

Análisis litoestratigráfico, petrográfico y geoquímico de los volcánicos Uritusinga, Loja-Ecuador

Lithostratigraphic, petrographic and geochemical analysis of the Uritusinga volcanics, Loja-Ecuador

Aníbal Roberto Pulupa Vela¹, Christian Wladimir Romero Cóndor¹, Darwin Patricio Condoy Guiracocha¹, Edison Dario Calderón Romero¹, Fausto Rodolfo Carranco Andino¹, Erick Javier Guerrero Tamayo¹, Mateo Andrés Vega Zambrano², Gabriela Carolina Andrade Lescano¹

¹ Instituto de Investigación Geológico Energético. Quito - Ecuador.

E-mail: anibal.pulupa@geoenergia.gob.ec.

² Barrick Gold Corporation. Lima - Perú. E-mail: mateo.vega@barrick.com

ISSN: 2661-6998



Fecha de recepción: 06-07-2023

Fecha de aceptación: 03-02-2025

Resumen

La cartografía de antiguos depósitos volcánicos es un tema de interés para la comunidad geocientífica. La discusión sobre el origen de litotipos volcánicos y litofacies volcanoclásticas en las últimas décadas permitió entender el comportamiento y la geodinámica de volcanes extintos, erosionados y que ocupan un lugar en el registro estratigráfico regional. En Ecuador, al sur de la ciudad de Loja, en la vía Puntzara Grande – Malacatos, el Cerro Uritusinga incluye a rocas volcanoclásticas y volcánicas no reportadas. Esta investigación presenta la caracterización litoestratigráfica, la descripción de litotipos volcánicos y litofacies volcanoclásticas, así como también, resultados del análisis geoquímico. La litoestratigrafía de los depósitos volcánicos Uritusinga incluye a: brechas volcánicas (BVMP), conglomerados volcánicos (CCSO), toba de clastos (TGC), toba de cristales (TFC), toba fina masiva (TFM) y andesita (And). En lámina delgada se observan textura pilotáxica en las brechas volcánicas y micro-texturas fluidales en las tobas masivas finas. La composición geoquímica se analizó en cuatro muestras de lavas en donde las proporciones de álcali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) evaluadas en función de sílice (SiO_2) indican que las rocas corresponden a andesitas. De acuerdo con las relaciones entre K_2O y SiO_2 , indican una afinidad calcoalcalina. Las concentraciones de $\text{Th}_{(N)}$ y $\text{Nb}_{(N)}$ indican que estas lavas se formaron en un arco volcánico en un margen continental. Edades de traza de fisión indican una edad de $2,36 \pm 0,36$ Ma. Datos estratigráficos, petrográficos, geoquímicos y geocronológicos permiten vincular a la Unidad Uritusinga a una facie volcánica distal del volcanismo del Pleistoceno reportado regionalmente en la Formación Salapa.

Palabras clave: Arquitectura estratigráfica epiclásica, Petrografía, Geoquímica, Pleistoceno, volcánicos Uritusinga.

Abstract

Cartography of ancient volcanic deposits is a topic of interest for the geoscientific community. The discussion regarding the origin of volcanic lithotypes and volcanoclastic lithofacies in recent decades has allowed us to understand the behavior and geodynamics of extinct, eroded volcanoes, which occupy a place in the regional stratigraphic record. In Ecuador, south of Loja on the Puntzara Grande - Malacatos road, Cerro Uritusinga hill includes unreported volcanic and volcanoclastic rocks. This research presents lithostratigraphic characterization, the description of volcanic lithotypes and volcanoclastic lithofacies, and geochemical analysis. The lithostratigraphy of the Uritusinga volcanic deposits includes: volcanic breccias (BVMP), volcanic conglomerates (CCSO), clast tuff (TGC), crystal tuff (TFC), massive fine tuff (TFM), and andesite (And). Thin section analysis reveals pilotaxitic texture in volcanic breccias and fluid microtextures in fine massive tuffs. The geochemical composition was analyzed in four samples of lavas where the proportions of alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) evaluated as a function of silica (SiO_2) indicate that the rocks correspond to andesites. The K_2O and SiO_2 ratios indicate a calc-alkaline affinity. $\text{Th}_{(N)}$ and $\text{Nb}_{(N)}$ concentrations indicate that these lavas formed in a volcanic arc on a continental margin. Fission track ages reveal an age of $2,36 \pm 0,36$ Ma. Stratigraphic, petrographic, geochemical, and geochronological data allow linking the Uritusinga Unit to distal volcanic facies

of Pleistocene volcanism regionally reported in the Salapa Formation.

Keywords: Epiclastic stratigraphic architecture, Petrography, Geochemistry, Pleistocene, Uritusinga volcanics.

1. INTRODUCCIÓN

Al sur de los Andes de Ecuador, diferentes episodios volcánicos ocurridos a lo largo del tiempo fueron incluidos en el registro litoestratigráfico regional, sin una adecuada caracterización [1, 3]. A escala regional, series de rocas volcánicas de afinidad intermedia y secuencias de rocas volcanoclásticas y sedimentarias del Paleoceno fueron agrupadas en la Formación Sacapalca. Por otro lado, series de rocas piroclásticas de composición ácida a intermedia del Eoceno fueron cartografiadas como Formación Loma Blanca. Mientras que en la Formación Saraguro se ubicaron a secuencias monótonas de rocas volcánicas y volcanoclásticas de afinidad ácida a intermedia del Oligoceno tardío al Mioceno temprano [2, 3]. Kennerley [1] agrupó en la Formación Salapa rocas piroclásticas intercaladas con rocas sedimentarias. Esta formación fue datada en $2,4 \pm 0,8$ Ma mediante trazas de fisión [2, 3].

Desde el punto de vista de la cartografía geológica de unidades volcánicas, en Ecuador son pocas las unidades volcánicas cartografiadas adecuadamente, o que cumplen con estándares internacionales. En algunos casos, secuencias volcánicas han sido incluidas en grupos litoestratigráficos a nivel regional, y por otra parte,

algunas secuencias de rocas volcánicas y volcanoclásticas fueron cartografiadas únicamente en base a su litología (ej.: flujos de lava, brechas), sin considerar relaciones estratigráficas, características petrográficas o geoquímicas. Además, no se consideró que una unidad geológica de origen volcánico puede integrar diferentes litologías, ej.: andesitas, brechas volcánicas, tobas, areniscas con aporte volcánico, entre otros. Cada una de estas litologías representa un periodo de formación o destrucción de un edificio volcánico, es decir, se formaron en un mismo ambiente y a una misma edad [4, 5].

Durante la actualización de la hoja geológica Gonzanamá escala 1:100 000, realizada por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), se identificaron algunas series de rocas volcánicas y volcanoclásticas en el cerro Uritusinga. Este se ubica en la provincia de Loja, al suroeste de la ciudad de Loja, en la vía Puntzara Grande - Malacatos (Fig. 1). Estas secuencias de rocas volcanoclásticas y volcánicas fueron cartografiadas en una nueva unidad denominada Uritusinga, la cual fue interpretada como el sustrato de la cuenca [6], sin embargo, para efectos del presente estudio los denominaremos como volcánicos Uritusinga.

En este trabajo se presenta nuevos datos litoestratigráficos, petrográficos y geoquímicos de los volcánicos Uritusinga. Estos nuevos datos son interpretados en el marco del contexto geodinámico regional.

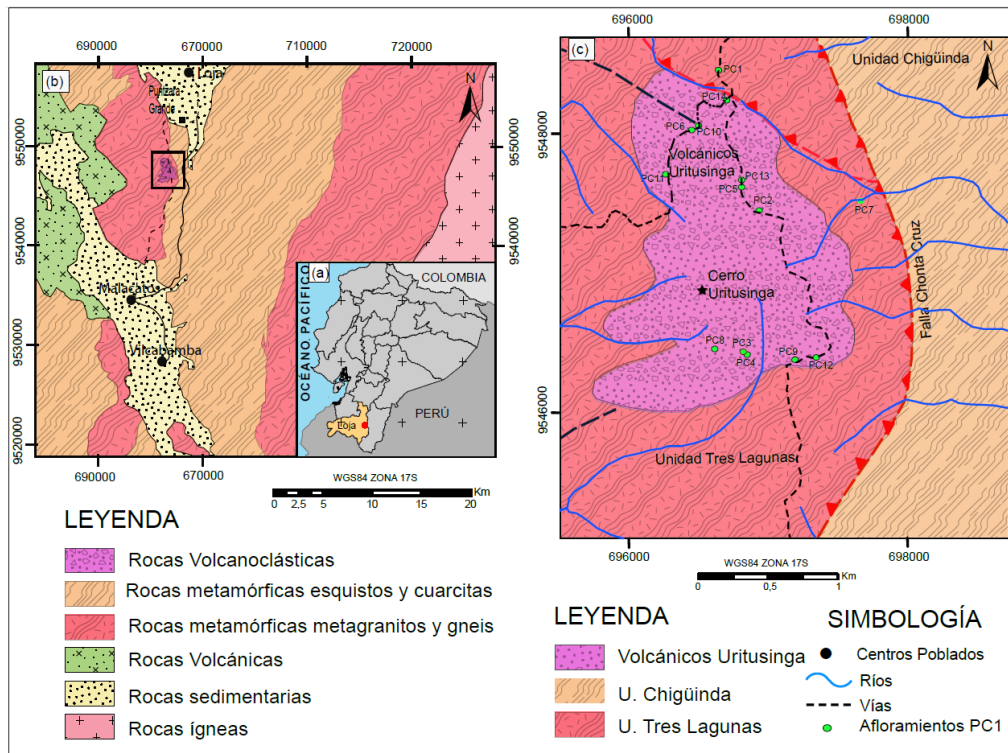


Figura 1. Mapa de Ubicación de la Unidad Uritusinga. (a). Ubicación del área de estudio en el Ecuador. (b). Mapa geológico regional, escala 1:100 000, mostrando la ubicación de la zona de estudio. (c). Mapa geológico de la Unidad Uritusinga.

1.1. Geología Regional

Al sur de los Andes ecuatorianos, las cuencas intramontanas se desarrollan entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real. El basamento de estas cuencas está conformado por secuencias volcánicas del Oligoceno agrupadas al noroeste en la Formación Saraguro y al sureste en la Formación Loma Blanca [7]. Dos secuencias de primer orden fueron cartografiadas en las cuencas intramontanas, la secuencia marino costera, del Mioceno Inferior y la secuencia continental que incluye a secuencias de origen volcánico del Mioceno Superior [2, 3].

En el caso de la cuenca de Loja, su basamento se compone de rocas metamórficas como filitas y cuarcitas de la Unidad Chigiúinda del Paleozoico y metagranitos de la Unidad Tres Lagunas del Triásico [6, 7]. Así como rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Loma Blanca datadas mediante U-Pb en circones en $36,2 \pm 1,8$ Ma [8].

Al este de la cuenca, se presentan areniscas y limolitas de la Formación San Cayetano datadas mediante trazas de fisión en circones detríticos obteniendo edades de $10,0 \pm$

$1,4$ Ma y $13,8 \pm 1,8$ Ma [2, 3], mientras que al oeste predominan areniscas y conglomerados de origen volcánico no datados correspondientes a la Formación Trigal, estos cubren en discordancia a los niveles volcánicos de la Formación Loma Blanca [2, 3]. Lutitas margosas, niveles de calizas y areniscas calcáreas datadas en $11,1 \pm 1,2$ Ma (obtenidas de circones detríticos) del miembro La Banda [6] cubren en concordancia a la Formación Trigal. Areniscas y conglomerados de origen continental de la Formación Belén cubren concordantemente al miembro La Banda.

Al noroeste de la cuenca, potentes depósitos volcánicos y volcanoclásticos datados en $2,3 \pm 1,2$ Ma mediante el método K-Ar en hornblendas [1], correspondientes a la Formación Salapa cubren en discordancia angular a rocas sedimentarias de las formaciones San Cayetano (miembro La Banda), Trigal, y Belén [6] (Fig. 2).

Al suroeste de la cuenca de Loja se identificaron depósitos volcánicos y volcanoclásticos no reportados. Estos depósitos cubren en inconformidad al basamento metamórfico y fueron agrupados en la Unidad Uritusinga [6].

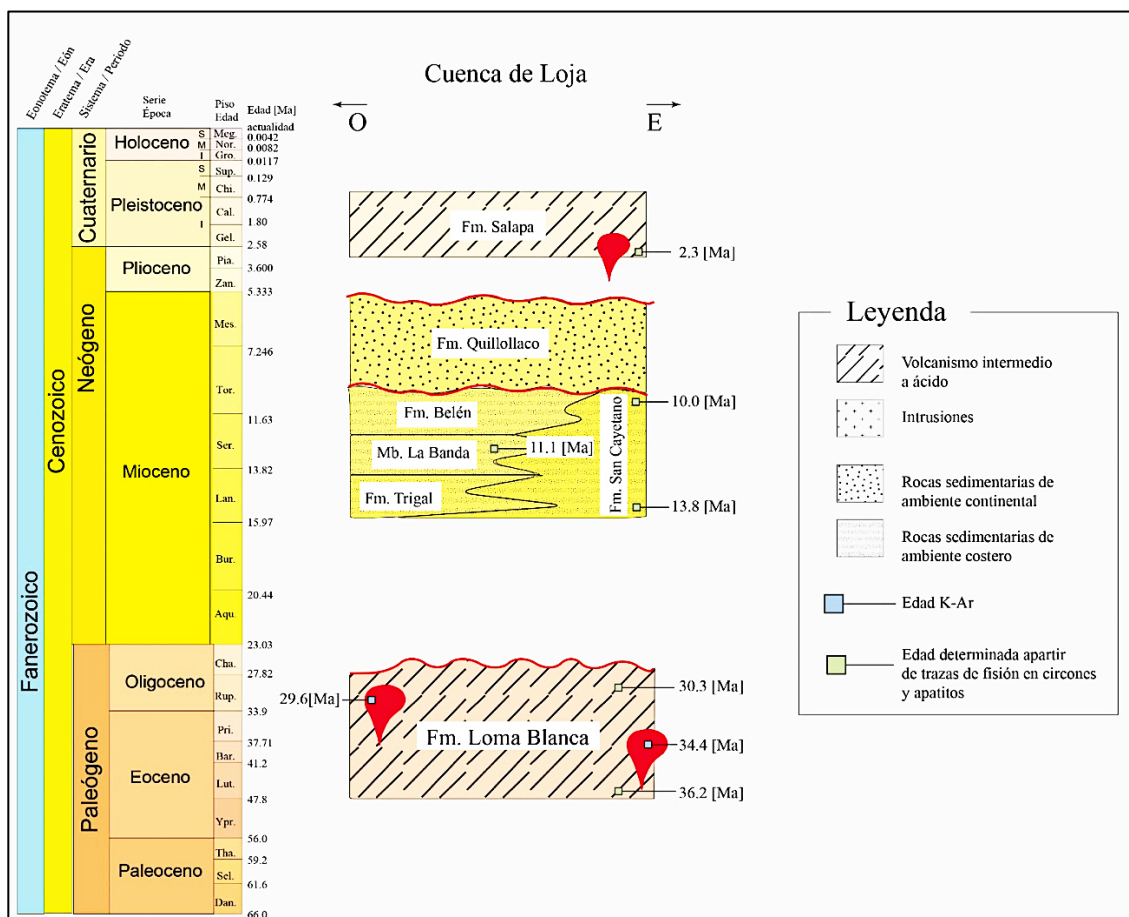


Figura 2. Litoestratigrafía de la Cuenca de Loja. Modificado de Hungerbühler [1].

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este trabajo incluye recopilación bibliográfica, levantamiento de información en campo, análisis e interpretación de información.

La recopilación bibliográfica incluyó bases de datos, mapas geológicos de diferentes escalas (1:25 000, 1:50 000 y 1:100 000), imágenes satelitales, informes y memorias técnicas publicados e inéditos y artículos científicos. El análisis de datos bibliográficos incluyó la

geo-referenciación de afloramientos tipo, en donde se levantaron secciones y se elaboró la columna estratigráfica de los depósitos volcánicos (Fig. 3). Los datos obtenidos fueron proyectados en imágenes satelitales que permitieron redefinir lineamientos en la cartografía geológica regional y local (Fig. 1 c).

Durante el levantamiento en campo se recolectaron 22 muestras de roca para la discriminación litológica de muestras tipo (Fig. 1 c), descripción del estilo de apilamiento de secuencias volcánicas, volcanoclásticas [9, 10] y descripción petrográfica mediante lámina delgada bajo el microscopio de luz transmitida y polarizada. Utilizando esta información se determinaron litofacies que agrupan rocas de similar composición mineralógica, características texturales y estructurales, depositadas en un mismo ambiente de sedimentación [11, 12].

Para complementar esta descripción, se realizaron cuatro (4) ensayos geoquímicos de muestras correspondientes a la secuencia volcánica (Tabla 1), tanto en el laboratorio químico del Instituto de Investigación Geológico y Energético del Ecuador (IIGE), como en el laboratorio de Geoensayos de Colombia.

En primera instancia, para el procesamiento de las muestras se utilizaron trituradoras y pulverizadoras con discos de carburo de tungsteno. Para el análisis de elementos mayores se utilizó Fluorescencia de Rayos X – XRF (con perla fundida). Mientras que, para elementos traza, se empleó Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente – ICP-OES (con digestión total 4 ácidos) y para tierras raras, Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente – ICP-MS (con digestión por fusión alcalina). Posteriormente, los datos obtenidos fueron procesados e interpretados con el uso de diagramas de clasificación litológica y discriminación tectonomagmática en el software GCDKit 6.0 [13].

3. RESULTADOS

3.1 Relaciones de campo

Al suroeste de la ciudad de Loja el relieve montañoso está dominado por secuencias de rocas metamórficas que forman parte del basamento de la cuenca de Loja. Estas incluyen cuarcitas y filitas intensamente deformadas relacionadas con la Unidad Chigüinda del Paleozoico, además de granitoides del Triásico agrupados en la Unidad Tres Lagunas [8].

En la vía Puntzara Grande - Malacatos, en el sector del cerro Uritusinga (UTM: 697 253E; 9 546 395N) se observan múltiples secuencias de rocas volcánicas y volcanoclásticas que descansan discordantes a las rocas metamórficas.

Morfológicamente, estas secuencias forman colinas alargadas al sur y al suroeste formando grandes taludes controlados por estructuras locales asociadas a las fallas La Palma y Chonta Cruz (Fig. 1c).

3.2 Litoestratigrafía de los volcánicos Uritusinga

En la Figura 3, se observa el detalle litoestratigráfico de los volcánicos Uritusinga descrito a continuación de acuerdo con las distintas litofacies observadas:

Andesita (And): se presenta en color gris con tonalidades marrón a rojizas, con textura porfírica, y fenocristales de 0.5 mm a 2 cm, euhedrales a subeuhedrales de plagioclasa y hornblenda, distribuidos caóticamente en una matriz vítrea. En algunos niveles se observan xenolitos de composición básica y fragmentos de brechas volcánicas. Además, se observan niveles con texturas fluidas.

Brechas volcánicas (BVMP): de tipo matriz soportada, oligomícticas, con fragmentos angulares a subangulares, de andesitas y dacitas, mal clasificados, distribuidos de manera caótica en una matriz limo-arenosa, con abundantes cristales subangulares y rotos de plagioclasa y hornblenda.

Conglomerados volcánicos (CCSO): de tipo clasto-soportados en una matriz arenosa con abundante cuarzo, plagioclasa, muscovita y hornblenda; con clastos polimícticos, subangulares a subredondeados de limolitas, areniscas, andesitas, dacitas y riolitas, moderadamente clasificados, distribuidos en gradación normal.

Toba gruesa de clastos (TGC): roca de color gris con tonalidades amarilla y rosada. Presenta clastos angulares de andesitas, dacitas y riolitas, distribuidas de manera caótica en una matriz de lapilli.

Toba fina de cristales (TFC): roca de color blanco con tonalidad marrón, con cristales rotos de plagioclasa, hornblenda, augita, biotita y cuarzo distribuidos caóticamente en una matriz de ceniza; ocasionalmente se observan estructuras de flujo.

Toba fina vítrea masiva (TFM): de color gris con tonalidad blanca, textura afanítica; en su matriz se observa vidrio y sericita.

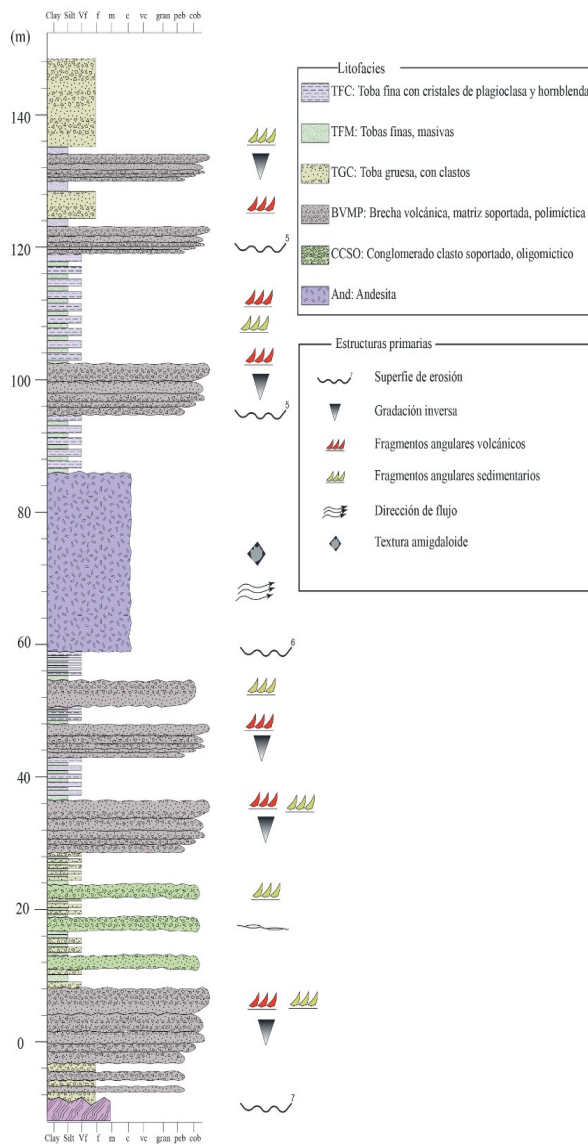


Figura 3. Columna estratigráfica de los volcánicos Uritusinga. Las abreviaciones en inglés corresponden a Clay: arcilla; silt: limo; Vf: muy fino; f: fino; m: medio; c: grueso; vc: muy grueso; gran: gránulo; peb: guijarro; cob: grava.

3.3 Arquitectura estratigráfica

Los volcánicos Uritusinga se depositan en discordancia angular sobre el basamento metamórfico. Esta superficie de erosión de acuerdo a Miall [14], tiene una jerarquía de séptimo orden y puede ser trazada a lo largo del cerro Uritusinga, en sentido norte – sur aproximadamente.

La base de la secuencia es dominada por estratos de morfología lobular, irregular en la base y convexa en el tope, que se componen de brechas volcánicas (BVMP). El espesor promedio de los estratos se aproxima a 2 m, en ningún caso se observó un espesor superior a 3 m, ni inferior a 1 m. Estos estratos muestran tendencia estrato-creciente y continuidad vertical. BVMP se intercalan entre estratos de geometría tabular compuestos por tobas finas de cristales (TFC) y tobas gruesas de clastos (TGC). En menor medida se observan estratos cóncavos a convexos de conglomerados volcánicos (CCSO), con tendencia estrato decreciente. En la parte media, la secuencia se observan potentes niveles de andesitas porfiríticas (And) intercaladas entre brechas volcánicas. Hacia el tope de la secuencia es común observar monótonos estratos tabulares compuestos por intercalaciones de tobas de cristales, tobas de clastos y tobas vítreas finas masivas (TFM) (Fig. 4).

3.4 Análisis Petrográfico

El análisis microscópico de las rocas pertenecientes a las litofacies BVMP, permitió reconocer microtexturas clástico-brechadas, conformadas por una matriz arenolimososa con cristales de cuarzo y plagioclasa. Son visibles litoclastos y cristales. Los líticos son subangulosos y pertenecen a rocas volcánicas intermedias de textura pilotáxica, en menor proporción aparecen clastos subangulosos de gneises, esquistos y cuarcitas. Los cristales se hallan dispersos y son principalmente de plagioclasa, feldespato, cuarzo y biotita (Fig. 5 a y b). Para las facies TFM, se observaron microtexturas piroclásticas y vesiculares. Está compuesta mayoritariamente por una matriz de ceniza volcánica. Los escasos cristales observados son de plagioclasa, biotita y cuarzo euhedral. Existe un alto porcentaje de vesículas a veces alargadas, que han sido rellenadas por soluciones saturadas en sílice (Fig. 5 c y d).

Las facies TGC, presentaron microtexturas fluidales y piroclásticas. Se observó líticos andesíticos, así como de pómez, escasos fragmentos de cristales de plagioclasa y biotita. La matriz se compone de vidrio volcánico y se aprecian dispersas vesículas rellenas de cuarzo (Fig. 5 e y f).

Las facies TFC, presentó microtextura epiclástica y piroclástica, compuesta por una matriz fina y cristales. Los cristales presentes son plagioclasa, biotita, feldespato y cuarzo (Fig. 5 g y h).

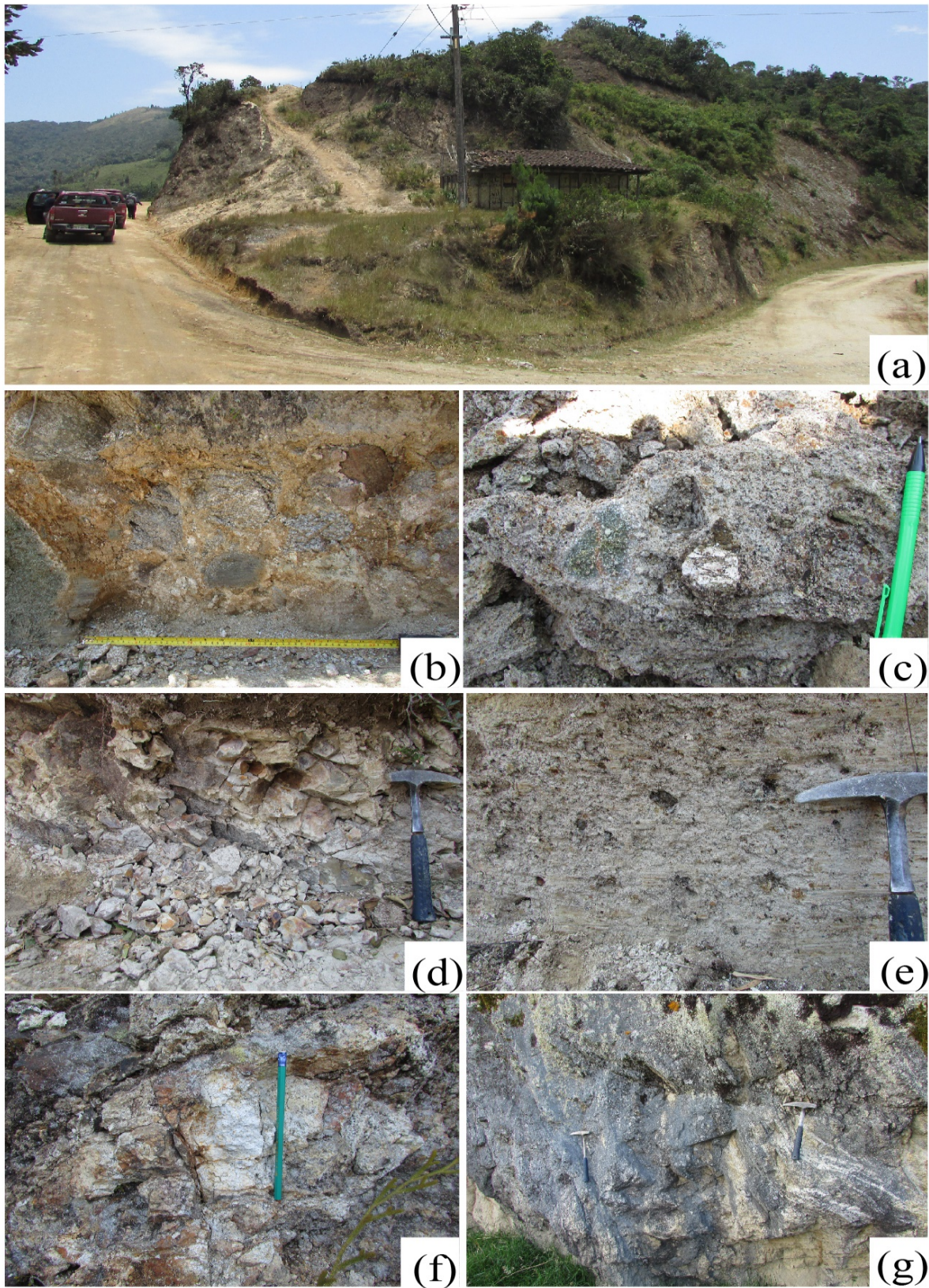


Figura 4. Afloramiento tipo y litofacies. **(a).** Afloramiento tipo en el cerro Uritusinga. **(b).** Conglomerado clasto soportado (CCSO). **(c).** Brecha volcánica, matriz soportada, polimictica (BVMP). **(d).** Tobas vítreas finas masivas (TFM). **(e).** Toba gruesa de líticos, distribuidos de manera caótica en la matriz (TGC). **(f).** Toba fina de cristales de plagioclasa y hornblenda (TFC). **(g).** Andesitas con textura fluidal.

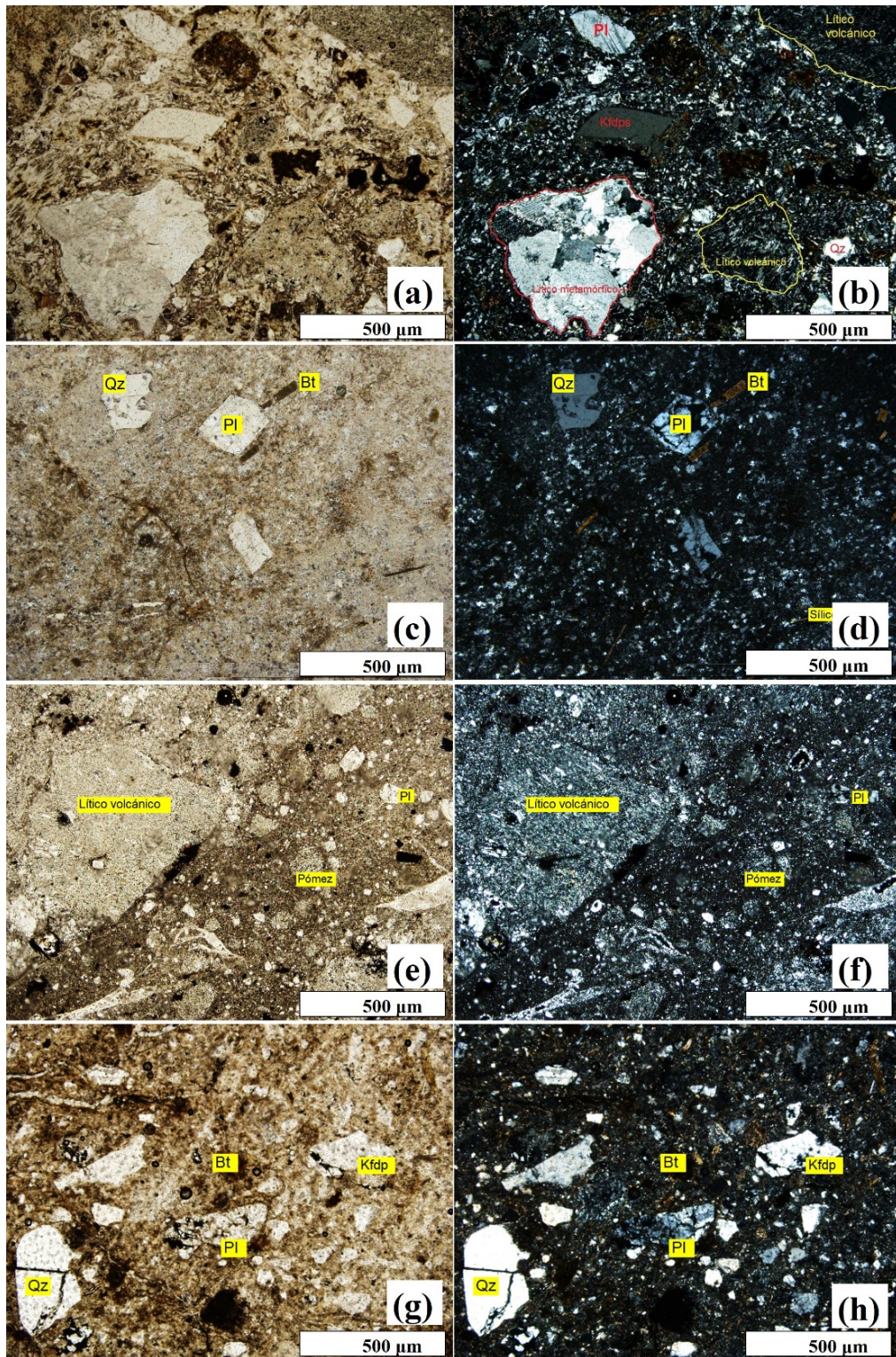


Figura 5. Microfotografías de litofacias. Objetivo 4X (N// - Nicoles paralelos; NX-Nicoles cruzados). (a) Brecha volcánica (BVMP)-N//. (b) Brecha volcánica (BVMP)- NX. (c) Toba fina masiva (TFM)-N//. (d) Toba vítrea fina masiva (TFM)-NX. (e) Toba gruesa de clastos (TGC) N//. (f) Toba gruesa de clastos (TGC)-NX. (g) Toba fina de cristales (TFC)-N//. (h) Toba fina de cristales (TFC)-NX.

3.5 Análisis Geoquímico

Para caracterizar la geoquímica de estas rocas se utilizaron cuatro (4) muestras de lavas recolectadas en el cerro Uritusinga. La tabla 1 presenta los resultados de óxidos mayores, elementos traza y tierras raras analizados. Los valores de pérdida por ignición (LOI) del conjunto de muestras varían desde 2,91 % a 3,17 %.

Todas las muestras presentan valores altos de sílice con proporciones de SiO₂ que varían entre 61,85 % y 62,06% se observan también contenidos altos a moderados e álcali (6,37 % < Na₂O + K₂O < 6,51 %) y Al₂O₃ (17,74 % – 17,88 %), además bajas concentraciones de TiO₂ (0,4 % – 0,47 %), Fe₂O₃ (4,56 % – 4,75 %), MgO (1,95 %

2,21 %), MnO (0,08 % – 0,1 %), CaO (3,9 % – 4,15 %) y P₂O₅ (0,09 % – 0,1 %).

Las proporciones de álcali (Na₂O + K₂O) evaluadas en función de sílice (SiO₂) en el diagrama TAS (total alkali – sílica) de [15], corresponde a composición andesítica

(Fig. 6a). Esto es corroborado con las observaciones al microscopio óptica. De igual manera utilizando el diagrama de clasificación de rocas volcánicas alteradas de Winchester y Floyd [16], el set de muestras analizadas corresponde a andesitas (Fig. 6b).

Tabla 1. Resultados de análisis geoquímicos de los óxidos de los elementos mayores (en % en peso) y elementos traza (en ppm).

COD_LAB	EC-2022-T1	EC-2022-T2	EC-2022-T3	EC-2022-T4
UTM-X	696 623	696 930	696 765	696 765
UTM-Y	9 548 515	9 547 429	9 546 407	9 546 407
Óxidos Mayores [%]				
SiO ₂	62	61,85	62,06	61,96
TiO ₂	0,45	0,43	0,47	0,44
Al ₂ O ₃	17,81	17,88	17,74	17,75
Fe ₂ O ₃ T	4,73	4,75	4,57	4,56
MnO	0,10	0,10	0,08	0,08
MgO	1,95	2,05	2,03	2,21
CaO	4,12	4,02	4,15	3,90
Na ₂ O	5,10	5,24	4,84	4,95
K ₂ O	1,38	1,15	1,53	1,56
P ₂ O ₅	0,09	0,10	0,10	0,10
LOI	2,91	3,09	2,95	3,17
Total	97,73	97,57	97,57	97,51
Na ₂ O+K ₂ O	6,48	6,39	6,37	6,51
CIA	62,69	63,20	62,77	63,03
PIA	0,64	0,64	0,64	0,65
Elementos traza y tierras raras [ppm]				
Ga	19,60	19,40	19,60	19,30
Rb	49,20	42,50	55	57,10
Sr	639	684	687	600
Zr	95,80	110	91,90	94,90
Y	8,81	9,49	9	8,89
Nb	2,86	2,96	2,80	2,72
Cs	2,81	2,92	3,19	3,20
Ce	13,80	17,90	23,80	13,10
Pr	2,58	3,13	3,71	2,46
Nd	10,70	12,80	14,90	10,40
Sm	2,40	2,71	2,96	2,31
Eu	0,58	0,53	0,54	0,57
Gd	2,29	2,47	2,58	2,26
Tb	0,33	0,38	0,35	0,33
Dy	1,76	2,01	1,83	1,76
Ho	0,34	0,37	0,34	0,34
Er	0,88	0,94	0,89	0,88
Tm	0,13	0,14	0,13	0,13
Yb	0,78	0,88	0,81	0,81
Lu	0,12	0,13	0,13	0,13
Sc	8,50	8,70	8,23	8,40
V	50,10	51,80	50	48,80
Cr	189	187	13,10	13
Ni	17	18,40	7,22	7,17
Hf	2,84	3,30	2,82	2,88
Ta	0,26	0,26	0,27	0,26
Th	1,81	1,47	1,36	1,38
Pb	7,96	8,03	8,55	7,90
U	1,30	1,60	1,72	1,86
Th/Yb	2,32	1,67	1,67	1,70
Zr/Y	10,87	11,59	10,21	10,67
Nb/Yb	3,66	3,36	3,45	3,35

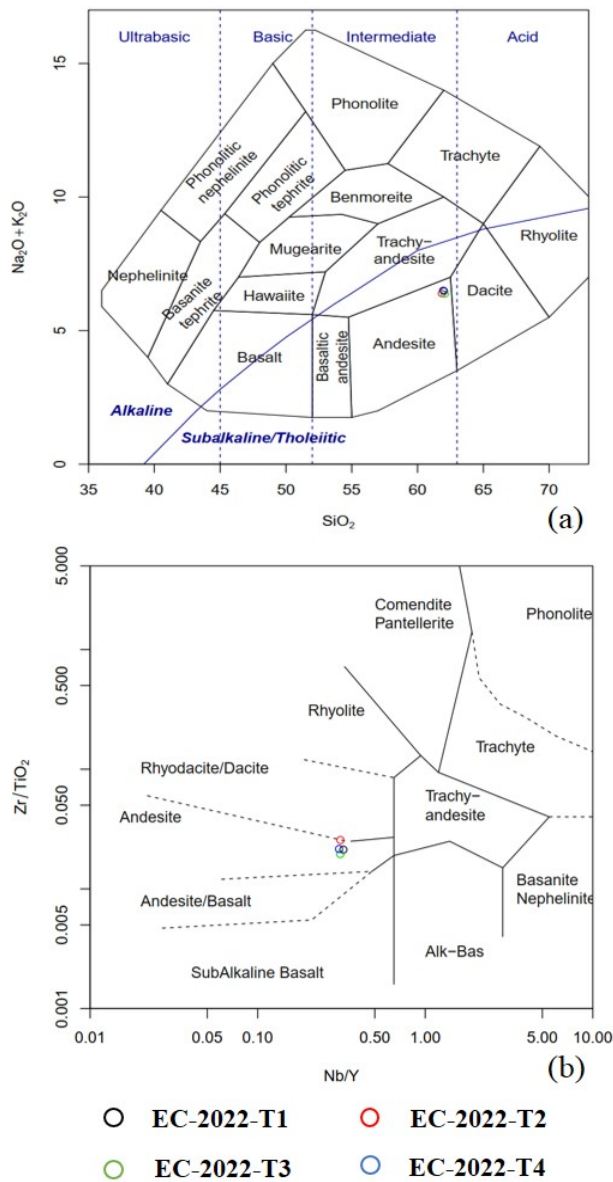


Figura 6. Clasificación en base a datos geoquímicos de muestras de los volcánicos Uritusinga. **(a)** Diagrama binario de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ de Cox *et al.*, [15]. **(b)** Diagrama binario de $\text{ZrTiO}_2\text{-Nb/Y}$ de Winchester y Floyd, [16].

De acuerdo con los resultados geoquímicos, el set de muestras presenta composición calco-alkalina que se evidencia en el diagrama binario Peccerillo y Taylor [17], que evalúa las relaciones entre K_2O y SiO_2 (Fig. 7a). Esto es consistente de acuerdo con el diagrama ternario de Irvine y Baragar [18], en donde las muestras corresponden al campo de las series calco-alkalinas (Fig. 7b).

Además, en el diagrama de Ross y Bédard [19] que utiliza las relaciones Th/Yb y Zr/Y , podemos observar la misma afinidad calco-alkalina en las rocas recolectadas en el cerro Uritusinga.

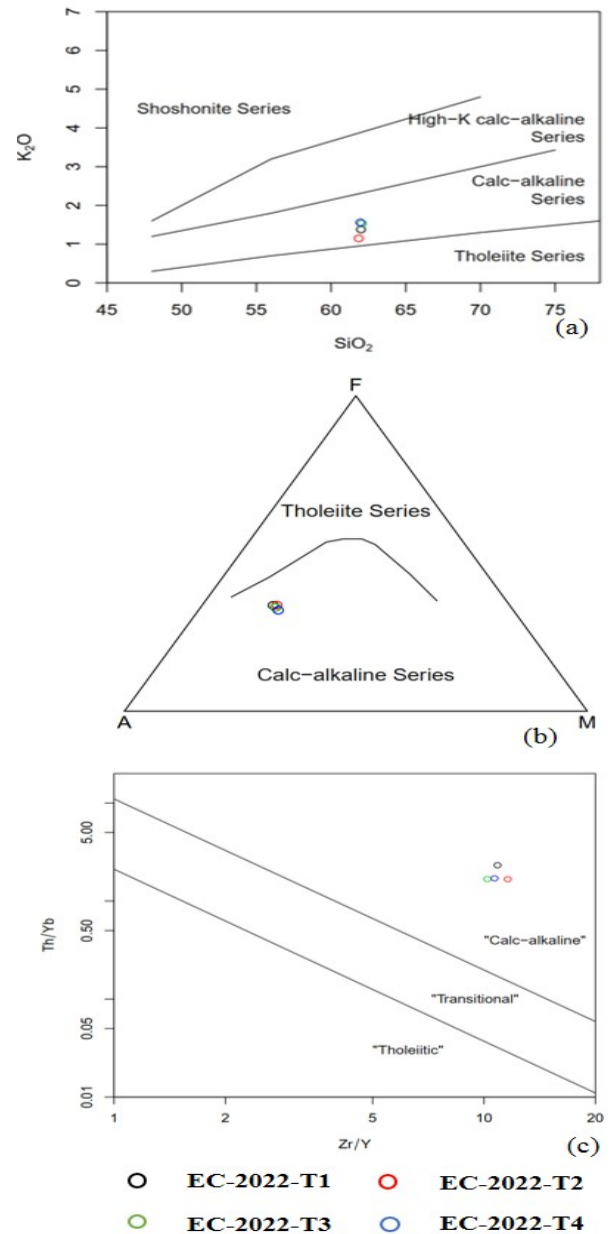


Figura 7. Caracterización geoquímica de muestras de los volcánicos Uritusinga. **(a)** Diagrama binario $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ de [17]. **(b)** Diagrama ternario A-F-M de [18]. **(c)** Diagrama binario Th/Yb-Zr/Y de [19].

En el diagrama binario de discriminación de ambiente tectónico para rocas ígneas extrusivas básicas en base a las relaciones de Th vs Nb [20] (Fig. 8a), al igual que el diagrama de Saccani [21] (Fig. 8b), las rocas son ploteadas en los campos de arco volcánico de un margen continental. Los diagramas analizados de la clasificación de basaltos de Wood [22], indican que las rocas del presente estudio corresponden al campo de basaltos de arco continental (Fig. 9), descartando una génesis de intraplaca o arco de islas continentales, tomando en cuenta las limitaciones del autor para concentraciones de sílice para basaltos y andesitas basálticas.

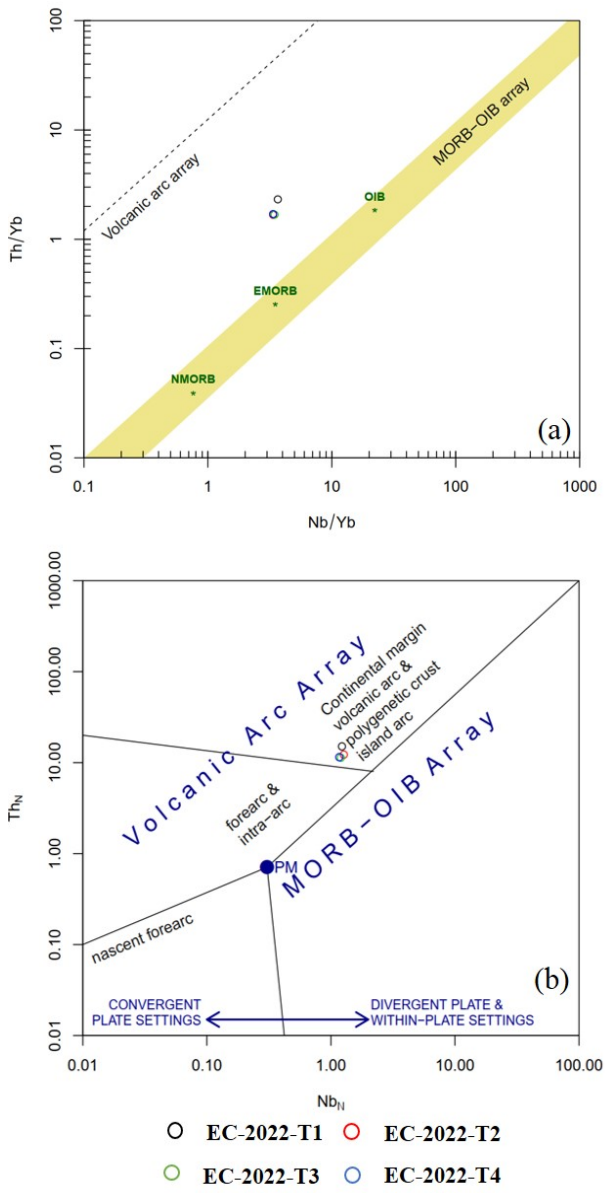


Figura 8. Discriminación tectónica en base a datos de geoquímica de muestras de los volcánicos Uritusinga. (a) Diagrama Th/Yb-Nb/Yb de [20]. (b) Diagrama Th_N-Nb_N de [21].

En el diagrama de tierras raras normalizado a condrita de Nakamura [23] se observa un enriquecimiento de LREE sobre HREE (Fig. 10a), lo cual es común en rocas de corteza continental, ya que esta suele estar enriquecida en LREE y con la característica anomalía negativa de Eu puede estar relacionada a la retención de Eu⁺² en la fuente o a cristales de plagioclasa que han fraccionado. Los diagramas multi-elementales permiten interpretar el comportamiento petrogenético de los elementos de las tierras raras (REE), elementos de fuerza de campo alta

(HFSE) y algunos elementos litófilos de radio iónico grande (LILE). En la figura 10b, normalizada a manto primitivo de McDonough y Sun [24], se observa la anomalía negativa de Ti que es característica en magmas de arcos. El empobrecimiento de P en rocas diferenciadas se atribuye a la fraccionación de apatito. Las anomalías negativas de Nb y Ta están asociadas a magmas generados en zonas de subducción por probable solubilidad baja en la generación de los fundidos de las rocas correspondientes debido a su alta incompatibilidad.

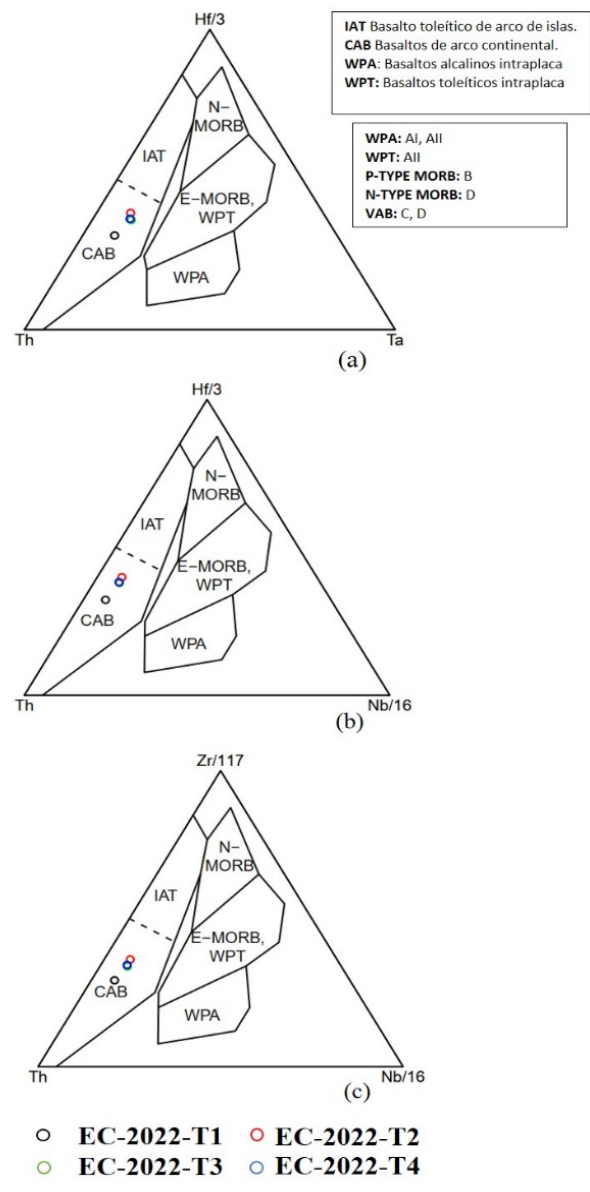


Figura 9. Diagramas de discriminación del ambiente tectónico con base a datos de geoquímica de muestras de los volcánicos Uritusinga. (a)-(b)-(c) Diagrama Th-Hf/3 de [22].

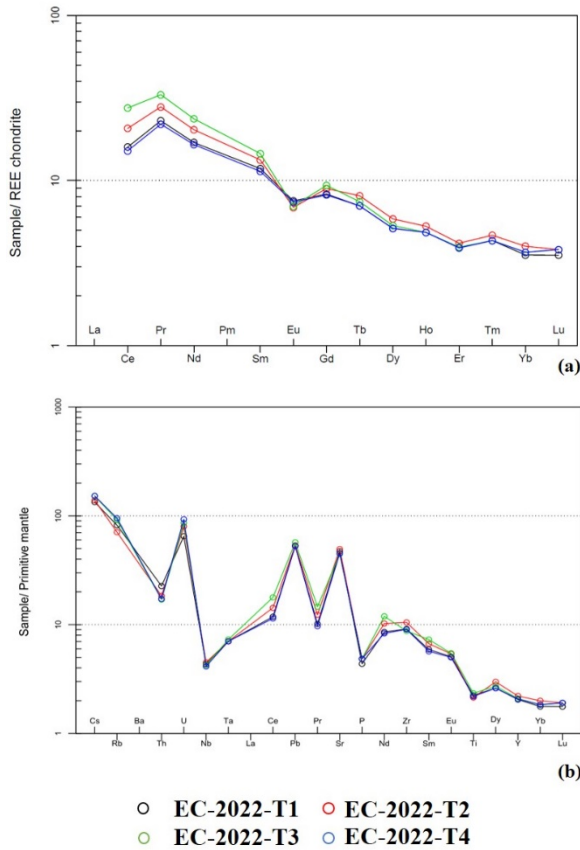


Figura 10. Diagramas multi-elementos de los volcánicos Uritusinga. (a). Diagrama normalizado a condrita de [23]. (b) Diagrama normalizado a manto primitivo de [24].

3.6 Discusión

De acuerdo con la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, por sus siglas en inglés) [25], la caracterización formal de una unidad volcánica necesariamente debe incluir la descripción litológica, relaciones estratigráficas, análisis petrográfico, estudio geoquímico, edad e interpretación en un marco geodinámico [26]. Además, [12], [27] y [28] detallan los

modelos de facies para secuencias volcánicas y volcanoclásticas (Fig. 11).

Por lo expuesto, se procedió con la caracterización de las secuencias volcánicas que se identificaron en el cerro Uritusinga, de donde se obtuvieron litofacies correspondientes a andesitas, brechas volcánicas, tobas de cristales, tobas de clastos, tobas de ceniza y conglomerados volcánicos. Asimismo, la arquitectura estratigráfica indica que niveles volcanoclásticos se intercalan con rocas epiclásticas. Los niveles volcánicos y volcanoclásticos progradan desde el noroeste al sureste y se intercalan con rocas detríticas hacia el sur. Estas características son propias de facies distales, probablemente influenciadas por facies proximales lo que se sugiere en la figura 6.

El análisis geoquímico sugiere que las rocas de la secuencia volcánica tienen afinidad calco-alcalina. Su ambiente de formación se relaciona a un arco volcánico en margen continental activa. Este volcanismo posiblemente tendría su centro de emisión por el sector de Las Juntas, al norte de la zona de estudio donde se reportan estructuras volcánicas como calderas, domos, conos y cuellos, que ocupan un área aproximada de 125 Km² [29].

Datos recientes de investigaciones realizadas en esta secuencia volcánica [30], sugieren que las edades enfriamiento de trazas de fisión corresponden a $2,36 \pm 0,36$ Ma, estas edades concuerdan con las reportadas anteriormente por Kennerley para la Formación Salapa y que difieren a lo indicado en [6] donde se colocó a la Unidad Uritusinga como basamento de la cuenca de Loja de edad Eoceno-Oligoceno.

En este contexto, el volcanismo expresado en el cerro Uritusinga correspondería a pulsos magmáticos del Pleistoceno, caracterizados por series calco-alcalinas diferenciadas, con lo cual, se puede correlacionar con rocas de la Formación Salapa.

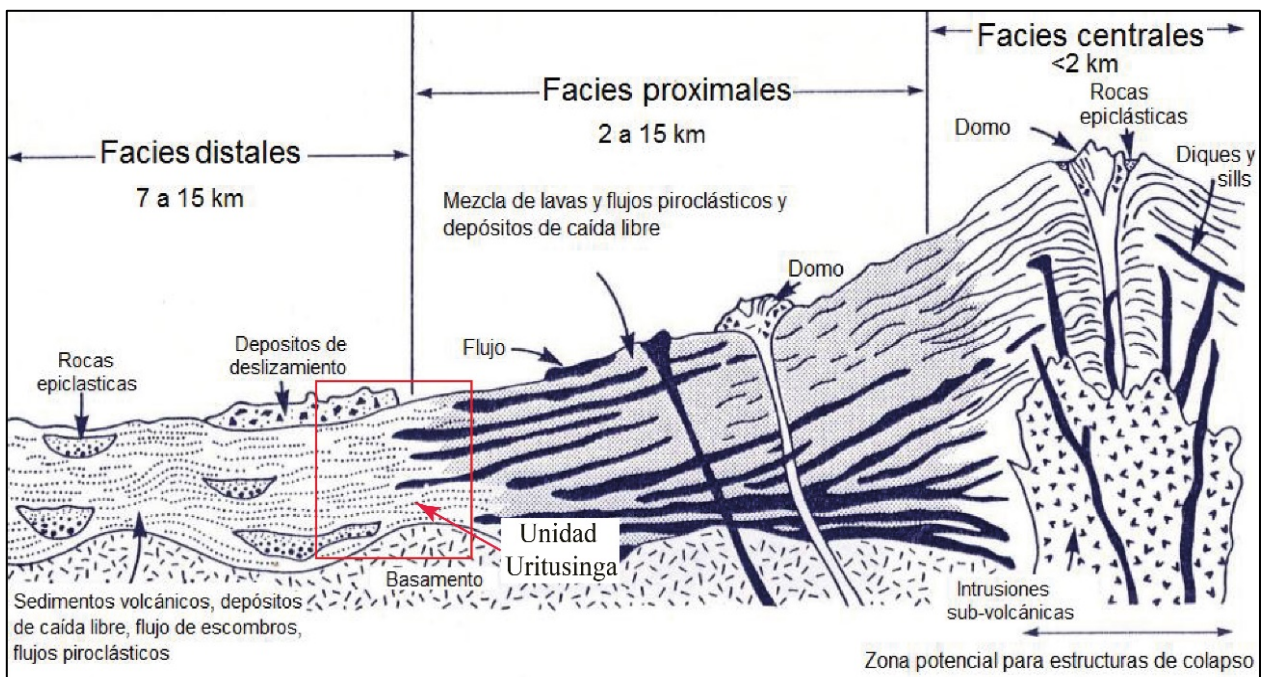


Figura 11. Modelo de facies volcánicas. Modificado de Cas y Wright [12].

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Los volcánicos Uritusinga, morfológicamente consisten en geoformas tipo domos irregulares alargados en sentido noroeste-sureste, controlados y limitados al norte por la Falla La Palma de dirección NNO-SSE. Esta secuencia se deposita directamente sobre el basamento metamórfico en discordancia angular y agrupa a secuencias de andesitas, brechas y conglomerados volcánicos intercalados con tobas finas de cristales, tobas gruesas de clastos y tobas finas de ceniza.

La arquitectura estratigráfica y el detalle de litofacies y litotipos, permite asociar a los volcánicos Uritusinga a facies volcánicas distales influenciadas por facies proximales según el modelo de facies volcánicas de Cas y Wright [12].

Un posible centro de emisión puede estar ubicado al norte del cerro Uritusinga, por el sector de Las Juntas donde se reportan estructuras volcánicas como calderas, domos, conos y cuellos, que ocupan un área aproximada de 125 km² [29].

4.2. RECOMENDACIONES

Una vez obtenida la información litoestratigráfica, petrográfica, geoquímica y la edad es necesario correlacionar estos volcánicos con la Formación Salapa y así actualizar la cartografía geológica.

Se sugiere realizar un estudio morfológico de los alrededores para ubicar el centro de emisión de los productos volcánicos, pues debido a procesos de erosión glaciaria no se ha podido determinar con certeza.

A nivel regional se recomienda realizar correlaciones litoestratigráficas con ayuda de datos geocronológicos y bioestratigráficos con unidades volcánicas similares con la finalidad de vincular esta unidad a un ciclo volcánico o a su vez reportar un nuevo ciclo volcánico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias Minerales en el Territorio Ecuatoriano, desarrollado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético, anexo al Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, y producto directo del levantamiento de información geológica en la hoja geológica Gonzanamá, escala 1: 100 000, entre los años 2014 a 2023.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Kennerley, J. B. (1973). Geology of the Loja Province, Southern Ecuador. Institute of Geological Sciences, Report, 23, 1-34.

[2] Hungerbühler, D., 1997. Tertiary basins in the Andes of southern Ecuador Z3800X-4820X.: sedimentary evolution, deformation and regional tectonic implications. PhD Thesis, Institute of Geology ETH Zürich, Switzerland, 182 pp.

[3] Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., ... & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 75-124.

[4] Cox, K. G. (Ed.). (2013). The interpretation of igneous rocks. *Springer Science & Business Media*.

[5] Bull, K. F., Troedson, A. L., Bodorkos, S., Blevin, P. L., Bruce, M. C., & Waltenberg, K. (2021). Warrumbungle Volcano: facies architecture and evolution of a complex shield volcano. *Australian Journal of Earth Sciences*, 68(2), 149-187.

[6] Instituto de Investigación Geológico Minero y Metalúrgico – INIGEMM. (2014). Memoria técnica de la Hoja Geológica de Gonzanamá escala 1: 100 000. Ministerio de Minas y Recursos No Renovables del Ecuador. Quito-Ecuador.

[7] Litherland, M., Aspden, J.A., Jemielita, R.A., 1994. The metamorphic belts of Ecuador. *Overseas Memoir of the British Geological Survey* 11, 147 pp.

[8] Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D., & Winkler, W. (1999). Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307(3-4), 255-276.

[9] Walker, R. G. (1990). Facies modeling and sequence stratigraphy: perspective. *Journal of Sedimentary Research*, 60(5).

- [10] Németh, K., & Palmer, J. (2019). Geological mapping of volcanic terrains: Discussion on concepts, facies models, scales, and resolutions from New Zealand perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 385, 27-45.
- [11] Orton, G. J. (1995). Facies models in volcanic terrains: time's arrow versus time's cycle. *Sedimentary Facies Analysis: A Tribute to the Research and Teaching of Harold G. Reading*, 157-193.
- [12] Cas, R. A. F., Wright, J. V., Cas, R. A. F., & Wright, J. V. (1988). Facies models for ancient volcanic successions. *Volcanic Successions Modern and Ancient: A geological approach to processes, products and successions*, 412-442.
- [13] Janoušek, V., Moyon, J. F., Erban, V., & Hora, J. (2019). GCDkit goes platform independent!. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 16, 315-324.
- [14] Miall, A. D. (2022). Stratigraphy: the modern synthesis. In *Stratigraphy: A modern synthesis* (pp. 341-417). Cham: Springer International Publishing.
- [15] Cox, K., Bell, J., and Pankhurst, R. 1979. The interpretation of igneous rocks. George Allen and Unwin, London, 445p.
- [16] Winchester, J. A., & Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology*, 20, 325-343
- [17] Peccerillo, A., and Taylor, S.R., (1976). Geochemistry of Eocene Calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonir area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58:63-81.
- [18] Irvine, T. N., & Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.
- [19] Ross, P. S., & Bédard, J. H. (2009). Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46(11), 823-839.
- [20] Pearce, J. A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1-4), 14-48.
- [21] Saccani, E. (2015). A new method of discriminating different types of post-Archean ophiolitic basalts and their tectonic significance using Th-Nb and Ce-Dy-Yb systematics. *Geoscience Frontiers*, 6(4), 481-501.
- [22] Wood, D.A. (1980). The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters* 50: 11-30.
- [23] 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.
- [24] McDonough, W.F., and Sun, S.S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- [25] Le Bas, M. J., & Streckeisen, A. L. (2018). The IUGS systematics of igneous rocks. *Journal of the Geological Society*, 239(5), 825-833.
- [26] Jerram, D., & Petford, N. (2011). The field description of igneous rocks. John Wiley & Sons.
- [27] Fisher, R. V., & Schmincke, H. U. (2012). Pyroclastic rocks. *Springer Science & Business Media*.
- [28] Mc Phie, J. (1993). Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks.
- [29] Instituto de Investigación Geológica Minero y Metalúrgico – INIGEMM. (2014). Memoria técnica de la Hoja Geológica Las Juntas escala 1: 50 000. Ministerio de Minas y Recursos No Renovables del Ecuador. Quito-Ecuador.
- [30] [Pulupa, R., Romero, C., Condoy, D., Calderón, D., Carranco, F., & Andrade, G. (2023). Facies volcánicas distales en la Unidad Uritusinga, Loja-Ecuador. In *XI Congreso Ecuatoriano de Geología, Minas, Petróleos y Ambiental*.