

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7443

GEOLOGÍA DE VOLCANES: CAMPO MONOGENÉTICO DE YURA

Departamento Arequipa
Provincia Arequipa
Distrito Yura



OCTUBRE
2023

“GEOLOGÍA DE VOLCANES: CAMPO MONOGENÉTICO DE YURA”

Distrito Yura, provincia Arequipa, departamento Arequipa

Elaborado por la
Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo
Geológico del
INGEMMET

Equipo de investigación:

*David Arteaga Utani
Nélida Manrique Llerena
Rigoberto Aguilar Contreras*

Revisión Técnica: Ing. Bilberto Luis Zavala Carrión

Revisión Externa.

Referencia bibliográfica

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023) - *“Geología de volcanes: campo monogenético de Yura”, Distrito Yura, provincia Arequipa, departamento Arequipa*. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7443 44 p.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Ubicación.....	3
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.4. Metodología.....	4
1.4.1. Gabinete.....	4
1.4.2. Campo.....	4
1.4.3. Post-campo.....	5
2. Marco teórico.....	5
2.1. Volcán.....	5
2.2. Volcán monogenético.....	6
2.3. Campo monogenético.....	7
2.4. Estilos de erupción.....	7
2.5. Tipos de volcanes monogenéticos.....	8
2.6. Productos volcánicos.....	9
3. Contexto tectónico y estructural.....	10
3.1. Entorno tectónico.....	10
3.2. Entorno estructural Volcánico.....	11
4. Contexto estratigráfico.....	12
4.1. Unidades estratigráficas infrayacentes al campo monogenético Yura.....	12
4.1.1. Formación Chocolate.....	12
4.1.2. Formación Socosani.....	13
4.1.3. Grupo Yura.....	13
4.1.4. Formación Murco.....	14
4.1.5. Grupo Tacaza.....	14
4.1.6. Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA).....	14
4.1.7. Tufo Yura.....	14
4.2. Vulcanismo de los volcanes aledaños al complejo volcánico Chachani.....	15
4.2.1. Cono de escoria Nicholson.....	15
4.2.2. Maar Ccapua.....	16
4.2.3. Volcán Yura Viejo.....	17

4.2.4.	Volcán Uyupampa	20
4.2.5.	Flujos de lava El Chiral	21
4.2.6.	Conos de escoria Patacocha.....	21
5.	PETROGRAFÍA	22
5.1.	Volcán monogenético Nicholson.....	23
5.1.1.	Andesita basáltica	23
5.2.	Volcán monogenético de Ccapua.....	24
5.2.1.	Andesita basáltica	24
5.3.	Volcán monogenético de Yura Viejo	28
5.3.1.	Andesita basáltica	28
5.3.2.	Xenolitos (Cuarzoarenita).....	31
5.4.	Volcán monogenético de Uyupampa	33
5.4.1.	Andesita basáltica	33
5.5.	Volcán monogenético El Chiral	35
5.5.1.	Andesita basáltica	35
5.6.	Volcán monogenético Patacocha	37
5.6.1.	Andesita basáltica	37
6.	GEOQUÍMICA.....	38
7.	GEOCRONOLOGÍA.....	39
8.	CONCLUSIONES.....	40
9.	RECOMENDACIONES.....	41
	BIBLIOGRAFÍA.....	42

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1.	Mapa de ubicación del campo monogenético de Yura en la zona volcánica central de los Andes (ZVC).....	3
Figura 2.	Mapa de puntos de observación geológica.....	5
Figura 3.	Volcán Misti.	6
Figura 4.	Volcán monogenético mellizo, campo monogenético de Andagua, Arequipa-Perú (Tomado de https://www.rumbosdelperu.com/).	6
Figura 5.	Campo monogenético de Andagua, en el lado derecho se aprecia el cono de Chilcapite, casi perfecto (tomada de Rivera, M. & Zavala, B. (2015). Volcanismo monogenético: paisajes y geoformas singulares en el valle de volcanes de Andagua y Huambo. En: 1 Simposio de Geoparques, Arequipa, 14 al 17 de julio 2015: Libro de resúmenes. Lima: INGEMMET, p.43-47.).	7
Figura 6.	Erupción estromboliana. Erupción del volcán Estrómboli (Italia). 2006.....	8
Figura 7.	Erupción surtseyana. Erupción de volcán submarino en Tonga (Oceanía), 2009.....	8
Figura 8.	Estructuras típicas de edificios volcánicos de pequeño volumen de composición máfica y silícica formado en ambientes subacuosa a subaéreos y el	

resultado de radios efectivos diferentes entre el magma y el agua (agregar fuente y referenciar en el texto).....	9
Figura 9. Fragmentos de magma solidificada (Tefra).....	9
Figura 10. Fragmentos de escoria.....	10
Figura 11. Fragmentos de pómez.....	10
Figura 12. Vidrio volcánico.....	10
Figura 13. Afloramiento del grupo Yura a lo largo del río Yura (oeste del Complejo Volcánico Chachani).....	13
Figura 14. Depósitos de Ignimbrita Aeropuerto Arequipa formando lomadas suaves, que cubren secuencias sedimentarias del Yura.	14
Figura 15. El Tufo Yura bajo depósitos de caída escoriácea.....	15
Figura 16. Estructura del volcán monogenético Nicholson.....	16
Figura 17. Estructura del volcán monogenético Ccapua.	17
Figura 18. Depósitos del volcán monogenético Yura Viejo.	18
Figura 19. Columnas tefroestratigráficas del volcán monogenético de Yura Viejo.	19
Figura 20. Volcán Uyupampa y columna tefroestratigráfica del volcán.....	20
Figura 21. Domos-colada y flujos de lava del volcán El Chiral.	21
Figura 22. Depósitos escoriáceos de los conos de escoria Patacocha.....	21
Figura 23. Mapa geológico del campo monogenético de Yura.....	22
Figura 24. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-010, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d) a) y b) Fenocristales de olivino inmersos en matriz microcristalina. c) y d) Fragmentos líticos alterados compuesto por agregados microlíticos y criptocristalinos inmerso en la matriz. Las abreviaturas minerales son: Olivino (OLV), fragmentos líticos alterados (Lít. Alt.) y vesícula (vesícula).	24
Figura 25. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-001, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Fenocristal de olivino con golfos y oquedades. b) Fenocristal de olivino con textura esquelética. c) Fenocristal de olivino formando textura aglomerádica d) Vesículas subredondeadas y matriz microcristalina compuesta por plagioclasa y piroxeno. Las abreviaturas minerales son: Olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), vesícula (vesícula).	25
Figura 26. Fotomicrografías de la muestra CHA-18-25, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b, c y d). y bajo luz de polarización paralela (d). a) y b) Fenocristal de olivino con bordes reabsorbidos presentando textura esquelética y bordeados por clinopiroxeno y plagioclasa. c) Aglomerado de cristales de olivino, inmersos en matriz de plagioclasa, piroxeno, vidrio volcánico y óxidos de hierro y titanio, ligeramente orientados. d) Moldes de mineral de hábito prismático relleno por microlitos de piroxeno, plagioclasa y óxidos de hierro y titanio vista en nicoles cruzados (izquierda), nicoles paralelos (derecha). Abreviaciones minerales Olivino (OLV), clinopiroxeno (CPX), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL) y óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi), vidrio volcánico (vd).	26
Figura 27. Fotomicrografías de la muestra CHA-19-50, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a) Fenocristal de olivino presentando textura esquelética y bordes de reacción inmerso en matriz compuesta por plagioclasa, piroxeno y óxidos de hierro y titanio, mostrando cierta orientación. Abreviaciones minerales olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vesícula (vesícula).....	27
Figura 28. Fotomicrografías de la muestra CHA-19-51, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a y b) Fenocristal	

de olivino con bordes de reacción y textura esquelética, microfracturado, con inclusiones de óxidos de hierro y titanio, inmerso en la matriz compuesta por plagioclasa, piroxeno, óxidos de hierro y titanio y vidrio volcánico. Abreviaciones minerales olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vidrio volcánico (vd)..... 27

Figura 29. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-002, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Fenocristal de olivino con textura esquelética. b) Fenocristal de olivino con textura coronítica conformada por piroxeno. c) Fragmentos líticos sedimentarios (Xenolitos) compuestos por granos de cuarzo. d) Detalle de la matriz mostrando las vesículas subredondeadas-irregulares y matriz microcristalina compuesta por plagioclasa y piroxeno. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), cuarzo (cz), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL), líticos sedimentarios (Lít. Sed.), vesícula (vesícula), matriz (Matriz)..... 29

Figura 30. Fotomicrografías de la muestra CHA-18-46, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (c y d). a y b) Fenocristal de olivino con textura esquelética con golfos de reabsorción. c) xenolito de origen sedimentario detrítico grano soportada, inmerso en matriz conformada por microlitos de piroxeno, plagioclasa, vidrio volcánico y óxidos de hierro y titanio, vista en nicoles cruzados (izquierda), nicoles paralelos (derecha). d) enclave de composición andesítica y detalle de las vesículas de formas anhedrales de bordes irregulares. Abreviaciones minerales olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), vidrio volcánico (vd), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vesículas (vesículas)..... 30

Figura 31. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-004, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Olivino con textura esquelética. b) Aglomerado de olivino, asociado con moldes de minerales y c) Moldes de minerales con formas prismáticas rellenas por piroxenos y textura coronítica compuesta por opacita. d) Detalle de la matriz, mostrando la orientación de los microlitos de piroxeno, plagioclasa, óxidos de hierro y titanio, así como vidrio volcánico englobando fenocristales de olivino. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), anfíbol (ANF), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi), opacita (Opacita), vidrio volcánico (vd) y vesícula (vesícula)..... 31

Figura 32. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-003A, correspondiente a una cuarzoarenita: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Roca sedimentaria detrítica, compuesta por granos de cuarzo. b) xenolitos o fragmentos líticos de origen volcánico compuesto por piroxeno. c) Agregados criptocristalinos de carbonatos rellenas intersticios dejados por los granos de cuarzo de forma puntual. d) Xenolitos o fragmentos líticos de origen volcánico II inmerso en matriz arcillosa englobando por sectores a los clastos de cuarzo. Las abreviaturas minerales son cuarzo (cz), fragmentos líticos volcánicos (Lít. Volc.) y carbonatos (CBs), arcillas (ARCs)..... 32

Figura 33. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-003B, correspondiente a una cuarzoarenita: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). y bajo luz de polarización paralela (c y d). a) Granos de cuarzo y feldespatos. b) Xenolito de origen volcánico y granos de zircón. c) Xenolito de origen volcánico compuesto por piroxenos. d) Detalle de la matriz arcillosa englobando a los granos de cuarzo. Las abreviaturas minerales son cuarzo (cz), feldespatos (FPs), xenolitos o fragmentos líticos volcánicos (Lít. Volc.), zircón (zir) y arcillas (ARCs)..... 33

- Figura 34. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-009, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Olivinos con textura esquelética. b) Cristales de olivinos con bordes de piroxenos formando textura coronítica. c) Cúmulo de piroxenos microcristalinos, formando textura aglomerada. d) Detalle de la matriz, mostrando a los microlitos de plagioclasas englobando a los fenocristales de olivinos. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), piroxeno (PX) y plagioclasa (PGL). 34
- Figura 35. Fotomicrografías de la muestra CHA-18-26, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b, c y d). y bajo luz de polarización paralela (b). a) Fenocristales de olivino de forma subhedral y fenocristal de olivino con borde de reacción y textura coronítica formada por opacita. b) Molde de cristal reemplazado por opacita y a su vez bordeado por un agregado microcristalino de clinopiroxeno formando textura coronítica, vista en nicoles cruzados (izquierda), nicoles paralelos (derecha). c) Xenolito de arenisca cuarcítica subredondeada. d) Anfíbol reemplazado por clinopiroxeno y óxidos de hierro y titanio, hacia el borde se presenta opacita conformada por microcristales de plagioclasas y óxidos de hierro y titanio. Abreviaciones minerales olivinos (OLVs), opacita (opacita), xenolitos (Xenolitos), plagioclasas (PGLs), clinopiroxenos (CPXs), anfíboles (ANFs). 35
- Figura 36. Fotomicrografías de la muestra 33S-CHA-R22-013, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a) Fenocristal de olivino de bordes subhedrales, fracturados e inmersos en matriz de plagioclasa y piroxeno. b) Óxidos de hierro y titanio relleno de moldes de minerales prismáticos con bordes de piroxenos mostrando textura coronítica. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi). 36
- Figura 37. Fotomicrografías de la muestra 33S-CHA-R22-015, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a y b) Cristales de olivinos con textura esquelética y fragmentos de olivino inmersos en matriz traquítica compuesto por plagioclasa, piroxeno y vesículas de formas sanhedrales. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vesículas (vesículas). 36
- Figura 38. Fotomicrografías de la muestra 33S-CHA-R23-014, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a y b) Cristales de olivino, unos con borde anhedral, y fracturado y otros mostrando textura esquelética, englobados por matriz compuesta por plagioclasa y piroxeno. b) Óxidos de hierro reemplazando a minerales prismáticos con bordes de piroxenos formando textura coronítica. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), clinopiroxeno (CPX), plagioclasa (PGL) y óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi). 37
- Figura 39. Composición química de los volcanes monogenéticos de Yura. Diagrama de Alkali-Sílice Total que muestra la clasificación de los volcanes Nicholson, Ccapua, Yura Viejo y Uyupampa. Los óxidos principales se muestran como valores libres de volátiles recalculados. Los diagramas de Ca, MgO, Sr y Rb versus SiO₂ muestran la variación de la composición. Diagramas de elementos múltiples normalizados al manto primitivo, que muestran patrones de elementos traza de muestras de rocas. 38

CUADROS

Tabla 1. Resumen de las características petrográficas del campo monogenético Yura. OLV: olivino, PGL: plagioclasa, PX: piroxeno, ANF: anfíbol, cz: cuarzo, OXsFeTi: Óxidos de hierro y titanio, CBs: carbonatos, FPs: feldespatos, zir: zircón, Lít. Volc: Lítico volcánico, vd: vidrio volcánico, ARCs: arcillas. Los valores de % entre paréntesis

representan el porcentaje de contenido de cristales como fenocristales ($\geq 500 \mu\text{m}$) y microlitos ($< 500 \mu\text{m}$) en la masa fundamental..... 23

Tabla 2. Resumen de datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de experimentos de calentamiento incremental. 39

RESUMEN

En los Andes peruanos, el vulcanismo monogenético se encuentra muy extendido, sin embargo, ha sido menos explorado y estudiado, que los estratovolcanes más grandes. En los alrededores del poblado de Yura Viejo se ha identificado cinco pequeños centros volcánicos, que junto al volcán Nicholson previamente conocido, forman el campo monogenético de Yura. Las erupciones freáticas, freatomagmáticas, estrombolianas y efusivas caracterizan la actividad monogenética de este campo, resultado de estas erupciones, generándose pequeños conos de escoria, maars y flujos de lava. La datación realizada en estos volcanes sugiere que el vulcanismo en el campo monogenético de Yura estuvo activo entre 195 ka y 54 ka, que es más reciente de lo esperado (1278 ka – 232 ka). Las rocas se encuentran en un estrecho rango de composición basáltica-andesítica (49,6 a 55,6% en peso de SiO₂), presentando fenocristales de olivino (< 10 vol%) en una matriz fina de textura pilotaxítica, que sugiere un rápido ascenso de magma basáltico a la superficie controlado por la configuración estructural. Estas composiciones son las más máficas del Pleistoceno. Estos pequeños volcanes al estar ubicados entre estratovolcanes activos de mayor dimensión proporcionan un patrimonio geológico valioso y tienen un potencial de desarrollo como sitios o lugares de interés geológico de tipo volcánico no solo por su valor científico, sino didáctico-educativo para comunicar el riesgo a través del geoturismo.

1. Introducción

Los volcanes monogenéticos son importantes manifestaciones de actividad volcánica que usualmente consisten de un conjunto de centros de emisión volcánica incluyendo diferentes geoformas volcánicas como conos de escoria, maars, conos de toba, anillos de toba, domos y flujos de lava (Connor, et al., 2000, Connor & Conway, 2000; Németh, 2010; Németh & Kereszturi, 2015). El término volcán monogenético es usado para designar a un volcán que erupcionó durante un solo periodo (pudiendo durar semanas, meses o años), en la que no hay evidencia de una interrupción temporal significativa o de larga duración en la actividad eruptiva (Macdonald, 1972; Connor & Conway, 2000). La característica más resaltante de estos edificios son el pequeño volumen y bajo contenido de sílice. Sin embargo, muchos de estos volcanes sufren erosión sin-eruptiva debido a agentes como el viento (fuertes vientos) y el agua (lluvias). Por lo general en los volcanes monogenéticos, el cuerpo de magma sube rápidamente y no hay tiempo de interacción con la roca de la corteza; es por ello que la mayoría de estos volcanes emiten magmas basálticos (Valentine & Gregg, 2008). (Wörner, et al, 2018) describió cuatro tipos de volcanes principales en la zona volcánica central de los Andes: Estratovolcanes compuestos andesíticos a dacíticos; grandes cúmulos volcánicos con amplios rangos de composición; voluminosos campos riódacíticos de ignimbrita y escasos campos monogenéticos de volumen insignificante de composición basáltica y andesita-basáltica. Existen pocos estudios geológicos sobre los campos monogenéticos. En la región Arequipa se encuentra el campo monogenético de Andagua, la cual está dividida en siete regiones identificándose seis flujos de lava, 118 domos de lava, y 47 conos piroclásticos (Galas, 2011). En la depresión de Arequipa, se conoce el volcán monogenético Nicholson, el cual se ha emplazado en dos etapas eruptivas (Palza, 1984), en la carta geológica 33s a escala 1/100000 se ha identificado cinco depósitos volcánicos en los sectores El Chiral, Patacocha, Yura Viejo, Uyupampa y Nicholson (Vargas, 1970) sin embargo, por estudios más detallados (trabajo de campo, imágenes satelitales y fotogrametría) los profesionales del Observatorio del INGEMMET han determinado que los depósitos previamente identificados por (Vargas,1970) corresponden a volcanes monogenéticos.

1.1. Ubicación

Los volcanes monogenéticos aledaños al complejo volcánico Chachani (campo monogenético de Yura) se localizan en la zona volcánica de los Andes Centrales, donde también se encuentran estratovolcanes activos y potencialmente activos (De Silva & Francis, 1991). La génesis de estos volcanes es producto de la subducción de la placa de Nasca bajo la placa Sudamericana originando un arco volcánico de composición calco-alcalina. En el arco volcánico se pueden distinguir diferentes estructuras como domos de lava, calderas, estratovolcanes, complejos volcánicos y volcanes monogenéticos (Thouret, et al., 2016; Wörner, et al., 2018).

Geográficamente los volcanes monogenéticos se ubican al noroeste de la ciudad de Arequipa, en el distrito de Yura, provincia y departamento de Arequipa (Fig. 1).

Las coordenadas UTM y geográficas de la zona de estudio son (Cuadro 1):

Volcanes del campo monogenético	Coordenadas			
	Geográficas		UTM	
	Latitud	Longitud	Este	Norte
Nicholson	16°15'41.90"S	71°45'14.65"O	205628 E	8200141 N
Ccapua	16°13'4.08"S	71°41'0.77"O	213107 E	8205095 N
Yura Viejo	16°12'56.18"S	71°42'7.46"O	211122 E	8205312 N
Uyupampa	16°11'54.41"S	71°41'10.49"O	212790 E	8207234 N
El Chiral	16° 9'31.09"S	71°43'13.57"O	209074 E	8211594 N
Patacocha	16° 9'30.01"S	71°45'30.54"O	205002 E	8211573 N

Cuadro 1. Coordenadas centrales de los volcanes monogenéticos que conforman el campo monogenético de Yura.

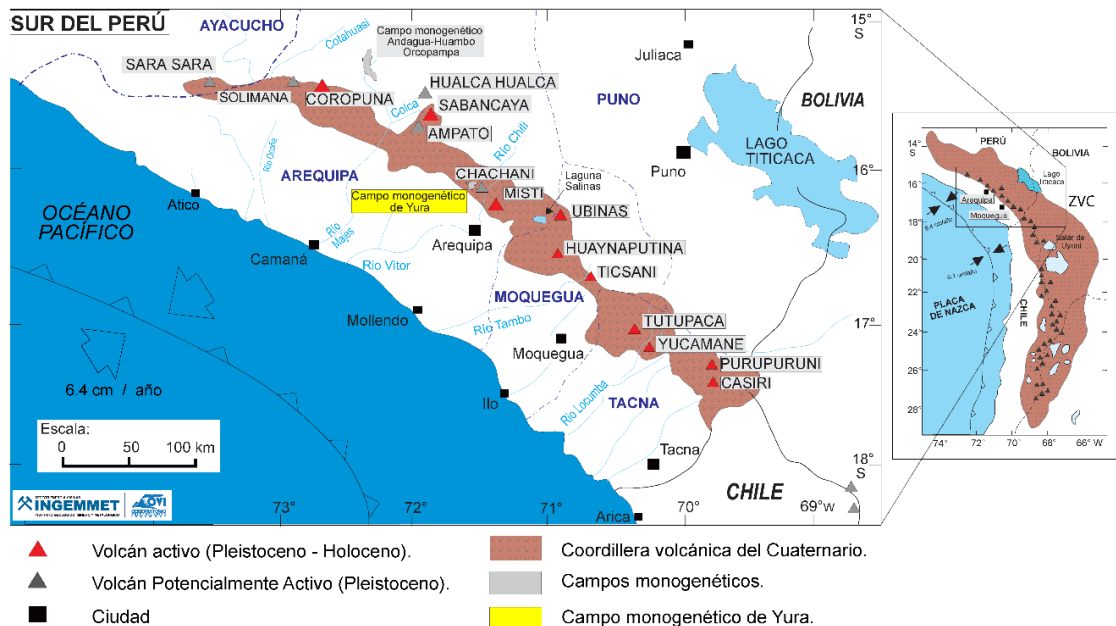


Figura 1. Ubicación del campo monogenético de Yura en la zona volcánica central de los Andes (ZVC).

1.2. Antecedentes

- Vargas (1970), en el mapa geológico del cuadrángulo de Arequipa, identificó cinco volcanes monogenéticos (El Chiral, Patacocha, Yura Viejo, Uyupampa y Nicholson), identificándolos como bloques volcánicos y cenizas.

- Palza (1984), en su tesis sobre el “Estudio Geológico-Geofísico del volcán Nicholson” realiza un estudio detallado que explica su probable origen y evolución a través del tiempo geológico, el cual contempló estudios petrográficos, vulcanológicos y magnéticos. Geomorfológicamente se identifica un cono casi simétrico, trunco, debido a dos etapas eruptivas ocurridas en un intervalo bastante corto.
- Aguilar (2021), describe en la nota informativa “*Yura Viejo, el pueblo asentado en el cráter de un volcán monogenético*”, el trabajo realizado por los investigadores del Observatorio Vulcanológico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet), permitiendo reconstruir la historia de este volcán, mediante el estudio de los depósitos y donde se hace énfasis en la utilización del patrimonio geológico como herramienta de educación, aprovechamiento de recursos y la sensibilización ante los peligros geológicos.
- Aguilar (2022), en el artículo “*Quaternary volcanism in the Yura Monogenetic Field near Arequipa city, southern Peru*” realiza una descripción geológica, configuración tectónica, estratigrafía local donde se encuentran los volcanes monogenéticos, petrografía, geoquímica y geocronología del campo monogenético de Yura. Con los datos obtenidos se definió que el campo monogenético estuvo activo entre 195 y 54 ka.
- Zavala et al., (2022), diferencia parcialmente en el mapa geomorfológico del “Estudio geoambiental de la cuenca del río Quilca-Vítor- Chili” con ayuda de imágenes satelitales, geoformas volcánicas como el volcán Nicholson, Patacocha, y al Este de Yura a las que denominan campo de lavas asociadas a conos monogenéticos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Estudio geológico de los volcanes monogenéticos aledaños al complejo volcánico Chachani.

1.4. Metodología

La metodología utilizada para el estudio de la geología de los volcanes monogenéticos aledaños al complejo volcánico Chachani, involucra trabajos de gabinete (Precampo), campo y finalmente Post-campo.

1.4.1. Gabinete

El trabajo de gabinete se basó en la compilación, análisis e integración de la información existente, interpretación de fotografías aéreas, interpretación de imágenes satelitales y obtención modelos digitales de elevación (DEM), que facilitó el reconocimiento de los volcanes monogenéticos, unidades estratigráficas-geológicas de la zona, contactos, etc., además de identificar los rasgos estructurales (fallas, pliegues y lineamientos), con lo cual elaboraron los mapas preliminares para realizar los trabajos de campo.

1.4.2. Campo

El trabajo de campo consistió de diferentes campañas entre el año 2021, 2022 y 2023, con brigadas conformadas entre 3 y 4 geólogos. Inicialmente realizando un reconocimiento del área de estudio, registrándose puntos de observación geológica (117 en total) entre los seis volcanes monogenéticos: Ccapua, Yura Viejo, Uyupampa y Nicholson, El Chiral y Patacocha (Fig. 2), con la descripción de afloramientos de roca con sus respectiva georeferenciación en coordenadas UTM-WGS84. La información fue plasmada en mapas topográficos y mapas geológicos a escala 1:25 000 elaborados en la etapa de gabinete. Además, se colectó muestras de roca para estudios petrográficos,

geoquímicos y datación radiométrica; además, se utilizaron los resultados obtenidos anteriormente por estudios del Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

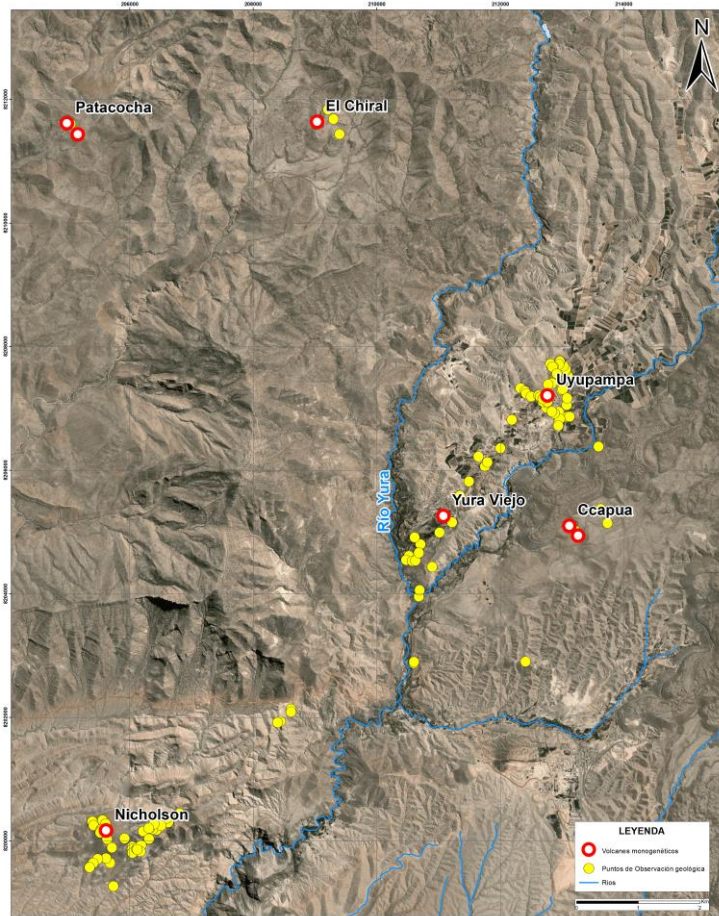


Figura 2. Mapa de puntos de observación geológica.

1.4.3. Post-campo

Elaboración de un Excel de las muestras colectadas con las características descritas en el campo. Se elaboraron secciones delgadas en el laboratorio institucional para el posterior estudio petrográfico y análisis químico (elementos mayores, menores y trazas). Se elaboró los mapas geológicos 1: 25 000 en base a los datos obtenidos en campo y el trabajo realizado en gabinete. Finalmente, la redacción del presente informe con los datos obtenidos en el gabinete, campo y post-campo.

2. Marco teórico

Teniendo como objetivo principal el estudio geológico de los volcanes monogenéticos aledaños al complejo volcánico Chachani es necesario comprender algunas definiciones.

2.1. Volcán

Los volcanes son estructuras situadas en la superficie terrestre o en el fondo marino, formados por la acumulación de materiales provenientes del interior de la Tierra. Un volcán es el resultado de un complejo proceso que incluye la formación, ascenso, evolución, emisión de magma y depositación de los materiales volcánicos (Fig. 3).



Figura 3. Volcán Misti.

2.2. Volcán monogenético

Los volcanes monogenéticos están asociados a una sola fase eruptiva, pero alimentados por varios pulsos de diferentes grados de energía, con volúmenes típicamente $\leq 1\text{km}^3$ (Fig. 4), presentan composición básica a silícica.



Figura 4. Volcán monogenético mellizo, campo monogenético de Andagua, Arequipa-Perú (Tomado de Guía del valle de los Volcanes de Andagua; Zavala et al., 2016).

2.3. Campo monogenético

Es un término no genético, que se utiliza para agrupar volcanes que son producto de una sola erupción (Fig. 5)¹, teniendo en cuenta factores como su génesis, relación espacio-temporal y número de centros volcánicos ubicados sobre un área determinada.



Figura 5. Campo monogenético de Andagua, en primer plano en el lado derecho se aprecia el cono de Chilcapite, casi perfecto y los volcanes Chilcayoc con conos truncados; al fondo la laguna de Chachas (tomada de Zavala et al.,(2016);Guía Geoturística del Valle de los volcanes de Andagua).

2.4. Estilos de erupción

Durante la fase de erupción un volcán puede presentar diferentes tipos de comportamiento, ejemplo, hawaiana, estromboliana, pliniana, peleana y vulcaniana, algunos de estos hacen referencia al nombre del volcán que presenta predominantemente este comportamiento. A continuación, se describen algunos estilos eruptivos que se presentan en la zona de estudio.

2.4.1. Erupciones estrombolianas

Se caracteriza por erupciones explosivas rítmicas (separadas por periodos de segundos hasta varias horas) (Fig. 6), columnas eruptivas que alcanzan alturas entre 1 a 15 km, donde el material emitido es de composición básica y está conformado por escoria, bombas y ceniza. Además, durante estas erupciones se forman conos de escoria (~100 y 200 m) y ceniza de poca altura.

¹ Un ejemplo de este tipo es la duración de la actividad del volcán Parícutín ocurrida en México e iniciada el 20 de febrero de 1943, que tuvo una duración de nueve años, concluyendo en 1952.



Figura 6. Erupción estromboliana. Erupción del volcán Estrómboli (Italia). 2006.

2.4.2. Erupciones freáticas y freatomagmáticas

Este tipo de erupciones ocurren por la interacción de pulsos de magma o calor magmático con cuerpos de agua superficial o subterránea (Fig. 7), que posteriormente permite la eyección de volúmenes importantes de material piroclástico, vapor y gas.

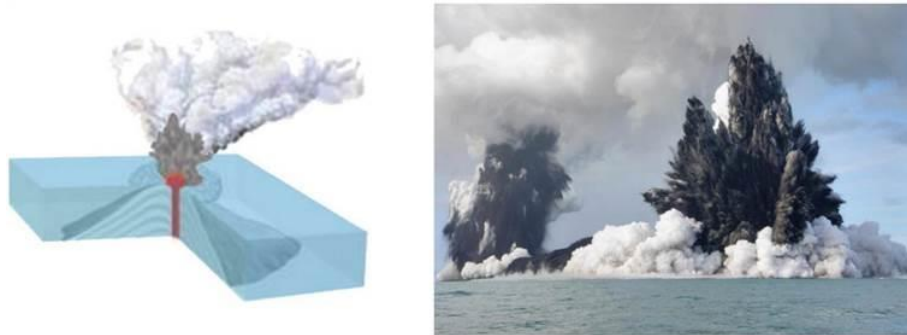


Figura 7. Erupción surtseyana. Erupción de volcán submarino en Tonga (Oceanía), 2009.

2.4.3. Flujos de lava

Son mantos que emite el volcán, cubriendo en muchos casos superficies planas, suaves y de pendiente. Pueden clasificarse en bloques, aa o escoriácea, cordadas o pahoehoe, bloques y almohadillada.

2.5. Tipos de volcanes monogenéticos

La variabilidad en los estilos eruptivos, son reflejados en las diferentes estructuras volcánicas (Fig. 8), que se pueden encontrar de forma aislada o como campos volcánicos (clústeres). A continuación, se describen algunas de estas tipologías:

2.5.1. Cono de escoria

Este tipo de volcán se forma por erupciones estrombolianas, caracterizadas por sus formas circulares o elípticas (vista en planta). Se constituye por fragmentos de lava expulsados por una sola chimenea, llegando a alcanzar una altura máxima de 1000 m.

2.5.2. Cono de toba

Este tipo de volcán se forma por emisiones de tefra cargadas con frecuencia (pocos segundos) y rápidamente expulsadas; pueden presentar una geometría irregular.

2.5.3. Maars

Son pequeños volcanes monogenéticos producidos por erupciones freatomagmáticas y freáticas, cuyos cráteres cortan superficies pre-eruptivas (Németh, K & Kósik, 2020;

Lorenz, 1985); sus cráteres generalmente presentan paredes abruptas y anillos de depósitos piroclásticos en sus márgenes.

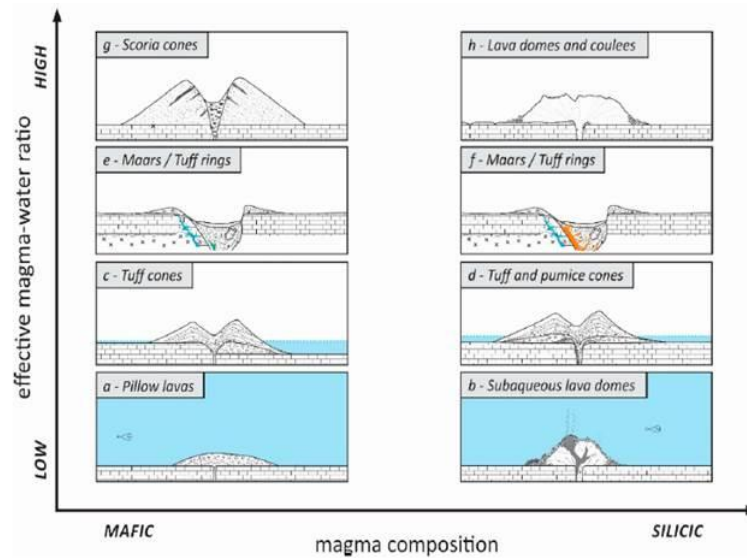


Figura 8. Estructuras típicas de edificios volcánicos de pequeño volumen de composición máfica y silícica formado en ambientes subacuáticos a subaéreos y el resultado de radios efectivos diferentes entre el magma y el agua (Németh, K & Kósik, 2020).

2.6. Productos volcánicos

Los productos volcánicos son aquellos que salen del interior del volcán cuando entra en erupción

2.6.1. Tefra

Son fragmentos que se forman durante una actividad volcánica explosiva originados por procesos de fragmentación o cristalización directa de material líquido o sólido. El material piroclástico se expulsa hacia el aire y al caer a la superficie se va enfriando. Este material se clasifica según su tamaño (según la IUGS-International Union of Geological Sciences) en: “bloques” y “bombas” que son los clastos más grandes (>64 mm), “lapilli” que comprenden tamaños entre 2 y 64 mm y ceniza (el material más fino < 2mm) (Fig. 9).

Tamaño de los piroclastos



Figura 9. Fragmentos de magma solidificada (Tefra).

2.6.2. Escoria

Fragmentos de color gris, gris oscuro o rojizo, presencia de vesículas (cavidades) (Fig. 10), que se originaron por la descompresión, son rocas típicas producto de erupciones estrombolianas.



Figura 10. Fragmentos de escoria.

2.6.3. Pómez

Son piroclastos de composición silíceea, generalmente de composición dacítica a riolítica presentando colores claros; se encuentran vesículas por el escape de los gases y son de baja densidad (Fig. 11).



Figura 11. Fragmentos de pómez.

2.6.4. Vidrio volcánico

También conocido como obsidiana, se forma por el enfriamiento brusco de la lava, es muy dura, quebradiza y se rompe formando bordes afilados (Fig. 12).

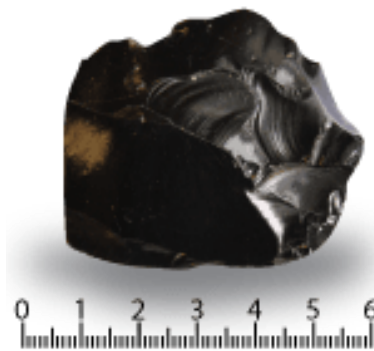


Figura 12. Vidrio volcánico.

3. Contexto tectónico y estructural

3.1. Entorno tectónico

La actividad magmática y volcánica en Perú, en la zona volcánica central, se inició desde el Jurásico inferior (~190 Ma) hasta el presente (Mamani, et al., 2010), siendo de mayor intensidad en el Cenozoico especialmente durante el levantamiento de los Andes (~40 Ma). Sin embargo, (Mamani et al., 2010) describió el magmatismo y la evolución química

desde 91 Ma, con la superposición y migración de siete arcos magmáticos: Toquepala (91-45 Ma), Andahuaylas (45-30 Ma), Tacaza (30-24 Ma), Huaylillas (24-10 Ma), Barroso inferior (10-3 Ma), Barroso superior (3-1 Ma) y el Arco Frontal o Arco Actual (<1 Ma). En el sur de Perú el “Arco Frontal” se ubica entre 220 y 250 km al este de la Fosa Perú-Chile con un buzamiento de 30° (Fig. 23). Los volcanes activos, inactivos y extintos crecieron sobre la cordillera Occidental con una orientación N130° y N170°, paralela a la fosa peruano-chilena. El contexto geodinámico es el de un margen continental activo y una subducción andina arquetípica (Thorpe, et al., 1982; Wilson, 1986). El vulcanismo Neógeno a Reciente se asocia con regímenes transtensionales al ofrecer estas áreas menos resistencia a través de fallas, ascendiendo el magma más fácilmente a superficie (Van Wyk de Vries & Merle, 1988, Acocella et al., 1999).

La depresión de Arequipa se produce por una tectónica de separación asociada con fallas normales regionales de rumbo ~N130° (Mering, et al., 1996; Thouret, et al., 2001; Benavente, 2017), limitada por el Sistema de Fallas Cincha-Lluta-Incapuquio, experimentando diferentes regímenes tectónicos (Vicente, 1982); por el oeste se delimita por la cordillera Occidental. Estudios realizados alrededor de la cuenca Arequipa han demostrado que este sistema de fallas ha operado durante el Mesozoico en sucesivos regímenes extensionales e inversos (Acosta et al., 2010). El sistema fue interpretado como fallas de empuje y rumbo, que ahora actúan en un régimen transtensional. La falla de Ayo-Lluta-Arequipa (Falla Huanca) con orientación N130° es una estructura regional que anteriormente era una falla de cabalgamiento. Esta estructura pone en contacto unidades sedimentarias mesozoicas (incluido el Grupo Yura) con unidades volcánicas sedimentarias del Cenozoico. Durante el Cenozoico, el área se ha visto afectada por importantes fases compresivas. Desde el Mioceno Medio, la tectónica extensional ha tenido una gran influencia en el vulcanismo en la Cordillera Occidental (Huaman-Rodrigo, et al., 1993; Mering, et al., 1996). Desde el Plioceno, el sistema Ayo-Lluta-Arequipa ha actuado como una falla de rumbo normal y sinistral (Sempere & Jacay, 2006).

3.2. Entorno estructural Volcánico

El contexto estructural en el cual se emplazaron los volcanes aledaños al complejo volcánico Chachani consta de cuatro grupos de fallas: N130°, N160°, N80° y N20°. Esta configuración es similar al complejo volcánico Chachani descrito por Aguilar et al., 2022.

En imágenes satelitales, un lineamiento orientado N130° corta los domos-colada Potrero y coincide con la escarpa de colapso de la unidad media de este grupo de domos (Aguilar, et al., 2022). Las fallas N120°-130° se extienden al este de la ciudad de Arequipa. Otra falla notable es la falla normal-dextral que atraviesa el flanco occidental del volcán Misti (Thouret et al., 2001) y se extiende hacia el flanco este del estratovolcán Estribo con una orientación N130°.

A escala regional, las fallas y lineamientos N120°-130° y N160° muestran un sistema de fallas escalonadas, que se extiende hasta el volcán Misti y el complejo volcánico Pichu-Pichu. En la parte central oriental del complejo volcánico Chachani, este sistema corta esos edificios. La orientación de estos lineamientos probablemente esté controlada por fallas perpendiculares de orientación N80°.

Un grupo de extensas fallas y lineamientos (~ 20 km), con dirección predominante N80°, permiten definir una estructura NE-SO que delimita el borde noroeste de la cuenca Arequipa (Mering et al., 1996; Thouret et al., 2001, Benavente et al., 2017). Esta falla intersecta a la falla Ayo-Lluta-Arequipa (~N130° de rumbo y falla normal; Fig. 23).

Finalmente, el último grupo de lineamientos cortos sigue una dirección N20-40° observada en el sector sur del complejo volcánico Chachani. Una característica notable en esta área es la orientación predominante N20-40° en la mayoría de los pequeños respiraderos eruptivos, que han construido los voluminosos canales de domos-colada Potrero. Similar tendencia, siguen los volcanes Uyupampa y Yura Viejo en el campo monogenético Yura.

La zona extensional a lo largo de las fallas de tendencia N80° y N135° está asociada con fisuras que permiten el ascenso de magmas a la superficie (Huamán-Rodrigo et al., 1993). Los datos de medición magnética del volcán Nicholson identificaron dos cuerpos tabulares con tendencia E-O debajo del edificio, lo que sugiere conductos de alimentación en forma de dique (Rivera, 2021). También se observan lineamientos E-O entre los volcanes Ccapua y Yura Viejo, y los volcanes El Chiral y Patacocha. Los volcanes Uyupampa y Yura Viejo están alineados siguiendo una tendencia N40°. En el flanco suroeste del Chachani, varios respiraderos pequeños también están alineados a lo largo de las fisuras eruptivas N10° y N40° (Aguilar et al., 2022).

Las estructuras N130° y N80° identificadas en este estudio en el campo monogenético de Yura y el complejo volcánico Chachani, se asemejan a las descritas por Huamán-Rodrigo et al. (1993) en la región del río Colca - nevado Ampato- Sabancaya, ubicada a unos 50 km al noroeste de Yura (fallas de Maca y Huambo). En el área cercana a Huambo al NO de Yura, y en el flanco norte del complejo volcánico Chachani, las fallas normales N80° (Huamán-Rodrigo et al., 1993; Sempere y Jacay, 2006; Aguilar et al., 2022) se consideran activas, porque cortaron flujos de lava recientes del Pleistoceno tardío y depósitos coluviales del Holoceno.

4. Contexto estratigráfico

En los alrededores de los volcanes monogenéticos se encuentra una importante secuencia sedimentaria del Mesozoico que incluye depósitos volcánicos del Cenozoico. Se inicia con la Formación Chocolate (Jurásico inferior) infrayaciendo con discordancia a la Formación Socosani (Jurásico medio), superpuesta con una leve angularidad por los depósitos sedimentarios del Grupo Yura, cuya edad va desde el Jurásico superior al Cretácico inferior constituido por cinco formaciones: Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Huallhuani; sobre esta última se deposita la Formación Murco de edad Aptiano - Albiano inferior, la cual está cubierta en discordancia erosional por secuencias volcánicas y volcanoclásticas del Grupo Tacaza del (Mioceno). El Cuaternario temprano comienza con la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (1.65 ± 0.04 Ma) (Paquereau, et al., 2006), superpuesta por depósitos del Tufo Yura de edad 1.03 ± 0.09 Ma, posteriormente se emplazan los volcanes monogenéticos (depósitos volcánicos). Finaliza con una cobertura de depósitos cuaternarios recientes (aluviales, coluviales, fluviales y también de depósitos de ceniza perteneciente al volcán Huaynaputina de la erupción de 1600).

4.1. Unidades estratigráficas infrayacientes al campo monogenético Yura

4.1.1. Formación Chocolate

Se compone de rocas sedimentarias (arenisca y caliza) y volcánicas violáceas, algunas de las cuales han sido afectadas por metamorfismo. Un afloramiento de esta formación ha sido encontrado al sur del área del estudio con un espesor de unos 40 metros (Vargas, 1970).

4.1.2. Formación Socosani

Esta unidad corresponde a rocas sedimentarias de origen marino. Está compuesta por lutitas intercaladas con calizas fosilíferas que afloran a lo largo del río Yura y al sureste del volcán Nicholson. Benavides, 1962, estimó un espesor mayor a 70 metros.

4.1.3. Grupo Yura

El Grupo Yura (Fig. 13) en el área de estudio (suroeste del poblado de Yura Viejo) se compone por cinco formaciones de origen sedimentario depositadas en un ambiente formado por planicies de inundación y de acreción lateral siguiendo el siguiente orden: Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Huallhuani. Se estima un espesor total de 850 m.



Figura 13. Afloramiento del grupo Yura a lo largo del río Yura (oeste del Complejo Volcánico Chachani).

4.1.3.1. Formación Puente

Esta unidad presenta areniscas y areniscas cuarcíticas de color gris intercaladas con lutitas negras (Benavides, 1962). Se estima un espesor mayor a 60 metros al oeste del volcán Nicholson.

4.1.3.2. Formación Cachíos

Esta formación aflora principalmente en el río Yura; litológicamente está compuesta por lutitas negras de moderada a alta fisibilidad (Benavides, 1962); alcanza un espesor de 30 a 40 metros.

4.1.3.3. Formación Labra

Está constituida por areniscas laminares de grano fino a medio intercaladas con lutitas de estratos decimétricos (Benavides, 1962). Localmente en la zona se estima un espesor mayor a 600 metros.

4.1.3.4. Formación Gramadal

Presenta espesores métricos a decimétricos en la zona de estudio. Está constituida por calizas arrecifales de color marrón claro a gris oscuro (Benavides, 1962), estimadas entre 70 y 120 metros de espesor en el área de estudio.

4.1.3.5. Formación Huallhuani

Se encuentra suprayaciendo con contacto muy visible a la Formación Gramadal (Vargas, 1970). La secuencia sedimentaria se compone por un conjunto de areniscas

cuarzosas, con algunos niveles de lutitas El espesor promedio de esta unidad en la hoja de Arequipa, señalado por Benavides, 1962, es de 50-60 metros.

4.1.4. Formación Murco

Esta unidad se compone principalmente por lutitas oscuras y pizarras con niveles de areniscas. Estas secuencias se encuentran formando los flancos de los anticlinales y sinclinales de la zona de estudio. En los trabajos de campo se estimó un espesor mayor a 50 metros.

4.1.5. Grupo Tacaza

El Grupo Tacaza se encuentra cubriendo las unidades mesozoicas (Grupo Yura). Jenks, 1946 describió secuencias de brechas volcánicas de color pardo grisáceo y lavas andesíticas de color gris oscuro de textura porfirítica. Esos depósitos se encuentran en superficie de relieves suaves y en las quebradas estas unidades presentan escarpas (Vargas, 1970). El Grupo Tacaza alrededor de los depósitos del volcán El Chiral alcanza un espesor entre 230 a 240 metros.

4.1.6. Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA)

Los depósitos piroclásticos de la IAA (Fig. 14) alcanzan un volumen de 18 km³ (Paquereau-Lebti, et al., 2006). Afloran principalmente en ambos márgenes el cañón del río Chili, presentando uno de los mayores espesores en la quebrada Añashuayco. La ignimbrita está conformada por dos unidades. La unidad inferior (blanca) es de mayor espesor (~40 metros), compacta y masiva. Posee pómez y fragmentos de plagioclasa, biotita, óxidos, cuarzo y vidrio volcánico. La unidad superior (rosácea) se expone con espesores muy variables (3-5 metros), y se presenta masivo y poco consolidado. Se compone por fragmentos líticos, fragmentos de vidrio y pómez, también minerales de plagioclasa, biotita, óxidos, cuarzo. La IAA ha sido datada en 1.65 ± 0.04 Ma (Paquereau-Lebti, et al., 2006).



Figura 14. Depósitos de Ignimbrita Aeropuerto Arequipa formando lomadas suaves, que cubren secuencias sedimentarias del Yura.

4.1.7. Tufo Yura

Según Paquereau et al., 2006. La ignimbrita Tufo Yura, está compuesta por depósitos de pómez y ceniza, consolidados a más o menos endurecidos, que alcanzan un volumen estimado de ~ 1.5 km³ y un espesor estimado entre 15 a 20 metros en la localidad de Yura Viejo (Fig. 15). El afloramiento del Tufo Yura se restringe al norte y oeste del complejo volcánico Chachani. Llenan la depresión de norte-sur entre los sedimentos del Grupo Yura y las lavas Pre-Chachani. Estos flujos piroclásticos han sido datados en 1.03 ± 0.09 Ma.



Figura 15. El Tufo Yura bajo depósitos de caída escoriácea.

4.2. Vulcanismo del Campo Monogenético de Yura

El campo monogenético Yura está compuesto por seis centros volcánicos (Fig. 23); tres de ellos (Patacocha, Yura Viejo y Ccapua) están distribuidos en una dirección de N130°, dos centros volcánicos (El Chiral y Uyupampa) localizados al noroeste siguiendo una dirección N140° separados por 6 km de distancia, alineados a la falla Ayo-Lluta-Arequipa. El volcán Nicholson se localiza cerca al límite noroeste de la cuenca Arequipa. La actividad eruptiva ha sido caracterizada por erupciones estrombolianas con flujos de escoria, caídas piroclásticas y emisiones de flujos de lava.

4.2.1. Cono de escoria Nicholson

El volcán Nicholson abarca un área de 1,42 km². Se construyó en el borde suroeste de la depresión de Arequipa sobre una llanura formada por la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa (IAA) de ~1,65 Ma de edad (Fig. 16). El edificio volcánico consta de dos conos de escoria superpuestos. El cono más antiguo alcanza una altura de aproximadamente 100 metros (flanco sur). El cono más joven está ubicado en la parte norte y alcanza una altura de ~90 metros (flanco norte; Fig. 23), y tiene un cráter circular de ~220 metros de diámetro medio. Ambos conos fueron construidos por la acumulación de depósitos de escoria de tamaño lapilli y bombas (< 3 metros de diámetro) rojizas y oscuras. Los depósitos de flujo de lava bordean el lado norte y este del cráter más joven, mientras que los bloques aglutinados de escoria se encuentran alrededor del borde del cráter. Se puede apreciar fragmentos balísticos de ~30 cm alcanzando hasta 900 metros de distancia del cráter. En la parte inferior del flanco sureste se observan depósitos de lahares matriz soportado de 40-60 cm de espesor, que incorporaron fragmentos de escoria. Parte del flanco noreste y el cráter del Nicholson está cubierto por una capa de ceniza retrabajada (~10 cm) del año 1600 de la erupción del volcán Huaynaputina, ubicado a 104 km al sureste (Japura, 2018; Prival, et al., 2020). El cono más joven ha sido datado en 77.4 ± 18.4 ka (Aguilar et al., 2022).

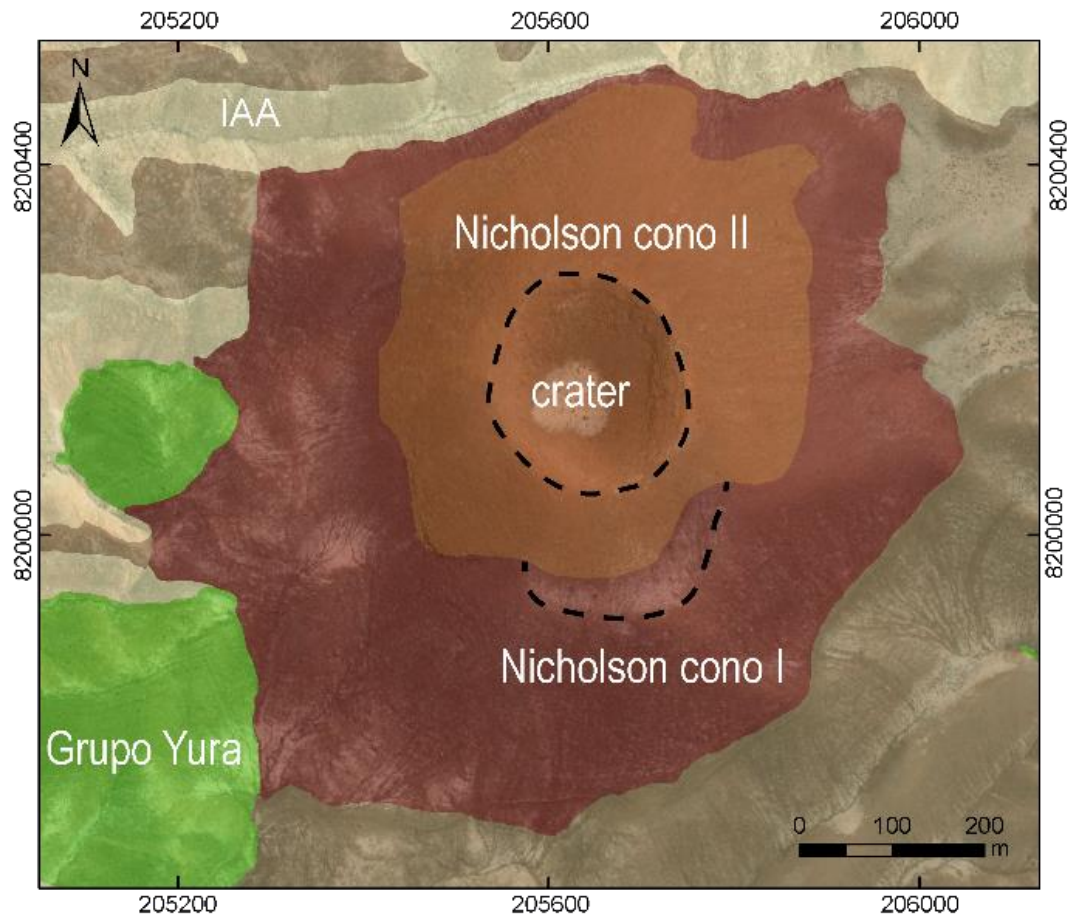


Figura 16. Estructura del volcán monogénico Nicholson.

4.2.2. Maar Ccapua

Este centro eruptivo ($\sim 4.39 \text{ km}^2$) se superpone a la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa. Está formado por dos Maars superpuestos de poca altura, cuyos cráteres se encuentran por debajo del nivel del suelo circundante (Fig. 17). El Maar I es un semi cono de 50 m de altura y muestra un cráter semicircular de 330 metros de diámetro. El Maar II es un cono que sobreyace parcialmente al Maar I y subyace a flujos de lava del Complejo volcánico Chachani, tiene una altura de 38 m y su cráter mide 310 metros de diámetro. Los bordes de cráteres están formados por flujos de lava y bloques de escoria aglutinada, formando paredes casi verticales. Los suelos de los cráteres están parcialmente llenos de sedimentos finos (arena y limo) lo que sugiere la presencia de agua en el pasado. Las áreas que rodean los maars están cubiertas por piroclastos balísticos de tipo corteza de pan que alcanzaron 2 km desde la fuente de emisión y que cubren la ignimbrita Aeropuerto. El Maar II ha sido datado en $97.7 \pm 10.4 \text{ ka}$ (Aguilar et al., 2022).

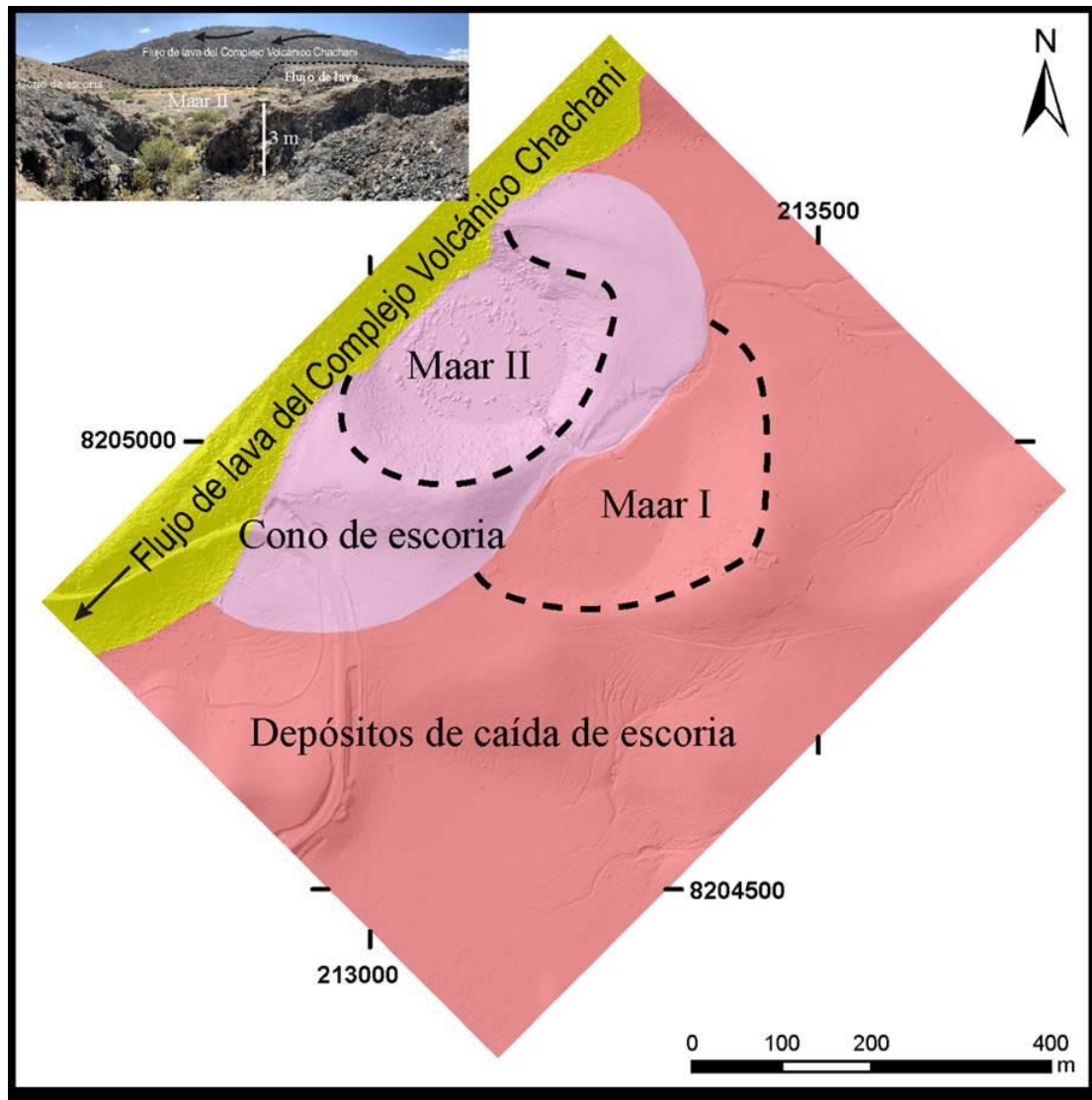


Figura 17. Estructura del volcán monogenético Ccapua.

4.2.3. Volcán Yura Viejo

Este volcán fue construido cubriendo ($\sim 0.74 \text{ km}^2$) a los depósitos del Tufo Yura y rocas sedimentarias Mesozoicas del Grupo Yura. El cráter se encuentra en el lugar actual del poblado del mismo nombre, el cual está marcado por una estructura semicircular abierta al suroeste. Su historia eruptiva se caracteriza por una sucesión de flujos piroclásticos de escoria y caídas de escoria (Fig. 18, 19) generadas por erupciones de estilo estromboliana combinadas con una fuerte influencia freatomagmática (bombas de escoria oscura incrustadas en una matriz limosa fina). Muchos de estos depósitos volcánicos contienen xenolitos que incluyen fragmentos de arenisca cuarzosa, caliza y lutitas asimiladas de estratos del Grupo Yura, así como fragmentos de ignimbritas. Las bombas de escoria alcanzan diámetros de hasta 50 cm a $\sim 1 \text{ km}$ de distancia del cráter. En áreas alejadas del cráter, los depósitos de caída de escoria están intercalados con depósitos de lahar. La actividad de este volcán culminó con el emplazamiento de un flujo de lava que llenó un pequeño valle hacia el suroeste, alcanzando una distancia de $\sim 1 \text{ km}$ (Fig. 18, 19). Este volcán probablemente estuvo emplazado en el cauce de un antiguo río, formando un dique donde se acumulaban sedimentos lacustres. Estos sedimentos se superponen a los depósitos de caída de escoria en el lado noreste del volcán (Fig. 18). Debido a su resistencia a la erosión, la lava emitida por el volcán Yura Viejo se encuentra bien conservada, y la quebrada que anteriormente existía en la zona

se abrió en sus costados, formando una meseta elevada (proceso de inversión del relieve). Por otro lado, las tefras generadas por las explosiones son fáciles de erosionar, y actualmente se encuentran solo en la parte alta de los cerros circundantes. Los depósitos de Yura Viejo están cortados por fallas activas NO-SE, en áreas cercanas al respiradero. El flujo de lava del volcán monogenético Yura Viejo ha sido datado en 167.8 ± 27.0 ka (Aguilar et al., 2022).

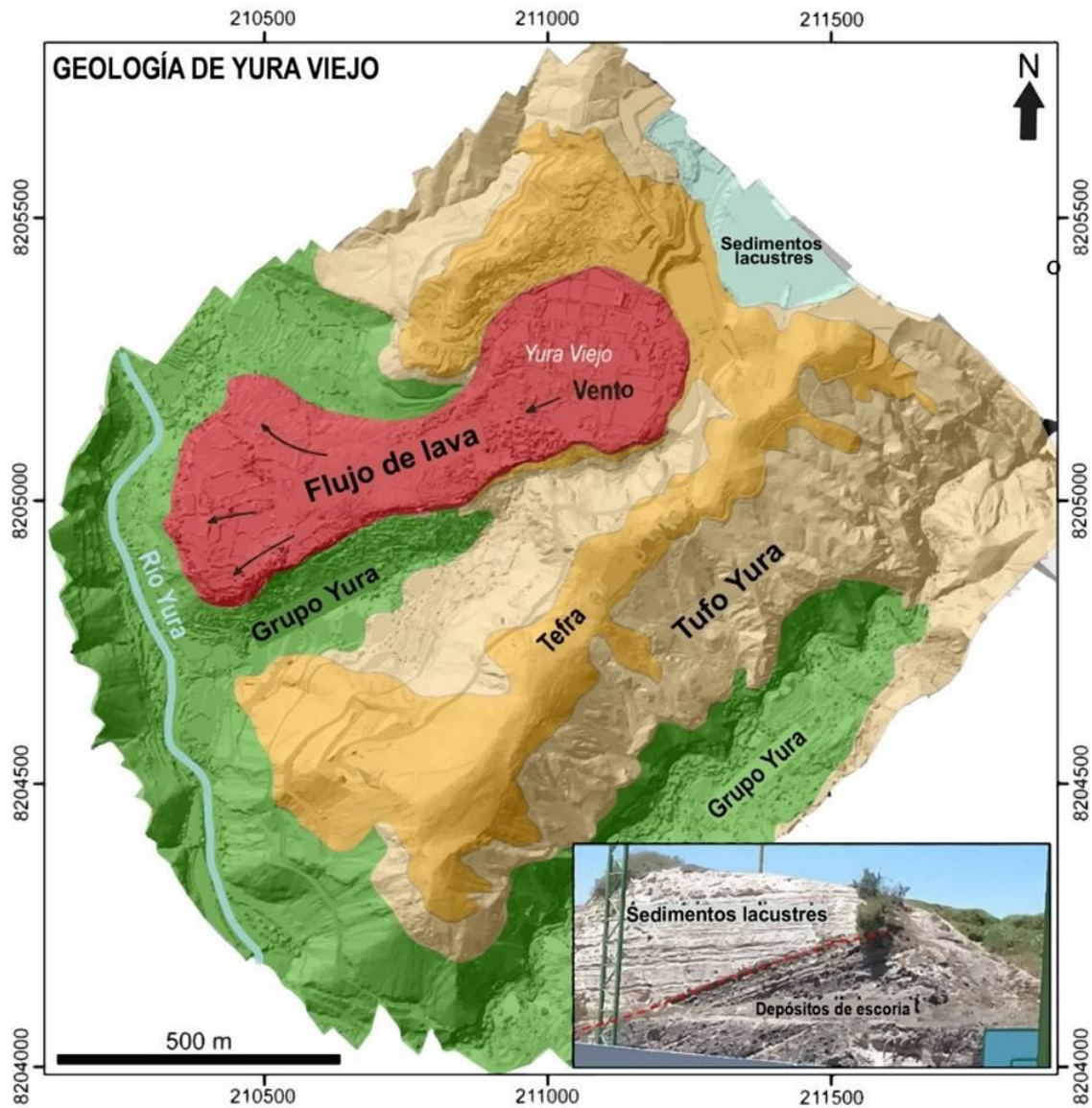


Figura 18. Depósitos del volcán monogenético Yura Viejo.

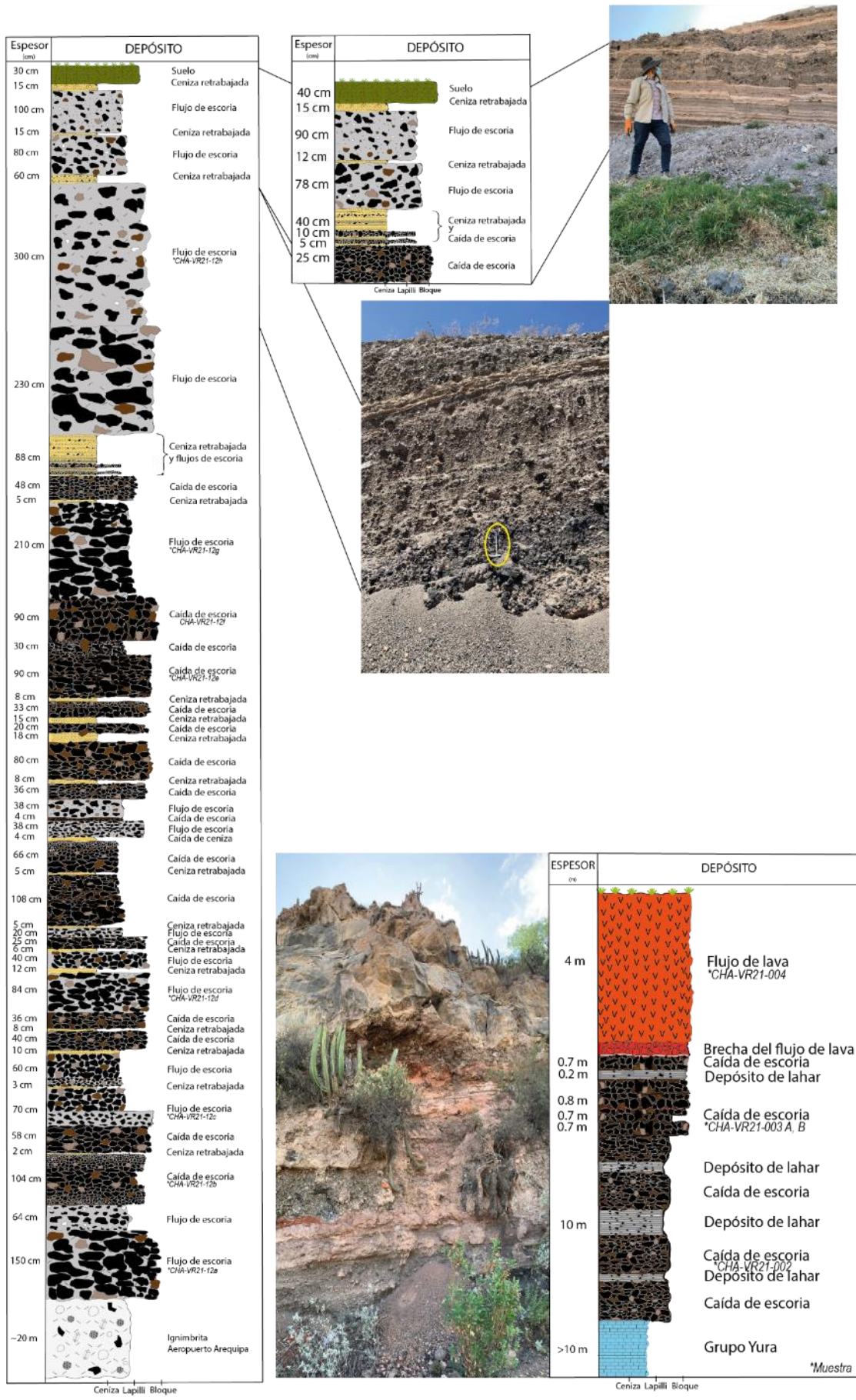


Figura 19. Columnas tefroestratigráficas del volcán monogenético de Yura Viejo.

4.2.4. Volcán Uyupampa

Este volcán fue construido sobre el Tufo Yura cubriendo una superficie de 0,30 km². Su cráter se encuentra en la ubicación actual del pueblo de Uyupampa. Este centro volcánico se encuentra muy erosionado y fue utilizado como cantera para la construcción de viviendas. Los depósitos consisten en una intercalación de caída de ceniza gris oscura retrabajada, pequeños flujos de escoria (< 1,30 metros de espesor), caída de lapilli escoriáceas con buen sorteo de hasta 90 cm espesor y flujo de lava tipo aa, de color negro rojizo. Los fragmentos muestran texturas de corteza de pan y coliflor. En los depósitos de caída de tefra se han identificado bombas escoriáceas que presentan xenolitos (<30 cm). La actividad eruptiva en este centro culminó con el emplazamiento de un flujo de lava tipo en bloque rica en olivino que alcanzó hasta 500 metros de recorrido al suroeste (Fig. 20). El último flujo de lava fue datado en 63.2 ± 9.0 ka (Aguilar et al., 2022).

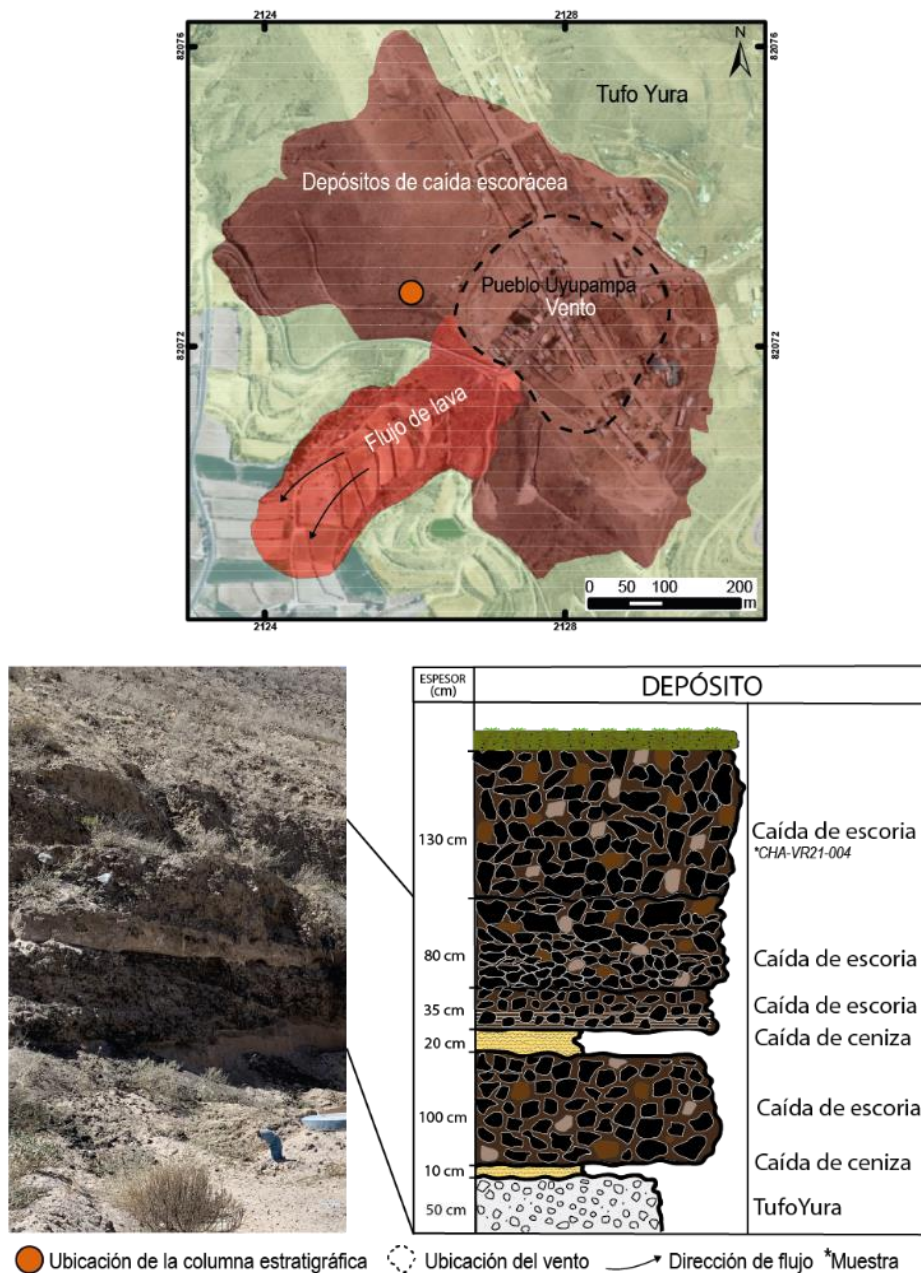


Figura 20. Volcán Uyupampa y columna tefroestratigráfica del volcán.

4.2.5. Flujos de lava El Chiral

Esta unidad volcánica se emplaza en el alineamiento de la Falla Ayo-Lluta-Arequipa, cubriendo una superficie de 1,54 km². Está formada por domos de lava de forma lobular (Fig. 21), cortados por un depósito de flujo de lava de ~50 metros de espesor y ~1,50 km de largo. Estos flujos de lava se encuentran rellenando una pequeña depresión NE-SO donde afloran depósitos volcánicos del Grupo Tacaza y areniscas cuarzosas (Formación Hualhuani) del Grupo Yura.

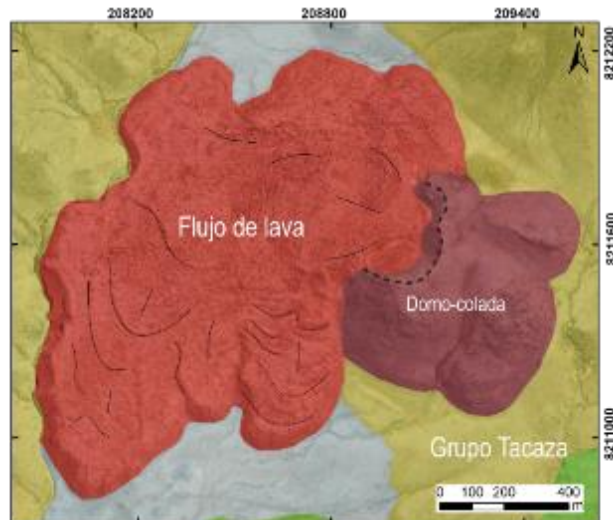


Figura 21. Domos-colada y flujos de lava del volcán El Chiral.

4.2.6. Conos de escoria Patacochoa

Este centro eruptivo (~0.45 km²) está formado por al menos tres cráteres (100, 130 y 200 metros de diámetro) a través de los cuales las erupciones explosivas generaron emisiones de escoria (Fig. 22). El material expulsado por este volcán cubre depósitos del Grupo Tacaza, y aparentemente cerró el cauce de un arroyo, provocando el represamiento de agua y la formación de una laguna denominada Patacochoa.

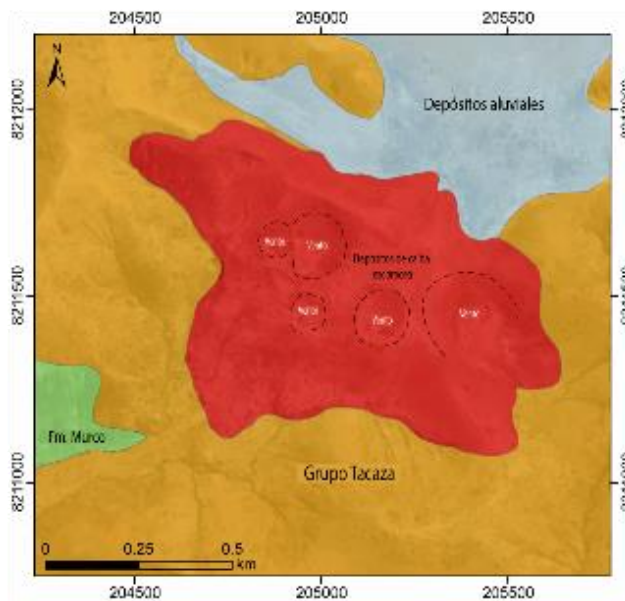


Figura 22. Depósitos escoriáceos de los conos de escoria Patacochoa.

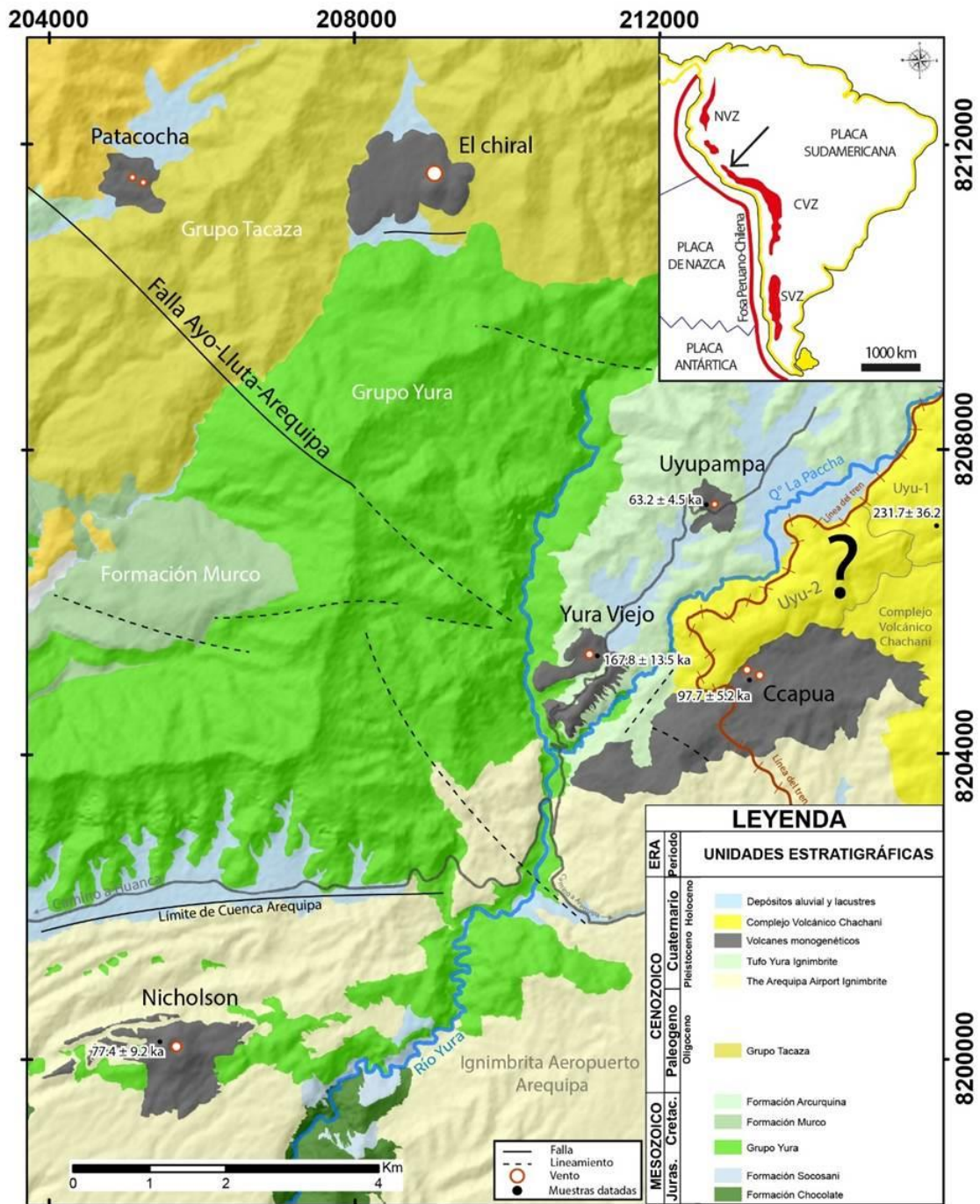


Figura 23. Mapa geológico del campo monogenético de Yura.

5. PETROGRAFÍA

Se realizó un estudio petrográfico a doce secciones delgadas de las muestras colectadas en las campañas de campo. El contenido mineral analizado en estas muestras es similar (Tabla 1) con fenocristales entre 7 y 10% del volumen total. Siendo en todas las muestras el olivino el mineral predominante (fenocristal), inmerso en matriz de clinopiroxeno, ortopiroxeno, plagioclasas y vidrio.

Volcán monogenético		Minerales			Texturas		Tipo de depósito	TIPO DE ROCA (Clasificación modal)	Observaciones (vesículas, alteración, amígdalas, enclaves, xenolitos)
		Cristales Esenciales (Fenox) (% vol.)	Matriz (% vol.)	Secundarios (% vol.)	Roca (1), Matriz (2)	Cristales			
Nicholson	CHA-VR21-010	OLV (9)	PX (42) ± PGL (40) ± OXsFeTi (5)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, aglomerádica.	Caída escoriácea	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (4%), xenolitos (volcánicos).
Ccapua	CHA-VR21-001	OLV (6)	PGL (32) ± PX (25) ± OXsFeTi (4) ± vd (3)	ARCes (Traza)	Porfírica ⁽¹⁾ , traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, aglomerádica.	Flujo escoriáceo	Andesita basáltica	Vesículas subredondeadas y subangulosas (30%).
	CHA-18-25	OLV (12)	PGL (30) ± PX (22) ± vd (5) ± OXsFeTi (4)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , Pilotáxica ⁽²⁾	Agglomerádica.	Flujo de lava	Andesita basáltica	Vesículas subredondeadas y subangulosas (27%).
	CHA-19-50	OLV (10)	PGL (31) ± PX (23) ± OXsFeTi (4) ± vd (4)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , Pilotáxica ⁽²⁾	Esqueletal.	Caída escoriácea	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (28%).
	CHA-19-51	OLV (9)	PGL (34) ± PX (26) ± OXsFeTi (4) ± vd (2)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, bordes de reacción	Caída escoriácea	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (25%).
Yura viejo	CHA-VR21-002	OLV (6)	PX (34) ± PGL (25) ± OXsFeTi (4) ± vd (3)	ARCes (Traza)	Porfírica ⁽¹⁾ , Hialoplitica ⁽²⁾	Esqueletal, aglomerádica.	Caída escoriácea	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (28%), xenolitos (sedimentarios).
	CHA-18-46	OLV (9)	PX (28) ± PGL (26) ± vd (4) ± OXsFeTi (4)	ARCes (Traza)	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, coronítica, aglomerádica.	Caída escoriácea	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (29%), xenolitos (sedimentarios), enclaves.
	CHA-VR21-004	OLV (9)	PX (34) ± PGL (31) ± OXsFeTi (3) ± vd (2)	Opacita (Traza) ± ARCes (Traza)	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, aglomerádica.	Flujo de lava	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (21%).
	CHA-VR21-003A	OLV (8) ± OXsFeTi (2) ± FPs (1) ± zir (Traza) ± Lit. Volc. I (3), Lit. Volc. II (1) ± cz (8) ± Lit. Volc. (3) ± FPs (1) ± OXsFeTi (Traza) ± zir (Traza)	ARCes (4) ± CBs (2)	-	Clástica	-	Xenolito sedimentario	Cuarzoarenita	Presencia de fragmentos líticos volcánicos I y II.
	CHA-VR21-003B	OLV (8) ± OXsFeTi (6)	ARCes (11)	-	Clástica	-	Xenolito sedimentario	Cuarzoarenita	Presencia de fragmentos líticos volcánicos de composición andesítica
Uyupampa	CHA-VR21-009	OLV (8) ± OXsFeTi (6)	PGL (53) ± PX (20) ± vd (Traza)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , seriada-traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, coronítica.	Flujo de lava	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (13%).
	CHA-18-26	OLV (9)	PGL (32) ± PX (28) ± OXsFeTi (3) ± vd (2)	ARCes (Traza) ± Opacita (Traza)	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Bordes de reacción, coronítica.	Flujo de lava	Andesita basáltica	Vesículas irregulares (26%), xenolitos (sedimentarios).
El Chiral	33S-CHA-R22-013	OLV (10)	PGL (60) ± PX (27) ± OXsFeTi (3)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, aglomerádica.	Domo de lava	Andesita basáltica	-
	33S-CHA-R22-015	OLV (15)	PGL (55) ± PX (20) ± OXsFeTi (5)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal.	Flujo de lava	Andesita basáltica	Vesículas angulosas (5%)
Patacocha	33S-CHA-R23-014	OLV (12)	PGL (50) ± CPX (28) ± OXsFeTi (4)	-	Porfírica ⁽¹⁾ , Traquitoide ⁽²⁾	Esqueletal, coronítica.	Flujo de lava aglutinada.	Andesita basáltica	Vesículas angulosas (6%)

Tabla 1. Resumen de las características petrográficas del campo monogenético Yura. OLV: olivino, PGL: plagioclasa, PX: piroxeno, ANF: anfíbol, cz: cuarzo, OXsFeTi: Óxidos de hierro y titanio, CBs: carbonatos, FPs: feldespatos, zir: zircón, Lit. Volc: Lítico volcánico, vd: vidrio volcánico, ARCes: arcillas. Los valores de % entre paréntesis representan el porcentaje de contenido de cristales como fenocristales ($\geq 500 \mu\text{m}$) y microlitos ($< 500 \mu\text{m}$) en la masa fundamental.

5.1. Volcán monogenético Nicholson

5.1.1. Andesita basáltica

5.1.1.1. CHA-VR21-010

La muestra corresponde a un depósito de flujo de caída escoriácea. Presenta textura porfírica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (9% vol.; $\leq 1,42 \text{ mm}$) de forma subhedral algunos con hábito prismático, microfracturado y bordes subredondeados, también posee textura esqueletal. Presenta inclusiones de óxidos de hierro.

La **matriz** presenta textura traquitoide, compuesta por: Piroxeno (Clinopiroxeno > ortopiroxeno) (42% vol.; $\leq 0,12 \text{ mm}$) de forma anhedral y subhedral con hábito prismático corto y tabular por sectores formando textura aglomerádica; Plagioclasa (40% vol.; $\leq 0,23 \text{ mm}$) de forma subhedral con hábito tabular, maclado, mostrando cierta orientación. Óxidos de hierro y titanio (5% vol.; $\leq 0,13 \text{ mm}$), de forma anhedral y subhedral, ocurren como inclusiones en cristales y como reemplazo en moldes de cristales, de forma diseminada.

De forma puntual se muestra fragmentos líticos alterados ($\leq 1,39 \text{ mm}$) conformado por arcillas, piroxeno, también óxidos de hierro y titanio. Asimismo, presenta vesículas (4% vol.) con formas irregulares y moldes de cristales ($\leq 0,59 \text{ mm}$) totalmente reemplazados por microlitos de piroxeno, óxidos de hierro y titanio y arcillas.

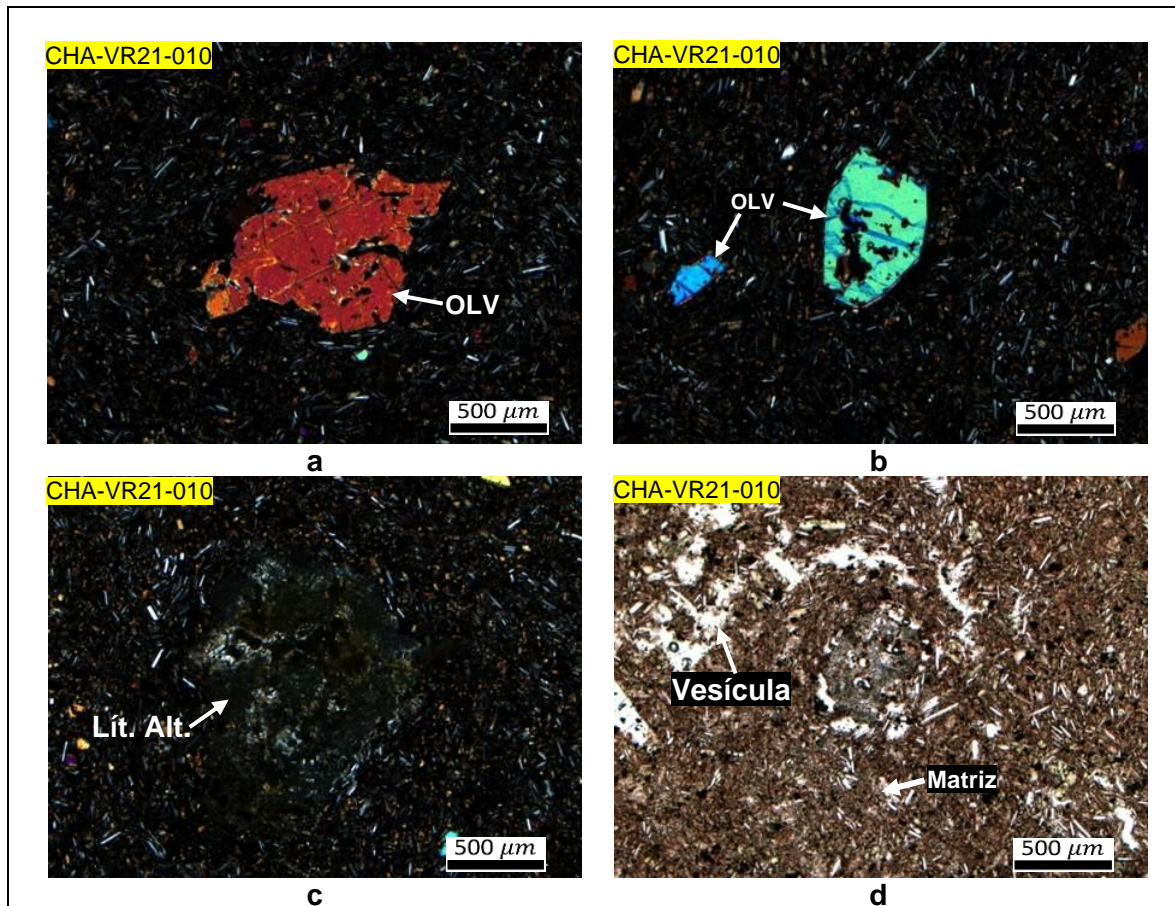


Figura 24. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-010, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c) y bajo luz de polarización paralela (d) a) y b) Fenocristales de olivino inmersos en matriz microcristalina. c) y d) Fragmentos líticos alterados compuesto por agregados microlíticos y criptocristalinos inmerso en la matriz. Las abreviaturas minerales son: Olivino (OLV), fragmentos líticos alterados (Lít. Alt.) y vesícula (vesícula).

5.2. Volcán monogenético de Ccapua

5.2.1. Andesita basáltica

5.2.1.1. CHA-VR21-001

La muestra corresponde a un depósito de flujo escoriáceo. Presenta textura porfirítica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (6% vol.; $\leq 0,90$ mm) de forma subhedral, microfracturado, algunos con golfos y oquedades, otros poseen textura esquelética; presentan inclusiones de óxidos de hierro y titanio, de forma puntual formando textura aglomerádica;

La **matriz** presenta textura traquítica, se encuentra conformada por: Plagioclasa (32% vol.; $\leq 0,30$ mm) de forma subhedral con hábito tabular y prismático, maclados, siguiendo cierta orientación; Piroxeno (25% vol.; $\leq 0,16$ mm) de forma subhedral y anhedral se encuentran como relleno intersticial entre los microlitos de plagioclasa; Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,22$ mm) de forma anhedral y subhedral, se presentan como inclusiones de olivino y de formas diseminada en la matriz; Vidrio volcánico (3% vol.; $\leq 0,004$ mm) como agregados amorfos englobando a los microlitos de plagioclasa y piroxeno.

Como **minerales secundarios** se presenta: Arcillas (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm) resultado de la desvitrificación y alteración de plagioclasas. Además, presenta **vesículas** (30% vol.) de formas subredondeadas y irregulares.

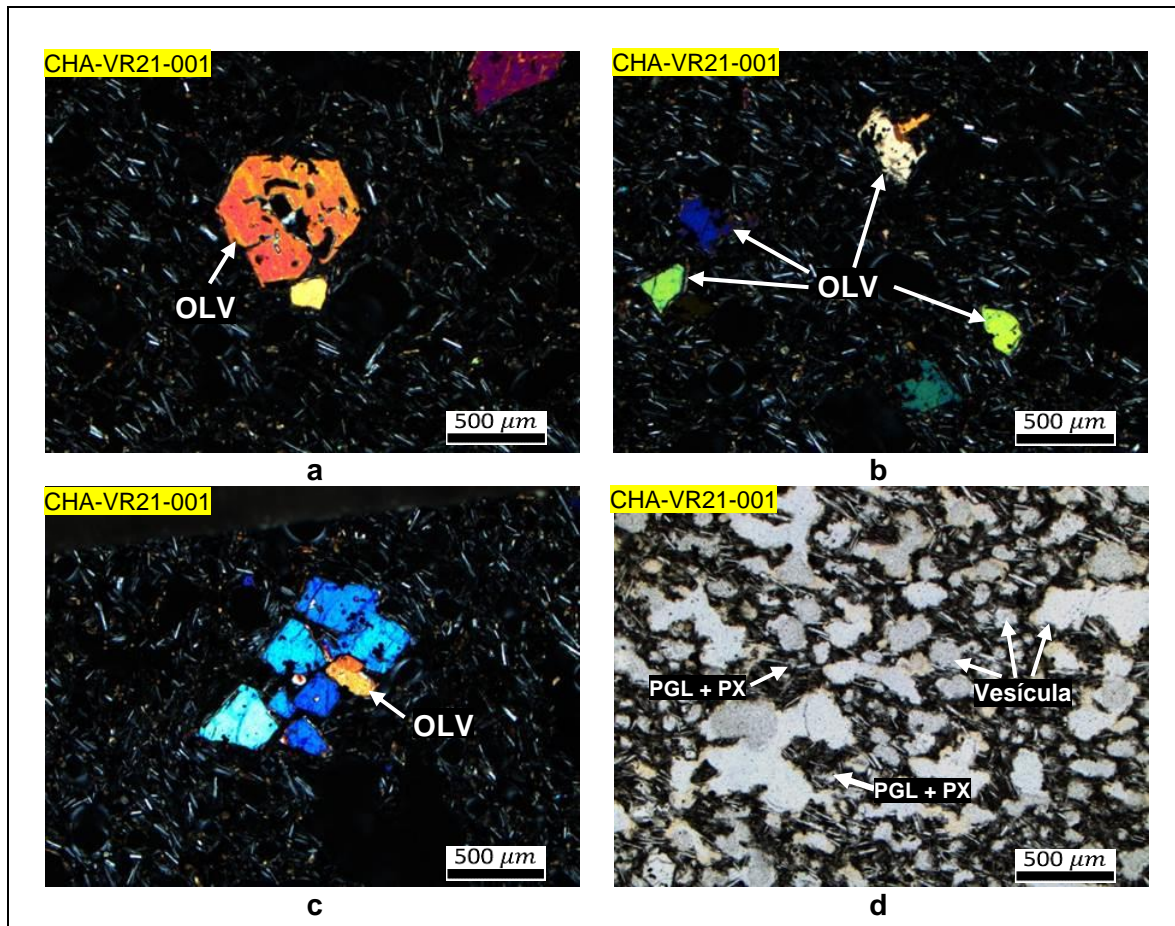


Figura 25. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-001, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c) y bajo luz de polarización paralela (d). a) Fenocristal de olivino con golfos y oquedades. b) Fenocristal de olivino con textura esqueletal. c) Fenocristal de olivino formando textura aglomerada d) Vesículas subredondeadas y matriz microcristalina compuesta por plagioclasa y piroxeno. Las abreviaturas minerales son: Olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), vesícula (vesícula).

5.2.1.2. CHA-18-25

La muestra tomada de un depósito de flujo de lava. Presenta textura porfirítica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (12% vol.; $\leq 0,63$ mm) de forma subhedral y anhedral, algunos mostrando textura aglomerada; otros con textura coronítica formada por piroxenos.

La **matriz** presenta textura pilotáxica, se constituye por: Plagioclasa (30% vol.; $\leq 0,20$ mm) de forma subhedral con hábito tabular, de macla simple, dispuestos de forma subparalela; Piroxeno (22% vol.; $\leq 0,18$ mm) (Ortopiroxeno > Clinopiroxeno) de forma subhedral con hábito tabular, algunos relleno de moldes de minerales junto a plagioclasas; vidrio volcánico (5% vol.; $\leq 0,004$ mm) como agregados amorfos englobando microlitos de la matriz. Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,21$ mm) de formas anhedrales y subhedrales, se encuentran como inclusiones en olivinos y diseminados en la matriz.

De forma puntual, se observan moldes prismáticos reemplazados por la matriz. La muestra presenta **vesículas** (27% vol.) de formas subredondeadas e irregulares. La asociación mineralógica y fenocristales corresponde principalmente a olivino.

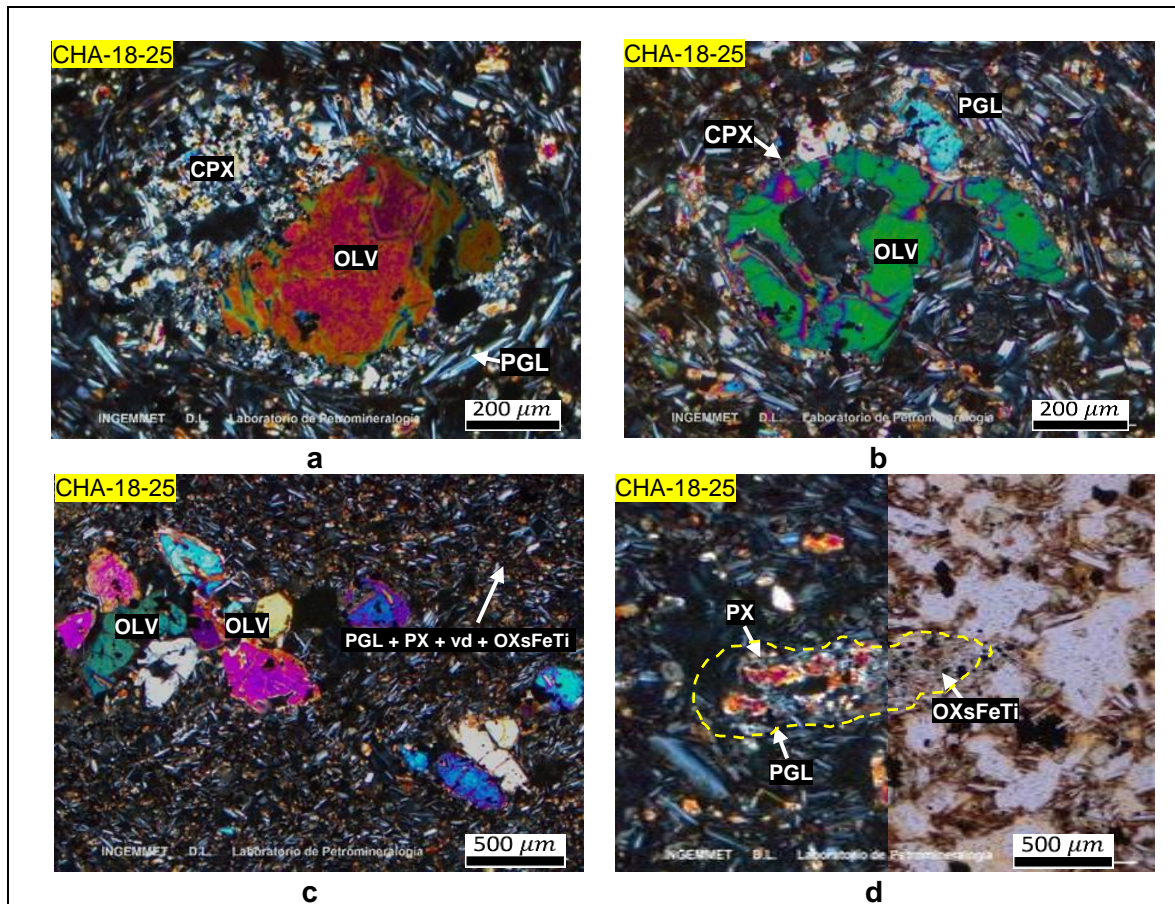


Figura 26. Fotomicrografías de la muestra CHA-18-25, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b, c y d). y bajo luz de polarización paralela (d). a) y b) Fenocristal de olivino con bordes reabsorbidos presentando textura esquelética y bordeados por clinopiroxeno y plagioclasa. c) Aglomerado de cristales de olivino, inmersos en matriz de plagioclasa, piroxeno, vidrio volcánico y óxidos de hierro y titanio, ligeramente orientados. d) Moldes de mineral de hábito prismático relleno por microlitos de piroxeno, plagioclasa y óxidos de hierro y titanio vista en nicoles cruzados (izquierda), nicoles paralelos (derecha). Abreviaciones minerales Olivino (OLV), clinopiroxeno (CPX), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL) y óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi), vidrio volcánico (vd).

5.2.1.3. CHA-19-50

Muestra corresponde a un depósito de caída escoriácea. Presenta textura porfírica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (10% vol.; $\leq 0,85$ mm) con textura esquelética, otros con bordes de reacción, bordeados por piroxeno.

La **matriz** presenta textura pilotáxica, se compone por: Plagioclasa (31% vol.; $\leq 0,28$ mm) de forma subhedral con hábito tabular, macla simple, se encuentra con cierta orientación. Piroxeno (23% vol.; $\leq 0,13$ mm) de forma subhedral y anhedral, se encuentra relleno de intersticios. Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,22$ mm) con forma anhedral y subhedral, ocurren como inclusiones de olivino y diseminados. Vidrio volcánico (4% vol.; $\leq 0,004$ mm) material criptocristalino diseminado por toda la muestra y englobando a los cristales. Además, presenta **vesículas** (28% vol.) con formas irregulares.

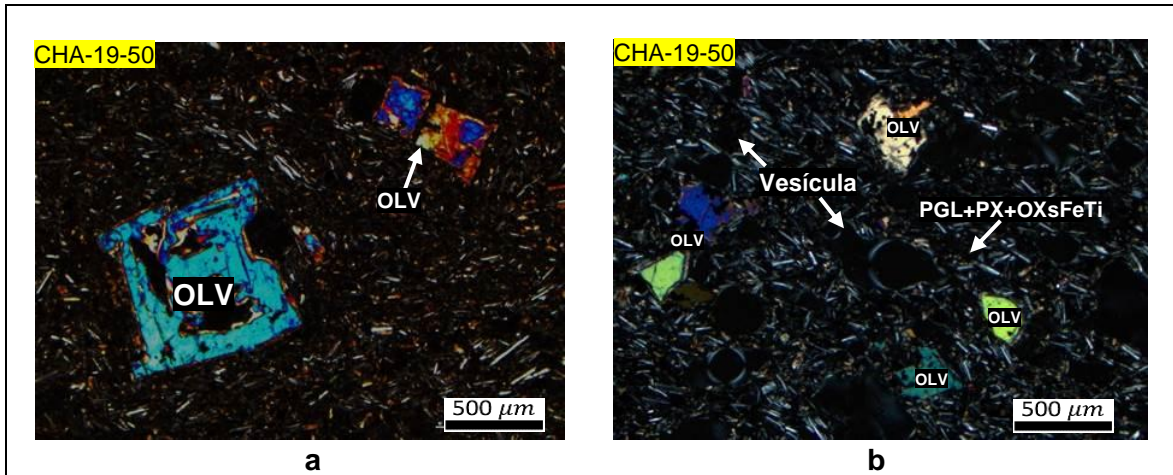


Figura 27. Fotomicrografías de la muestra CHA-19-50, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a) Fenocristal de olivino presentando textura esqueletal y bordes de reacción inmerso en matriz compuesta por plagioclasa, piroxeno y óxidos de hierro y titanio, mostrando cierta orientación. Abreviaciones minerales olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vesícula (vesícula).

5.2.1.4. CHA-19-51

Muestra tomada de un depósito de caída escoriácea. Presenta textura porfírica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (9% vol.; $\leq 0,77$ mm) con forma subhedral y microfracturado, algunos muestran textura esqueletal y bordes de reacción.

La **matriz** presenta textura traquítica, se constituye por: Plagioclasa (34% vol.; $\leq 0,25$ mm) de forma subhedral, con macla simple; Piroxeno (26% vol.; $\leq 0,20$ mm) de forma anhedral y subhedral, se ubican relleno intersticios y diseminado; Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,08$ mm) con forma subhedral, diseminado en la matriz y como inclusiones de olivino; Vidrio volcánico (2% vol.; $\leq 0,004$ mm) material criptocristalino relleno intersticios y englobando a los minerales. Además, presenta **vesículas** (25% vol.) redondeadas e irregulares.

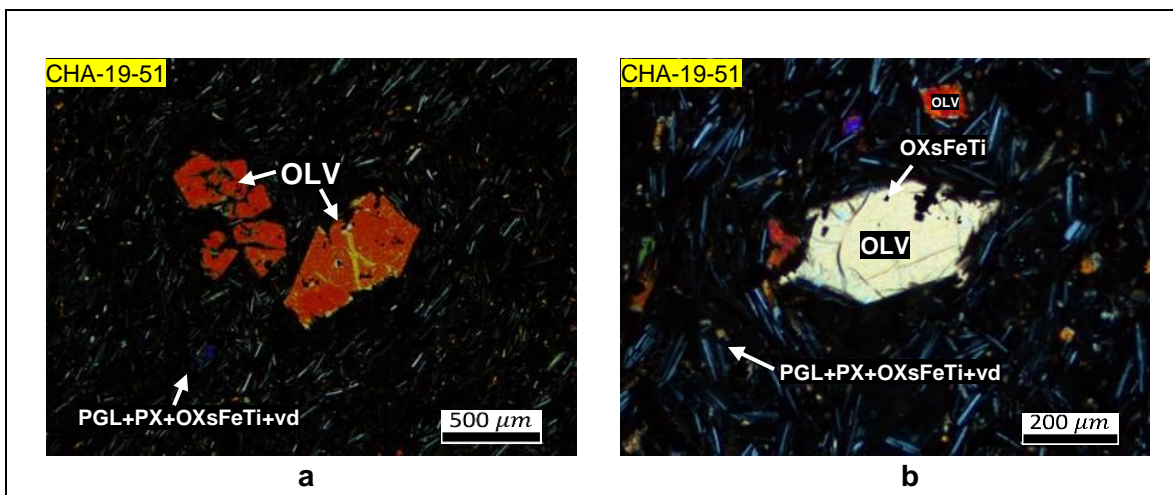


Figura 28. Fotomicrografías de la muestra CHA-19-51, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a y b) Fenocristal de olivino con bordes de reacción y textura esqueletal, microfracturado, con inclusiones de óxidos de hierro y titanio, inmerso en la matriz compuesta por plagioclasa, piroxeno, óxidos de hierro y titanio y vidrio volcánico. Abreviaciones minerales olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vidrio volcánico (vd).

5.3. Volcán monogenético de Yura Viejo

5.3.1. Andesita basáltica

5.3.1.1. CHA-VR21-002

La muestra fue tomada de un depósito de caída escoriácea. Presenta textura vitrofídica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (6% vol.; $\leq 1,05$ mm) de forma subhedral y anhedral, microfracturado con inclusiones de minerales opacos. Varios cristales presentan bordes irregulares, otros muestran textura esqueletal, también se encuentran cúmulos de olivino formando textura aglomerádica y puntualmente presentan textura coronítica formada por microlitos de piroxenos.

La matriz presenta textura hialopilítica conformada por: Piroxeno (34% vol.; $\leq 0,40$ mm) de forma anhedral y subhedral con hábito prismático a tabular, se encuentran diseminados por toda la matriz, por sectores formando aglomerados y como reemplazo de cristales de olivino; plagioclasa (25% vol.; $\leq 0,70$ mm) fragmentos y microlitos de formas subhedrales con hábito tabular, maclados, se encuentran siguiendo cierta orientación (textura traquitoide); Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,19$ mm) de forma anhedral, se presentan como inclusiones de olivino y diseminados en la muestra. Vidrio volcánico (3% vol.; $\leq 0,004$ mm) se localizan como agregados amorfos rellenando intersticios dejados por los microlitos de la matriz. Como **minerales secundarios** se presentan: Arcillas (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm) producto de la desvitrificación y como alteración de las plagioclasas. Además, se localiza **xenolitos** ($\leq 0,20$ mm) como fragmentos líticos de origen sedimentario, compuesto por clastos suturados de cuarzo. Además, la muestra posee **vesículas** (28% vol.) con formas irregulares a subredondeadas.

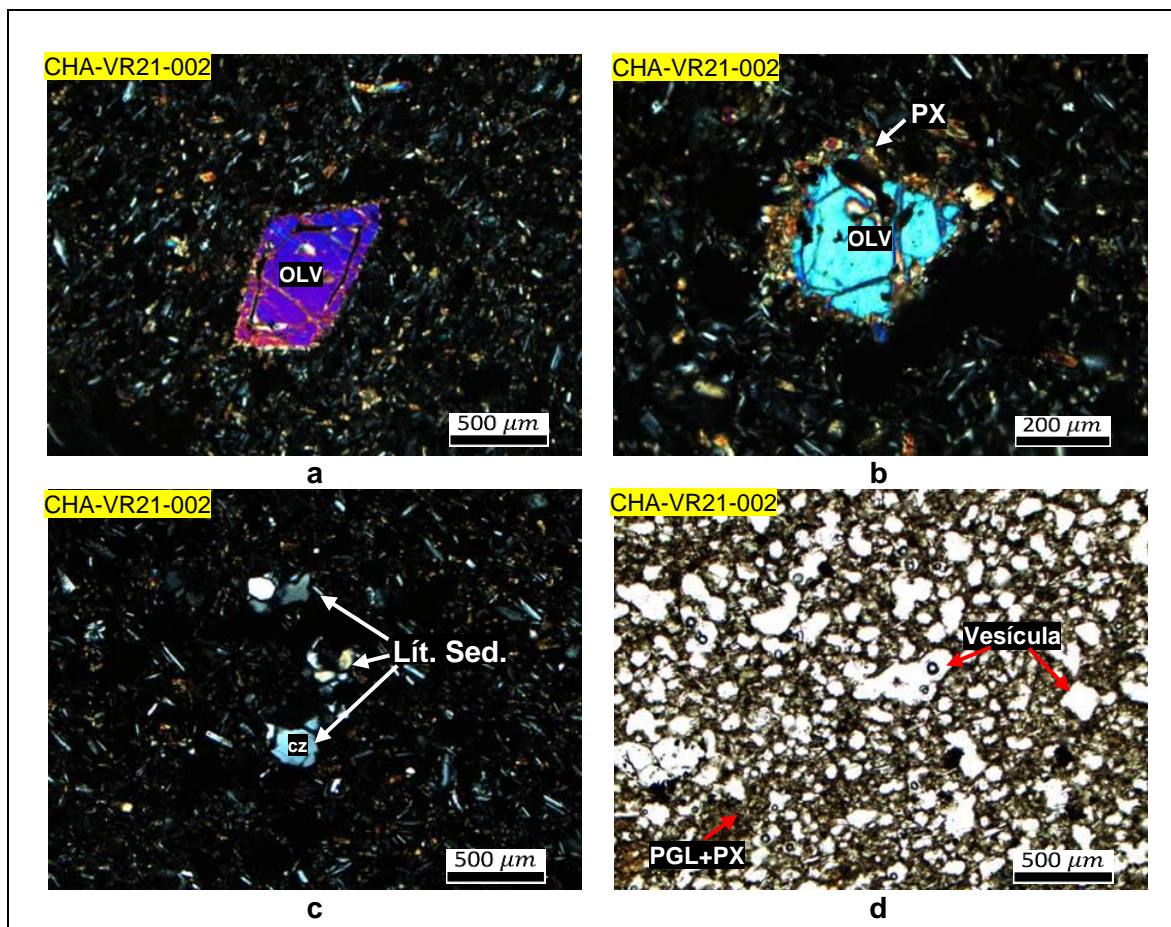


Figura 29. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-002, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Fenocristal de olivino con textura esqueletal. b) Fenocristal de olivino con textura coronítica conformada por piroxeno. c) Fragmentos líticos sedimentarios (Xenolitos) compuestos por granos de cuarzo. d) Detalle de la matriz mostrando las vesículas subredondeadas-irregulares y matriz microcristalina compuesta por plagioclasa y piroxeno. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), cuarzo (cz), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL), líticos sedimentarios (Lít. Sed.), vesícula (vesícula), matriz (Matriz).

5.3.1.2. CHA-18-46

La muestra corresponde a un depósito de caída escoriácea. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (9% vol.; $\leq 1,20$ mm) de forma subhedral a anhedral, microfracturado, varios con textura esqueletal, otros con textura coronítica compuesto por microlitos de piroxeno, de forma puntual cúmulos formando textura aglomerádica, presenta inclusiones de óxidos de hierro y titanio, bordes subredondeados y bordes de reabsorción.

La matriz presenta textura traquítica, compuesta por: Piroxeno (ortopiroxenos > clinopiroxenos) (28% vol.; $\leq 0,38$ mm) de forma anhedral y subhedral con hábito prismático a tabular, se encuentran diseminados por toda la matriz, por sectores formando aglomerados y como reemplazo de fenocristales de olivino; Plagioclasa (26% vol.; $\leq 0,65$ mm) fragmentos y microlitos de formas subhedrales y anhedrales, con hábito tabular, maclado; Vidrio volcánico (4% vol.; $\leq 0,004$ mm) agregados amorfos diseminados en la matriz; Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,04$ mm) de forma subhedral y anhedral, se presenta como inclusiones de olivino y de forma diseminada.

Como **minerales secundarios** se presentan: Arcillas (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm) producto de la desvitrificación y como alteración de la plagioclasa. De forma puntual se muestra **xenolitos** (Traza% vol.; $\leq 0,22$ mm) fragmentos líticos de origen sedimentario, compuesto por clastos de cuarzo, óxidos de hierro y titanio, así como feldespatos: También se encuentra **enclaves** (Traza% vol.; $\leq 0,32$ mm) fragmentos líticos de origen volcánico de composición andesítica integrado por plagioclasa y vidrio volcánico. Además, presenta **vesículas** (29% vol.) de forma irregular.

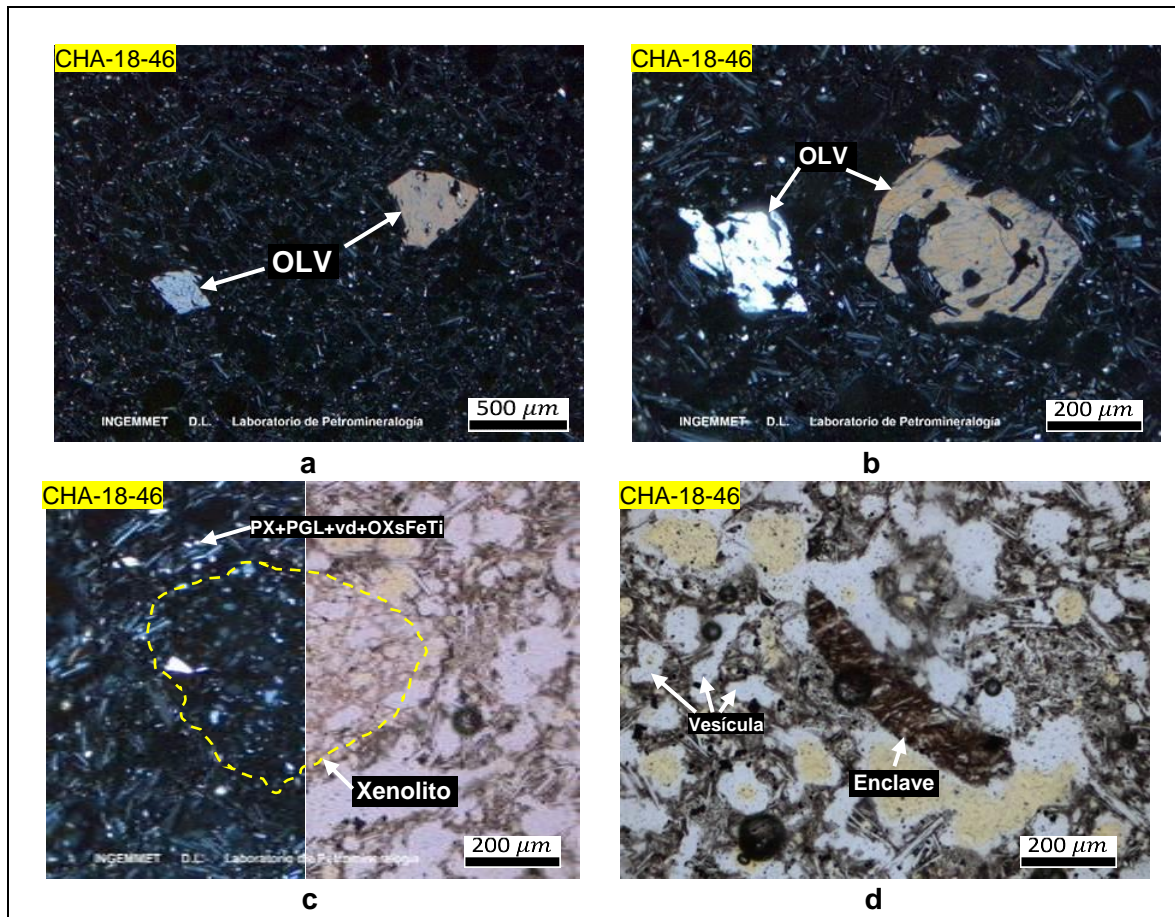


Figura 30. Fotomicrografías de la muestra CHA-18-46, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (c y d). a y b) Fenocristal de olivino con textura esqueletal con golfos de reabsorción. c) xenolito de origen sedimentario detrítico grano soportada, inmerso en matriz conformada por microlitos de piroxeno, plagioclasa, vidrio volcánico y óxidos de hierro y titanio, vista en nicoles cruzados (izquierda), nicoles paralelos (derecha). d) enclave de composición andesítica y detalle de las vesículas de formas anhedrales de bordes irregulares. Abreviaciones minerales olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), vidrio volcánico (vd), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vesículas (vesículas).

5.3.1.3. CHA-VR21-004

La muestra corresponde a un depósito de flujo de lava. Presenta textura porfirítica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (9% vol.; $\leq 1,89$ mm) de forma subhedral con hábito rómbico, microfracturado, con inclusiones de óxidos de hierro y titanio, algunos presentan golfos y oquedades. Presentan textura aglomerádica y esqueletal de forma puntual.

La matriz presenta textura traquítica, compuesta por: Piroxeno (34% vol.; $\leq 0,16$ mm) de forma subhedral y anhedral, relleno intersticios entre la plagioclasa y como reemplazo de anfíbol; Plagioclasa (31% vol.; $\leq 0,26$ mm) de forma subhedral y euhedral, maclados, se presentan siguiendo una orientación (dirección de flujo); Óxidos de hierro y titanio (3% vol.; $\leq 0,28$ mm) de forma subhedral y anhedral, ubicándose en inclusiones y de forma diseminada; vidrio volcánico (2% vol.; $\leq 0,004$ mm) como agregados amorfos relleno intersticios dejados por los microlitos; Moldes de cristales ($\leq 2,37$ mm) de forma subhedral con hábito hexagonal y prismática, se encuentran rellenos por piroxenos. Además, presentan bordes de reacción.

Como **minerales secundarios** se encuentra: Opacita (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm) como agregado criptocristalino localizados en los bordes de los moldes de cristales de forma pervasiva (casi por completo); arcillas (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm) agregado

criptocristalino, producto de la desvitrificación. Además, se presentan **vesículas** (21% vol.) de formas irregulares elongadas siguiendo la misma orientación de las plagioclasas. La asociación mineralógica y fenocristales se compone principalmente de olivino.

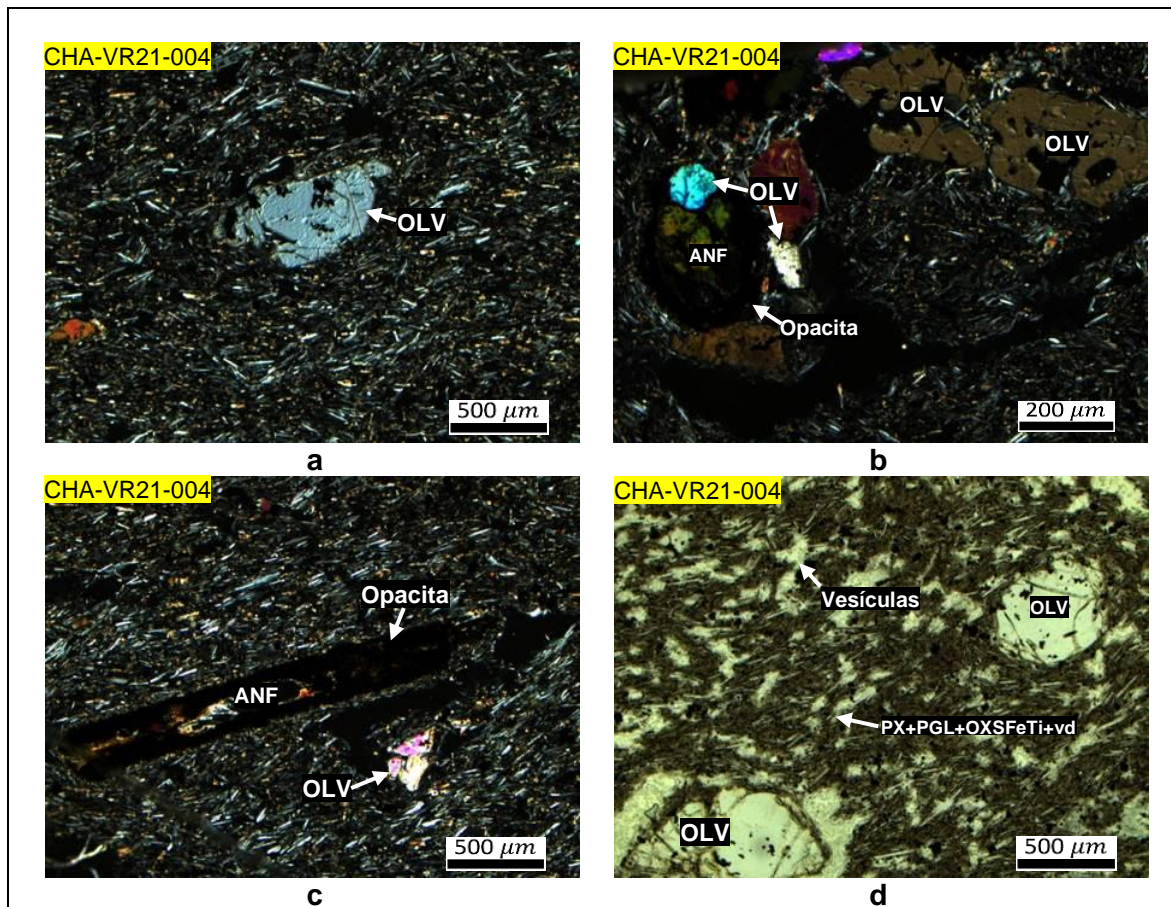


Figura 31. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-004, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c) y bajo luz de polarización paralela (d). a) Olivino con textura esqueletal. b) Aglomerado de olivino, asociado con moldes de minerales y c) Moldes de minerales con formas prismáticas rellenas por piroxenos y textura coronítica compuesta por opacita. d) Detalle de la matriz, mostrando la orientación de los microlitos de piroxeno, plagioclasa, óxidos de hierro y titanio, así como vidrio volcánico englobando fenocristales de olivino. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), anfíbol (ANF), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi), opacita (Opacita), vidrio volcánico (vd) y vesícula (vesícula).

5.3.2. Xenolitos (Cuarzoarenita)

5.3.2.1. CHA-VR21-003A

La muestra corresponde a una roca sedimentaria clástica, con textura grano soportada. Está compuesta por granos detríticos, angulosos y subangulosos, de baja esfericidad de regular selección. Compuesto por granos de **cuarzo** (87% vol.; $\leq 0,23$ mm) monocristalino de contacto suturado y cóncavo, en su mayoría con extinción recta, algunos microfracturados; **óxidos de hierro y titanio** (2% vol.; $\leq 0,23$ mm) de forma anhedral y subredondeado, también, de forma puntual se encuentran como granos policristalinos; granos de **feldespatos** (1% vol.; $\leq 0,23$ mm) subredondeados y maclados; granos de **fragmentos líticos I** (3% vol.; $\leq 0,23$ mm) de origen volcánico, compuesto por microlitos de piroxeno; **fragmentos líticos II** (1% vol.; $\leq 0,23$ mm) de origen volcánico, de formas subangulares compuestos por plagioclasa; **zircón** (Trazas vol.; $\leq 0,23$ mm) diseminados por toda la muestra, se encuentran cementados por sílice. **La matriz** es escasa, ocurre por sectores y está compuesta por una mezcla de

agregados terrosos de **arcillas** (4% vol.; $\leq 0,23$ mm). Asimismo, como último evento se observa **carbonatos** (2% vol.; $\leq 0,23$ mm) por sectores rellenando intersticios. La muestra no presenta alteración.

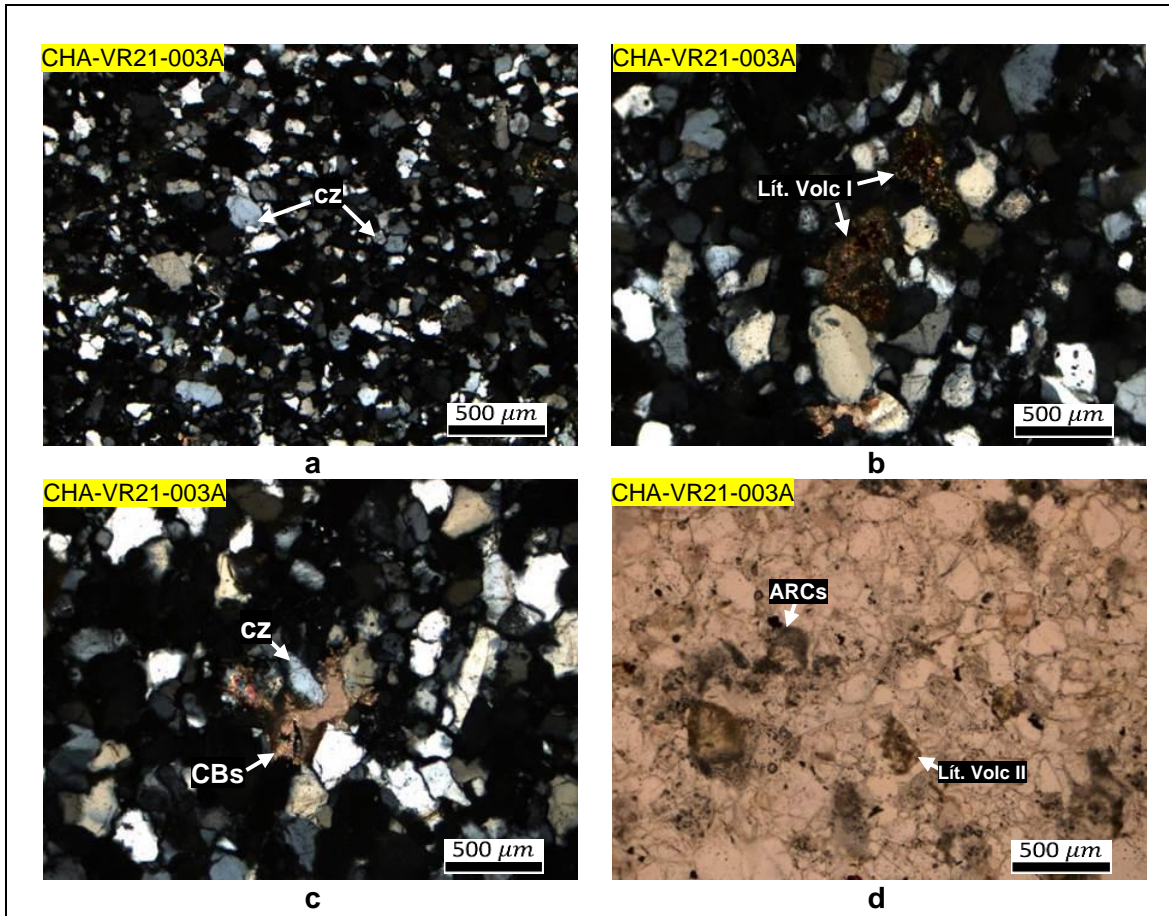


Figura 32. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-003A, correspondiente a una cuarzoarenita: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c). y bajo luz de polarización paralela (d). a) Roca sedimentaria detrítica, compuesta por granos de cuarzo. b) xenolitos o fragmentos líticos de origen volcánico compuesto por piroxeno. c) Agregados criptocristalinos de carbonatos rellenando intersticios dejados por los granos de cuarzo de forma puntual. d) Xenolitos o fragmentos líticos de origen volcánico II inmerso en matriz arcillosa englobando por sectores a los clastos de cuarzo. Las abreviaturas minerales son cuarzo (cz), fragmentos líticos volcánicos (Lít. Volc.) y carbonatos (CBs), arcillas (ARCs).

5.3.2.2. CHA-VR21-003B

La muestra corresponde a una roca sedimentaria clástica, con textura grano soportada. Compuesta por granos detríticos, angulosos y subangulosos, de baja esfericidad de regular a mala selección. La muestra se compone por granos de: **Cuarzo** (85% vol.; $\leq 0,44$ mm) monocristalino de contacto largo a suturado, presentan extinción recta y oblicua de forma puntual, varios microfracturados; **Fragmentos líticos** (3% vol.; $\leq 0,20$ mm) de composición andesítica compuesto por microcristales de plagioclasas y otros por agregados de piroxenos; granos de **feldespatos** (1% vol.; $\leq 0,25$ mm) subangulares de forma puntual; granos de **óxidos de hierro y titanio** (Traza% vol.; $\leq 0,15$ mm) diseminados por toda la muestra; granos de **zircón** (Traza% vol.; $\leq 0,08$ mm) de forma subangular;. La **matriz** se compone por arcillas (11% vol.; $\leq 0,004$ mm) como agregados terrosos. La muestra no presenta alteración.

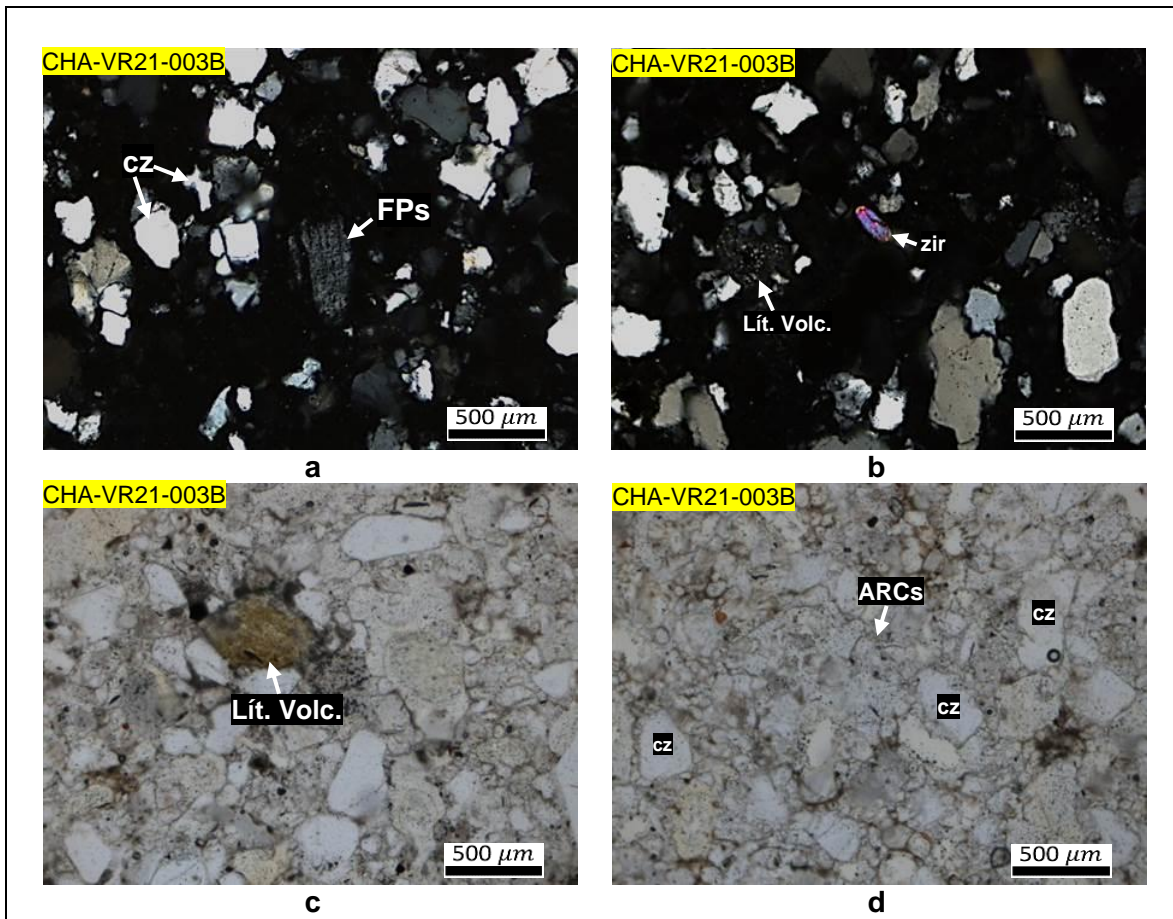


Figura 33. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-003B, correspondiente a una cuarzoarenita: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b), y bajo luz de polarización paralela (c y d). a) Granos de cuarzo y feldspatos. b) Xenolito de origen volcánico y granos de zircón. c) Xenolito de origen volcánico compuesto por piroxenos. d) Detalle de la matriz arcillosa englobando a los granos de cuarzo. Las abreviaturas minerales son cuarzo (cz), feldspatos (FPs), xenolitos o fragmentos líticos volcánicos (Lít. Volc.), zircón (zir) y arcillas (ARCs).

5.4. Volcán monogenético de Uyupampa

5.4.1. Andesita basáltica

5.4.1.1. CHA-VR21-009

La muestra corresponde a un depósito de flujo de lava. Presenta textura porfirítica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (8% vol.; $\leq 1,04$ mm) de forma subhedral, varios con hábito rómbico, microfracturados e inclusiones de óxidos de hierro y titanio. Presentan textura esqueletal, de forma puntual también se encuentran con bordes de piroxenos formando textura coronítica; Óxidos de hierro y titanio (6% vol.; $\leq 0,19$ mm) de forma subhedral y anhedral, localizándose en inclusiones de olivinos y de forma diseminada.

La matriz presenta textura seriada-traquitoide, conformada por: Plagioclasa (53% vol.; $\leq 0,28$ mm) de forma subhedral y euhedral con hábito prismático, maclado y siguiendo una cierta orientación formando textura traquitoide; Piroxeno (Clinopiroxeno > ortopiroxeno) (20% vol.; $\leq 0,09$ mm) de forma anhedral rellenando intersticios entre las plagioclasas, por sectores formando cúmulos y zonalmente como relleno de coronas de los olivinos; Vidrio volcánico (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm), rellenando intersticios dejados por los microlitos. Además, presenta vesículas (13% vol.) de formas irregulares. La asociación mineralógica y fenocristales está compuesta por olivinos y óxidos de hierro y titanio.

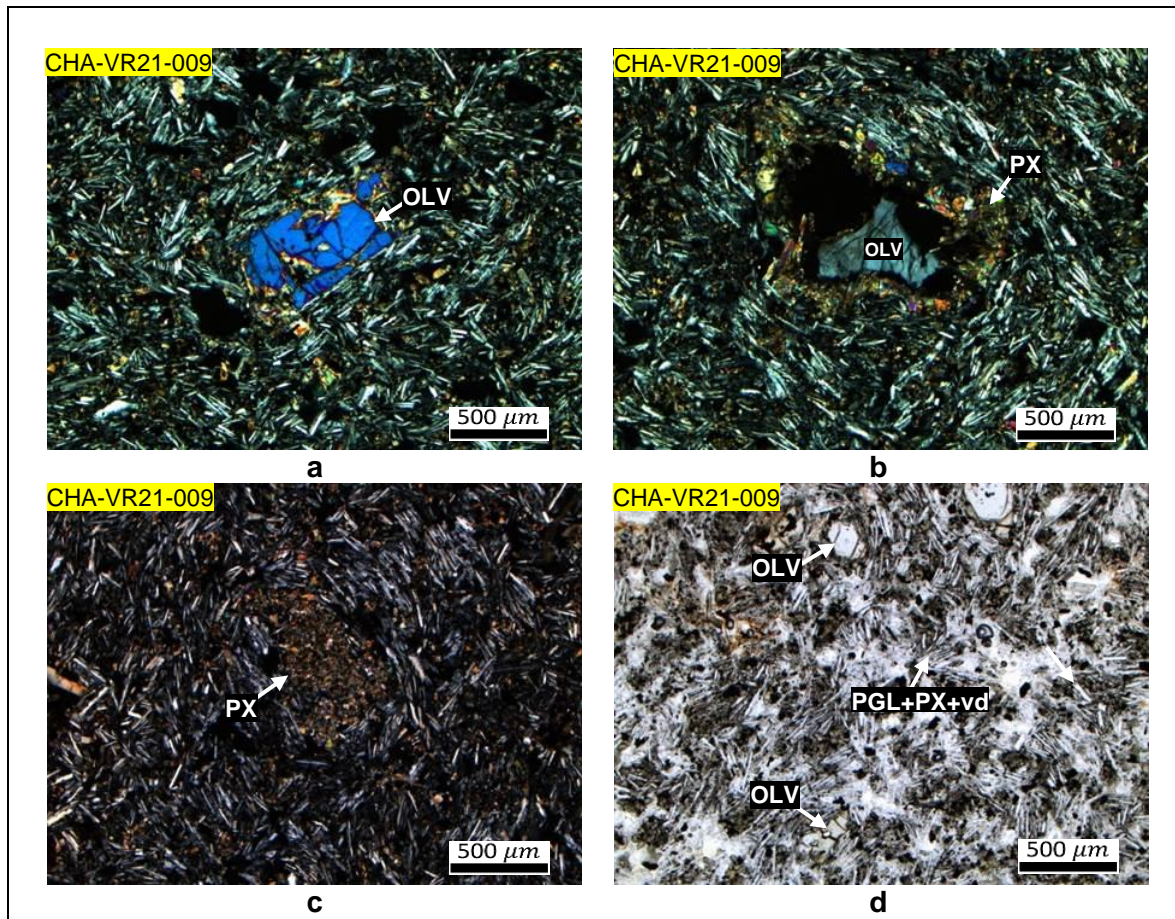


Figura 34. Fotomicrografías de la muestra CHA-VR21-009, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b y c), y bajo luz de polarización paralela (d). a) Olivinos con textura esquelética. b) Cristales de olivinos con bordes de piroxenos formando textura coronítica. c) Cúmulo de piroxenos microcristalinos, formando textura aglomerádica. d) Detalle de la matriz, mostrando la los microlitos de plagioclasas englobando a los fenocristales de olivinos. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), piroxeno (PX) y plagioclasa (PGL).

5.4.1.2. CHA-18-26

La muestra tomada de un depósito de flujo de lava. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (9% vol.; $\leq 1,07$ mm) de forma subhedral y anhedral, microfracturado, con bordes de reacción conformado por minerales criptocristalinos. Estos cristales presentan bordes de reacción y textura coronítica formada por opacita. **La matriz** presenta textura traquítica, compuesta por: Plagioclasa (32% vol.; $\leq 0,17$ mm) de forma subhedral, maclado, microfracturado; Piroxeno (ortopiroxeno > clinopiroxeno) (28% vol.; $\leq 0,13$ mm) de forma subhedral, se presenta como cúmulos formando textura aglomerádica; Óxidos de hierro y titanio (3% vol.; $\leq 0,77$ mm) de forma subhedral y anhedral ubicándose como inclusiones y de forma diseminada en la matriz; Vidrio volcánico (2% vol.; $\leq 0,004$ mm) ocurren como agregados amorfos diseminados en la matriz. Moldes de cristales ($\leq 0,80$ mm) de forma prismática rellenas por agregados microcristalinos de piroxenos y opacita; además, por sectores presenta relictos de anfíbol. Como **minerales secundarios** se encuentra: Arcillas (Traza% vol.; $\leq 0,004$ mm) producto de la desvitrificación; Opacita (Traza% vol.) agregado criptocristalino relleno de moldes de cristales. De forma puntual se muestra xenolitos ($\leq 0,54$ mm) fragmentos líticos de origen sedimentario, compuesto por granos de cuarzo, óxidos de hierro y titanio, así como feldespatos. Además, presenta **vesículas** (26% vol.) de formas irregulares. La asociación mineralógica y fenocristales está compuesta por olivino.

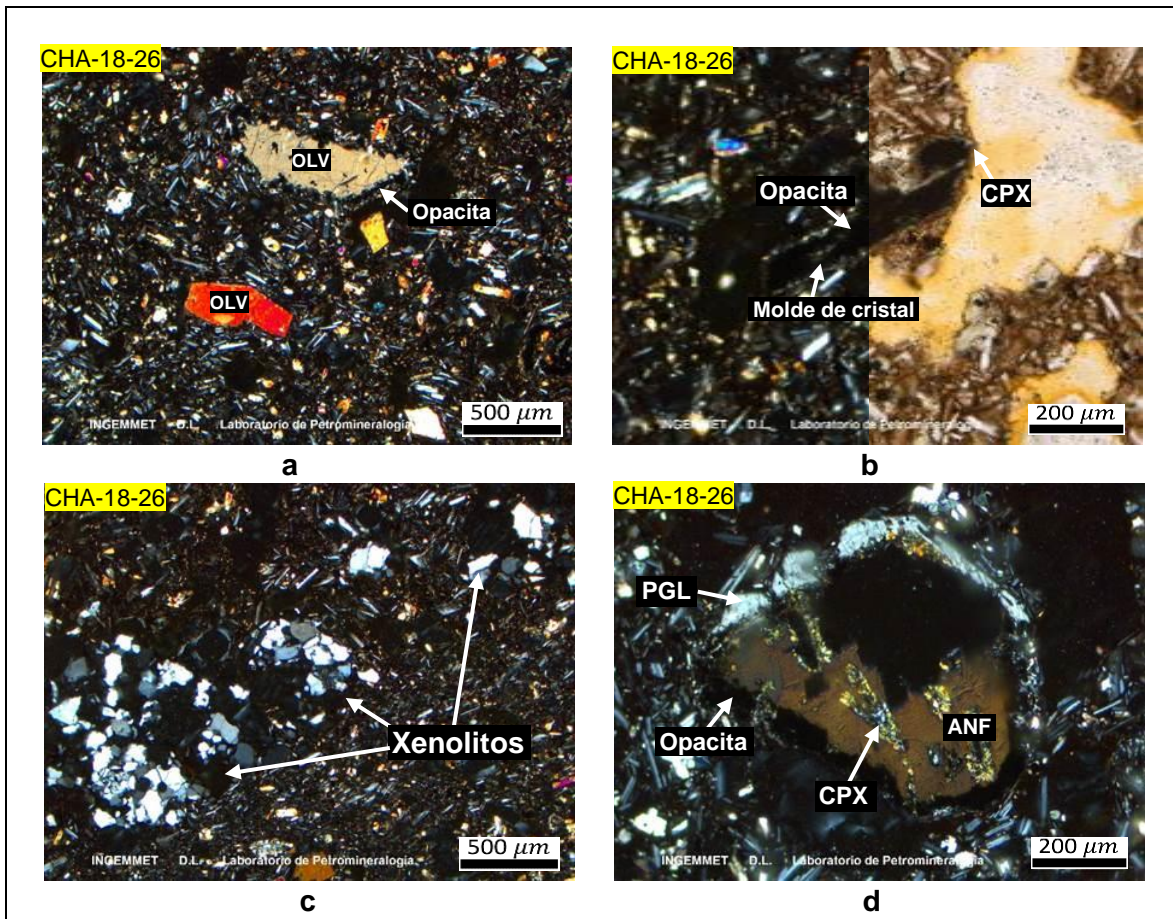


Figura 35. Fotomicrografías de la muestra CHA-18-26, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a, b, c y d), y bajo luz de polarización paralela (b). a) Fenocristales de olivino de forma subhedral y fenocrystal de olivino con borde de reacción y textura coronítica formada por opacita. b) Molde de cristal reemplazado por opacita y a su vez bordeado por un agregado microcristalino de clinopiroxeno formando textura coronítica, vista en nicols cruzados (izquierda), nicols paralelos (derecha). c) Xenolito de arenisca cuarcítica subredondeada. d) Anfíbol reemplazado por clinopiroxeno y óxidos de hierro y titanio, hacia el borde se presenta opacita conformada por microcristales de plagioclasas y óxidos de hierro y titanio. Abreviaciones minerales olivinos (OLVs), opacita (opacita), xenolitos (Xenolitos), plagioclasas (PGLs), clinopiroxenos (CPXs), anfíboles (ANFs).

5.5. Volcán monogenético El Chiral

5.5.1. Andesita basáltica

5.5.1.1. 33S-CHA-R22-013

La muestra corresponde a un depósito de domo de lava. Presenta textura porfírica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (10% vol.; $\leq 0,60$ mm) de forma anhedral y subhedral, microfracturado, con inclusiones de minerales opacos. Algunos se encuentran formando textura esquelética, otros se encuentran como cúmulos formando textura aglomerádica y de forma puntual textura coronítica;

La matriz presenta textura traquitoide, compuesta por: Plagioclasa (60% vol.; $\leq 0,19$ mm) de forma subhedral y euhedral con hábito prismático, maclado y siguiendo una cierta orientación; Piroxeno (Clinopiroxeno > ortopiroxeno) (27% vol.; $\leq 0,09$ mm) de forma subhedral, rellenando intersticios entre la plagioclasa, por sectores se encuentran cúmulos formando textura aglomerádica y puntualmente formando una textura coronítica conformada por olivino; Óxidos de hierro y titanio (3% vol.; $\leq 0,11$ mm) de forma anhedral y subhedral, se encuentran como relleno de moldes de minerales de hábitos prismáticos. Presenta xenocristales de cuarzo de bordes redondeados y corona de piroxeno.

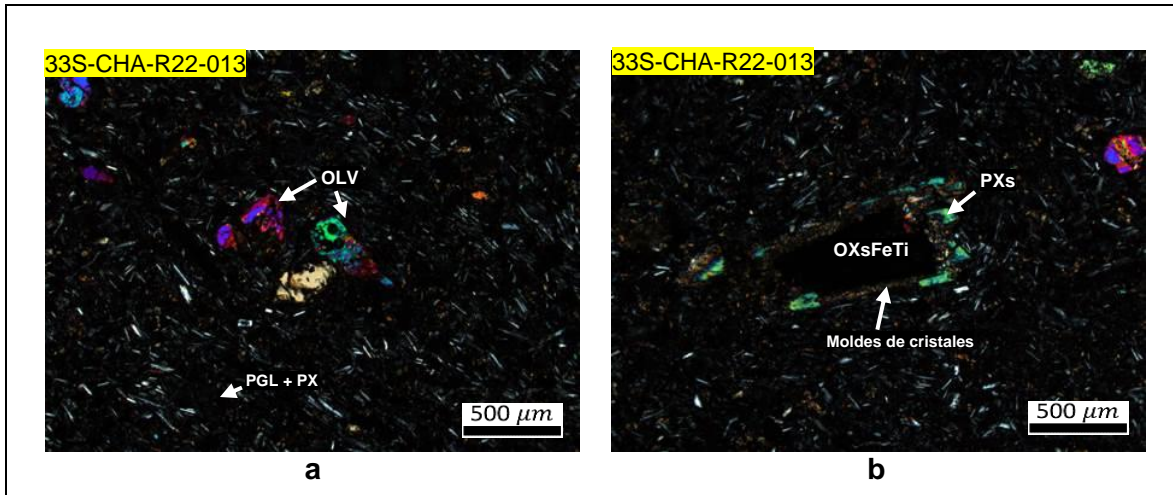


Figura 36. Fotomicrografías de la muestra 33S-CHA-R22-013, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a) Fenocristal de olivino de bordes subhedrales, fracturados e inmersos en matriz de plagioclasa y piroxeno. b) Óxidos de hierro y titanio relleno de moldes de minerales prismáticos con bordes de piroxenos mostrando textura coronítica. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), piroxeno (PX), plagioclasa (PGL), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi).

5.5.1.2. 33S-CHA-R22-015

La muestra corresponde a un depósito de flujo de lava. La roca presenta textura porfirítica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (15% vol.; ≤ 0.80 mm) de forma subhedral, presenta inclusiones de óxidos de hierro y titanio. Se encuentra mostrando textura esquelética.

La **matriz** presenta textura traquítica, compuesta por: Plagioclasa (55% vol.; $\leq 0,26$ mm) de forma euhedral con hábito prismático, maclado y siguiendo una cierta orientación; Piroxeno (Clinopiroxeno > ortopiroxeno) (20% vol.; $\leq 0,12$ mm) de forma subhedral y anhedral, se encuentra relleno de intersticios entre los microlitos de plagioclasa, de forma puntual formando textura aglomerádica; Óxidos de hierro y titanio (5% vol.; $\leq 0,10$ mm) de forma subhedral a euhedral, se encuentran diseminados por toda la matriz y como inclusiones en olivino. Además, la muestra presenta vesículas (5% vol.) de formas angulosas.

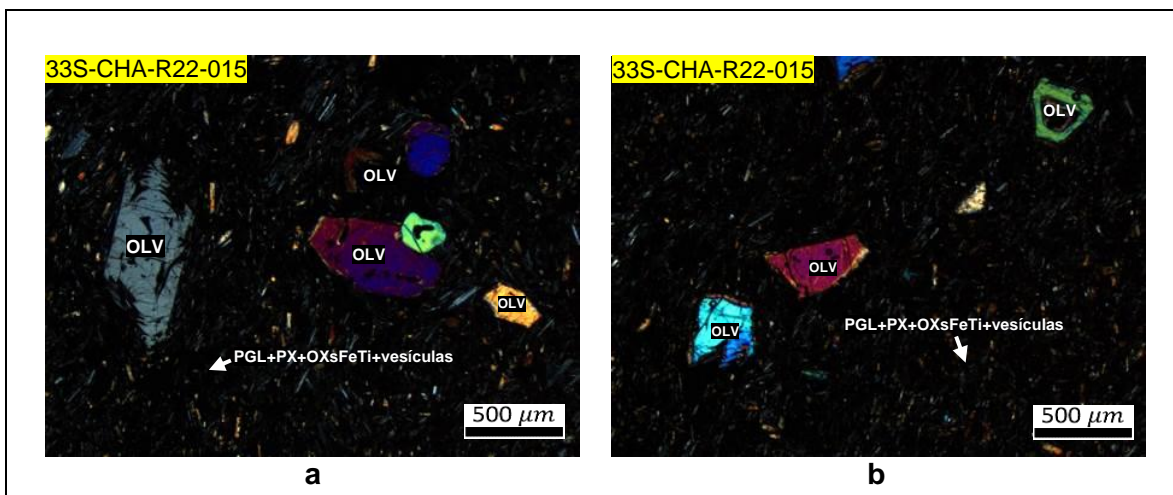


Figura 37. Fotomicrografías de la muestra 33S-CHA-R22-015, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a y b) Cristales de olivinos con textura esquelética y fragmentos de olivino inmersos en matriz traquítica compuesto por plagioclasa, piroxeno y vesículas de formas sanhedrales. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), plagioclasa (PGL), piroxeno (PX), óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi) y vesículas (vesículas).

5.6. Volcán monogenético Patacocha

5.6.1. Andesita basáltica

5.6.1.1. 33S-CHA-R23-014

La muestra corresponde a un depósito de flujo de lava aglutinada. Presenta textura porfírica. Como mineral esencial se encuentra: **Olivino** (12% vol.; $\leq 0,90$ mm) de forma subhedral, microfracturado, mostrando textura esquelética, de forma puntual bordeadas por microlitos de piroxeno formando textura coronítica; presenta inclusiones de óxidos de hierro y titanio.

La matriz presenta textura traquitoide, compuesta por: Plagioclasa (50% vol.; $\leq 0,19$ mm) de forma subhedral y euhedral con hábito prismático, maclado y siguiendo una cierta orientación; Clinopiroxenos (28% vol.; $\leq 0,14$ mm) de forma subhedral con hábito redondeado, relleno intersticios entre las plagioclasas. Puntualmente se encuentra formando textura coronítica. Óxidos de hierro y titanio (4% vol.; $\leq 0,13$ mm) se presentan de forma subhedral y diseminado por toda la muestra. Finalmente, se encuentran vesículas de formas angulosas (6% vol.).

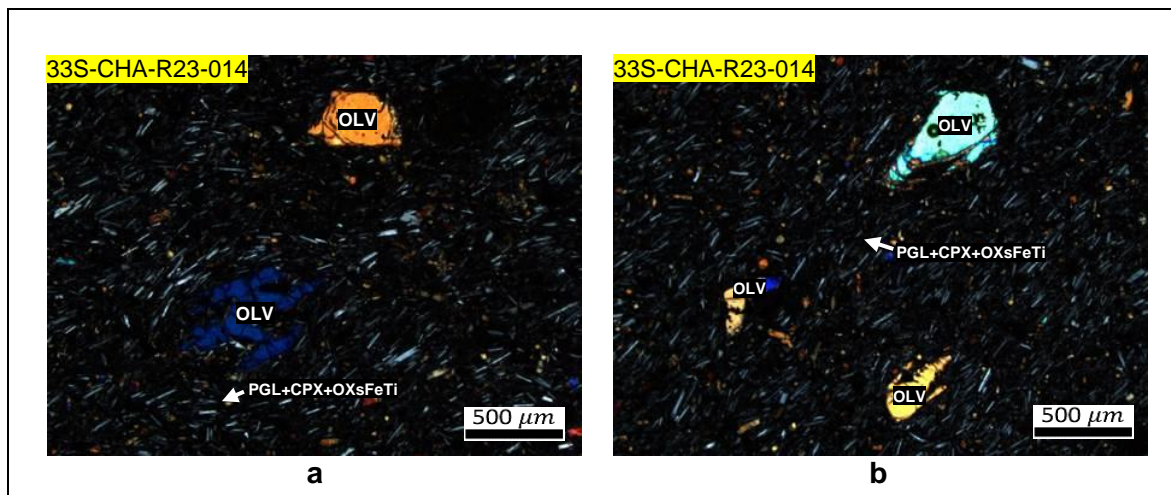


Figura 38. Fotomicrografías de la muestra 33S-CHA-R23-014, correspondiente a una andesita basáltica: Sección delgada bajo luz de polarización cruzada (a y b). a y b) Cristales de olivino, unos con borde anhedral, y fracturado y otros mostrando textura esquelética, englobados por matriz compuesta por plagioclasa y piroxeno. b) Óxidos de hierro reemplazando a minerales prismáticos con bordes de piroxenos formando textura coronítica. Las abreviaturas minerales son olivino (OLV), clinopiroxeno (CPX), plagioclasa (PGL) y óxidos de hierro y titanio (OXsFeTi).

6. GEOQUÍMICA

Las muestras analizadas (escorias y lavas) corresponden a rocas calco-alcalinas con alto contenido de K (1.58 – 2.01 vol. %), característica típica de los arcos volcánicos modernos en la zona volcánica Central (Wilson, 1986). La andesita basáltica es la composición predominante en todo el campo monogenético Yura, con un rango de 49,6 a 55,6 vol. % de SiO₂. Las muestras ricas en olivino menos diferenciadas se encuentran en los centros volcánicos El Chiral, Ccapua, Nicholson y Patacocha como se muestra en algunos diagramas de Harker (Fig. 34), los diagramas de MgO y CaO muestran una correlación negativa con el SiO₂, lo que indica una tendencia de diferenciación común. De manera similar, los elementos de transición Ni, Cr, V y Dy están negativamente correlacionados con el SiO₂, lo que sugiere que la cristalización fraccionada es el principal proceso de diferenciación en estos magmas. La mayoría de los elementos incompatibles como Rb, U y Th junto con Sm se correlacionan positivamente con el aumento de SiO₂.

Un diagrama de elementos múltiples normalizado al manto primitivo (Sun & McDonough, 1989); Fig. 39 muestra un patrón similar para todas las muestras analizadas: enriquecimiento en LILE (Cs, Rb, Ba, Sr) relativo a HFSE (Nb, Ta).

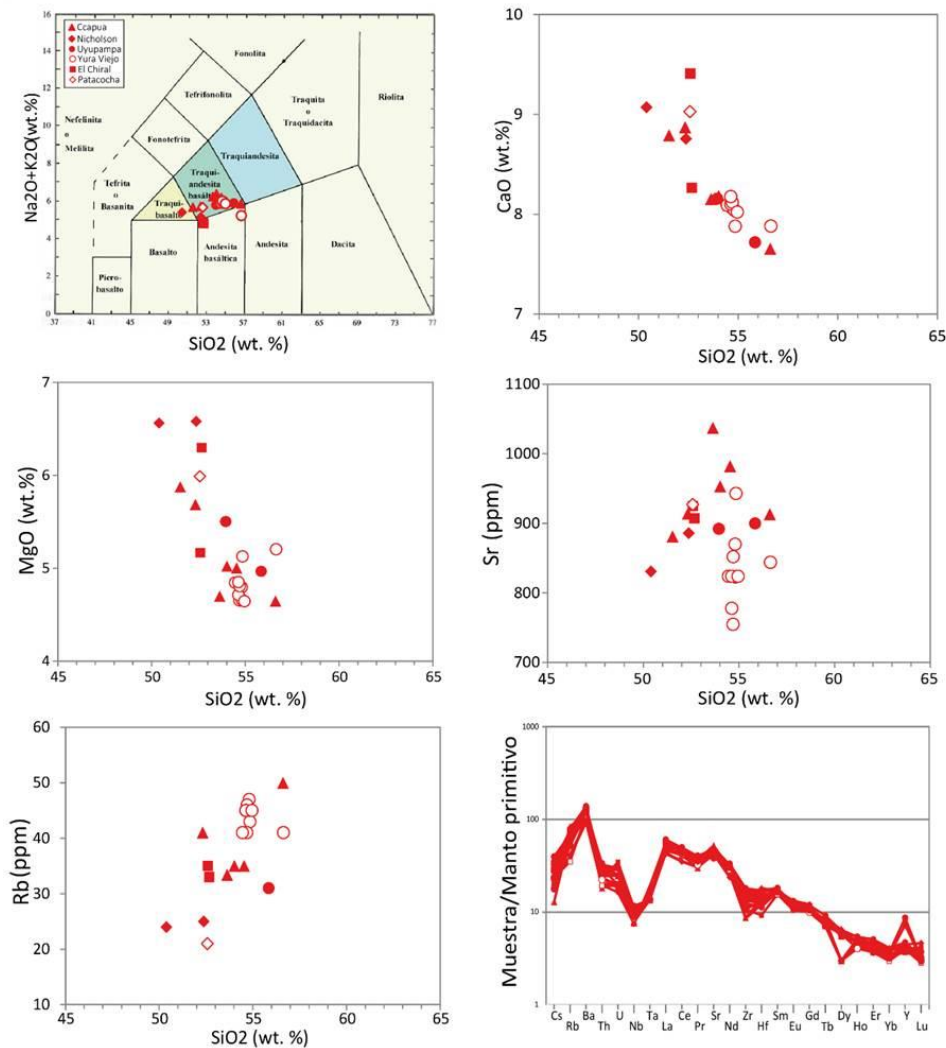


Figura 39. Composición química de los volcanes monogenéticos de Yura. Diagrama de Álcali-Sílice Total que muestra la clasificación de los volcanes Nicholson, Ccapua, Yura Viejo y Uyupampa. Los óxidos principales se muestran como valores libres de volátiles recalculados. Los diagramas de Ca, MgO, Sr y Rb versus SiO₂ muestran la variación de la composición. Diagramas de elementos múltiples normalizados al manto primitivo, que muestran patrones de elementos traza de muestras de rocas.

7. GEOCROLOGÍA

La geocronología de la actividad volcánica en el campo monogenético Yura se determinó utilizando el método de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en el Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL, Gif-sur-Yvette, Francia). Para la determinación de la edad se utilizó la matriz de las muestras de los volcanes Yura Viejo, Uyupampa, Ccapua y Nicholson (Aguilar et al 2022), resumida en la tabla 2.

El Grupo Tacaza (30-24 Ma) por Mamani et al., 2010 representa las unidades más antiguas, sobre la cual se encuentra el campo monogenético de Yura (El Chiral y Patacocha), al noroeste del campo. Sin embargo, el grado de preservación de las estructuras volcánicas como los cráteres (conos), lóbulos y crestas (flujos de lava) sugiere que Patacocha y El Chiral son mucho más jóvenes que 24 Ma. Las edades obtenidas en los volcanes Yura Viejo, Ccapua, Nicholson y Uyupampa, coincide con la estratigrafía de la zona, teniendo como basamento a la ignimbrita Aeropuerto Arequipa (1.65 Ma) por (Paquereau-Lebti et al., 2006), en el caso de los volcanes Nicholson y Ccapua; mientras que los volcanes Yura Viejo y Uyupampa se superponen al Tufo Yura (1.08) (Paquereau-Lebti et al., 2006). Considerando las edades obtenidas de los volcanes, el campo monogenético de Yura podría haber tenido una ventana de tiempo de 141 Ka, entre aproximadamente 195 ka y 54ka. La edades obtenidas del campo monogenético de Yura, sugieren que la actividad eruptiva coincide con los edificios jóvenes del complejo volcánico Chachani y las unidades basales del volcán Misti. Futuras dataciones radiométricas de los depósitos del volcán El Chiral y Patacocha serán necesarias para contrastar la edad y duración del magmatismo del campo monogenético de Yura (Aguilar et al., 2022).

Tabla 2. Resumen de datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de experimentos de calentamiento incremental.

Muestra	Volcán	Tipo de depósito	UTM		Peso (mg)	K/Ca	Edad de fusión total (ka)	Espectro de edad			Análisis de isócronas				
			Este	Norte				Incrementos utilizados	^{39}Ar (%)	Age $\pm 2\sigma$ (1)(Ka)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ $\pm 2\sigma$	n/N	MSWD	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ $\pm 2\sigma$ (1) Interceptad	Age $\pm 2\sigma$ (1)(Ka)
CHA-VR21-09	Uyupampa	Flujo de lava	213209	8205215	131	0.36	51.6 \pm 10.6	726-1081	88.3	63.2 \pm 9.0	0.67	7 de 9	0.67	298.3 \pm 2.4	65.3 \pm 17.5
CHA-VR21-010	Nicholson	Escoriácea	205497	8200259	131	0.28	79.7 \pm 20.8	663-1083	98.0	77.4 \pm 18.4	0.24	8 de 10	0.43	299.5 \pm 2.0	63.4 \pm 31.8
CHA-VR21-001	Ccapua	Escoriácea	213209	8205215	124	0.41	99.5 \pm 13.8	725-1167	98.7	97.7 \pm 10.4	0.16	8 de 10	0.20	299.0 \pm 3.3	95.8 \pm 19.6
CHA-VR21-004	Yura Viejo	Flujo de lava	211218	8205159	121	0.23	133.9 \pm 28.0	788-1168	84.4	167.8 \pm 27.0	0.32	7 de 9	0.52	298.8 \pm 3.3	164.6 \pm 59.8

Edades calculadas relativas Acs-2 en 1,1891 Ma (Niespolo et al., 2017) y la constante de desintegración total de 40K de Renne et al. (2011). (1): Error externo completo. n/M: número de cristales retenidos en el cálculo de la edad sobre el número de cristales analizados de Jourdan et al. (2009). Los valores en negrita indican las edades consideradas para cada volcán.

8. CONCLUSIONES

El estudio de la historia eruptiva del campo monogenético de Yura, es útil para definir la secuencia de eventos y la dinámica de las erupciones que construyeron estos edificios volcánicos. Estos volcanes son clave para comprender la evolución geológica de un área, ya que reflejan la dinámica del magma, la tectónica y los procesos superficiales que ocurrieron.

Por lo tanto, la combinación de estratigrafía volcánica, estudios geoquímicos, petrográficos y geocronológicos de la actividad volcánica en el campo monogenético Yura, podría ser crucial para comprender mejor la evolución del vulcanismo en el sur de Perú. El estudio de los depósitos ha permitido reconstruir la historia de este campo monogenético emplazado luego de la formación de ignimbritas en la depresión tectónica denominada cuenca Arequipa.

1. Se identificaron seis centros volcánicos con composiciones basálticas-andesíticas relativamente homogéneas (49,6 a 55,6% en peso de SiO_2). La dinámica de las erupciones está marcada por una actividad explosiva estromboliana y freatomagmática, combinada con flujos de lava dispersos y pequeños depósitos de flujos piroclásticos (flujos de escoria). En la mayoría de los volcanes, los flujos de escoria, incluyen estructuras tipo corteza de pan y bombas tipo coliflor, que sugieren procesos de actividad freatomagmática. Asimismo, se encuentran depósitos de lahares.
2. El volcán Yura Viejo muestra uno de los eventos más complejos del campo monogenético de Yura. Los depósitos observados indican que su actividad comenzó con erupciones freatomagmáticas evolucionando a estrombolianas, las cuales expulsaron fragmentos de roca (tefra) hasta 1 km de distancia del cráter. Posteriormente generó un flujo de lava que se emplazó en una pequeña paleo quebrada alcanzando hasta 1 km de distancia hacia el actual cauce del río Yura, con esto, poniendo fin a su actividad eruptiva.
3. Los elementos principales y trazas de roca resaltan el hecho de que las composiciones no han variado, a pesar de las ubicaciones de los cráteres de todo el campo monogenético. Esto sugiere que el vulcanismo en el área estuvo activo entre 195 ka y 54 ka, que es más reciente de lo esperado. La posición estratigráfica indica que El Chiral y Patacocha son los volcanes más jóvenes de todo el campo por la preservación de sus estructuras. Además, por su proximidad geográfica, similitud en sus características petrográficas y químicas, son contemporáneos a los otros volcanes monogenéticos datados. Por lo tanto, el vulcanismo en el área tuvo una duración de ~141 ka.
4. El campo monogenético Yura, caracteriza la geodiversidad del área en una porción del sur de Perú que había sido poco estudiada. En su extensión define la presencia de importantes sitios de interés geológico de un campo volcánico cuaternario de valor científico, didáctico y geoturístico, ubicado muy cerca de la ciudad de Arequipa, la segunda más importante en nuestro país.

9. RECOMENDACIONES

El conocimiento de la actividad volcánica del campo monogenético Yura aledaño al complejo volcánico Chachani es relevante para la evaluación del peligro volcánico y la gestión de riesgos, se recomienda:

- Continuar con la datación en los volcanes monogenéticos: El Chiral y Patacochoa.
- Realizar estudios geofísicos que complementen la información geológica.
- Impartir charlas informativas, de capacitaciones y de orientación a las autoridades locales y a la población que reside en el área de estudio, para difundir mejor la información geológica y también poner en valor estos geositos para un mejor aprovechamiento social, cultural, turístico y económico.



ING. NÉLIDA MANRIQUE LLERENA



ING. JERSY MARIÑO SALAZAR
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, H., Mamani, M., Alvan, A., Oviedo, M., & Rodriguez, J. (2010). Actividad tectónica del sistema de fallas Incapuquio durante la formación de la cuenca Arequipa en el Jurásico. XV congreso peruano de Geología. CD Resúmenes extendidos., 4p.
- Aguilar, R., Thouret, J.-C., Samamniago, P., Wörner, G., Jicha, B., J.-L, P., . . . Finizola, A. (2022). Growth and evolution of long-lived, large volcanic clusters in the Central Andes: the Chachani volcano Cluster, southern Peru. *J Volc Geoth Res*, 426, 107539.
- Benavente, C. D. (2017). Neotectónica, Evolución y Peligro Sísmico en la Región Arequipa. . INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 64, , 395 pp .
- Benavides, V. (1962). Estratigrafía Pre-terciaria de la Región de Arequipa. *Bol. Soc. Geol. del Perú*, Tomo XXXVI - Lima, 58 p.
- Connor, C., & Conway, F. (2000). Basaltic volcanic fields, in Sigurdsson, H.,. nyclopedia of Volcanoes: San Diego, Academic Press,, p. 331–343.
- Connor, C., Stamatakos, J., Ferrill, D., Hill, B., Ofoegbu, G., Conway, F., . . . Trapp, J. (2000). Geologic factors controlling patterns of small-volume basaltic volcanism: Application to a volcanic hazards assessment at Yucca Mountain, Nevada. *Journal of Geophysical Research*, v. 105,, p. 417–432, doi: 10.1029/1999JB900353.
- de Silva, S., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of the Central Andes*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. Price DM 138.00, viii + 216 pp.
- Galas, A. (2011). The extent and volcanic structures of the Quaternary Andahua Group, Andes, southern Peru. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 81,1: 1–19.
- Huaman-Rodrigo, D., Chorowicz, J., Guillande, R., Antallaca, A., Caceres, R., & Aguilar, R. (1993). Remote Sensing contribution on seismotectonic hazard in a volcanic active area (Nevado Sabancaya, southern Peru). In: *Int. Symp. Andean Geodynamics ISAG*, Oxford, 21-23 Sept. 1993, ORSTOM:, p. 373-376.
- Japura, S. (2018). Estudio estratigráfico y sedimentológico del depósito de caída pliniana de la erupción del volcán Huaynaputina del año 1600 d.C. Tesis de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, , 192 p .
- Macdonald, G. (1972). *Volcanoes: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall*, 510 . Maritime Safety Agency of Japan., 1996a, Omi Sima: Bathymetric chart 63436,, p. 87.
- Mamani, M., Wörner, G., & Semperé, T. (2010). Geochemical variation in igneous rocks of the Central Andean orocline (13 °S to 18 °S): tracing crustal thickening and magmas generation through time and space. *Geol Soc Amer Bull* 97:, 241–254.
- Mering, C., Huaman-Rodrigo, D., Chorowicz, J., Deffontaines, B., & Guillande, R. (1996). New data on the geodynamics of southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. . *Tectonophysics* 259: , p. 153–169.

- Németh, K. (2010). Monogenetic volcanic fields: Origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism, in Cañón-Tapia, E., and Szakács, A., eds., *What Is a Volcano?* Geological Society of America Special Paper 470, p. 43–66, doi:10.1130/2010.2470(04).
- Németh, K., & Kereszturi, G. (2015). Monogenetic volcanism: personal views and discussion. *International Journal of Earth Sciences*, 104. *International Journal of Earth Sciences*, 2131–2146, <http://doi.org/10.1007/s00531-015-1243-6>.
- Németh, K.; Kósik, S. (2020) Review of Explosive Hydrovolcanism. *Geosciences* 2020, 10, 44. <https://doi.org/10.3390/geosciences10020044>
- Paquereau-Lebti, P., Thouret, J.-C., Wörner, G., & Fornari, M. (2006). Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations. *J Volc Geoth Res* 154: . *J Volc Geoth Res* 154:, 251–275, Doi 10.1016/j.jvolgeores.2006.02.014.
- Prival, J., J-C, T., S, J., L, G., C, B., J, M., & K., C. (2020). New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption. *Peru. Bull Volcanol* 82:, p. 7. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1340-7>.
- Rivera, L. (2021). Mapeo Tridimensional del volcán Nicholson, Perú, mediante la inversión del vector magnético esparcido en coordenadas esféricas. . Report (Unpubl.), IGCP-692 Project: Geoharitage for Geohazard resilience, , p 93.
- Sempere, T., & Jacay, J. (2006). Estructura tectónica del Sur del Perú (Antearco, arco y Altiplano suroccidental). . XIII Congreso Peruano de Geología, Extended Abstracts, Lima: , p. 324-327.
- Sun, S., & McDonough, W. (1989). Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Magmatism in the Ocean Basin. Geol Soc Amer Spec Paper* 42, 313–345.
- Thorpe, R., Francis, P., Hammil, M., & Baker, M. (1982). The Andes, In: Thorpe RS. (Ed.), *Andesite*, p. 187 - 205.
- Thouret, J.-C., Finizola, A., Fornari, M., Legeley-Padovani, A., Suni, J., & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geol Soc Amer Bull* 113, 12:, p. 1593–1610.
- Thouret, J.-C., Jicha, B., Paquette, J.-L., & Cubukcu, E. (2016). A 25 Myr chronostratigraphy of ignimbrites in South Peru. Implications for the volcanic history of the Central Andes. *Geol Soc London* 173: , 734-756, doi: 10.1144/jgs2015-162.
- Van Wyk de Vries, B., & Merle, O. (1988). Extension induced by volcanic loading in regional strike-slip zones. *Geology*, 26:, p. 983-986.
- Vargas, L. (1970). Geología del cuadrángulo de Arequipa - [Boletín A 24] . INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 24, 79 p.
- Wilson, M. (1986). *Igneous petrogenesis*. Unwyn Hyman. London, 456 p.
- Wörner, G., Mamani, M., & Blum-Oeste, M. (2018). Magmatism in the Central Andes. *Elements* 14:. p. 8. Doi: 10.2138/gselements.14.4.237.

Zavala, B., Mariño, J. & Varela, F. (2016). Valle de los volcanes de Andahua: Guía Geoturística. Ingemmet, Boletín, Serie I: Patrimonio y Geoturismo, 6, 423p, 3 mapas.

Zavala, B., Nuñez, S., Gómez, E., Pari, W., Peña, F. & Carpio, J. (2022). Estudio Geoambiental de la cuenca del río Quilca-Vítor. Chili. INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica; 91, 290p., 13 mapas