33	2,49	2,47	2,74	2,98	2,63	2,05	3,37	3,43
Tb	0,54	0,64	0,46	0,44	0,53	0,55	0,50	0,41	0,64	0,65
Dy	3,6	4,3	3,14	2,73	3,5	3,7	3,4	2,76	4,3	4,3
Ho	0,82	0,94	0,71	0,60	0,79	0,81	0,77	0,62	0,94	0,97
Er	2,57	2,88	2,19	1,82	2,35	2,53	2,33	1,95	2,81	2,88
Tm	0,38	0,43	0,31	0,26	0,35	0,36	0,33	0,28	0,41	0,42
Yb	2,32	2,62	1,92	1,66	2,23	2,27	2,10	1,84	2,54	2,71
Lu	0,36	0,41	0,31	0,25	0,34	0,35	0,33	0,29	0,40	0,41
Hf	1,41	1,70	1,27	1,27	1,37	1,38	1,25	1,23	1,34	2,02
Ta	0,22	0,27	0,20	0,20	0,22	0,22	0,24	0,20	0,26	0,30
W	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	0,54	0,63	0,83	<0,4	<0,4	<0,4
Pb	<2	<2	<2	<2	<2	3,11	<2	<2	<2	<2
Th	0,24	0,29	0,21	0,93	0,24	0,24	0,20	0,21	0,26	0,30
U	0,07	0,08	0,06	0,29	0,07	0,07	0,07	0,06	0,09	0,09
Hg	0,014	0,011	0,004	0,003	0,0025	0,0185	0,003	0,006	0,002	0,148

Con los resultados de los elementos en traza se realizó el diagrama de discriminación de la serie magmática según Hastie et al. (2007) con el cual se logró determinar las características del arco magmático que formaron las estructuras rocosas de Bella Rica.

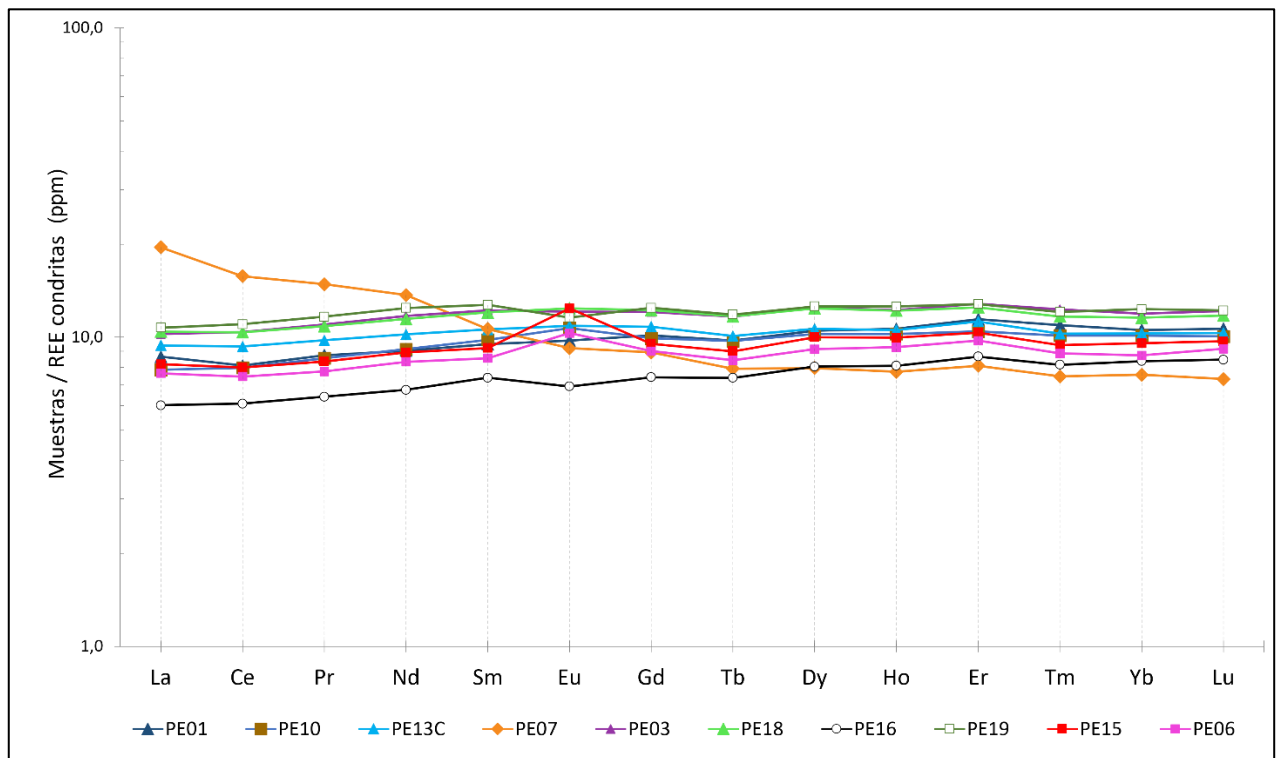


**Figura 4.6 Diagrama Th (ppm) vs Co (ppm) según Hastie et al. (2007).**

El diagrama Th vs Co (Figura 4.6) indicó que la muestra PE-07 se encuentra clasificada dentro de la serie calco-alcalina con composición basáltico-andesítico, la muestra PE-16 se encuentra en el rango de serie toleítica con composición basáltico-andesítico, y las muestras PE-01, PE-03, PE-06, PE-10, PE-13C, PE-15, PE-18 y PE-19 corresponden a la serie toleítica de basaltos.

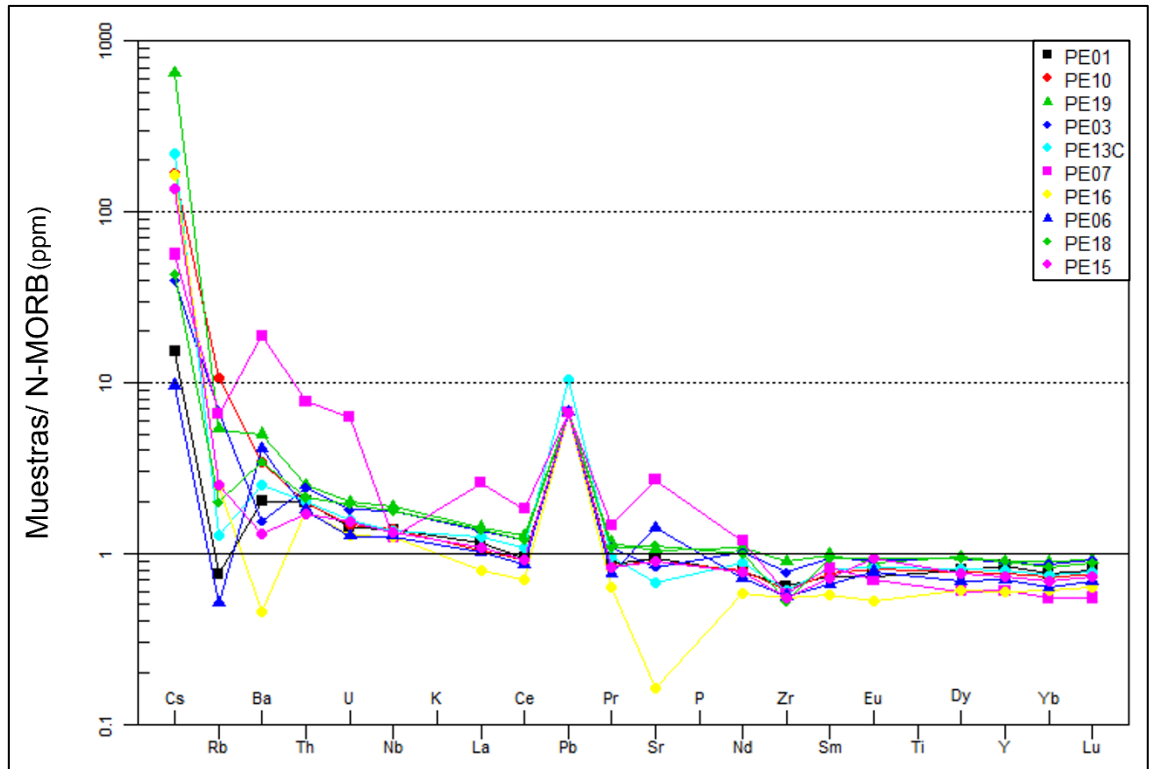
Además, los resultados de la Tabla 4.4. permitieron elaborar diagramas de normalizaciones de las tierras raras (REE) con el objetivo de verificar las características magmáticas identificadas con el diagrama de la Figura 4.6. El diagrama de concentraciones de REE normalizadas con respecto a condritas de Nakamura (1974) se empleó ya que la zona de estudio es identificada como un depósito de pórfidos cupríferos. Y también se utilizó

el diagrama multielemental de manto primitivo normalizado al N-MORB según Sun & McDonough (1989).



**Figura 4.7 Diagrama de REE normalizado a condritas según Nakamura (1974) a partir de muestras pulverizadas.**

En el diagrama de concentraciones de REE (Figura 4.7) se observó que PE-07 presenta una afinidad diferente al resto de muestras analizadas con un enriquecimiento en tierras raras ligeras y un empobrecimiento en tierras raras pesadas. Además, se identificó anomalías positivas en Eu para las muestras PE-06, PE-10 y PE-15. En su mayoría el patrón refleja un comportamiento de tipo basalto toleítico a excepción de la muestra PE-07.



**Figura 4.8 Diagrama de manto primitivo normalizado al N-MORB según Sun & McDonough (1989) a partir de muestras pulverizadas.**

El diagrama de manto primitivo (Figura 4.8) confirmó que la muestra PE-07 es muy diferente al resto de las muestras por la presencia de una anomalía negativa de Nb, relaciones mayores en Th/Nb, Ba/Nb y La/Nb las cuales concuerdan con las características de una afinidad calco-alcalina. Los resultados también mostraron anomalías positivas de Ba para las muestras PE-07, PE-06 y PE-13C, y anomalía negativa de Ba y Sr para la muestra PE-16. Para las muestras PE-06 y PE-01 se identificó Rb bajo 1. El diagrama reflejó que todas las muestras presentan una fuerte anomalía positiva de Pb.

### 4.2.3 Mapas de concentración de las rocas

Los resultados de la química de elementos en traza también permitieron elaborar mapas de concentración de los elementos como Ag, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn (Figura 4.9 y Figura 4.10). Se observaron concentraciones de Ag (Figura 4.9a) entre 0,31 y 0,48 ppm en la zona norte del área de estudio. Hacia el SW, se observaron concentraciones de Cr (Figura 4.9b) entre 212 a 232 ppm y concentraciones de Hg (Figura 4.9d) que iban desde los 0,0057 a 0,014 ppm. El Cu (Figura 4.9c) se extienden a lo largo de la región en cantidades de 22 a 151 ppm incrementando sus concentraciones en dirección W-E.

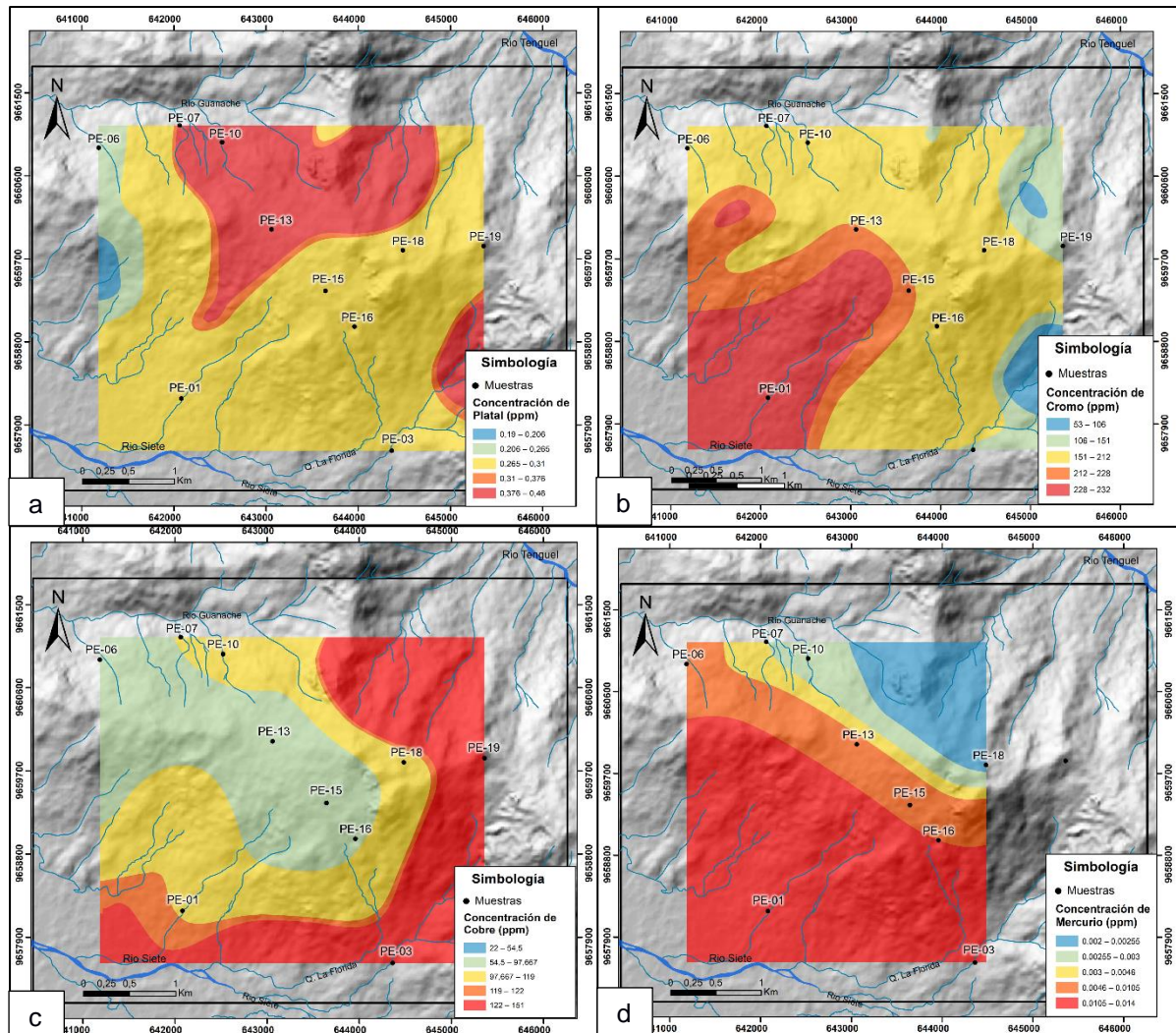
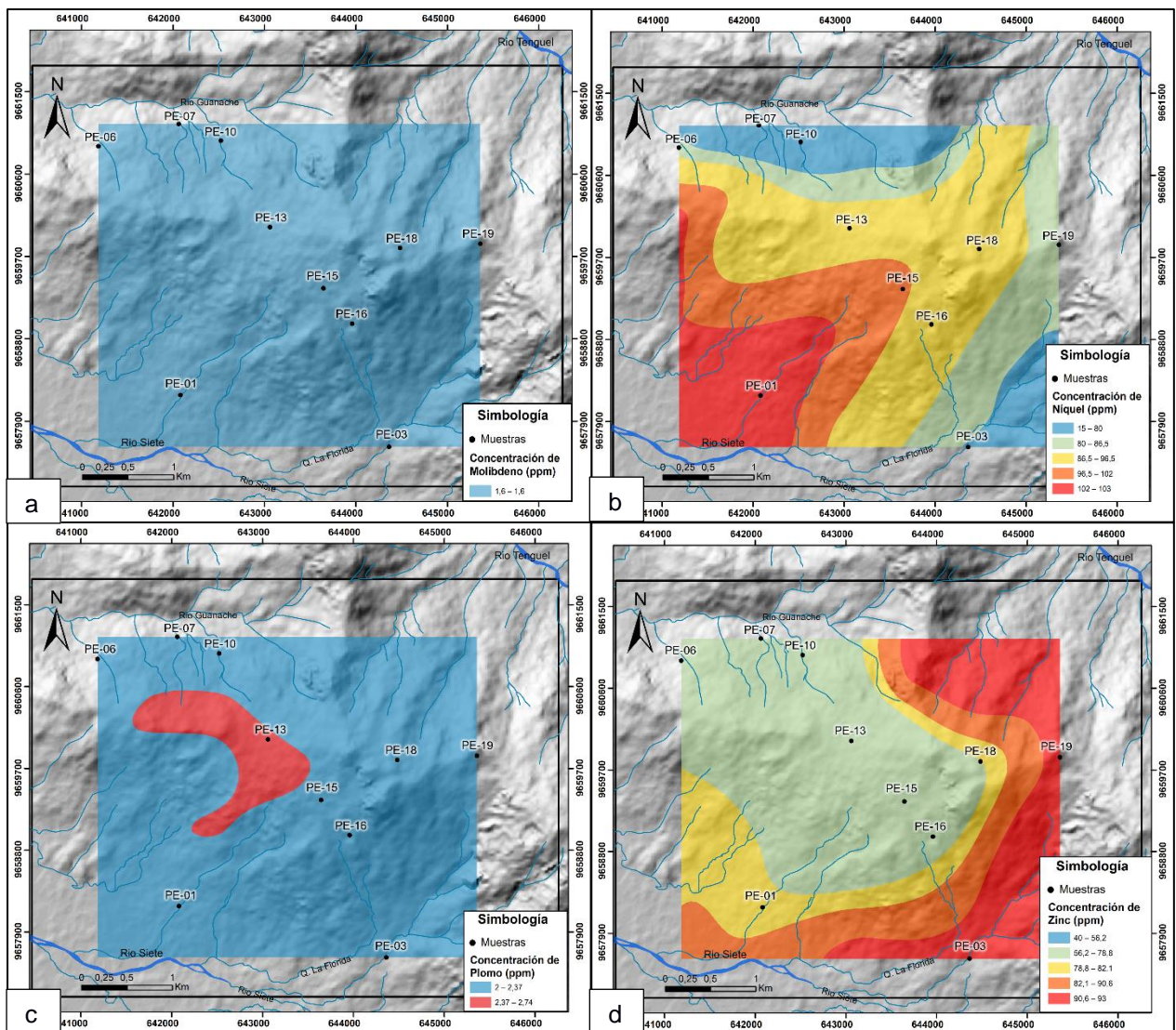


Figura 4.9 Mapas de concentraciones químicas de elementos en las rocas de Bella Rica: (a) Plata. (b) Cromo. (c) Cobre. (d) Mercurio.

Las concentraciones de Ni (Figura 4.10b) incrementan de NE a SW de 83,83 a 103 ppm. El Pb (Figura 4.10c) por su parte presentó concentraciones de 3,11 ppm en la zona central del área de estudio y de 2 ppm en la zona restante. Las concentraciones de Zn (Figura 4.10d) se observaron en aumento de NW a SE y en la zona NE con 40 a 93 ppm. Mientras que las concentraciones de Mo (Figura 4.10a) se mantuvieron bajo los 1,6 ppm en todo el territorio de Bella Rica.



**Figura 4.10** Mapas de concentraciones químicas de elementos en las rocas de Bella Rica: (a) Molibdeno. (b) Níquel. (c) Plomo. (d) Zinc.

### 4.3 Química de clorita y epidota

#### 4.3.1 Clorita

Para un detalle más específico de la mineralogía primaria se realizó el análisis EPMA en aquellas muestras donde se observó mayor contenido de epidota y clorita al microscopio petrográfico y SEM. Estas muestras fueron la PE-07, PE-10 y PE-15, las zonas estudiadas en cada una se pueden observar en el Apéndice C.

El resultado de los elementos se recalculó tomando en consideración la fórmula estructural de la clorita (Tabla 4.5) y epidota (Tabla 4.6). Para la clorita se obtuvo el promedio de temperatura de formación de este mineral tomando en consideración 4 geotermómetros (C&N85: Cathelineau & Nieva, 1985; K&M87: KRANIDIOTIS & Mc Lean 1987; C88: Carthelineau 1988; J91: Jowett 1991), para la muestra PE-10 Y PE-15 se obtuvo que la temperatura de formación de la clorita fue de alrededor de 288°C, en cambio para las muestras PE-07 la temperatura de formación es de aproximadamente 281°C.

Los resultados completos de temperatura para las tres muestras se muestran en el Apéndice C al final del documento.

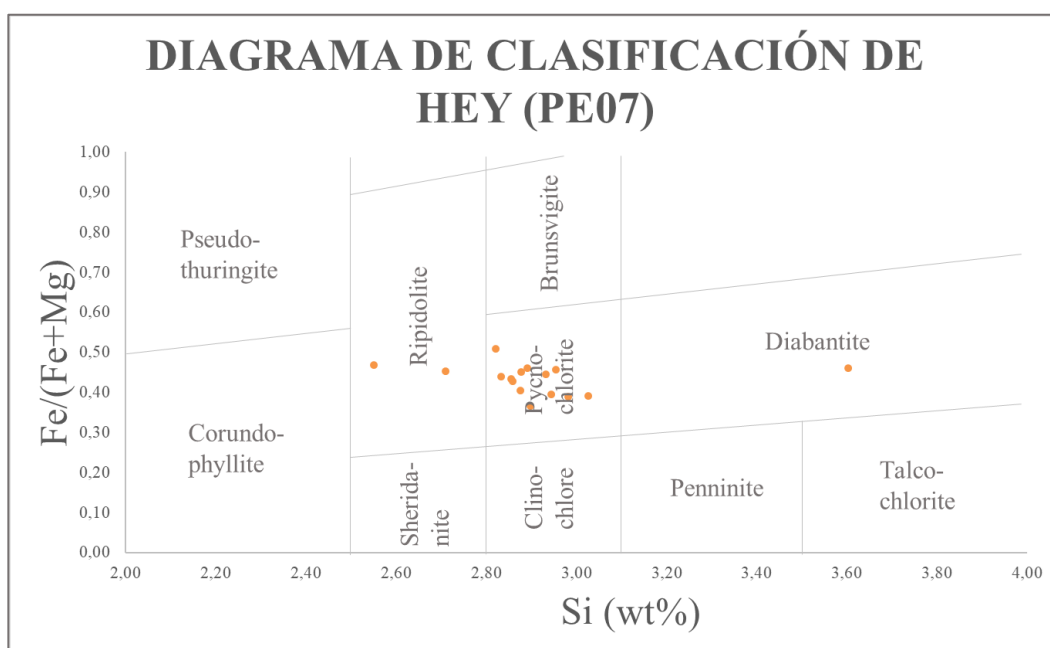
**Tabla 4.5. Resultados del EPMA para las muestras PE-15, PE-10 y PE-07, obtención de la temperatura de la Clorita con 4 diferentes geotermómetros.**

Muestra		PE-15	PE-10	PE-07
Geotermómetros	C&N85	264	264	258
	K&M87	265	265	259
	C88	312	312	303
	J91	313	312	303
Mean T (°C)		288	288	281

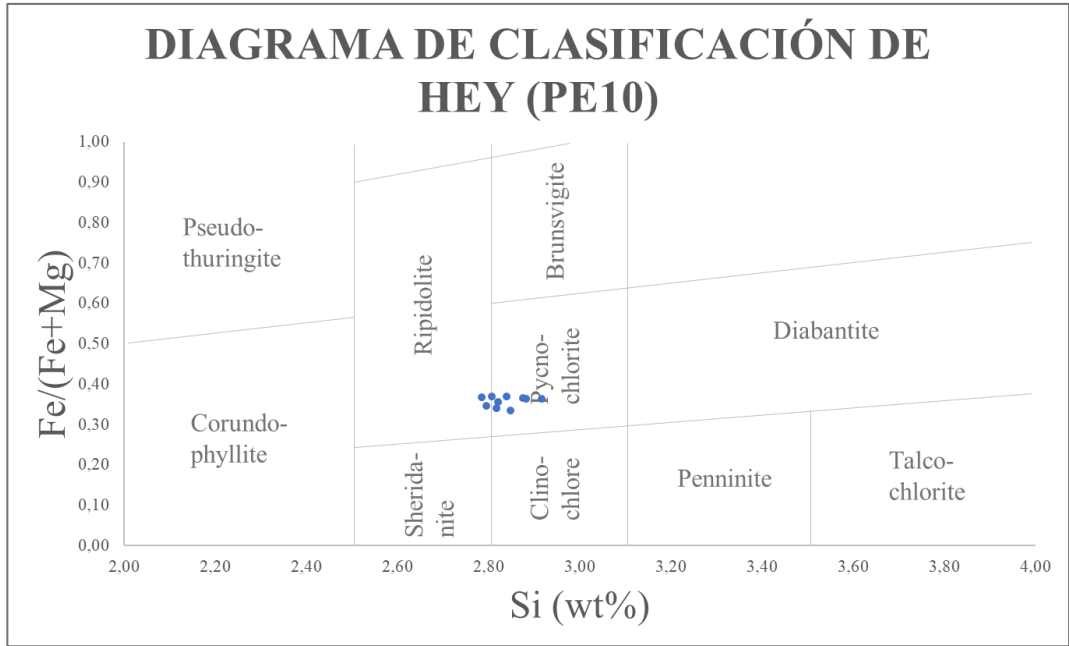


Se graficaron los resultados de Si y Fe/(Fe+Mg) de la clorita en el Diagrama de Hey (1954) para conocer en específico el tipo de clorita analizada. En los diagramas se observa que las muestras PE-10 Y PE-07 corresponden en su mayoría a picnocloritas (Figura 4.11 y 4.12), mientras que la muestra PE-15 corresponde a una ripidolita (Figura 4.13), con una relación de Fe/(Fe+Mg) que varía entre 0.35 – 0.55 (Figura 4.11 – 4.13).

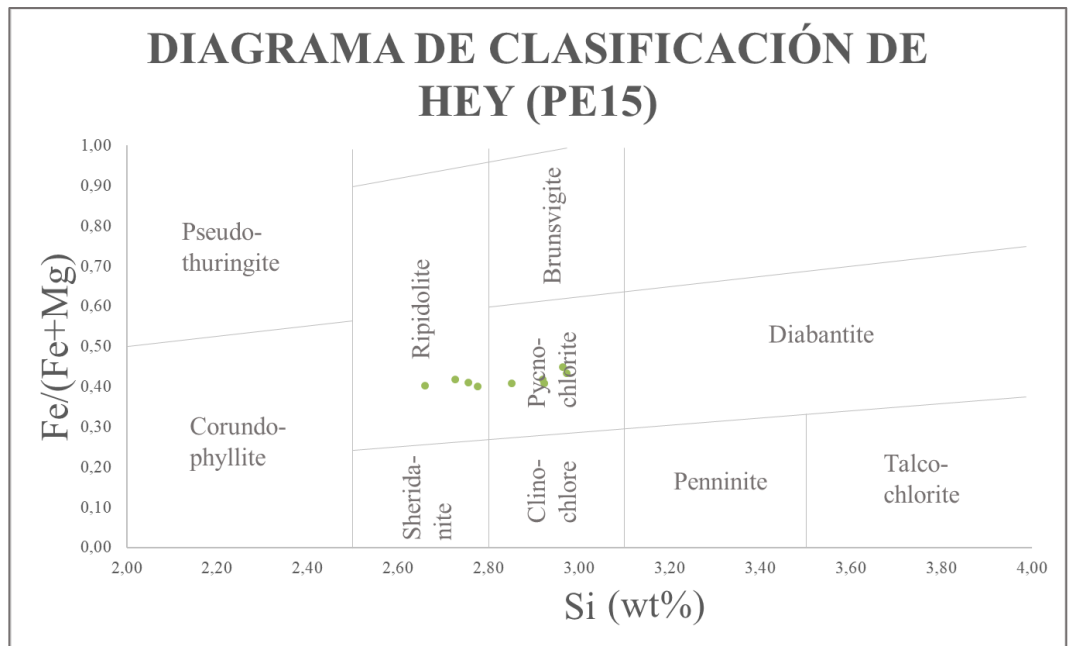
Las picnocloritas son cloritas propilíticas formadas a 240 – 340°C con una relación alta de Fe/(Fe+Mg). Estas cloritas muestran alto contenido de V, Cr, Co, Cu, Zn y Rb, y bajo contenido en Ni, Sc, La, Ce y U (Georgieva & Nedialkov, 2017). Por otro lado, la ripidolita se puede describir como una clorita con contenido medio de Fe con una distribución casi simétrica de metales (Hamer, Graham, Amrhein & Bozhilov).



**Figura 4.11 Diagrama de clasificación de la Clorita para la muestra PE-07 según Hey (1954).**



**Figura 4.12** Diagrama de clasificación de la Clorita para la muestra PE-10 según Hey (1954).



**Figura 4.13** Diagrama de clasificación de la Clorita para la muestra PE-15 según Hey (1954).

### 4.3.2 Epidota

Por otro lado, se analizó también la epidota en la muestra PE-15 (Tabla 4.6) y se obtuvo un contenido promedio de 22 Xps, que corresponde a la fracción molar de la pistacita, una variedad de epidota ferrosa.

**Tabla 4.6 Resultados obtenidos del EPMA para la composición química (wt%) de la Epidota y recálculo de la fórmula estructural.**

Muestra	PE-15														
	an1 nc	an2 bd	an3 nc	an4 bd	an5 nc	an6 bd	an21	an22	an23	an24	an31	an32	an33	an34	an35
<b>SiO2</b>	40,04	37,80	39,07	38,15	37,95	38,12	37,62	38,29	37,97	38,48	38,11	37,83	37,90	38,66	38,17
<b>TiO2</b>	0,00	0,11	0,05	0,06	0,00	0,10	0,04	0,05	0,01	0,00	0,06	0,03	0,13	0,09	0,14
<b>Al2O3</b>	29,51	23,64	24,37	25,81	25,08	24,39	26,93	24,18	24,66	25,46	26,11	25,60	24,27	24,70	25,71
<b>Fe2O3</b>	6,70	13,08	12,48	10,20	10,60	12,65	9,27	12,43	11,97	11,44	10,39	11,80	12,33	12,54	10,40
<b>MnO</b>	0,06	0,14	0,04	0,05	0,06	0,26	0,55	0,00	0,09	0,10	0,14	0,39	0,09	0,09	0,18
<b>MgO</b>	0,06	0,02	0,00	0,04	0,05	0,01	0,16	0,04	0,01	0,04	0,00	0,12	0,10	0,08	0,07
<b>CaO</b>	23,99	23,47	23,83	23,84	23,72	23,59	22,81	23,81	23,56	23,82	23,82	22,65	23,50	23,35	23,68
<b>Na2O</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,03	0,02	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00
<b>K2O</b>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
<b>Cr2O3</b>	0,00	0,05	0,00	0,03	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05
<b>Tot</b>	100,38	98,31	99,85	98,18	97,52	99,16	97,44	98,83	98,31	99,34	98,66	98,46	98,33	99,52	98,40
<b>Si</b>	3,02	3,00	3,03	3,00	3,01	2,99	2,97	3,01	3,00	3,00	2,98	2,97	2,99	3,01	2,99
<b>Al vi</b>	2,62	2,21	2,23	2,39	2,34	2,25	2,50	2,24	2,29	2,34	2,41	2,37	2,26	2,27	2,38
<b>Ti</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
<b>Fe3+</b>	0,38	0,78	0,73	0,60	0,63	0,75	0,55	0,74	0,71	0,67	0,61	0,70	0,73	0,73	0,61
<b>Fe2+</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Mn</b>	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
<b>Mg</b>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Cr</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Ca</b>	1,94	1,99	1,98	2,00	2,01	1,98	1,93	2,00	1,99	1,99	2,00	1,91	1,99	1,95	1,99
<b>Xps</b>	0,13	0,26	0,25	0,20	0,21	0,25	0,18	0,25	0,24	0,22	0,20	0,23	0,24	0,24	0,21
<b>Mean Xps</b>	0,22														

#### 4.4 Química de sedimentos

La química de los sedimentos (PRODEMINCA,1998; Jiménez-Oyola et al., 2021) se analizó estadísticamente y se elaboraron mapas de concentraciones de los elementos más significativos (Figura 4.14 y Figura 4.15). Estos mapas muestran las concentraciones en ppm de Ag, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb y Zn en la zona de estudio de Bella Rica clasificando el tipo de anomalías encontradas según la Tabla 3.2 con datos específicos calculados para cada elemento analizado.

Los resultados mostraron concentraciones de Ag (Figura 4.14a) con anomalías entre 3,75 a 28,3 ppm al NW y SW de la zona de estudio. En la misma zona y hacia el NE se observaron concentraciones de Cr (Figura 4.14b) con anomalías entre 56,3 a 309,79 ppm. Por otro lado, se presencian anomalías medias a altas de Cu (Figura 4.14c) que van desde 157,33 a 394,68 ppm y de Hg (Figura 4.14d) entre 0,15 a 33,84 ppm en la zona NE, NW y SW de Bella Rica.

Las concentraciones de Mo (Figura 4.15a) se presentaron con anomalías bajas y medias de 3,79 a 16,17 ppm hacia el norte. Se observaron anomalías medias y altas de Ni (Figura 4.15b) de 36,12 a 393,05 ppm, de Pb (Figura 4.15c) entre 28,62 a 1832 ppm y de Zn (Figura 4.15d) entre 184,2 a 1221 ppm en las zonas NE, NW y SW de la zona de estudio.

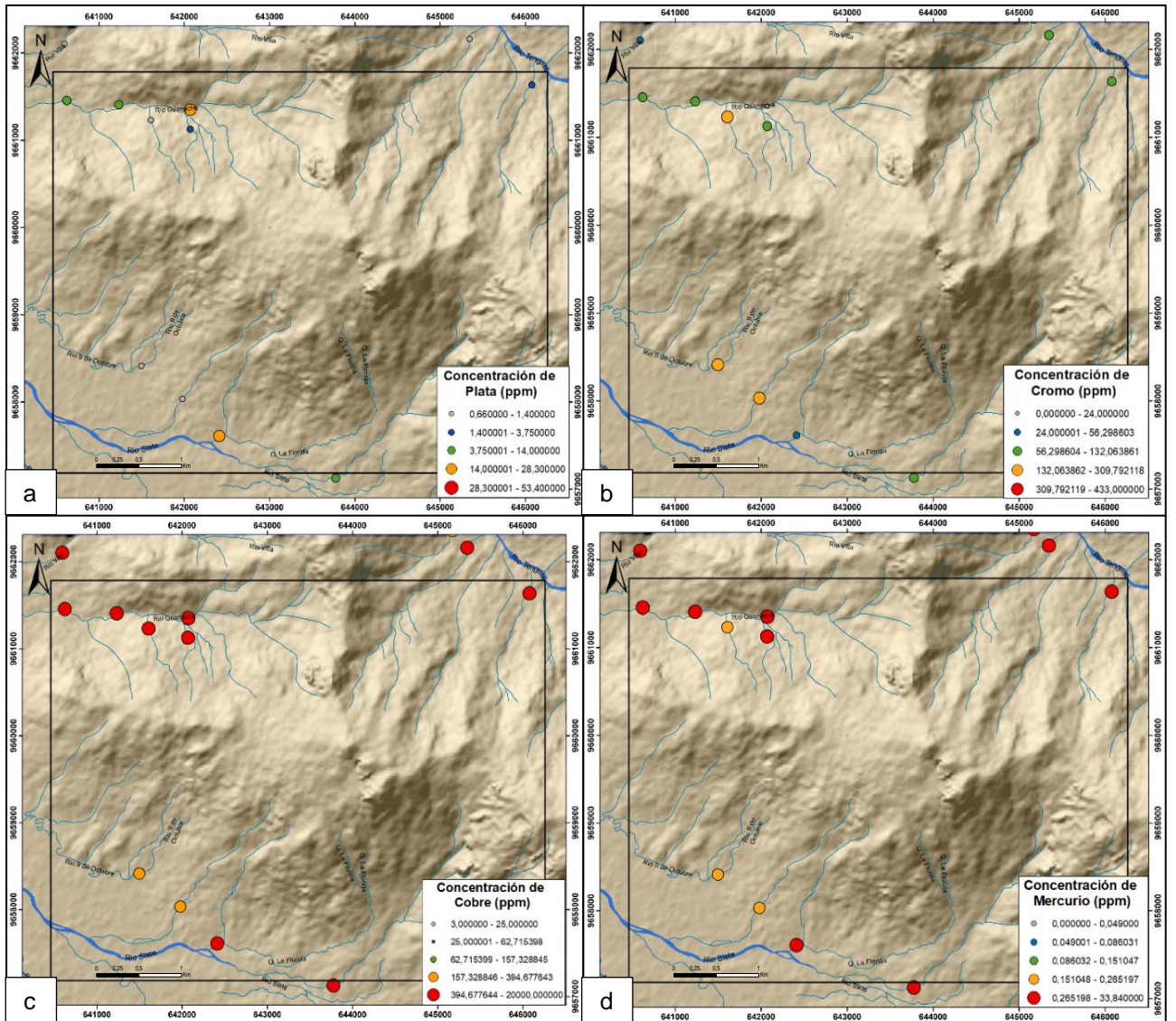
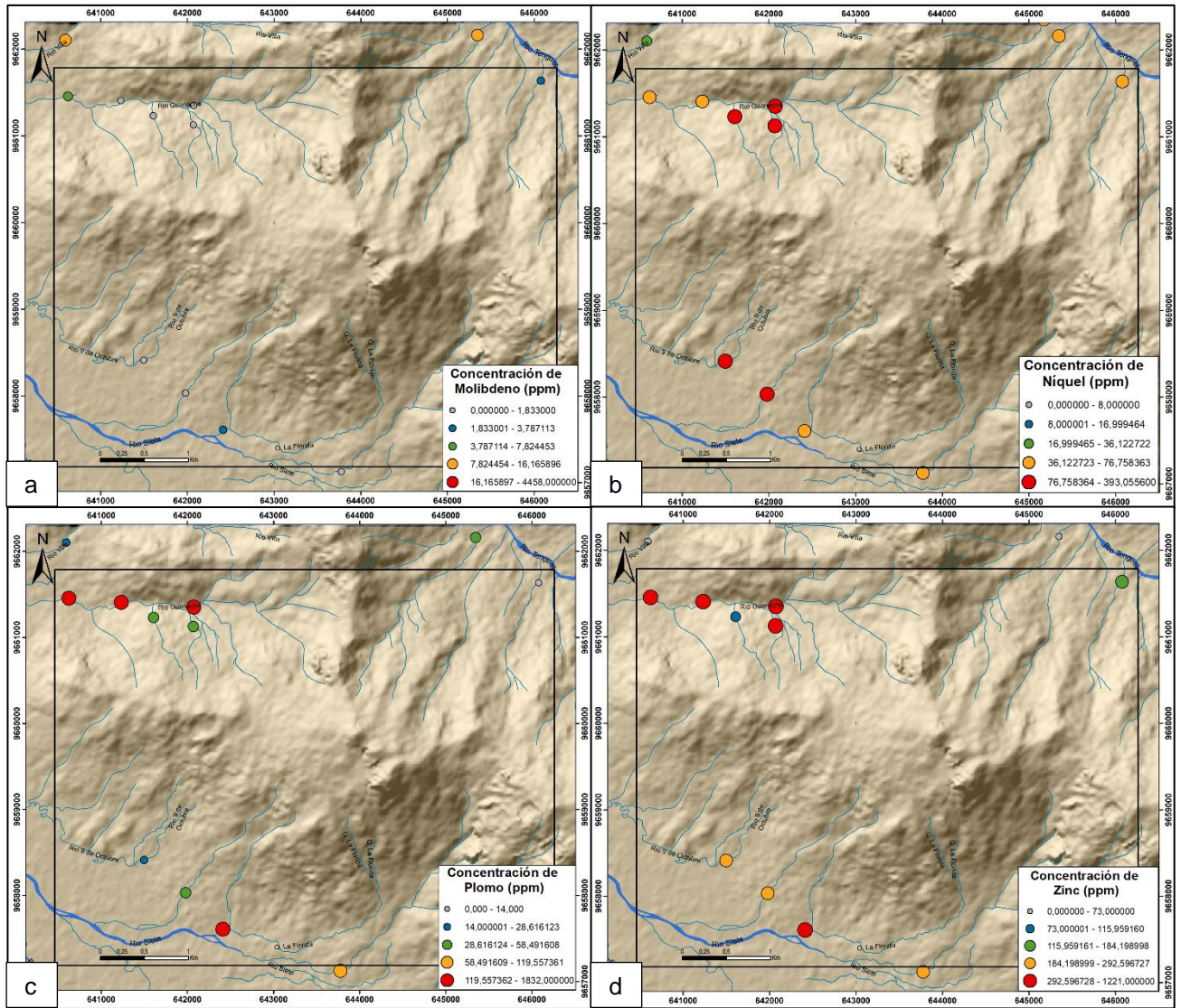


Figura 4.14 Mapas de concentraciones químicas de elementos en Bella Rica: (a) Plata. (b) Cobre. (c) Cromo. (d) Mercurio.



**Figura 4.15 Mapas de concentraciones químicas de elementos en Bella Rica: (a) Molibdeno. (b) Níquel. (c) Plomo. (d) Zinc.**

Estos mapas de concentraciones de sedimentos fueron correlacionados con los mapas de la química en las rocas para observar las diferencias en las anomalías encontradas. Estas fueron clasificadas en dos tipos: anomalías naturales y anomalías no naturales. Las anomalías naturales se determinaron por la similitud en los rangos de concentraciones en una misma zona tanto para sedimentos como para rocas mientras que las anomalías no naturales se determinaron por el hallazgo de concentraciones, en sedimentos, en zonas donde no se relacionaban con las concentraciones del elemento en la roca.

# CAPÍTULO 5

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1 Tipología de roca

Según el estudio petrográfico, las muestras presentan en su mayoría textura afanítica siendo las únicas de textura porfiríticas las muestras PE-07, PE-08 y PE-09 que corresponden a rocas intrusivas. Esta textura porfirítica puede indicar dos o varias etapas de enfriamiento del sistema magmático.

Según el estudio geoquímico de las muestras, analizando los elementos mayores se obtuvo que en su mayoría corresponden a rocas de composición basáltica toleíticas y muestras como PE-06 o PE-18 corresponden a rocas andesíticas basálticas según la clasificación TAS (Figura 4.4). Tomando en consideración la clasificación de Pearce (1996) (Figura 4.5), las muestras serían en su totalidad basaltos de afinidad toleítica. Por otro lado, la muestra PE-07 una de las que se encuentra más al norte de la zona de estudio, presentó composición andesítica (Figura 4.6) y corresponde a la serie calco-alcalina.

La diferencia en los gráficos se debe a que cada uno evidencia una característica en específico, por ejemplo, la Figura 4.5 indica si la roca es alcalina o toleítica, y la Figura 4.6 brinda información de las características del arco, si este es toleítico o shoshonítico.

El diagrama de REE normalizado a condritas (Figura 4.7) y el de manto primitivo normalizado al N-MORB (Figura 4.8) confirman la clasificación obtenida del diagrama Th vs Co (Figura 4.6) ya que las muestras presentan en general un comportamiento de basalto con afinidad toleítica, a diferencia de la muestra PE-07. Y la Figura 4.8 presenta una anomalía negativa de Nb para la muestra PE-07 y relaciones mayores entre Th/Nb, Ba/Nb y La/Nb lo cual confirma que esta muestra es una andesita basáltica con afinidad calco-

alcalina. Otras anomalías como la variación del contenido de Cs, Ba, Rb y Sr sugieren que las muestras se encuentran alteradas.

En 1995, la Misión Belga-Ruilova identificó cuerpos dioríticos (Ruilova, 2015) que se presentaban en el área con espesor entre 20 a 100 metros, este cuerpo identificado como intrusivo se encuentra en contacto con la Unidad Pallatanga debido a la presencia de fallas hacia el norte de la zona de estudio. Las muestras PE-07, PE-08 y PE-09 con textura porfirítica encontradas en Bella Rica, presentan características similares a los intrusivos cercanos a la falla del Río Guanache. Se puede observar la ubicación de las muestras con respecto a la geología de Bella Rica en el mapa geológico de la Figura 3.4.

Además, todos los análisis químicos de la muestra PE-07 presentaron claramente diferencias con el resto de las muestras, comprobando que su composición es diferente al de los basaltos toleíticos que constituyen a la Unidad Pallatanga presente en la Concesión Minera Bella Rica. Esto indica que esta Unidad se formó bajo el régimen del arco volcánico del Cretácico compuesta por basaltos toleíticos y andesitas calcoalcalinas tal como expuso McCourt et al. (1997) en un estudio de la Cordillera Occidental.

Como se mencionó anteriormente, la muestra PE-07 es de gran interés ya que presenta características diferentes al resto de las muestras. La toma de muestras cercanas a la PE-07 hubiera sido esencial para profundizar la investigación de esta zona.

## **5.2 Mineralizaciones y alteraciones**

Las muestras presentaron texturas de lavas con vetas de cuarzo como uno de los minerales más comunes, otras muestras presentaron vetas de calcita. Se identificaron minerales como epidota y clorita que son típicos de alteraciones hidrotermales producto del ascenso de fluidos que recorren las fracturas, comunes de las rocas en la Unidad Pallatanga. Otros minerales corresponden a plagioclasas, anfíboles, opacos, galena y sulfuros. Bella Rica se caracteriza por sus vetas de tipo Stockwork en las cuales se encuentran



los sulfuros en especial asociaciones de pirita y calcopirita que son conocidos por albergar oro, motivo por el cual las actividades mineras en la zona han aumentado con el pasar de los años. En la muestra PE-13C se encontró pirita arsenífera. Otros sulfuros encontrados son los de cobre conocidos como digenita y calcosina que solo se encontraron en las muestras PE-11 y PE-12.

Un hecho interesante fue el hallazgo de inclusiones fluidas en la muestra PE-03, la cual se encuentra ubicada al sureste de la zona de estudio a un lado de la quebrada por donde pasa el Río Siete. Se encontraron inclusiones de fase II donde domina el líquido, pero se observaron también inclusiones donde domina el vapor lo que puede indicar la presencia de un proceso de ebullición. La presencia de inclusiones fluidas en buen estado en los cristales de cuarzo pueden ser un objeto de estudio de gran interés para conocer en más detalle las características de los fluidos del depósito hidrotermal que provocaron las alteraciones y mineralizaciones en las rocas de la Unidad Pallatanga.

La muestra PE-18 presenta una veta y los sulfuros se pueden observar dentro y fuera de la veta lo que puede indicar que las vetas tuvieron un origen epigenético. Para una mejor identificación de los minerales presentes en las muestras se empleó FEG-SEM en donde se observó la presencia de galena (PE-03 y PE-24), esfalerita (PE-13C y PE-16), minerales del grupo de la cobaltita (PE-16) y clorita (PE-13C). Además, se identificaron asociaciones de Ag-Te-Au, Ag-Te, S-Sb-Pb, Sp-Cu, S-Fe-Ni y electro (aleación de Au-Ag) en las muestras.

En general, las vetas encontradas en las secciones delgadas fueron de cuarzo (PE-03), clorita (PE-19) y epidotas (PE-16 Y PE-13C). Estos minerales son fuertes indicadores de una alteración propilítica (clorita-epidota y carbonatos) en sistemas de pórfidos cupríferos, lo cual se puede relacionar a un ambiente de formación epi-mesotermal.

### **5.3 Indicadores geotérmicos**

Con el análisis detallado de la clorita en la microsonda se pudo estimar la temperatura a la que se formó este mineral (entre 281–288°C), y según la clasificación de Hey (Figura 4.8 – 4.10) estas cloritas corresponderían a picnoclorita y ripidolita. Por otro lado, los resultados de la epidota muestran la distribución de los componentes de la pistacita (Xps) con un rango de 13–25% y un promedio de 22% (Tabla 4.8), encontrándose dentro del rango típico de las epidotas hidrotermales según Cavarretta et al. (1982) y Bird et al. (1984), además el valor de Xps indica que las epidotas tuvieron su origen por alteración de la plagioclasa según el rango de Siqueira et al., 2021 (<25%).

Los datos obtenidos mediante indicadores geotérmicos son un nuevo aporte al conocimiento que se tenía sobre este tipo de depósito epi-mesotermal. Por medio de la microsonda se logró determinar la relación que tienen las cloritas con la temperatura de formación de las alteraciones propilíticas logrando caracterizar a Bella Rica.

### **5.4 Anomalías naturales y anomalías no naturales**

Para el análisis de anomalías en la región de estudio se realizó la comparación entre los mapas de concentración de sedimentos y de la roca total con los mismos elementos, donde se encontró anomalías naturales medias de Ag y media-baja de Cr al norte, altas de Cu al noreste y suroeste, altas de Hg y Ni al suroeste y altas de Pb al noroeste de Bella Rica. Además, se identificaron anomalías no naturales altas de Cu al noroeste, altas de Hg y medias de Mo al norte, medias de Zn al oeste y medias-altas de Ni al norte.

Se analizaron estos elementos por su importancia en la zona, la Ag y el Cu son metales con importancia económica. Así mismo, el Cu y el Mo son metales comunes dentro de la zona de estudio ya que la asociación del depósito mineral es de Au-Cu-Mo. Por otro lado, el Cr, Hg, Pb, Cu, Zn y Ni son metales pesados que ayudan a determinar si la anomalía se debe a una fuente natural producto de las rocas presentes en la región o no natural debido a las diversas actividades que se desarrollan en el distrito minero Bella Rica.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- ✓ Los principales minerales encontrados en las muestras son la epidota, clorita, pirita, calcopirita, calcita, titanita, minerales del grupo de la cobaltita, pirrotita, digenita, esfalerita, cuarzo y en una muestra se encontró oro (PE-24). El hallazgo de clorita, epidota y calcita en las muestras fue de gran interés ya que son minerales indicadores de alteración propilítica, la cual se forma en condiciones de baja temperatura (200-350°C). Mediante la aplicación de los principales geotermómetros, en el análisis de microsonda de la clorita, se identificó que la temperatura de formación del ambiente se dio entre 281-288°C comprobando el tipo de alteración y clasificando al ambiente de pórfidos cupríferos en Bella Rica como uno de tipo epi-mesotermal.
  
- ✓ Los análisis químicos realizados a las muestras determinaron que en su mayoría las rocas de Bella Rica en la Unidad Pallatanga pertenecen a basaltos toleíticos pero que también se encuentran presentes basaltos andesíticos/andesitas de afinidad calco-alcalina como en el caso de la muestra PE-07, al norte de la zona de estudio, que presentó diferencias en su composición con respecto a las demás muestras.
  
- ✓ La correlación entre el análisis químico realizado en la roca total y el análisis de los sedimentos en el sector de Bella Rica permitió identificar que se encuentran anomalías naturales al norte (Unidad Pallatanga) medias-bajas de Cr (56,3-309,8 ppm) y medias de Ag (14-28,3 ppm), hacia el noreste altas de Cu (394,7-20000 ppm) y Pb (119,6-1832 ppm), mientras que al suroeste (Fm. Yunguilla) altas de Hg (0,27-33,8 ppm) y Ni (76,7-393,1 ppm). Sin embargo, se identificó la presencia de anomalías no naturales hacia el norte (Unidad Yunguilla) altas de Hg (0,27-33,8 ppm), medias de Mo (7,8-16,2 ppm) y medias-altas de Ni (36,1-393,1 ppm), hacia el noroeste altas de Cu (394-20000 ppm) y hacia el oeste medias de Zn (184,2-292,6 ppm).

- ✓ Con la información obtenida se elaboró una base de datos con la geoquímica y petrología analizada la cual cuenta con mapas del área de estudio indicando la geología y concentración de elementos tanto en los sedimentos como en las rocas. Estos mapas son de gran utilidad para analizar las anomalías presentes y determinar si estas tienen un origen natural o no natural.
  
- ✓ Los análisis fueron realizados en Pisa – Italia, gracias al convenio ERASMUS+ KA107 entre la Università di Pisa y la Escuela Superior Politécnica del Litoral, siendo esta una oportunidad muy favorable para nosotras por la disponibilidad de equipos. Sin embargo, fue complicado al estar lejos obtener más información de campo en zonas donde las muestras presentaban información relevante.

## 6.2 Recomendaciones

- ✓ Es importante que al utilizar el analizador de mercurio se controle previamente que no haya ninguna ventilación para que no se dispersen las muestras en polvo y procurar limpiar con cuidado todos los utensilios para no contaminar las muestras. Además, tener en cuenta que para una coherencia en los resultados los pesos de las muestras que se vuelven a analizar deben ser aproximadamente similares.
  
- ✓ Durante el análisis petrográfico fue posible identificar inclusiones fluidas en una de las muestras (PE-03) al sureste de la zona de estudio, estas inclusiones (ricas en líquido y otras ricas en vapor) son de gran interés en el campo de yacimientos minerales. Por este motivo se recomienda continuar su estudio para la identificación de la temperatura, composición y otras características de los fluidos que conformaron el sistema de depósito mineral durante el proceso geológico de su formación.
  
- ✓ La muestra PE07 presenta características diferentes en cada diagrama de clasificación (Figura 4.5, 4.6, 4.7, 4.8) por lo que se considera de gran interés para futuros estudios. Por esta razón se recomienda profundizar en su composición química y recolectar más información en el campo cerca de donde se obtuvo esta muestra.

# BIBLIOGRAFÍA

- Abd Mutalib, M., Rahman, M. A., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., & Jaafar, J. (2017). Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-Ray (EDX) Spectroscopy. In *Membrane Characterization* (pp. 161–179). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00009-7>
- Abraira, V. (2002). notas estadísticas Desviación y error estándar. *Unidad de Bioestadística Clínica. Hospital Ramón y Cajal. Madrid*, 28(11), 2001–2003.
- Acero, P., Mateo, E., & Lucha, P. (2013). Rocas bajo el microscopio: acercamiento al estudio en lámina delgada de minerales y rocas. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 10(3), 438–444. [https://doi.org/10.25267/rev\\_eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2013.v10.i3.09](https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2013.v10.i3.09)
- Alegria, D. (2014). *Propuesta de mejora para la recuperación aurífera de la zona “La Bella” de la concesión Bella Rica, ubicada en el Distrito Ponce Enríquez*. [Tesis de Grado. Universidad Central del Ecuador]
- Alperin, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. Buenos Aires, Argentina: Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN).
- AMBIENCONSUL. (2017). *Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental expost para la fase de explotación y beneficio de minerales metálicos bajo el régimen de pequeña minería de las concesiones mineras Bella Rica y Guanache-Tres de Mayo*.
- Bates, R. L. & Jackson J. A. (1984) Dictionary of geological terms. Anchor books. A Division of Random House Inc., New York
- Begbie, M. J. & Craw, D. (2006). Geometry and petrography of stockwork vein swarms, macraes mine, Otago Schist, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 49(1), 63–73. <https://doi.org/10.1080/00288306.2006.9515148>
- Billets, S. (2004). *Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment*.
- Bird, D. K., Schiffman, P., Elders, W.A., Williams, A.E., McDowell, S.D., 1984. Calc-silicate mineralization in active geothermal systems. *Econ. Geol.* 79, 671-695.
- Castro, A. (2015). *Petrografía de Rocas Ígneas y Metamórficas*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Cathelineau, M., 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. *Clays Clay Miner.* 23, 471-485.
- Cathelineau, M., Nieva, D., 1985. A chlorite solid solution geothermometer: The Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Miner. Petrol.* 91, 235-244.

- Cavarretta, G., Gianelli, G., Puxeddu, M., 1982. Formation of authigenic minerals and their use as indicators of physico-chemical parameters of the fluid in the Larderello-Travale geothermal field. *Econ. Geol.* 77, 1071-1084
- Chen, X., Xu, R., Zheng, Y, Jiang, X, Du, W. (2018). Identifying potential Au-Pb-Ag mineralization in SE Shuangkoushan, North Qaidam, Western China: Combined log-ratio approach and singularity mapping, *Journal of Geochemical Exploration*, 189, 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.04.001>.
- Cooperativa Minera Bella Rica. (2015). *Historia y marco geográfico*. Obtenido de <http://bellarica.org/>
- Cuervas-Mons, J. (2015). *Estudio geológico-estructural y análisis geomecánico en la mina San Juan; distrito minero Ponce Enríquez, provincia Azuay, Ecuador*. [Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral]
- Dirección de Planificación Urbana y Rural. (2019). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Camilo Ponce Enríquez*.
- Dunkley, P., & Gaibor, A. (1997). *Mapa geológico Cordillera Occidental del Ecuador entre 2°-3°S - escala 1 200.000*.
- Duque, P. (2000). Breve Léxico estratigráfico del Ecuador. Quito: UCP PRODEMINCA
- D’Orazio, M. (2021). La preparazione di sezioni sottili di rocce per analisi petrografiche.
- Egüez, A., Gaona, M., & Albán, A. (2017). Mapa Geológico de la República del Ecuador escala 1:1000000. In *Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico*.
- Espejo, M. R. (2017). Estimación de la desviación estándar. *Estadística española*, 59(192), 37-44.
- Georgieva, H., R. Nedialkov. 2017. Chlorite from Elatsite PCD as a mineral vector. *Goldschmidt Abstracts 2017*, p. 1319.
- Gough, L. (1993) Understanding our fragile environment. *Lessons from geochemical studies. US Geol Surv Circ* 1105:1–34
- Hamer, M., Graham, R. C., Amrhein, C., & Bozhilov, K. N. (2003). Dissolution of Ripidolite (Mg, Fe-Chlorite) in Organic and Inorganic Acid Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2), 654. doi:10.2136/sssaj2003.6540
- Hanson, G. N., & Langmuir, C. H. (1978). Modelling of major elements in mantle-melt systems using trace element approaches. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 725–741. doi:10.1016/0016-7037(78)90090-x

- Hastie, A., Kerr, A., Pearce, J. & Mitchell, S. (2007). Classification of altered volcanic island rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology* 48, 2341-2357.
- Haynes, S.J., 1993. Vein-type ore deposits: Introduction. *Ore Geol. Rev.* 8, 205–211.
- Hey, M. (1954). A new review of the chlorites. *Mineralogical magazine and journal of the Mineralogical Society*, 30(224), 277-292.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). *Fascículo Provincial Azuay*.
- Jiménez-Oyola, S., Chavez, E., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Bolonio, D., Guzmán-Martínez, F., García-Garizabal, I., & Romero, P. (2021). Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112629>
- Jowett, E.C. 1991. *Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer*. In: GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Toronto, 27–29 May, Program with Abstracts, A62, 16.
- Kerr, A. C., Aspden, J. A., Tarney, J., & Pilatasig, L. F. (2002). The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints. In *Journal of the Geological Society* (Vol. 159). <http://jgs.lyellcollection.org/>
- Kranidiotis, P. & MacLean, W.H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82, 1898–1911.
- Kyser, K., Barr, J., & Ihlenfeld, C. (2015). Applied Geochemistry in Mineral Exploration and Mining. *Elements*, 11(4), 241–246. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.11.4.241>
- Le Bas, M., Lemaitre, R., Streckeisen, A. & Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27, 745-750.
- McCourt, W., Duque, P., Pilatasig, L., Villagómez, R. (1997). Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 1° - 2° S, escala 1:200000, CODIGEM-BGS.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 42, 313–345.



- Michaud, D. (4 de Octubre de 2016). *Vein Mineral Deposits*. Obtenido de 911 Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/vein-mineral-deposits>
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et cosmochimica acta*, 38 (5), 757-775.
- Neal, L. C., Wilkinson, J. J., Mason, P. J., & Chang, Z. (2018). Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 184, 179–198. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.019>
- Pearce, J. (1996). A user's guide to basalt discrimination diagrams. *Geological Association of Canada Special Publication*, 12, 79-113
- Plumlee GS (1999) The environmental geology of mineral deposits. In Plumlee GS, Logsdon MJ (eds) *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*. *Rev Econ Geol* 6A:71-116
- Pownceby, M. I., MacRae, C. M., & Wilson, N. C. (2007). Mineral characterisation by EPMA mapping. *Minerals Engineering*, 20(5), 444–451. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.10.014>
- Pratt, E., Figueroa, J., & Flores B. (1997). *Mapa geológico Cordillera Occidental del Ecuador entre 3°-4°S escala 1 200.000*.
- PRODEMINCA. (1998). *Monitoreo Ambiental de las áreas mineras en el sur del Ecuador*. Ministerio de Energía y Minas.
- PRODEMINCA. (2000). *Evaluación de distritos mineros del Ecuador*. UCP PRODEMINCA Proyecto.
- Randive, K., Hari, K. R., Dora, M. L., Malpe, D. B., & Bhondwe, A. A. (2014). *Study of Fluid Inclusions: Methods, Techniques and Applications*. <https://www.researchgate.net/publication/275337661>
- Ridley, J. (2013). *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press.
- Ruilova, J. & Chamba, C. (2015). Susceptibilidad a deslizamientos en las áreas mineras Bella Rica código 15 y Guanache-Tres de Mayo código 170, cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay. [Tesis de Grado. Universidad Nacional de Loja]
- Schütte, P., Chiaradia, M., Barra, F., Villagómez, D., & Beate, B. (2012). Metallogenic features of Miocene porphyry Cu and porphyry-related mineral deposits in Ecuador revealed by Re-Os,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , and U-Pb geochronology. *Mineralium Deposita*, 47(4), 383–410. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0378-z>

- Sharma, R., & Srivastava, P. (2014). *Hydrothermal Fluids of Magmatic Origin* (p. 191). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-06471-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-06471-0_9)
- Sinclair, A. J. (1991). A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited. *Journal of Geochemical Exploration*, 41(1-2), 1–22. doi:10.1016/0375-6742(91)90071-2
- Siqueira, R., Sial, A. N., & Ferreira, V. P. (2021). Crystallization conditions of two adjacent epidote + diopside-bearing granitic stocks, northeastern Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 93. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120210535>
- Sun, S. & McDonough, W. (1989). Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A., Norry, M., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society London, Special Publications, 42, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Thalman, H. (1946). Micropaleontology of upper Cretaceous and Paleocene in western Ecuador. *AAPG Bulletin*, 30 (3), 337-347
- Vallejo, C. (2007). Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene). [PhD Thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich]
- Van Zuidam, R. A. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Science The Hague*.
- Vázquez, D., González, C., Jiménez, R., & Cervantes-Hernández, Pedro. (2008). Media, varianza y desviación estándar.
- Wallace, C. J., & Maher, K. C. (2019). Phyllic alteration and the implications of fluid composition at the Copper Flat hydrothermal System, New Mexico, USA. *Ore Geology Reviews*, 104, 273–293. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.009>
- White, W. M. (2020). *Geochemistry*. John Wiley & Sons.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: Descripción petrográfica de las muestras

Tabla A.1 Descripción petrográfica de las muestras con luz transmitida y reflejada.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA		
Muestra	Luz transmitida	Luz reflejada
PE-01	Muestra finas vetillas. Presencia de calcita y cloritas. Textura afanítica con matriz de lava.	
PE-02	Lava o Pillowlavas. Pequeños fenocristales. Tal vez olivino. Cuarzo pobre. Textura: Microporfídica/seriada. Fenocristales: Olivino mayormente alterados, clorita. Groundmass: Lava. No hay veta.	
PE-03	Veta de cuarzo. Los opacos se pueden ver en la misma veta. Las inclusiones fluidas son de fase 2 en su mayoría ricas en líquido, pero también se pueden ver inclusiones de vapor. La roca que contiene la veta de cuarzo está altamente alterada por clorita y epidota. La epidota también se encuentra en la veta de cuarzo.	Se observan dos diferentes tipos de sulfuros, uno de color gris y otro más blanquesino.
PE-04	Textura isotrópica, radial con matriz de plagioclasas. No hay veta.	
PE-05	Textura: Afanítica. Groundmass: Plagioclasas. Vetillas con epidota, sulfatos que estan oxidados, limonita.	
PE-06	Lava máfica de grano fino. No se ven muchos minerales opacos, no tiene sulfuros. El único opaco podría ser hematita. Presencia de anfíboles. Se observa alteración. Epidotas abundantes en vetas y cloritas.	Presencia de óxidos de hierro.
PE-07	Matriz de granos finos. No se ven vetas de cuarzo. Es de textura porfirítica con fenocristales de anfíboles y feldespatos posiblemente alterados. No hay veta. La clorita está presente como un mineral secundario.	
PE-08	Presenta textura muy porfirítica. Entre los fenocristales se reconoce la hornblenda y plagioclasa. Xenolito de cuarzo.	
PE-09	Tiene veta fina de sulfuros, limonita.	
PE-10	Roca porfirítica con fenocristales de hornblenda y plagioclasa en una matriz de grano fino. Pocos opacos. Fenocristal completamente sustituido por opacos y tal vez minerales arcillosos. Los minerales que se observan epidota y clorita. Los minerales opacos se encuentran más en la matriz.	Los sulfuros se encuentran a lo largo de la veta.
PE-12	Los feldespatos se ven alterados. Presenta textura isotrópica, radial. La matriz es de plagioclasas. No hay veta.	Se ven minerales con textura "corona".
PE-13C	Muy alterada de sulfuros, colores de interferencia altos.	Se observa posiblemente óxido de hierro.
PE-14	Tiene minerales opacos.	Se observan opacos de diferentes colores.

PE-15	Lava máfica, Afirítica con matriz de granos finos. Vetas de clorita y epidota con poco cuarzo. La mayor parte de la sección es una veta.	
PE-16	Veta de cuarzo, epidota y calcita con opacos. Entre los minerales presentes están la epidota, cuarzo y sulfuros. Los sulfuros, tal vez pirita, están un poco oxidados. La roca que contiene la veta es una brecha hidrotermal alterada.	
PE-18	La mineralización está diseminada. Los sulfuros están en la veta y en la matriz. La mayoría de los sulfuros son opacos. Se observa pirrotina. Los cristales se ven que se dirigen hacia la veta. Los minerales presentes son cloritas, opacos, sulfuros y pirrotina.	Mineral cruzando la veta, tal vez anfíbol. La pirrotina está en la veta pero también diseminada en la roca.
PE-19	Está llena de minerales opacos. Presenta una veta de cloritas y calcitas con cuarzos pequeños. La textura es afanítica.	Los opacos son brillantes de dos colores distintos, uno gris y el otro amarillento.
PE-20	Lava máfica. Afirítica con textura isotrópica de granos finos y plagioclasa y olivino como minerales principales. La clorita está presente como un mineral hidrotermal. La textura es isotrópica, radial. La matriz es de plagioclasas y no presenta veta.	
PE-21	Se observan epidotas, cloritas y anfíboles. No se observan opacos.	

## APÉNDICE B: Análisis petrográfico y químico de las muestras

**Tabla B.1 Detalle del análisis realizado para cada muestra.**

MUESTRAS	Lámina Petrográfica	ANÁLISIS REALIZADOS				
		FEG-SEM	EPMA	ICP-OES	ICP-MS	ANÁLISIS MERCURIO
PE-01	X			X	X	X
PE-02	X					
PE-03	X	X		X	X	X
PE-04	X					
PE-05	X					
PE-06	X			X	X	X
PE-07	X		X	X	X	X
PE-08	X					
PE-09	X					
PE-10	X		X	X	X	X
PE-11	X	X				
PE-12	X	X				
PE-13C	X	X		X	X	X
PE-14	X					
PE-15	X		X	X	X	X
PE-16	X	X		X	X	X
PE-17	X					
PE-18	X	X		X	X	X
PE-19	X			X	X	X
PE-20	X					
PE-21	X					
PE-22						
PE-23						
PE-24	X	X				

## APÉNDICE C: Fotografías y Resultados del Análisis EPMA

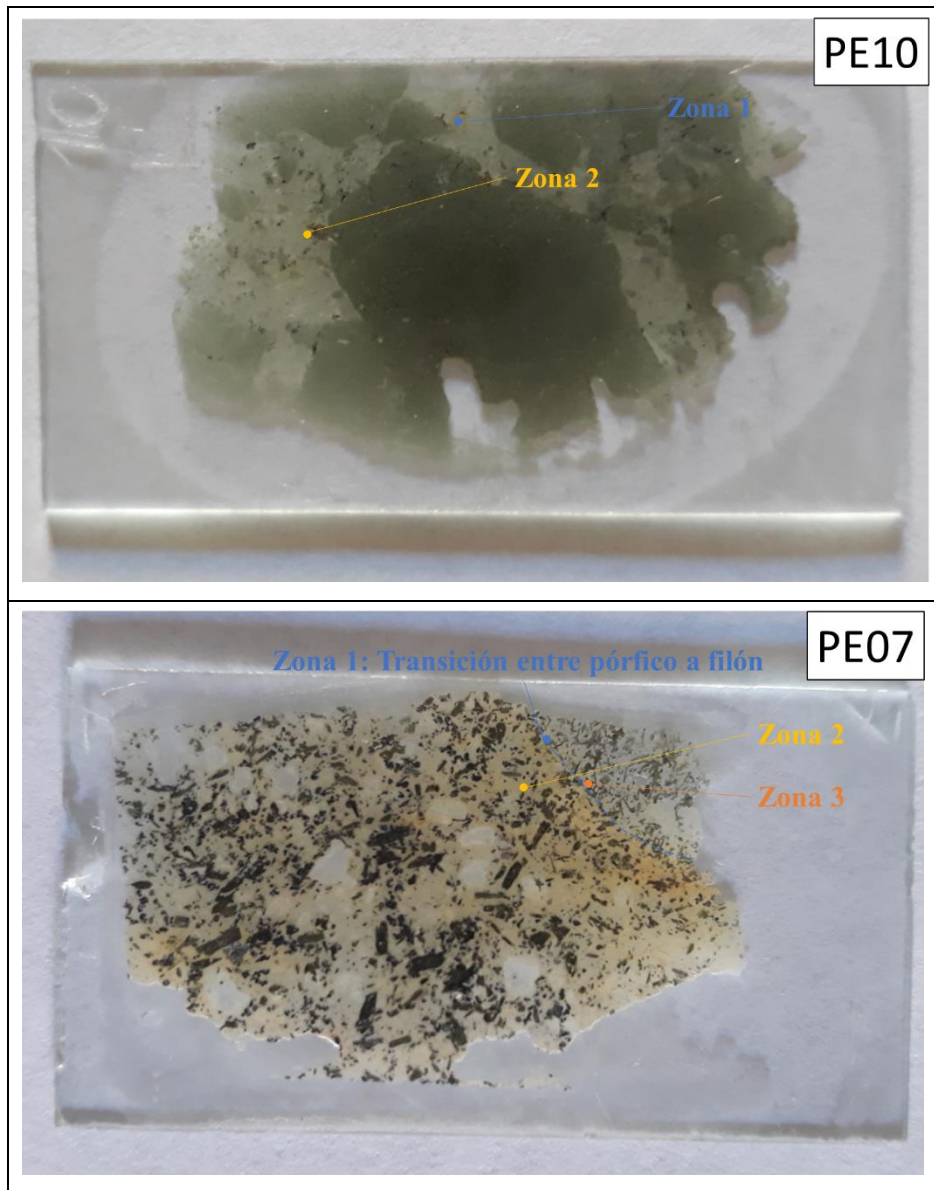


Figura C.1 Ubicación de las zonas del análisis en el EPMA.

**Tabla C.1 Resultados del EPMA para la muestra PE-10, recálculo de la fórmula estructural y obtención de la temperatura de la Clorita con 4 diferentes geotermómetros.**

Muestra		PE-10									
Zona de muestreo		Zona 1			Zona 2						
		an11	an12	an13	an1	an2	an3	an4	an5	an6	an7
Geotermómetros	C&N85	262	248	256	269	268	271	276	273	264	255
	K&M87	263	248	257	269	268	271	276	274	265	255
	C88	309	287	300	319	318	322	329	326	312	298
	J91	310	287	301	319	318	322	330	326	312	298
Mean T (°C)		288									

**Tabla C.2 Resultados del EPMA para la muestra PE-07, recálculo de la fórmula estructural y obtención de la temperatura de la Clorita con 4 diferentes geotermómetros.**

Muestra		PE-07															
Zona de muestreo		Zona 1					Zona 2										Zona 3
		an1	an2	an3	an4	an5	an4	an6	an14	an30	an31	an32	an33	an34	an39	an40	an17
Geotermómetros	C&N85	256	261	292	256	325	259	253	234	240	244	242	252	224	265	260	268
	K&M87	256	261	292	257	326	260	254	234	240	245	242	252	225	266	260	268
	C88	299	307	354	300	405	305	295	266	275	282	278	293	252	314	306	318
	J91	300	307	354	300	405	305	296	266	275	282	278	293	252	314	306	318
Mean T (°C)		281															

**Tabla C.3 Resultados del EPMA para la muestra PE-15, recálculo de la fórmula estructural y obtención de la temperatura de la Clorita con 4 diferentes geotermómetros.**

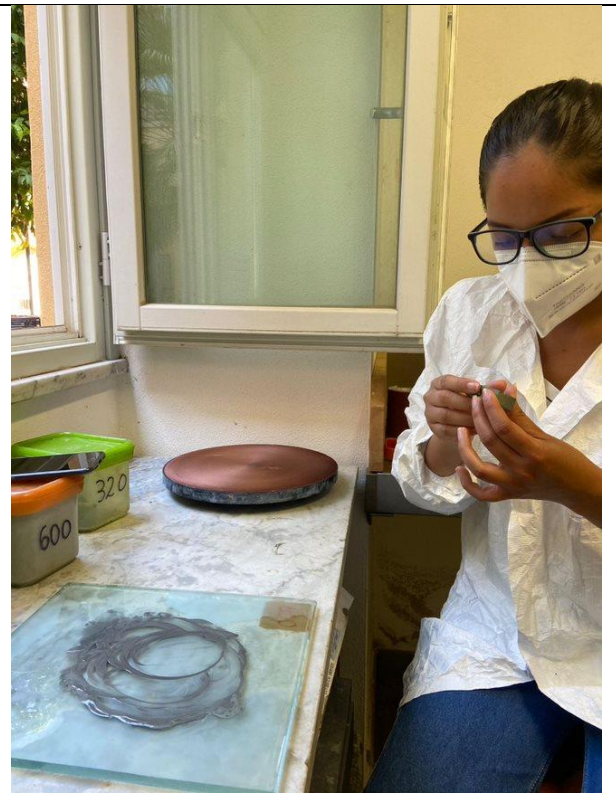
Muestra		PE15								
Zona de muestreo		an16	an26	an27	an28	an29	an30	an36	an37	an39
Geotermómetros	C&N85	247	238	262	247	278	236	302	282	288
	K&M87	247	238	262	247	278	236	302	282	289
	C88	286	272	308	285	333	269	370	339	349
	J91	286	272	308	286	333	269	370	339	349
Mean T (°C)		288								



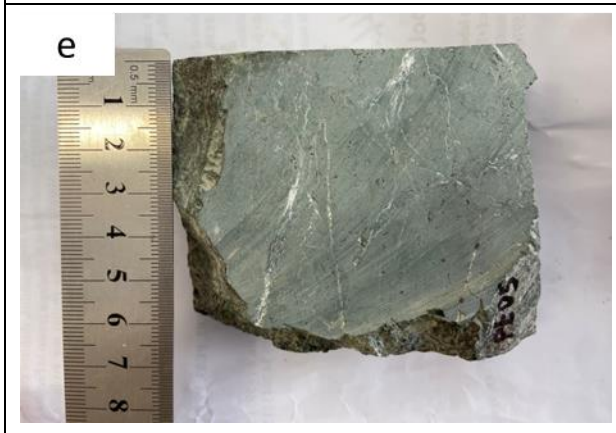
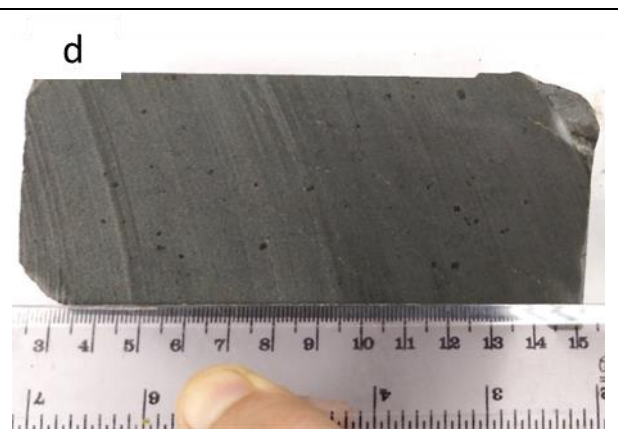
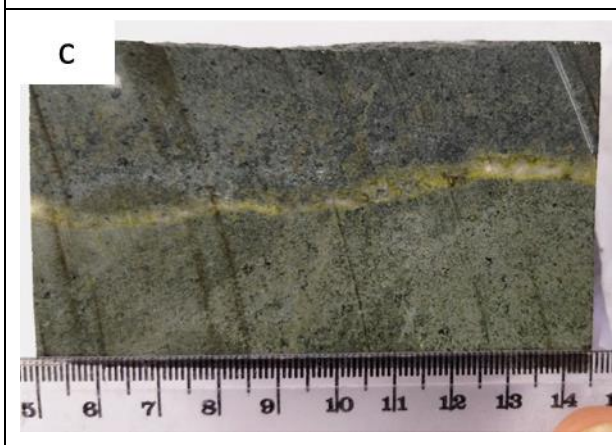
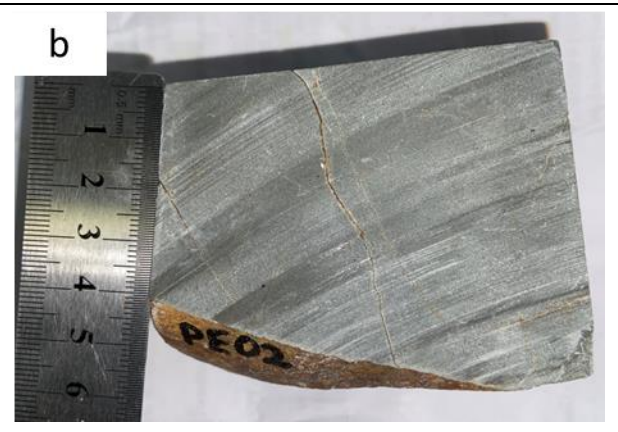
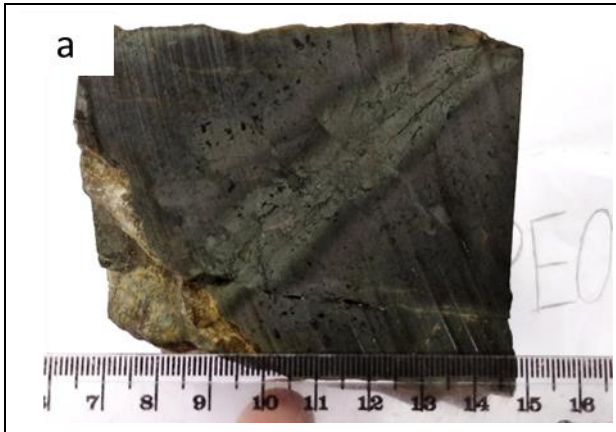
## APÉNDICE D: Actividades en el proceso del proyecto

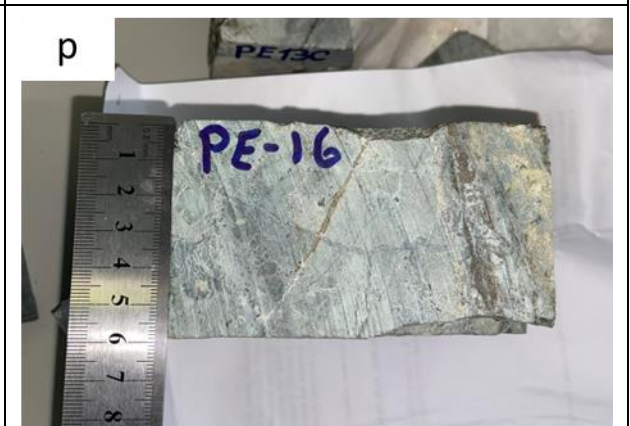
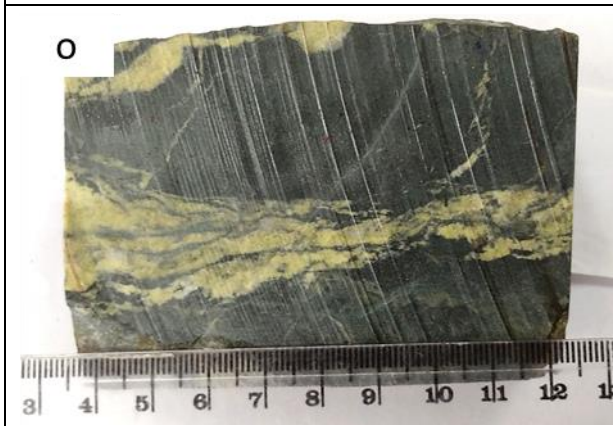
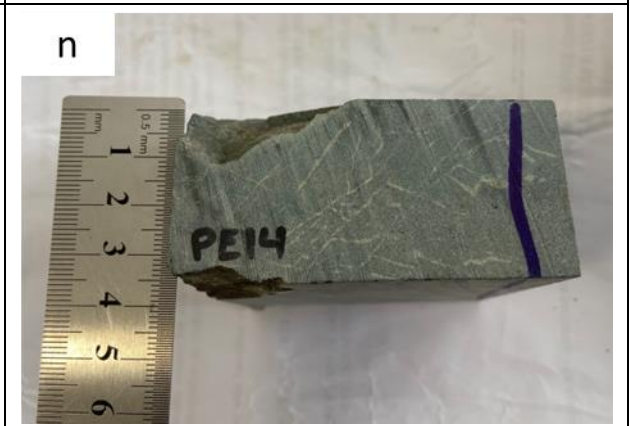
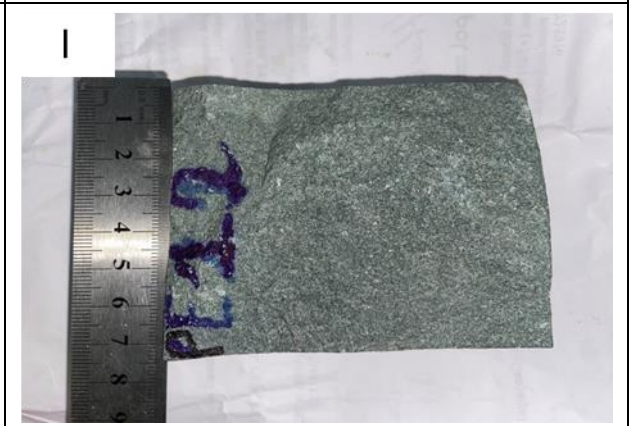
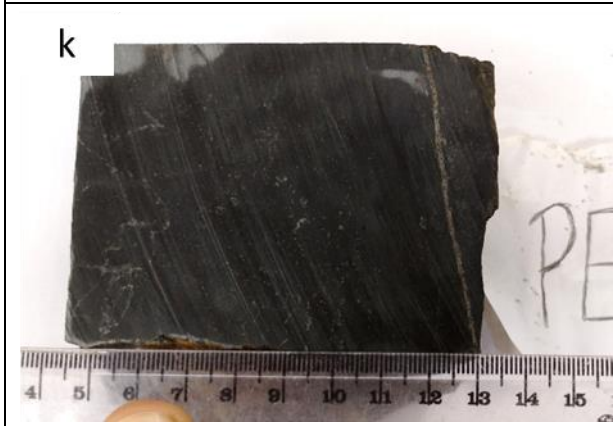
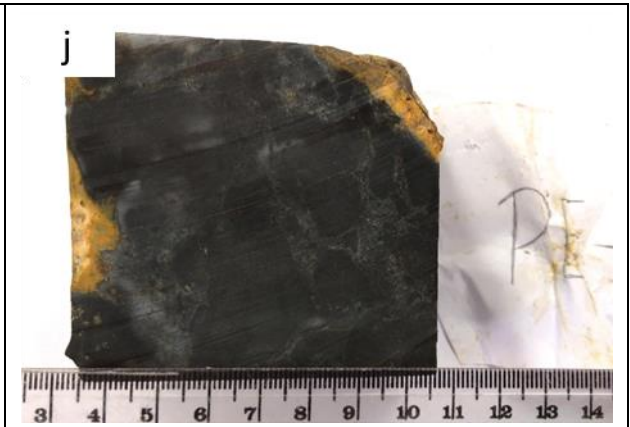


Figura D.1 Actividades en campo en la zona de estudio Bella Rica.



**Figura D.2 Actividades en laboratorios de la Universidad de Pisa (Italia).**





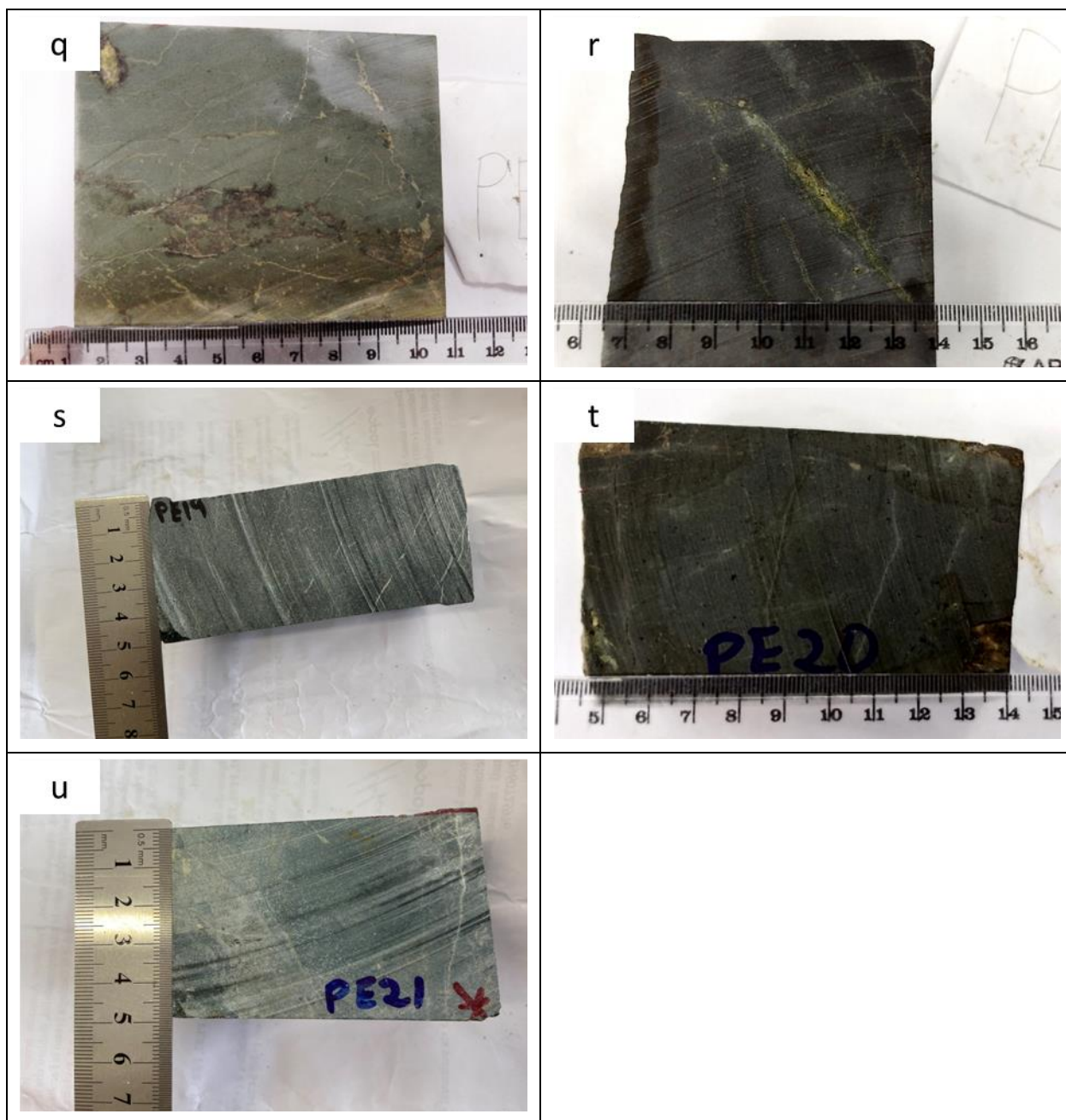


Figura D.3 Cubos de muestras de Bella Rica. (a) PE-01. (b) PE-02. (c) PE-03. (d) PE-04. (e) PE-05. (f) PE-06. (g) PE-07. (h) PE-08. (i) PE-09. (j) PE-10. (k) PE-11. (l) PE-12. (m) PE-13. (n) PE-14. (o) PE-15. (p) PE-16. (q) PE-17. (r) PE-18. (s) PE-19. (t) PE-20. (u) PE-21