



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Análisis tectónico y estructural del volcánico Calipuy en
la Cordillera Negra (Áncash) mediante el uso de
software libre**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Jorge Vladimir GONZÁLEZ CHÁVEZ

ASESOR

Mg. Víctor Manuel URIBE CÓRDOVA

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

González, J. (2021). *Análisis tectónico y estructural del volcánico Calipuy en la Cordillera Negra (Áncash) mediante el uso de software libre*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	JORGE VLADIMIR GONZÁLEZ CHÁVEZ.
DNI	47005904
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1589-0611
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	VÍCTOR MANUEL URIBE CÓRDOVA
DNI	40534269
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3096-325X
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.1.9. Tectónica
Grupo de investigación	NO APLICA
Agencia de financiamiento	SIN FINANCIAMIENTO
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huaraz Distrito: Huaraz Latitud: -9.523892° Longitud: -77.526536°

Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2019 - octubre 2020
URL de disciplinas OCDE	Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO

De acuerdo a la Resolución Rectoral Nº 01242-R-20, usando la plataforma virtual Google Meet el día lunes 26 de abril del año 2021 siendo las 17:00 horas, y luego de instalar el acto académico protocolar el Vicedecano Dr. Alfonso Alberto Romero Baylón en la presencia de los miembros del Jurado Calificador:

Dr. TOMAS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA
Ing. MARTIZA EDITH CAMPIÁN LAZO
Ing. JUAN MANUEL ELESCANO YUPANQUI

(Presidente de Jurado)
(Miembro de Jurado)
(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico virtual público de colación de la Tesis del Bach. Sr. **JORGE VLADIMIR GONZÁLEZ CHÁVEZ**, quien sustentará virtualmente la Tesis titulada: «**ANÁLISIS TECTÓNICO Y ESTRUCTURAL DEL VOLCÁNICO CALIPUY EN LA CORDILLERA NEGRA (ANCASH), MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE LIBRE**», su asesor fue el docente Mag. Víctor Manuel Uribe Córdova, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación virtual respectiva, plantearon virtualmente al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

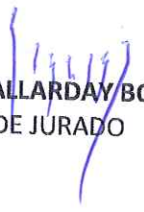
El Jurado procedió a la calificación virtual, cuyo resultado fue:

APROBADO POR UNANIMIDAD CON NOTA DE (16) Dieciséis

Habiendo sido aprobada la sustentación virtual de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. **JORGE VLADIMIR GONZÁLEZ CHÁVEZ**.

Siendo 18.00 pm horas se dio por concluido el acto académico virtual, expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 26 de abril de 2021


DR. TOMAS EZEQUIEL GALLARDAY BOCANEGRA
PRESIDENTE DE JURADO


ING. MARTIZA EDITH CAMPIÁN LAZO
MIEMBRO DE JURADO


ING. JUAN MANUEL ELESCANO YUPANQUI
MIEMBRO DE JURADO



Creazione di Adamo. Miguel Ángel.

En memoria de Jorge González Asián
(1960-2007)

Reconocimiento

Quiero agradecer al M Sc. Víctor Manuel Uribe por su asesoría durante las campañas de campo y gabinete. Gracias por su apoyo, sugerencias y observaciones en cada una de las etapas.

Agradezco a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, que me entregaron el conocimiento y demás herramientas necesarias para poder desarrollarme en el ámbito profesional.

Quiero agradecer a mi familia, por su apoyo constante, en especial agradecer a mi mamá, la señora Yolanda Chávez López Vda. De González, por su amor y paciencia; a mi tía la Sra. Consuelo Chávez y mi prima Lizbeth Torres, por la confianza depositada en mí y en este proyecto.

Es mi deseo expresar mi gratitud al M Sc. Luis Reyes, al M Sc. Hugo Tumialan y al Ing. Oscar Palacios, por aceptar entrevistarse conmigo y manifestar su parecer acerca del área interés durante la fase de pre campo.

Un reconocimiento especial al M Sc. Cristian Hurtado por las sugerencias en el perfil sección – geologica que se muestra como uno de los resultados de esta investigación.

Agradezco también a los profesionales de INGEMMET que brindaron su opinión acerca de este trabajo, a los Ingenieros: Luis Vargas, Jorge Acosta, Hugo Rivera, William Martinez y a la Dra. Miriam Mamani.

Deseo agradecer a los ingenieros Mario Díaz, Giovanni Pedeminte y Harrison Jara por su asesoría con el capítulo de Petrología en la elaboración secciones delgadas. También debo mencionar al M.Sc. Billy Beas y al Ing. Anthony Reátegui por ayuda en la parte interpretativa de los procesos volcánicos. Al Lic. Miguel Alva, por su asesoría en la parte de teledetección.

A las ingenieras Lisenia Chávez y Diana Pajuelo por brindarme su tiempo y acceder a a entrevistarse conmigo en aras de contribuir de manera favorable al desarrollo de la tesis.

A Elsa Arrilucea, Flor López, Jonathan Díaz, Carolina Grández, Paulo Ahumada, Jean Salcedo, Melissa López, Norma Díaz y Angely Benavente por su apoyo en la elaboración de este trabajo. Asimismo, quiero agradecer a mis amigos Alex Tafúr, Daniel Flores, Noel Huallpa, Vianca Guillen entre otros por sus palabras de aliento.

A las personas de las diversas comunidades que apoyaron mi tesis, brindando todas las facilidades, al Sr. Abdías y a Jorge Mendoza por ser los conductores de cada campaña de campo que realicé.

Resumen

El presente trabajo de investigación fue desarrollado con la finalidad de mostrar nuevas alternativas para realizar trabajos geológicos a bajo costo, utilizando software libre el cual nos garantiza una excelente calidad, tanto en el proceso como en el producto final.

Asimismo, esta tesis servirá de guía para pequeña minería y minería artesanal, en su búsqueda de nuevos yacimientos en el área, con opciones mucho más rentables a corto y largo plazo que les permita dar un paso más hacia la parte técnico – científica.

En el ejercicio comparativo entre las brújulas electrónicas y las brújulas convencionales, se llegó a determinar que la calidad de los datos es aceptable por parte de ambas, sin embargo, las brújulas y dispositivos móviles agilizan los procesos en gabinete y ayudan a reducir el tiempo y por ende los costos a mediano y largo plazo.

Se hizo una comparación entre distintos softwares aplicados, tanto en geología estructural como en geoquímica, de ello se colige que, Win Tensor y GcdKit son los más completos, para cada rama respectivamente.

Se propuso una metodología para el trazado de lineamientos y el procesamiento de los mismos, así como se logró generar un mapa de densidad de lineamientos que indica las zonas con mayor permeabilidad secundaria causada por los procesos de deformación.

El mapeo estructural realizado nos muestra que, el evento tectónico predominante en el área es de tipo extensivo, con cierto componente de rumbo, además, tanto este último como los eventos de deformación anteriores, condicionaron la formación de yacimientos mineros polimetálicos, característicos de área.

La petrología macroscópica y las secciones delgadas realizadas, nos muestran que el volcánico Calipuy esta constituido de una serie de procesos volcánicos efusivos y explosivos. Hacia la parte Este, con predominancia de tobas de ceniza y hacia el sector Oeste, se encuentran rocas volcánicas de naturaleza andesítica.

La caracterización geoquímica nos indica que los magmas son hidratados, evolucionados a niveles someros menores de 40 km y con fraccionamiento de plagioclasas. De los resultados de geoquímica podemos afirmar, además que la naturaleza de la corteza es de tipo félsica y el magma se formó a presiones moderadas, por lo que el área es prospectiva tanto para yacimientos Epitermales de baja sulfuración polimetálicos (Au, Ag, Zn – Pb, Cu) y pórfidos Cu – Au y Mo.

El procesamiento de datos con el software Qgis nos da como resultado un producto de gran calidad, en ciertos puntos incluso mejor que su simil comercial ArcGIS. Es muy probable que en unos años Qgis llegue a ser la herramienta Gis mas usada para la confección de mapas geológicos.

Abstract

This research work was developed with the purpose of showing new alternatives to carry out geological works at low cost, using free software which guarantees excellent quality, both in the process and in the final product.

Likewise, this thesis will serve as a guide for small mining and artisanal mining, in their search for new deposits in the area, with much more profitable options in the short and long term that will allow them to take another step towards the technical-scientific.

In the comparative exercise between electronic compasses and conventional compasses, it was determined that the quality of the data is acceptable by both, however, compasses and mobile devices speed up cabinet processes and help reduce time and hence the costs in the medium and long term.

A comparison was made between different applied softwares, both in structural geology and in geochemistry, from which it follows that Win Tensor and GcdKit are the most complete, for each branch respectively.

The structural mapping carried out shows us that the predominant tectonic event in the area is extensive, with a certain bearing component, in addition, both the latter and the previous deformation events, conditioned the formation of polymetallic mining deposits, characteristic of the area.

The geochemical characterization indicates that the magmas are hydrated, evolved to shallow levels of less than 40 km and with fractionation of plagioclase. From the geochemical results we can also affirm that the nature of the crust is felsic and the magma was formed at moderate pressures, so the area is prospective for both low-sulfidation polymetallic Epithermal deposits (Au, Ag, Zn - Pb, Cu) and Cu-Au-Mo porphyry deposits.

Data processing with Qgis software results in a high quality product, at some points even better than its commercial ArcGIS simile. It is very likely that in a few years Qgis will become the most used Gis tool for geological mapping.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 GENERALIZADAS	1
1.1 Localización	1
1.2 Accesos	1
1.3 Formulación del problema	2
1.4 Justificación del estudio	2
1.5 Objetivos	2
1.6 Hipótesis	3
1.6.1 Hipótesis general	3
1.6.2 Hipótesis específica	3
1.7 Identificación de las variables	5
Capítulo 2 METODOLOGÍA	8
2.1 Pre campo	8
2.2 Campo	13
2.3 Post Campo	14
Capítulo 3 MARCO TEÓRICO	28
3.1 Conceptos teóricos	28
3.1.1 Conceptos teóricos de vulcanismo	28
3.1.2. Conceptos teóricos de magmatismo	32
3.1.3 Conceptos teóricos de geología estructural	37
3.1.3.1. Geología estructural (<i>structural geology</i>)	37
3.1.4 Equipos móviles como brújula electrónica	48
3.1.5 La teoría de los diedros rectos	51
3.1.6 La regla de la mano derecha (<i>right hand rule</i>)	54
3.1.7 La tectónica y su relación a los fluidos mineralizantes	55
3.1.8 Conceptos de Geoquímica	56
3.1.9 Conceptos de software libre	58
Capítulo 4 CONFIGURACIÓN REGIONAL	72
4.1 Geología Regional	72
4.1.1 Estratigrafía	72
4.1.1.1 Unidades estratigráficas del Jurásico	72
A) Formación Chicama (Titoneano)	72
4.1.1.2 Unidades estratigráficas del Mesozoico	72
A) Grupo Gollarisquizga (Neocomiana - Aptiano)	72
B) Formación Chimú (Valanginiano inferior)	72
C) Formación Santa (Valanginiano superior)	73
D) Formación Carhuaz (Aptiano)	74
E) Formación Farrat (Aptiano)	75
F) Formación Pariahuanca, Chulec y Pariatambo (Albiano)	76
4.1.1.3 Unidades estratigráficas del Cenozoico	77
A) Grupo Calipuy (Paleógeno - Neógeno)	77
B) Formación Yungay (Neógeno)	78
C) Batolito de la Costa / Super Unidad Paccho (Albiano)	79

D) Batolito de la Costa / Super Unidad Santa Rosa Clara (Santoneano).....	79
E) Batolito de la Costa / Complejo de Pariacoto	80
F) Tonalita Pira	80
G) Batolito Cordillera Blanca (Plioceno)	81
H) Depósitos Pleistocénicos	83
4.1.2 Geomorfología	85
4.1.2.1 Abanico de piedemonte.....	85
4.1.2.2 Colina y lomada en roca intrusiva	85
4.1.2.3 Colina y lomada en roca sedimentaria	85
4.1.2.4 Colina y lomada en roca Volcano – Sedimentaria.....	85
4.1.2.5 Colina y lomada en roca volcánica	85
4.1.2.6 Llanura o planicie inundable.....	86
4.1.2.7 Meseta volcánica lávica	86
4.1.2.8 Montaña con cobertura glaciár.....	87
4.1.2.9 Montaña en roca intrusiva.....	87
4.1.2.10 Montaña en roca sedimentaria	87
4.1.2.11 Montaña en roca volcano – sedimentaria.....	88
4.1.2.12 Montaña en roca volcánica	88
4.1.2.13 Montaña estructural en roca intrusiva.....	88
4.1.2.14 Morrenas	88
4.1.2.15 Terraza Aluvial	89
4.1.2.16 Valle Glaciár con laguna.....	90
4.1.2.17 Vertiente coluvial de Detritos	90
4.1.2.18 Vertiente glacial	91
4.1.2.19 Vertiente glacio – fluvial	91
4.1.2.20 Vertiente o piedemonte aluvio torrencial.....	92
4.1.2.21 Vertiente o piedemonte coluvio - deluvial.....	92
4.1.3 Tectónica.....	93
4.1.3.1 Sistema de Fallas Tapacocha (SFT).....	94
4.1.3.2 Sistema de Fallas Huacclán – Churín (SFHCH)	94
4.1.3.3 Sistema de Fallas Huaraz – Recuay (SFHR)	94
4.1.3.3 Sistema de Fallas Cordillera Blanca	94
4.2 Geología Local.....	95
4.2.1 Litología.....	96
4.2.1.1 Andesita Porfírica	96
4.2.1.2 Pórfido Dacita	96
4.2.1.3 Dacita	97
4.2.1.4 Latita Porfírica	98
4.2.1.5 Toba Litocristalina	98
4.2.1.6 Toba Lapillicristalina	99
4.2.1.7 Toba Cristalina.....	100
4.2.1.8 Tonalita	101
4.2.2. Secciones Delgadas.....	102

4.2.2.1. M7	102
4.2.2.2. M10	102
4.2.2.3. M8	103
4.2.2.4. M9	104
4.2.2.5. M11	104
4.2.2.6. M12	105
4.2.2.7. M13	106
4.2.2.8. M14	106
4.2.2.9. M6	107
4.2.2.10. M1	107
4.2.2.11. M9	108
4.2.2.12. M5	108
4.2.2.13. M15	109
4.2.2.14. M16	109
4.2.2.15. M3	110
4.2.3. Geología económica del área	111
4.2.3.1. Gran y mediana minería	111
4.2.3.2. Pequeña minería y minería artesanal	116
Capítulo 5 RESULTADOS	119
5.1 Lineamientos Estructurales	119
5.2 Fallas	121
5.2.1 Fallas NW a N	122
5.2.2 Fallas E-W	122
5.2.3 Fallas NE	122
5.3. Procesamiento y Análisis de Fallas	122
5.3.1. Sector Este	122
5.3.2. Sector Centro	123
5.3.3. Sector Oeste	124
5.4 Fracturamiento	124
5.5 Dominios estructurales	125
5.5.1. Zona Este - Sector Este	125
5.5.2. Zona Centro - Sector Este	126
5.5.3. Zona Oeste - Sector Este	127
5.5.4. Zona Este - Sector Centro	127
5.5.5. Zona Centro - Sector Centro	128
5.5.6. Zona Oeste - Sector Centro	128
5.5.7. Zona Este - Sector Oeste	129
5.5.8. Zona Oeste - Sector Oeste	129
5.6.1 Elementos Mayores	131
6.6.2 Diagramas de tipo Harcker	134
6.6.3 Diagramas de Tierras Raras Normalizadas	138
6.6.4 Diagramas de Cocientes para Elementos Traza	139
Capítulo 6 DISCUSIÓN	146

Capítulo 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	152
7.1. Conclusiones.....	152
7.2. Recomendaciones	154
Referencias Bibliograficas	157

Tabla 1.1 Hipótesis general y específica.....	4
Tabla 1.2 Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 1 Principales Software Libres / Open Source	12
Tabla 3 2. Composición del magma y su relación con la viscosidad.	30
Tabla 3 3 Composición de fenocristales en las principales lavas.	36
Tabla 3 4 Comparación de ventajas y desventajas entre Brújulas	53
Tabla 3. 5. Lista top de los principales proyectos Open Source.	65
Tabla 3. 6. Comparación entre los principales sistemas operativos.	66
Tabla 3. 7. Comparación entre programas open source para geoquímica magmática.....	67
Tabla 3. 8 Comparación entre programas open source en Geología Estructural	68
Tabla 3 9 Principales distribuciones de Software Libre y Open Source.....	69
Tabla 3 10 Principales Plugins en Qgis.	70

Listado de Figuras

Figura 2.1. Imagen que muestra la búsqueda de la página para la descarga.....	15
Figura 2.2. Interfaz de la página de descarga.....	15
Figura 2.3. Trazado del área Regional de tesis	16
Figura 2.4. Distintas opciones para descarga de imágenes Alos Palsar.....	16
Figura 2.5. Pasos para añadir nuestra imagen.....	17
Figura 2.6. Pasos para generar el DEM	18
Figura 2.7. Pasos para completar la ventana del complemento DEMto3D	19
Figura 2.8. Pasos para realizar el Mapa Hillshade.....	20
Figura 2.9. Pasos para configurar el Mapa Hillshade.....	21
Figura 2.10. Resultados del Hillshade generado.....	22
Figura 2.11. Ejemplo de Lineamientos trazados tal como se indica.....	23
Figura 3.1. Estructura de un volcán.....	31
Figura 3.2. Esquema del flujo de lava félsica	32
Figura 3.3. Los diferentes bordes de interacción de placas.....	33
Figura 3.4. Relación entre el esfuerzo esperado en cada régimen tectónico	38
Figura 2.5. Clasificación de fracturas Modo Fundamental	39
Figura 3.6. Crecimiento de Fracturas basada en Scholtz.....	40
Figura 3.7. Estructura en pluma.....	41
Figura 3.8. Ilustración esquemática de las partes de una falla.....	42
Figura 3.9. Ilustración de clasificación de fallas.....	43
Figura 3.10. Ilustración de Graben y Horst.....	44
Figura 3.11. Clasificación de indicadores cinemáticos.....	46
Figura 3.12. Esquema que muestra la toma de datos con un dispositivo móvil	48
Figura 3.13. Ilustración de los diedros.....	52
Figura 3.14. Ilustración del método de la mano derecha.....	55
Figura 3.15. Envoltiente de Falla	56
Figura 3.16. Infografía de la evolución histórica de GNU y LINUX	59
Figura 3.17 Interfaz mostrando el Mapa Geológico Regional.....	62
Figura 4.1. Calizas gris oscuro correspondientes a la Formación Santa.....	74
Figura 4.3. Rocas Volcánicas del Grupo Calipuy.....	78
Figura 4.4. Tobas de la Formación Yungay.....	79
Figura 4.5. Afloramiento rocoso en la localidad de Pira	80
Figura 4.6. Distribución espacial del magmatismo en los Andes Centrales	82
Figura 4.7. Depósito morrénico a lo largo de la carretera	83
Figura 4.8. Depósito glaciofluviales a lo largo de la carretera.....	84
Figura 4.9. Colina en roca volcánica dentro del área regional.....	86
Figura 4.10. Se muestra la Cordillera Blanca.....	87
Figura 4.11. Depósito morrénico a lo largo de la carretera	89
Figura 4.12. Terresa aluvial a lo largo de la carretera	90
Figura 4.13. Vertiente coluvial de detritos.....	91
Figura 4.14. Vertiente o piedemonte coluvio - deluvial	92
Figura 4.15. Crecimiento de la Falla Cordillera Blanca	95
Figura 4.16. Andesita Porfirítica.....	96

Figura 4.17. Pórfido Dacita.....	97
Figura 4.18. Dacita.....	98
Figura 4.19. Toba Litocristalina.....	99
Figura 4.20. Toba Lapillicristalina. Elaborado por el autor.....	100
Figura 4.21. Toba cristalina.....	101
Figura 4.22. Tonalita.....	101
Figura 4.23. Muestra de Andesita vista al microscopio.....	102
Figura 4.24. Muestra de Toba de cenizas, vista al microscopio.....	103
Figura 4.25. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	103
Figura 4.26. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	104
Figura 4.27. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	105
Figura 4.28. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	105
Figura 4.29. Muestra de Toba Cristalina, vista al microscopio.....	106
Figura 4.30. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	107
Figura 4.31. Muestra de Toba de Cenizas, vista al microscopio.....	107
Figura 4.32. Muestra de Toba Cristalina, vista al microscopio.....	108
Figura 4.33. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	108
Figura 4.34. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	109
Figura 4.35. Muestra de Dacita Porfírica, vista al microscopio.....	109
Figura 4.36. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.....	110
Figura 4.37. Muestra de Toba Litica, vista al microscopio.....	110
Figura 4. 38. Orientación de Esfuerzos y Mapa Estructural de la Mina Adriana.....	112
Figura 4.39. Orientación de Esfuerzos y Mapa Estructural de la Mina Anita.....	113
Figura 4. 40. Orientación de Esfuerzos y Mapa Estructural de la Mina Huinac.....	114
Figura 4.41. Orientación de Esfuerzos y Mapa Estructural de la Mina Huacapeti.....	114
Figura 4.42. Orientación de Esfuerzos y Mapa Estructural de la Mina Pierina.....	115
Figura 4.43. Orientación de Esfuerzos y Mapa Estructural de la Mina Santo Toribio.....	116
Figura 4.44. Orientación de Esfuerzos y Foto de San Jorge.....	117
Figura 5.1. Procesamiento de las fallas del sector Oeste.....	123
Figura 5.2. Procesamiento de las fallas del sector Centro.....	123
Figura 5.3. Procesamiento de las fallas del sector Centro.....	124
Figura 5.4. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Este - Sector Este.....	126
Figura 5.5. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Centro - Sector Este.....	126
Figura 5.6. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Oeste - Sector Este.....	127
Figura 5.7. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Este - Sector Centro.....	127
Figura 5.8. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Centro - Sector Centro.....	128
Figura 5.9. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Oeste - Sector Centro.....	128
Figura 5.10. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Este - Sector Oeste.....	129
Figura 5.11. Procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Oeste - Sector Oeste.....	129
Figura 5.12. Fórmula para Normalizar los Elementos Mayores.....	130
Figura 5.13. Diagrama Tas para clasificación de rocas volcánicas.....	131
Figura 5.14. Diagrama Tas para clasificación de rocas intrusivas.....	131
Figura 5.15. Diagrama SiO ₂ vs K ₂ O para rocas volcánicas.....	132
Figura 5.16. Diagrama SiO ₂ vs K ₂ O para clasificar rocas intrusivas.....	132
Figura 5.17. Diagrama de Saturación de Alúmina.....	133

Figura 5.18. Diagrama de Saturación de Alumina.....	133
Figura 5.19. Diagrama de Harker.	134
Figura 5.20. Diagrama de Harcker.....	135
Figura 5.21. Diagrama de Harcker.....	136
Figura 5.22. Diagrama de Harcker.....	137
Figura 5.23. Diagrama de Tierras Raras Normalizadas para rocas volcánicas.....	138
Figura 5.24. Diagrama de Tierras Raras Normalizadas para rocas intrusivas.....	138
Figura 5.26. Diagrama de Cocientes Ce/Y vs SiO ₂ para rocas volcánicas.	139
Figura 5.27. Diagrama de Cocientes Ce/Y vs SiO ₂ para rocas intrusivas.....	140
Figura 5.28. Diagrama de discriminación tectónica para rocas intrusivas.	140
Figura 5.29. Diagrama de cocientes Sr/Y vs Y.....	141
Figura 5.30. Gráfico de asimilación (Sm/Yb) _n vs Sr/Y.....	141
Figura 5.31. Gráfico Eu/Eu* vs Sr/Y.....	142
Figura 5.32. Gráfico de asimilación Eu/Eu* vs Sr.....	142
Figura 5.33. Gráfico de asimilación Eu/Eu* vs Km.	143
Figura 5.34. Gráfico de (Sm/Yb) _n vs edad.....	143
Figura 5.35. Gráfico Sr/Y vs edad.	144

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Localizacion

El área está ubicada en el departamento de Ancash, a lo largo de la carretera Huaraz – Casma, en el tramo comprendido entre Huaraz y Chacchan. El área regional geológicamente comprende los cuadrángulos de Carhuaz (19H), Huari (19I), Huaraz (20 H) y Recuay (20I) ubicados en la zona 18S.

El área forma parte de la Cordillera Occidental, en la zona central de la Cordillera Negra (Navarro et al., 2010). Para mayor detalle ver el plano ***KZ2016 -GEO – 001***.

1.2 Accesos

Existen dos vías de acceso para llegar al área de estudio, cada una de las cuales une diferentes provincias.

- A través de la carretera Panamericana Norte, desde Lima hasta Paramonga, seguimos por el desvío noreste hasta la ciudad de Huaraz. Desde allí tomamos la carretera afirmada rumbo a Casma, hasta la localidad de Chacchan.
- A través de la carretera Panamericana Norte, de Lima hasta Casma, continuamos por la carretera afirmada hacia los distritos de Pariacoto, Yupash y Huaraz.

1.3 Planteamiento del problema

En la actualidad no se cuenta con un estudio de carácter similar en dicha área, que nos ayude a entender el arreglo estructural y tectónico, así como su relación con el sistema de mineralización a nivel regional y local que pueda servir como guía en la búsqueda posibles yacimientos.

1.3.1 Formulación del problema

¿Será posible realizar una óptima evaluación tectónica y estructural, a través de la aplicación de software libre obteniendo resultados de alta calidad?

1.4 Justificación del estudio

- Contribuir con una mayor y mejor información en cuanto al cartografiado estructural.
- Proponer un modelo que explique la configuración tectónica del área de investigación.
- Contribuir como base teórica de futuras investigaciones.
- Contribuir con mapas estructurales que puedan servir como guías en la búsqueda de yacimientos, tanto para minería convencional como para minería artesanal.
- Aplicar una nueva metodología para el análisis de la información utilizando software libre, el cual no tiene un costo de licencia.
- Generar algunos manuales de parte del autor sobre el uso del software Libre con aplicación geológica.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Realizar una evaluación estructural y tectónica, con muy buena precisión y calidad, mediante el uso software libre y open source, con un costo mucho menor.

1.5.2 Objetivos específicos

- Definir una metodología para la obtención de rasgos tectónicos y estructurales.
- Analizar los datos obtenidos en campo a través del software Libre.
- Definir las posibles zonas de interés para la exploración de yacimientos profundos.
- Elaborar un mapa geológico actualizado, con las principales unidades que afloran en el área de estudio.
- Interpretar los diversos eventos tectónicos que ocurrieron en la zona de estudio.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

El volcánico Calipuy, en la región Ancash, ha sido afectado por diversos procesos de deformación tectónica y geodinámica, los cuales condicionaron los procesos de mineralización y la ubicación de posibles nuevos yacimientos.

1.6.2 Hipótesis específica

- El análisis tectónico y estructural detallado, podrá establecer la base del modelo geológico en este sector de la Cordillera Negra.
- La aplicación de la técnica de lineamientos estructurales, permitirá deducir patrones estructurales regionales que, sirvan de guía para la caracterización de estructuras y la identificación de zonas de deformación como posibles prospectos de yacimientos.
- El software libre para trabajos geológicos, es muy útil y de menor costo frente a otros softwares convencionales.

Tabla 1 1 *Hipótesis general y específica*

<i>Hipótesis general</i>	<i>Hipótesis específica</i>
El volcánico Calipuy, en la región Ancash, ha sido afectado por diversos procesos de deformación tectónica y geodinámica, los cuales condicionaron los procesos de mineralización y la ubicación de posibles nuevos yacimientos.	El análisis tectónico y estructural detallado, podrá establecer la base del modelo geológico en este sector de la Cordillera Negra. La aplicación de la técnica de lineamientos estructurales, permitirá deducir patrones estructurales regionales que, sirvan de guía para la caracterización de estructuras y la identificación de zonas de deformación como posibles prospectos de yacimientos. La utilización de software libre para trabajos geológicos, es una herramienta muy útil y de menor costo frente a otros softwares convencionales

1.7 Identificación de las variables

1.7.1 Variable independiente

El uso de software Libre

1.7.2 Variable dependiente

Análisis tectónico y estructural

1.7.3 Variables intervinientes

Tectónica, Geología Regional, Petrología, Geoquímica

Tabla 1 2 *Matriz de Consistencia: ANÁLISIS TECTÓNICO Y ESTRUCTURAL DEL VOLCÁNICO CALIPUY EN LA CORDILLERA NEGRA (ANCASH) MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE LIBRE*

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGÍA
En la actualidad no se cuenta con un estudio de carácter similar en dicha área, que nos ayude a entender el arreglo estructural y tectónico, así como su relación con el sistema de mineralización a nivel regional y local que pueda servir como guía en la búsqueda posibles yacimientos. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ¿Será posible realizar una óptima evaluación tectónica y estructural, a través de la aplicación de software libre obteniendo resultados de alta calidad?	Realizar una evaluación estructural y tectónica, con muy buena precisión y calidad, mediante el uso software libre y open source, con un costo mucho menor. OBJETIVOS ESPECÍFICOS •Definir una metodología para la obtención de rasgos tectónicos y estructurales. •Analizar los datos obtenidos en campo a través del software Libre. •Definir las posibles zonas de interés para la exploración de yacimientos profundos. •Elaborar un mapa geológico actualizado, con las principales unidades que afloran en el área de estudio.	El volcánico Calipuy, en la región Ancash, ha sido afectado por diversos procesos de deformación tectónica y geodinámica, los cuales condicionaron los procesos de mineralización y la ubicación de posibles nuevos yacimientos. HIPÓTESIS ESPECÍFICA El análisis tectónico y estructural detallado, podrá establecer la base del modelo geológico en este sector de la Cordillera Negra. La aplicación de la técnica de lineamientos estructurales, permitirá deducir patrones estructurales regionales que, sirvan de guía para la caracterización de estruclutras y la identificación de zonas de deformación como posibles prospectos de yacimientos. La utilización de software libre para trabajos geológicos, es una herramienta muy útil y de menor costo frente a otros softwares convencionales.	VARIABLE INDEPENDIENTE El uso de software Libre. VARIABLE DEPENDIENTE Análisis tectónico y estructural.	TIPO DE INVESTIGACIÓN Aplicada DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Experimental POBLACIÓN Se tomaron 312 lineamientos estructurales, 200 muestras petrográficas, 40 muestras geoquímicas, 1850 datos estructurales. MUESTRA Se eligieron 90 lineamientos estructurales, 60 muestras petrográficas, 20 muestras geoquímicas y 1200 datos estrucutrales (fracturas y fallas).

Capítulo 2

Metodología

Esta tesis comprende las ramas de Geología Estructural, Geoquímica y Petrología de la Cordillera Negra, en el tramo comprendido entre la ciudad de Huaraz y el pueblo de Chacchan, en el departamento de Ancash. Esta investigación se realizó en tres fases.

En el caso de las descripciones de petrología macroscópica, éstas se realizaron en campo y fueron corroboradas por el especialista Mario Díaz, el mismo que estuvo a cargo del análisis microscópico de secciones delgadas y que ha servido para una mejor interpretación local.

2.1 Pre campo

2.1.1 Revisión de trabajos anteriores

Se realizó una búsqueda de información acerca del área de estudio. Se recopiló artículos y tesis escritas anteriormente.

- A. Se revisó los artículos científicos publicados acerca de la Cordillera Negra, el Volcánico Calipuy, el Batolito Cordillera Blanca, el Grupo Gollar, entre otros.
- B. Se realizó la lectura de las tesis más recientes cerca del área de estudio, en la que destacan las siguientes:
 - Las primeras descripciones concernientes al área de estudio se registran en las libretas de Antonio Raimondi (1873), estos fueron ampliados por el trabajo de Steimann (1929). En el campo de las intrusiones plutónicas, un estudio comparativo entre los Batolitos Cordillera Blanca y Batolito de la Costa, fue hecho por Boit (1965). Un detallado y cuidadoso estudio del Batolito de la Cordillera Blanca, fue completado por Egeler & De Booy (1956). Los trabajos

geológico regionales y el cartografiado fueron desarrollados por Wilson et al. (1967), a escala de 1: 200 000. Posteriormente, Wilson et al. (1995), en colaboración con el INGEMMET (por esos años bajo el nombre de Comisión de la Carta Geológica Nacional, Servicios de Geología y Minería), complementaria la información cartográfica levantada por Cobbing, en 1970. En 1996, Sanchez, presenta el cuadrángulo geológico 20-h titulado Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca.

- Las rocas del Grupo Calipuy en Ancash, consisten en espesas y extensas secuencias volcánicas y volcanoclásticas, que conforman parte de la Cordillera Occidental de los Andes y son el resultado de un arco magmático generado entre 54 a 8 Ma. (Wilson, 1975; Farrar & Noble, 1976; Noble et al., 1990; Turner, 1997; Davies, 2002; Longo, 2005; Rivera et al., 2005, 2006), posibilitando el emplazamiento de varios centros de emisión. Estos centros de emisión, produjeron diversos depósitos volcánicos luego de intensas e intermitentes actividades efusivas y explosivas.
- En 1956, Benavides estudió las rocas sedimentarias del Mesozoico presentes en la Cordillera Negra. Cossio (1964), describe las rocas del Grupo Calipuy como una formación de rocas volcánicas. Posteriormente, Wilson (1967) lo elevó a la categoría de Grupo.
- Atherton & Sanderson, en el año 1985, teniendo como base los estudios petrográficos realizados, determinaron que las rocas del volcánico Calipuy, de origen efusivo, son predominantemente básicas, en cambio las rocas volcánicas de origen explosivo, tienen una tendencia a ser ácidas, concluyendo que las rocas volcánicas varían desde Basaltos a Riolitas.

- Torres & Enriquez (1998), estudian el eje magmático en sentido O – E y dividen al Calipuy en dos unidades, Ututo y Chururo.
- Chávez (2010), publicaron un artículo como parte del XV Congreso de Geología titulado: “Estratigrafía Volcánica del Grupo Calipuy (Volcanismo Cenozoico) – Sector Norte del Segmento Cordillera Negra, Región Áncash” en el que se identifica los centros volcánicos y su relación a la mineralización.
- La tesis de Pajuelo (2015), muestra la diferenciación entre las unidades volcánicas del Calipuy.
- Posteriormente, Chávez (2016) en la tesis titulada “Estratigrafía y Geoquímica del Grupo Calipuy en la Cordillera Negra (8°45’S – 9°45’S) y su relación con los yacimientos minerales”, describe las formaciones volcánicas del Grupo Calipuy y los posibles centros de emisión.
- Caycho (2019), en la tesis, nos indica que las fallas en el sector norte de la Cordillera Negra (Carhuaz), influenciaron en la presencia de los yacimientos minerales en la zona, además, señala que el régimen tectónico es de tipo cizallamiento.

2.1.2 Información gis

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó información GIS cuyas fuentes fueron INGEMMET¹ y el Portal de Datos de Ciencia de la Tierra de la NASA² para la descarga de imágenes Alos Palsar.

¹ <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

² <https://search.asf.alaska.edu/#/>

2.1.3 Recopilación de *Software* libre y *Open Source*.

Para mayor detalle observar la tabla 2.1

Tabla 2 1 Resumen de los principales Software Libres / Open Source que se han empleado en la tesis y su utilidad.

Nº	SOFTWARE	UTILIDAD	ENLACE DE DESCARGA
1	QGIS	Elaboración de Mapas geologicos	https://qgis.org/es/site/forusers/download.html
2	GLOBAL MAPPER MOBILE	Labores de Mapeo y visualización de capas Gis	https://www.blumarblegeo.com/products/global-mapper-mobile.php
3	GCDKit	Procesamiento de la data de Geoquímica de Roca	http://www.gcdkit.org/
4	WIN TENSOR	Procesamiento de datos estructurales	http://damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor.html
5	GEOID	Aplicativo para tomar datos estructurales	https://apps.apple.com/us/app/geoid/id437190196
7	OBS STUDIO	Grabación de pantallas para cursos de capacitación	https://obsproject.com/es/download
8	INKSCAPE	Vectorización de imágenes	https://inkscape.org/es/#el-programa
9	ICE	Construcción de fotos panorámicas	https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/image-composite-editor/

2.1.4 Análisis de lineamientos

Se lleva a cabo la extracción de lineamientos estructurales, utilizando las imágenes Allos Palsar, Mapas Hillshade y Modelos de elevación digital usando Qgis.³

2.1.5 Elaboración de mapas y fotointerpretación de imágenes satelitales

Se elaboró mapas a escala 1: 25 000 y se llevó a cabo la fotointerpretación para determinar previamente, las litologías que serán corroboradas en campo.

2.1.6 Elaboración de formatos

Se elaboraron formatos de campo que se adjuntaron en una libreta. Los formatos elaborados se adjuntan en el *Anexo E*.

2.2 Campo

- Se realizó un cartografiado geológico a escala 1: 25 000.
- Todas las fotografías cuentan con una ubicación GPS, su descripción y escala respectiva.
- Se recolectó muestras para estudios geoquímicos y petrográficos de cada uno de los afloramientos evaluados. Para el análisis geoquímico, es preferible extraer muestras inalteradas.
- Se realizó 4 campañas de campo en un total de 20 días.

³ <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

2.3 Post Campo

Este trabajo de investigación, abarca dentro de sus variables a los temas de Tectónica, Geología Estructural y Software Libre. Durante el desarrollo de la misma, se vio necesario incluir algunos capítulos que refuercen el sustento estructural, para realizar un mejor análisis.

Dichos capítulos, que no están incluidos como variables dentro del título, pero que, sin embargo, son importantes para reforzar la interpretación, son el capítulo de Geoquímica Magmática y Petrología.

- Para el análisis de lineamientos que se realizó en este trabajo, se utilizó imágenes Alos palsar⁴ debido su resolución de hasta 12.5 m y su fácil descarga a un costo gratuito.
- Para descargar las imágenes seguimos estos pasos.
 - Nos dirigimos al navegador y digitamos Alaska Satelite Facility e ingresamos la primera opción que aparece en el navegador. Necesitaremos crear una cuenta para poder realizar la descarga con éxito, los pasos para ello son muy similares a los que se siguen para crear cualquier cuenta online, nos solicitará un nombre de usuario, datos personales y un correo electrónico de verificación (ver Figura 2.1.).
 - Una vez registrada la cuenta, iniciamos sesión, el interfaz aparecerá tal como se muestra en la Figura 2.2.

⁴ <https://search.asf.alaska.edu>

- Luego de haber ingresado, ubicamos el área que deseamos descargar y trazamos un rectángulo que contenga nuestra área de interés, tal como se ve en la Figura 2.3.
- Debemos trazar un rectángulo, que contenga el área de interes que vamos a analizar. Luego colocaremos la fecha. A continuación, oprimimos la opción de “Buscar” y descargamos la imagen que abarque en su totalidad el área que requerimos.

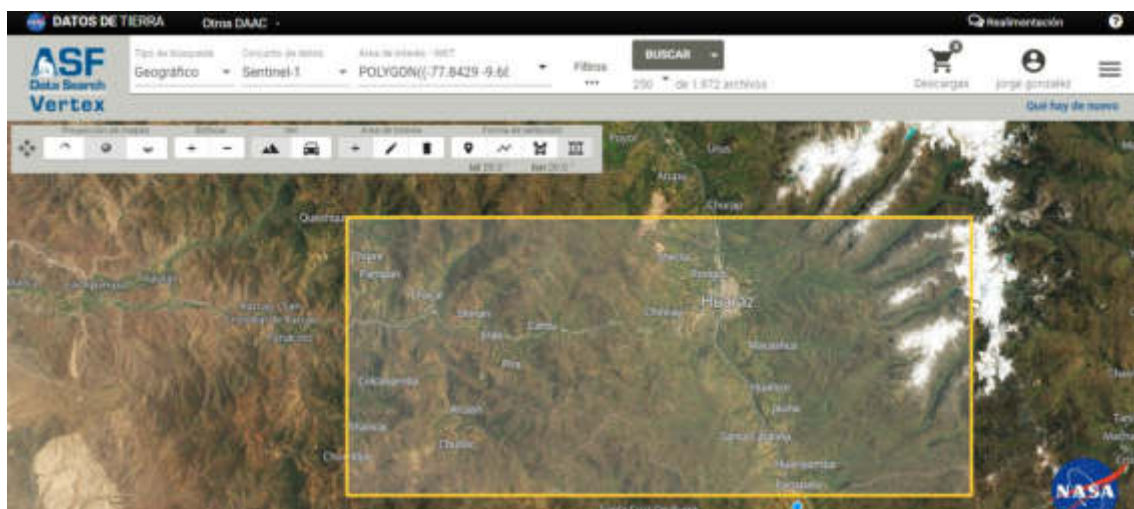


Figura 2.3. Trazado del área Regional de tesis.

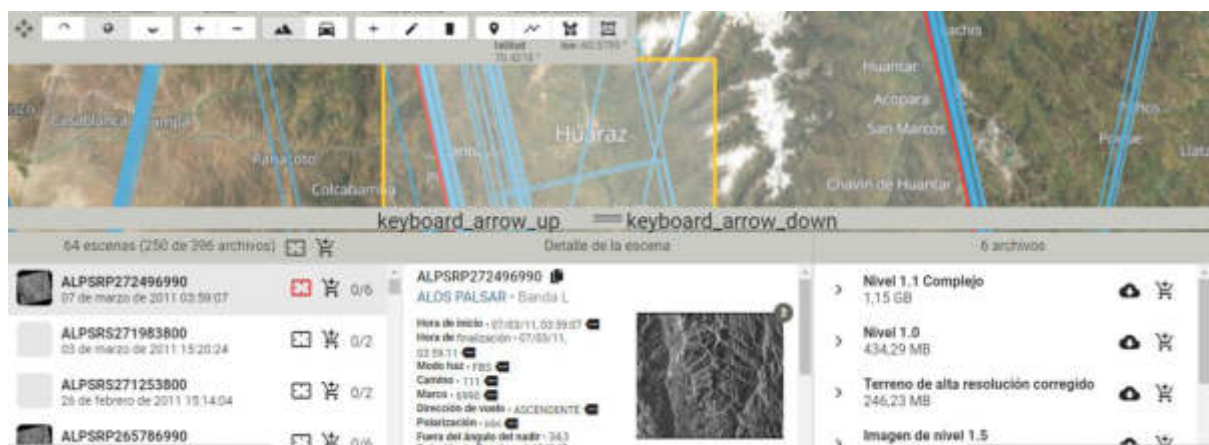


Figura 2.4. Distintas opciones para descarga de imágenes Alos Palsar.

- Debemos seleccionar la imagen que contenga las bandas completas, o la que es más pesada (ver la Figura 6.4.).
- En Qgis⁵, se puede generar modelos de elevación (Hildshade) que refleje las formas del terreno. Para ello necesitamos, por lo general datos de elevación. Una vez descargada la imagen, como se indicó líneas arriba, abrimos el Qgis y seguiremos los pasos que se detallan a continuación (ver Figura 2.5.).
 - Paso 1. Añadimos la imagen con el botón de “añadir capas ráster”.
 - Paso 2. Ubicamos el archivo donde lo tenemos guardado.
 - Paso 3. Una vez que se ubica la imagen.
 - Paso 4. Damos clic en el botón de abrir.

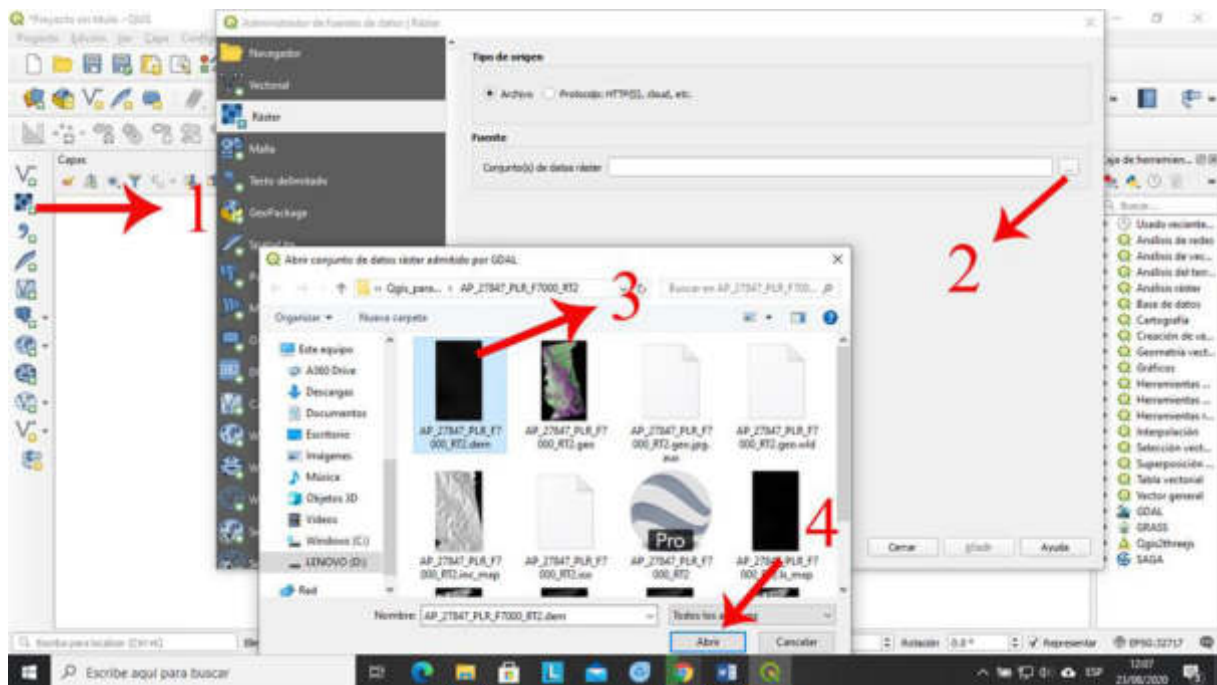


Figura 2.5. Pasos para añadir nuestra imagen.

⁵ <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

- Una vez que se ha cargado la imagen procedemos a elaborar el modelo de elevación digital. Para ello los pasos a seguir son los siguientes (ver Figura 2.6.).
 - Paso 1. Seleccionamos la imagen de la cual deseamos generar el DEM.
 - Paso 2. Nos dirigimos a la pestaña Raster.
 - Paso 3. Del menú de opciones seleccionamos DEMto3D.
 - Paso 4. Seleccionamos la opción Impresión 3D de MED.

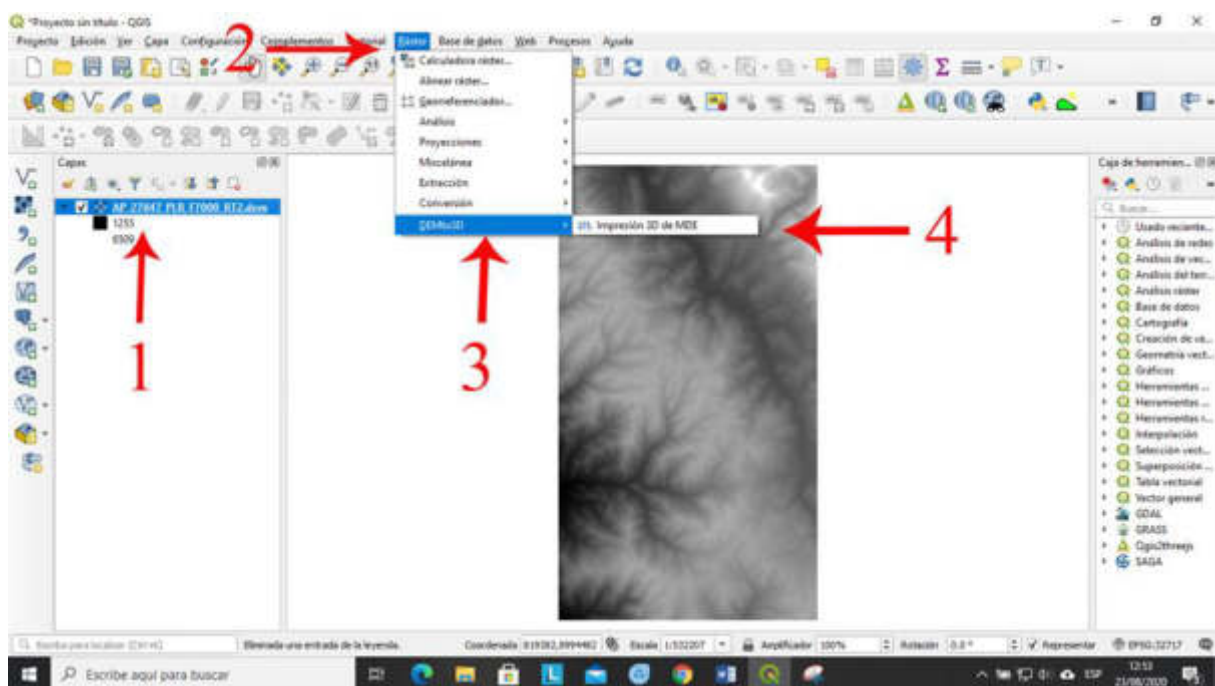


Figura 2.6. Pasos para generar el DEM.

- Luego, nos aparecerá una ventana en la cual debemos completar los campos según lo solicite para poder generar el modelo de elevación Digital (DEM).

Para ello, recomendamos los siguientes pasos (ver Figura 2.7.).

- Paso 1. Seleccionamos la opción “extensión de capa”.
- Paso 2. Escogemos el espaciado, para nuestro caso colocamos el valor recomendado por el software.
- Paso 3. Colocamos el ancho y largo que tendrá el Modelo.
- Paso 4. Se coloca la cota promedio del modelo.
- Paso 5. Damos Click en la opción Exportar a STL, escogemos la carpeta dnde se guardará el Modelo.

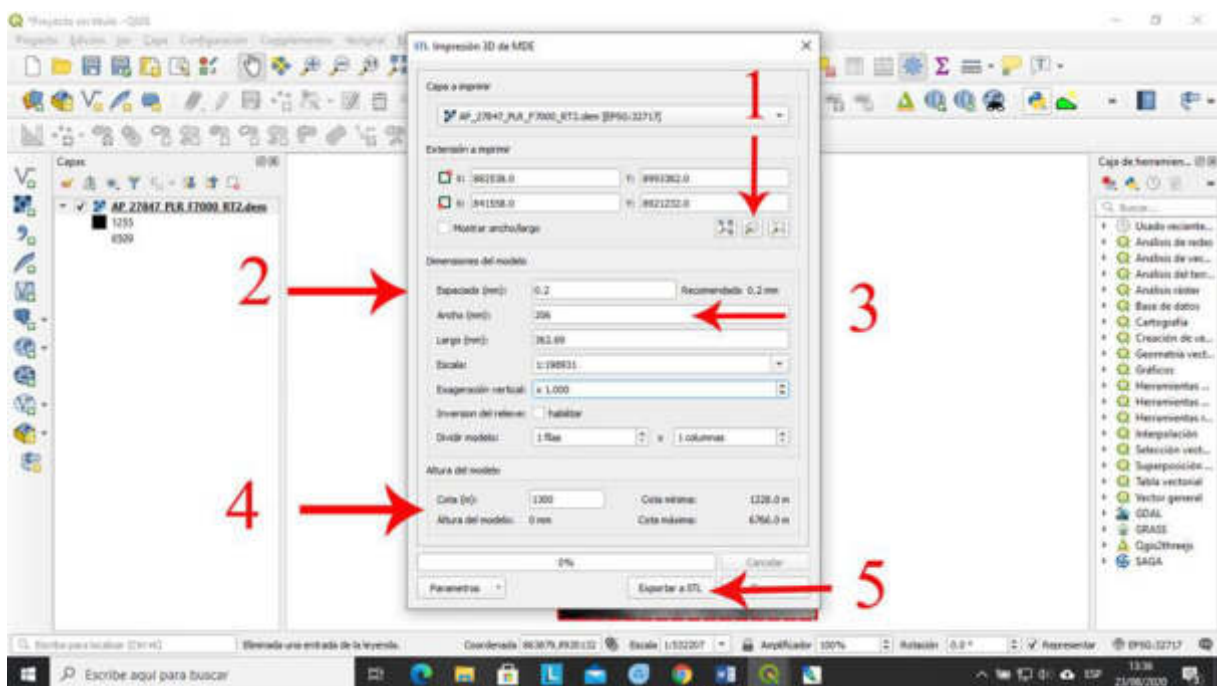


Figura 2.7. Pasos para completar la ventana del complemento DEMto3D.

- Cuando tengamos la imagen cargada en Qgis (los pasos se mencionaron en páginas anteriores), debemos generar un mapa de sombras, el cual es necesario para realizar el trazado de los lineamientos. Para ello se siguen estos pasos:
 - Paso 1. Seleccionamos la imagen.
 - Paso 2. Nos dirigimos a la pestaña ráster.
 - Paso 3. Seleccionamos Análisis / Mapa de sombras.

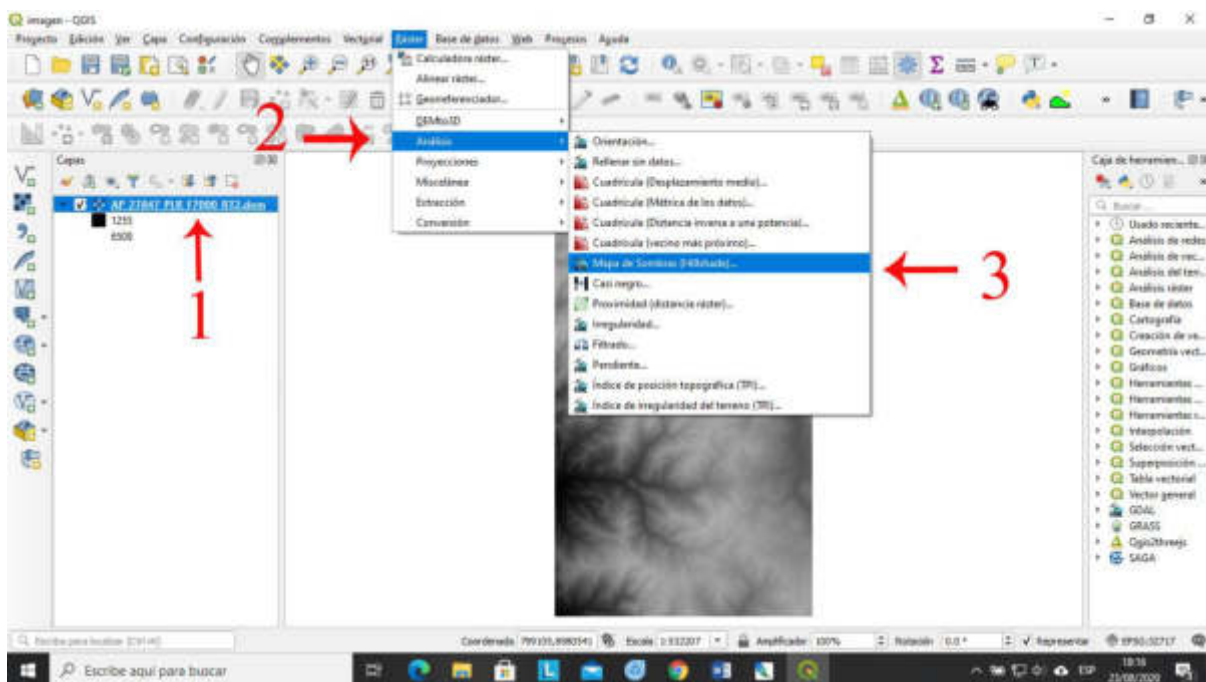


Figura 2.8. Pasos para realizar el Mapa Hillshade.

- Cuando aparezca la ventana, deberemos empezar a completar los espacios con la información correspondiente.
 - Paso 1. Mantenemos la imagen seleccionada.
 - Paso 2. Seleccionamos la imagen a la que vamos a extraer hillshade.

- Paso 3. Aquí deberíamos ir cambiando el ángulo de 360° , 90° , 180° , 270° manteniendo 45° en la horizontal aplicando la Teoría de la Iluminación Rembrandt⁶. Para mayor detalle revisar las Figuras 2.9 y 2.10.

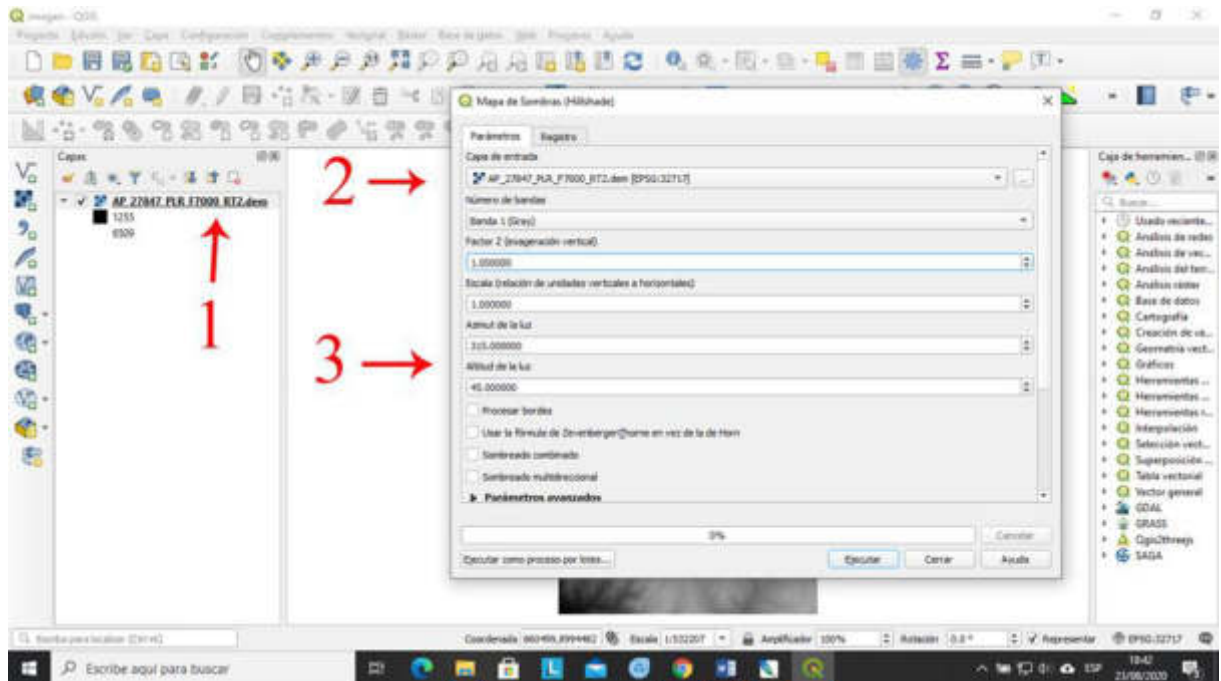


Figura 2.9. Pasos para configurar el Mapa Hillshade.

⁶ <https://www.avisualpro.es/la-iluminacion-rembrandt-luz-45-grados/>

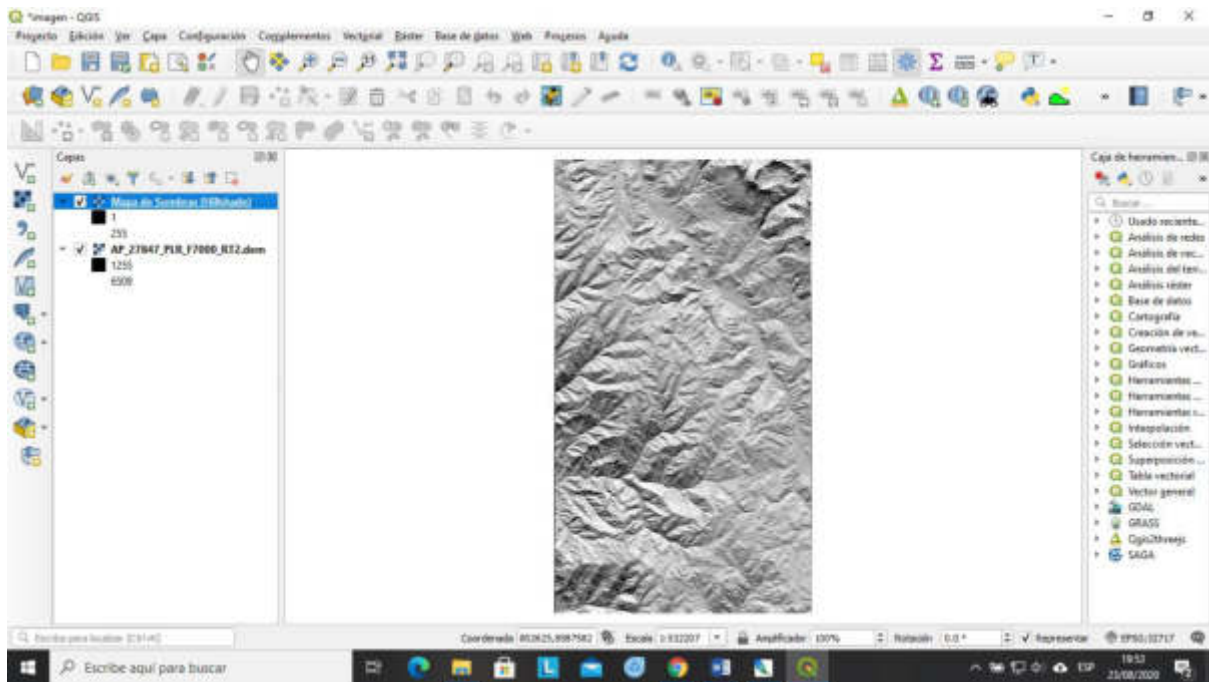


Figura 2.10. Resultados del Hillshade generado.

- En cuanto respecta a la configuración tectónica, se procesaron los datos de estructuras obtenidos en campo, mediante el software Win Tensor (Delvaux, 2003). Además, se realizó un análisis de las posibles fallas regionales, mediante el método de Lineamientos Estructurales.
- Para obtener los lineamientos estructurales, es necesario entender que, hasta el momento, no se conoce de un software open source que logre extraerlos de forma efectiva utilizando un algoritmo. Por ende, es necesario la habilidad del geólogo para trazar los lineamientos e interpretarlos posteriormente.
- El investigador Ricardo Valls, resalta la importancia de los lineamientos estructurales e indica que estos, sirven como guía para orientar la exploración por yacimientos. Para trazar los lineamientos, es necesario crear una capa vectorial de tipo línea.

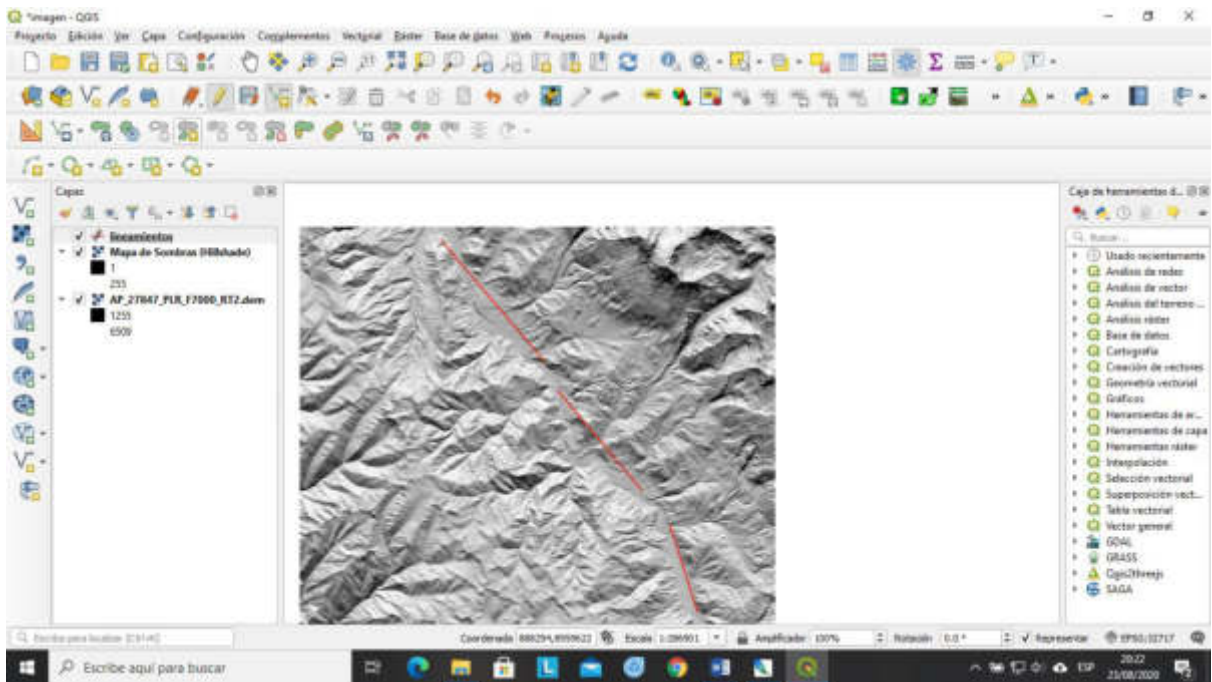


Figura 2.11. Ejemplo de Lineamientos trazados tal como se indica.

- Posterior a ello, la extracción sistemática de los lineamientos, se realizó trazando una línea representativa promedio de dichas orientaciones.
- Se consideró como lineamiento verificable en campo, solamente a aquellos que coincidían en 3 direcciones como mínimo. Se trazará una línea que represente la orientación promedio de los cuatro anteriores. Para mayor detalle ver el plano **KZ2016 – GEO – 005**.
- Los lineamientos que se verificaron en campo como fallas geológicas, se trazaron como tal y se describe su cinemática y análisis de esfuerzos utilizando el software libre Win Tensor⁷.
- Una vez obtenidos los gráficos de tipo “beachball”, se elaboró el mapa de configuración tectónica y el mapa de Geología estructural, que figuran en el plano **KZ2016 – GEO - 004** y en el plano **KZ2016 – GEO - 007**.

⁷ <http://damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor.html>

- En el caso de los datos de fracturas, fueron tomadas en cada punto de observación geológica, con el uso del dispositivo móvil y se procesaron los datos en el software Win Tensor.
- Se obtuvo los “diagramas de rosetas” con los cuales se confeccionó el mapa de fracturas, el mismo que se muestra en el plano **KZ2016 – GEO – 008**.
- Para llevar a cabo el análisis geoquímico, se hizo uso del convenio existente entre la Universidad Nacional Mayor de San Marcos e INGEMMET⁸. Se utilizó la data perteneciente al Proyecto de Geología Regional – GR4, que se ubicaba dentro del área Regional. Los criterios que se tomaron para la selección de las muestras se detallan a continuación.
 - Primero, se tomó en cuenta el tipo de análisis geoquímico realizado a las muestras seleccionadas
 - El segundo criterio que se utilizó para la selección de las muestras, fue la ubicación de las mismas.
 - Se procesó la data geoquímica obtenida de las 20 muestras, utilizando software Libre/ Open Source.
 - Se realizó una comparación entre los tres programas, sus ventajas y desventajas, las cuales figuran en la Tabla 2.7.
- Luego de ello, se tomó en cuenta el tipo de análisis geoquímico realizado a las muestras seleccionadas. Cabe indicar que se analizaron 20 muestras, 4 de las cuales pertenecen a cuerpos intrusivos según el mapa geológico regional. Las 16 muestras restantes, corresponden al Grupo Calipuy.
- La determinación de elementos mayores, se llevó a cabo mediante absorción atómica. Este método, es adecuado para la delineación de la composición

⁸ <https://www.ingemmet.gob.pe/>

geoquímica de rocas entre los rangos analíticos definidos, donde la mineralización presente, requiere de un ataque de ácidos fuertes y las rocas silicatadas, de una reacción con el ácido fluorhídrico en vaso cerrado a presión y temperatura, con posterior enfriamiento. La solución resultante, es analizada por silicio, aluminio, titanio, hierro, manganeso, calcio magnesio, sodio y Potasio (Vargas, 2020) (Correo electrónico).

- Para el caso de los elementos traza, el análisis se realizó por ICP – OES – ICP – MS para 54 elementos, ppm y % Potasio (Vargas, L, 2020) (Correo electrónico).
- Para el procesamiento de los datos geoquímicos, se suele utilizar el software Microsoft Excel (2016). Esto se debe al control que el investigador tiene sobre los datos, los cálculos matemáticos y demás.
- Se optó por utilizar software libre para poder procesar los datos geoquímicos. Los software seleccionados fueron T-igPet⁹, GCDKit¹⁰ y Petrograph¹¹, ello se debe, a que los autores Janoucksen, Michael Carr y Petrelli, son los más citados dentro del ámbito académico del uso de software libre en geoquímica. Se decidió utilizar el software GcdKit, por ser considerado el más completo a comparación de los otros dos. Una comparación entre los diferentes programas y sus ventajas se describen en la Tabla 3.7.
- Se muestra un manual desarrollado por el autor de la tesis, a manera de ejemplo, con las indicaciones correspondientes.
- Para los elementos mayores, se utilizaron los diagramas TAS para rocas volcánicas (Le Bas et al., 1986) y el diagrama TAS para rocas intrusivas (Cox

⁹ <https://sites.google.com/site/tsigpetteaching>

¹⁰ <http://www.gcdkit.org/download>

¹¹ <https://petrograph.software.informer.com/2.0b>

et al., 1979), el diagrama K₂O vs Sílice (Peccerillo y Taylor, 1976) y diagramas de tipo Harcker (Harcker, 1909).

- En el caso de los diagramas de Tierras Raras, se utilizó el Diagrama de tipo Spider normalizando las condritas según lo indica Nakamura, 1974. Para poder conocer la relación entre el proceso magmático, la tectónica, el grosor cortical y la profundidad de asimilación se utilizó de forma conjunta tanto Ms Excel y el Software GcdKit.
- Una vez obtenido el gráfico, el diseño fue mejorado utilizando el software Libre Inkscape ¹²para mejorar la calidad de los gráficos.

¹² <https://inkscape.org/es/>

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Conceptos teóricos

3.1.1 Conceptos teóricos de vulcanismo

3.1.1.1. Actividad volcánica

En primer lugar, Tarbuck (2005) definió la actividad volcánica como un proceso que produce una estructura pintoresca en forma de cono que, como el monte Santa Elena, hace erupción de manera violenta con cierta periodicidad. Pujadas (1999) precisó el término como el producto de una serie de fases que van desde el origen, hasta el almacenamiento del magma (ver Figura 2.1.).

Por otro lado, Toselli (2010) concretó que el vulcanismo muestra de forma irrefutable la actividad endógena del planeta, donde se da un enfriamiento rápido bajo diferentes condiciones.

3.1.1.2. Tipos de actividad eruptiva

En este sentido, Pujadas (1999) indicó que el tipo de erupción está en función de la composición y las condiciones del entorno, como el porcentaje de agua, las estructuras y la geoforma en la que se origina. De igual manera, diferenció dos tipos de actividad volcánica: la actividad volcánica efusiva y la actividad volcánica explosiva. Asimismo, Toselli (2010), mencionó algo distinto, al clasificar las erupciones volcánicas como centrales o fisurales.

A. Actividad volcánica efusiva

Asociada con frecuencia a los magmas básicos, origina la formación de coladas o mantos de lava fluida. De forma más excepcional, también se puede producir una actividad efusiva en la emisión de magmas de composición ácida, lo que genera, en estos casos, domos y pitones (Pujadas, 1999).

B. Actividad volcánica explosiva

El grado de explosividad de las manifestaciones volcánicas está relacionado con la composición del magma, su temperatura y los gases que contiene en el momento de su salida hacia la superficie terrestre (Pujadas, 1999). En este tipo de actividad volcánica es muy común utilizar los calificativos mencionados líneas arriba.

3.1.1.3. Factores que afectan a la viscosidad

El efecto que la temperatura ejerce sobre la viscosidad es completamente lógico; conforme la lava se enfría y empieza a congelarse, su movilidad disminuye y, por ende, el flujo acaba por frenar (ver Figura 2.2. para mayor detalle). Otro de los factores es la composición química del magma, dado que la diferencia entre una u otra roca ígnea se basa en su contenido de SiO_2 . Los magmas que producen rocas basálticas contienen alrededor de un 50 % de sílice, mientras que los magmas que originan las rocas félsicas contienen más del 70 % de sílice. Por otro lado, se sabe que las llamadas rocas intermedias contienen alrededor del 60 % de sílice (Tarbuck, 2010).

Tabla 3 2. *Composición del magma y su relación con la viscosidad.*

	<i>Composición</i>	<i>Contenido en Sílice</i>	<i>Viscosidad</i>	<i>Contenido Gaseoso</i>	<i>Tendencia a formar piroclastos</i>	<i>Tendencia a formar lavas</i>	<i>Geoformas</i>
B Á S I C O Á C I D O	Magma máfico (Basáltico)	Bajo 50%<	Baja	Baja (1 -2%)	Baja	Volcanes en escudo, Llanuras volcánicas, Conos de Ceniza	
	Magma intermedio (Andesítico)	Intermedio 50% - 60%	Media	Intermedio (3 -4%)	Intermedia	Conos Compuestos	
	Magma félsico (riolítico)	Alto 60% - 70%	Alta	Alto (4 – 6%)	Alta	Domos Volcánicos y Coladas Pirocláticas	

Nota. Modificado de Ciencias de la Tierra (p.720), por Tarbuck, 2005, Pearson Educación S.A.

Por otra parte, Tarbuck (2010) señaló que “la viscosidad de un magma está directamente relacionada con su contenido de sílice”. El flujo magmático encuentra resistencia precisamente al fluir, debido a que las moléculas de sílice forman largas cadenas de silicatos a los pocos segundos de salir a superficie (Tarbuck, 2010).

El tercer factor que condiciona la viscosidad es el contenido de gases que presenta el magma. De forma contraria a lo que sucede con la sílice, los gases incrementan la fluidez del magma. Cabe resaltar que el componente gaseoso más importante que presenta el magma es el H₂O (Tarbuck, 2010) (para más detalles, ver Tabla 2.1.).

Conforme el magma de la parte superior de la chimenea es expulsado, disminuye la presión en la roca fundida que se halla debajo, por lo que realmente no se trataría de una, sino de varias erupciones volcánicas intercaladas entre eventos violentos y tranquilos; esto, teniendo en cuenta que, una vez finalizada la fase eruptiva, vuelve a iniciar la acumulación de gases (Tarbuck, 2010).

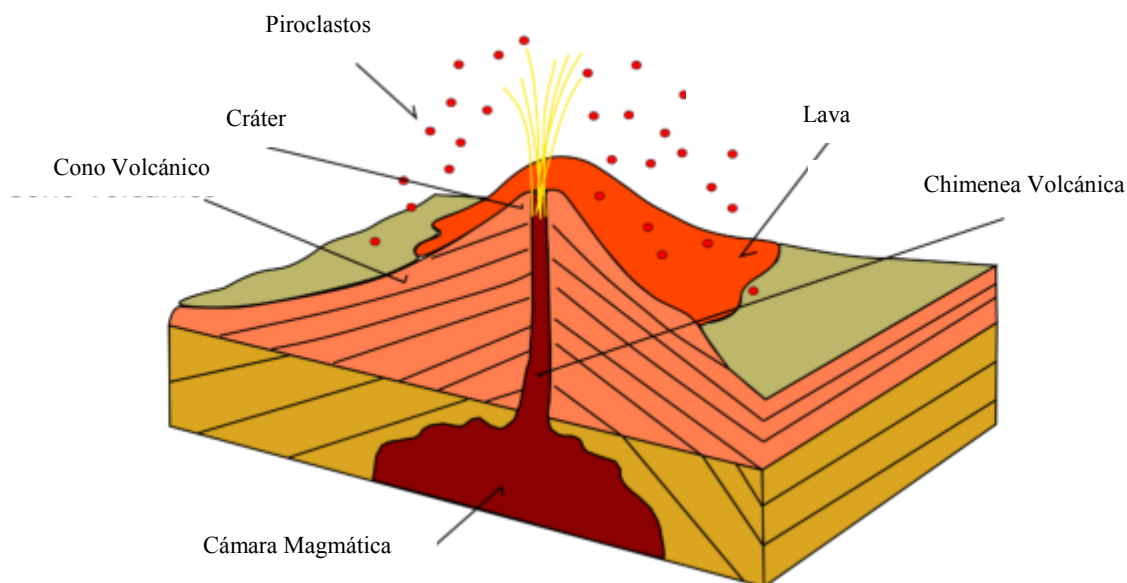


Figura 3.1. Estructura de un volcán. Modificado de The Field Description of the Igneus Rock (p.258) por Jerram, 2011, Wiley Blackwell.

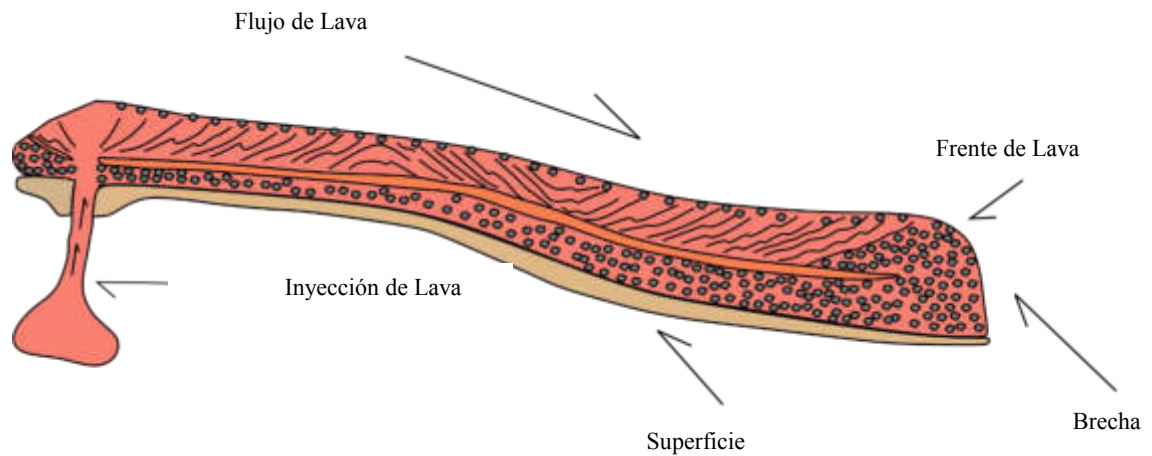


Figura 3.2. Esquema del flujo de lava félsica. Modificado de The Field Description of the Igneous Rock (p.258) por Jerram, 2011, Wiley Blackwell.

3.1.2. Conceptos teóricos de magmatismo

3.1.2.1. Rocas ígneas en relación a la tectónica

Las rocas ígneas son materiales que se solidificaron a partir de un fundido o un material parcialmente fundido conocido como magma; tales rocas pueden ser clasificadas como extrusivas, erupcionadas en la superficie de la tierra, e intrusivas, cristalizadas debajo de la superficie. Existen rocas ígneas de diferentes composiciones y relaciones de campo en regiones específicas, asociadas con la tectónica de placas en general (Jerram, 2011). La corteza de la tierra forma la parte superior de la litósfera, la que se divide en grandes placas que interactúan entre sí. Los bordes entre las placas son de cuatro tipos (Rivera, 2007).

a. Márgenes divergentes o constructivos: se lleva a cabo el mayor porcentaje del magmatismo de la Tierra. Algo característico de estos márgenes son las dorsales oceánicas, que originan el ascenso del magma debido a la fusión parcial (Rivera, 2007).

b. Márgenes convergentes o destructivos: son las zonas donde se destruye la litósfera. En dicho proceso, dos placas convergen de modo tal que una se hunde debajo de la otra y, finalmente, se reabsorbe en el manto (Jerram, 2011).

c. Magmatismo de borde de placa transformante: también conocido como bordes de placa conservadores, son aquellas donde dos de estas se deslizan una sobre la otra, para que la litósfera no se cree ni se destruya; además, la actividad ígnea es menor (Jerram, 2011).

d. Zonas de colisión: estas se refieren a donde dos arcos insulares y/o continentales colisionan para que la subducción del material oceánico cese. Tales áreas se caracterizan por presentar actividad ígnea extrusiva e intrusiva generalizada, la cual, comúnmente, continúa durante un tiempo considerable después de la colisión (Jerram, 2011).

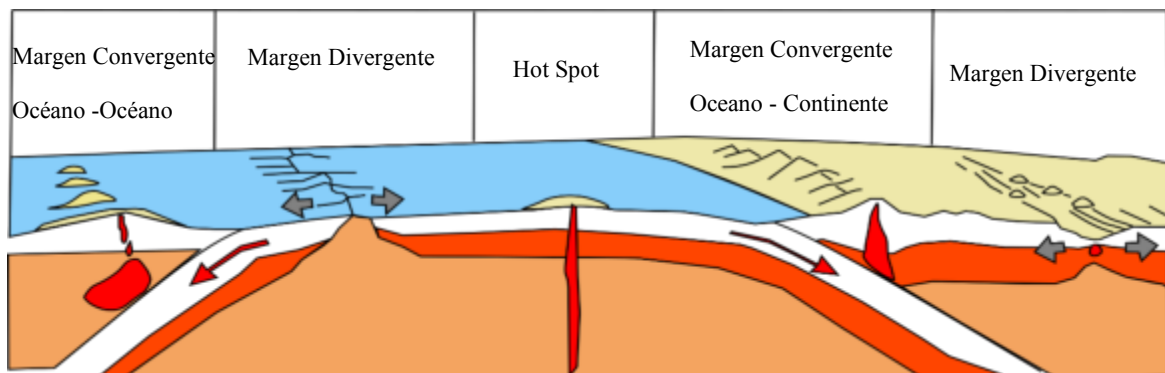


Figura 3.3. Los diferentes bordes de interacción de placas. Modificado de The Field Description of the Igneous Rock (p.258) por Jerram, 2011, Wiley Blackwell.

Más de 99% por volumen de actividad ígnea, se produce en los márgenes de las placas constructivas y destructivas o en las zonas de colisión. Algunos se producen en ubicaciones dentro de las placas, por ejemplo, volcanes como los de Hawaii y los asociados con el sistema de grietas del Este de África (Jerram, 2011).

La actividad en los márgenes de las placas constructivas, es responsable de la formación de la corteza oceánica. La composición y estructura de la corteza oceánica, es conocida por el estudio de las rocas dragadas desde el fondo del océano, de estudios sísmicos y de estudios de *onshore* de rocas más antiguas (Jerram, 2011).

3.1.2.2 Ocurrencia de los cuerpos ígneos

En general, se pueden establecer diferentes tipos de cuerpos ígneos en tres secciones principales relacionadas con sus posiciones relativas dentro de la tierra. Las rocas volcánicas, sobre la superficie; las intrusiones menores, que tienden a ocurrir en las zonas poco profundas; y las rocas plutónicas, que forman una intrusión más grande a una gran variedad de profundidades (Jerram, 2011).

A. Unidades de roca volcánica

Las rocas volcánicas son clasificadas como lavas y piroclastos (volcanoclásticas). *Lava* es el término para roca extrusiva fundida y su producto solidificado. Las rocas piroclásticas se componen de una mezcla de materiales (fragmentos de lava, piedra pómez y cristales) fragmentados por actividad volcánica explosiva (Jerram, 2011).

A menudo, las lavas y los piroclastos asociados con volcanes se concentran en los valles y depresiones alrededor del volcán. Los depósitos piroclásticos, que suelen ser más extensos, pueden formar unidades estratigráficas a gran escala que cubren la topografía y pueden formar características de meseta alrededor de los volcanes. Es también frecuente que los depósitos piroclásticos sean subestimados en cuanto al volumen; ello, debido a la gran proporción de material de ceniza fina que se puede transportar a grandes distancias del volcán en erupción (Jerram, 2011). Los volcanes que se encuentran en zonas de arco de isla, al hacer

erupción, expulsan lava casi en un 80 %, mientras que los márgenes continentales tienen menos del 10 % de lava y más del 90 % de rocas piroclásticas (Jerram, 2011).

a. Lavas

a.1. Mecanismos de emplazamiento de la lava

Los mayores flujos de lava son predominantemente de composición basáltica. Los flujos comienzan como finas láminas de lava que rápidamente forman una incipiente corteza. Un mayor desarrollo de dicha lava implica un aumento en el volumen del núcleo del flujo, el cual permanece fundido y prácticamente protegido por esta capa. Debido a este mecanismo, las lavas pueden viajar largas distancias desde la fuente sin sufrir un enfriamiento significativo (Jerram, 2011).

a.2. Composición del flujo de lava

Los tipos de flujo que se reconocen habitualmente en campo son los flujos máficos (basálticos) y los félsicos (silíceos); ello refleja la naturaleza del predominio de uno u otro, en un entorno volcánico particular. Las principales diferencias reposan en la viscosidad del máfico (que presenta baja viscosidad) hasta el félsico (con una viscosidad alta) (Jerram, 2011). En la mayoría de los casos, los flujos de lava entran en erupción y llevan cargas de cristales conocidos dentro del magma (Jerram, 2011) (para mayor detalle, ver Tabla 2.2.). Por ejemplo, el olivino es más común en el basalto y las lavas basálticas o andesíticas. El feldespató (plagioclasa), abundante con hornblenda, es típico de la andesita; mientras que el cuarzo y el feldespató potásico son diagnósticos de la riolita (Jerram, 2011).

Tabla 3 3 *Composición de fenocristales en las principales lavas.*

	Olivino basalto/picrita	Basalto	Andesita Basáltica	Andesita	Dacita	Riolita
Plagioclasa	**	**	***	***	***	**
Olivino	***	**	**	*	-	-
Piroxeno	*	**	**	**	*	-
Hornblenda	-	*	*	**	**	*
Biotita	-	-	-	*	**	**
Feldespato alcalino	-	-	-	*	**	***
Cuarzo	-	-	-	-	**	***
Fe – Ti oxide	*	*	*	*	-	-

Nota: Modificado de Tarbuck, (2005). Se asignan * para los cristales escasos, se asignó ** para cristales en presencia moderada y *** para cristales de presencia abundante. El – indica la ausencia de dichos cristales en la roca.

B. Unidades de roca intrusiva o plutónicas

B.1. Cuerpos globosos

Los cuerpos globulosos tienden a desarrollar formas toscamente equidimensionales; con una baja relación de superficie/volumen, lo que causa un enfriamiento lento. En este grupo, están los plutones, batolitos y stocks.

- *Plutones*. Pitcher (1993) agrupación de múltiples plutones que se desarrollan en zonas orogénicas.
- *Stocks*. Plutones cilíndricos, con superficies menores a 100 km² (Llambías, 2008).
- *Batolitos*. Plutones con superficies mayores a 100 km². Se pueden clasificar en orogénicos, posorogénicos y anorogénicos (Llambías, 2008).

3.1.3 Conceptos teóricos de geología estructural

3.1.3.1. Geología estructural

Es una especialidad de la geología que se encarga del estudio de las estructuras generadas como resultado de la deformación de una roca tras la aplicación de un determinado esfuerzo. Analiza la geometría, distribución y formación de las estructuras rocosas (Fossen, 2010).

Cabe resaltar que la geología estructural solo estudia a las estructuras resultantes durante la deformación de la roca, mas no de estructuras primarias formadas por procesos sedimentarios o magmáticos. Sin embargo, las estructuras de deformación se pueden formar a través de la modificación de estructuras primarias, como el plegamiento de estratos (Fossen, 2010).

A. Esfuerzo tectónico

Como su nombre indica, este es el resultado de la aplicación de fuerzas tectónicas como las que se originan cuando dos placas litosféricas colisionan (Niemeyer, 1999). La acción y reacción mutua a lo largo de una superficie constituye un esfuerzo (Billings, 1942).

Los estados de esfuerzo tratados se relacionan con factores naturales, como la densidad de la roca, los efectos térmicos y las propiedades físicas de esta. A gran escala (tectónica), el esfuerzo está relacionado con movimientos de placa; localmente, sin embargo, los esfuerzos tectónicos

pueden ser influenciados por el plegamiento de una capa o alguna falla, pero, regionalmente, los patrones tectónicos permanecen constantes. Con esto, se genera lo que se conoce como dominios estructurales (Fossen 2010).

Como se había mencionado, el esfuerzo se calcula en todas las actividades del mundo: en las minas, en trabajos de construcción, en túneles u operaciones de perforación, etc. Un compilado de todo ello se encuentra en el mapa de esfuerzos mundial, disponible en la World Wide Web (Fossen 2010).

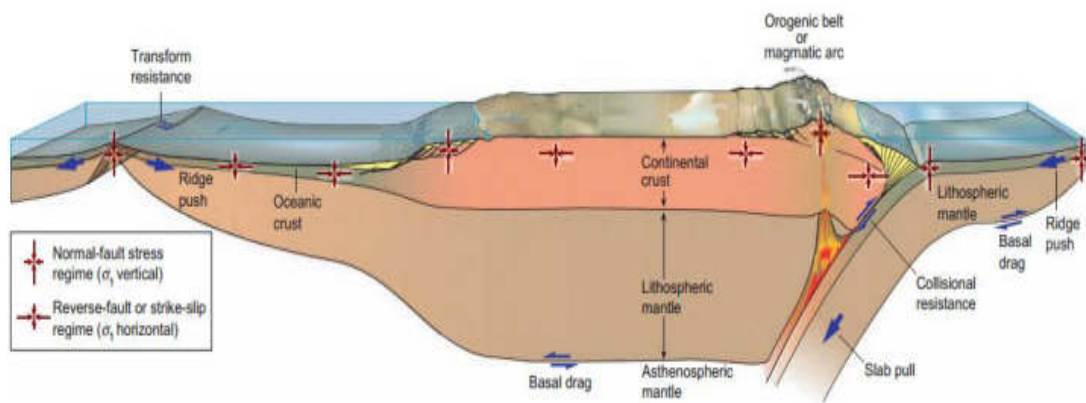


Figura 3.4. Relación entre el esfuerzo esperado en cada régimen tectónico. Tomado de Structural Geology (p.250) por Fossen, 2010, Cambridge University Press.

B. Fracturas

Las fracturas son superficies planas de partición de una roca sin desplazamiento (Saklani 2008). Existe una clasificación de fracturas según su modo de rotura, denominado modo fundamental, el cual consiste en los modos I, II y III. En el modo I, el desplazamiento de los bloques es normal al plano de fractura. En el modo II, el desplazamiento es paralelo al plano de fractura y normal al frente de propagación (Niemeyer, 1999). Por último, en el modo III, el desplazamiento de los bloques es paralelo tanto al plano de fractura como al frente de

propagación. Así, el modo I corresponde al esfuerzo tensional; y los modos II y III, al esfuerzo de cizallaje (Niemeyer, 1999).

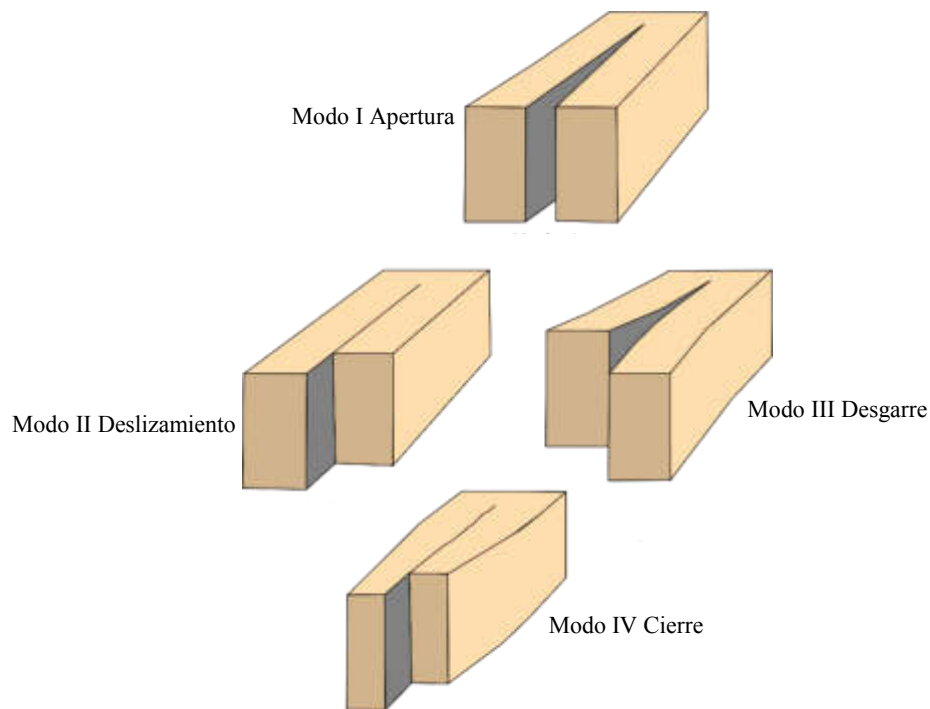


Figura 3.5. Clasificación de fracturas de acuerdo al modo fundamental o a su modo de apertura. Modificado de Structural Geology (p.250) por Fossen, 2010, Cambridge University Press.

- **Crecimiento y morfología de las fracturas**

Las fracturas por cizalla no pueden propagarse en su propio plano; en su lugar, se genera una fractura modo I, que se puede formar al borde del plano. Las grietas de modo II se forman a lo largo del plano, de modo que estas crecen y dan lugar a fracturas más pequeñas, pero similares, alrededor de la fractura de cizallamiento principal (Fossen, 2010).

Dichas fracturas suelen propagarse y crecer radialmente a partir de un punto o núcleo; igualmente, la tasa de propagación aumenta y la superficie se vuelve más áspera, lo que hace que el esfuerzo forme una bifurcación en la punta. Además, se originan planos estrechos, ligeramente oblicuos, que forman estructuras plumosas, las cuales reflejan la dirección de propagación del esfuerzo a través del eje (Fossen, 2010).

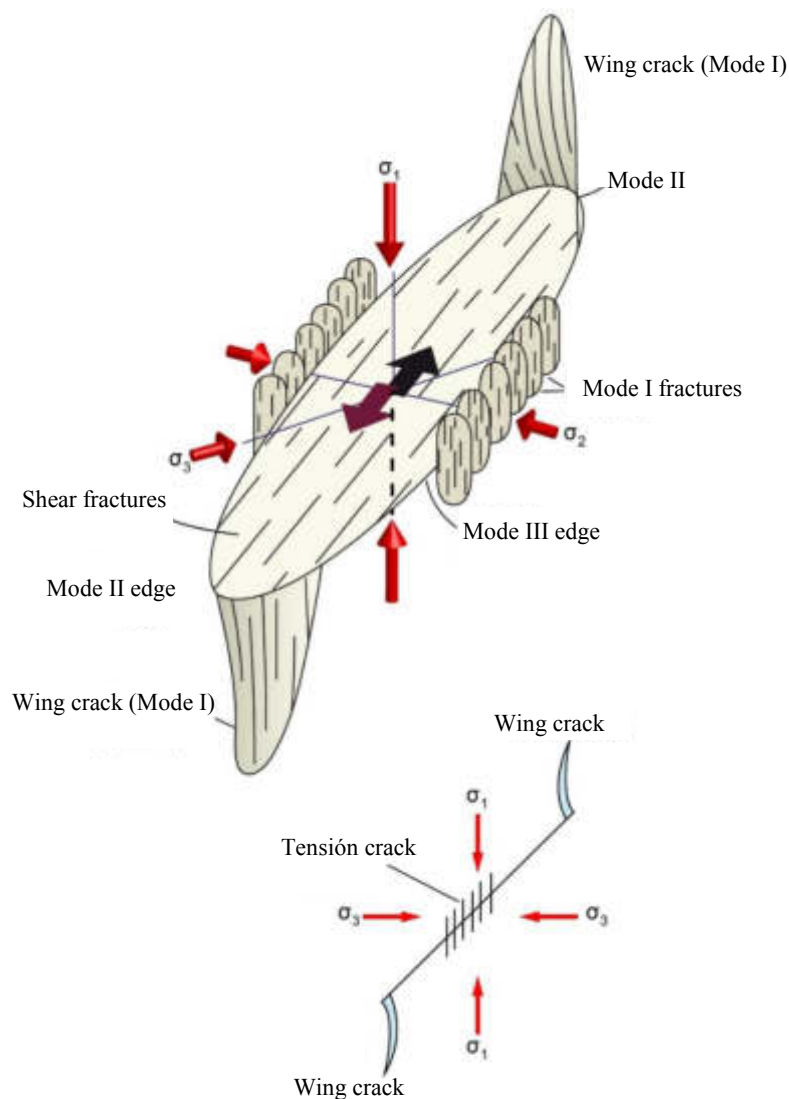


Figura 3.6. Crecimiento de Fracturas basada en Scholtz. Modificado de Structural Geology (p.250) por Fossen, 2010, Cambridge University Press.

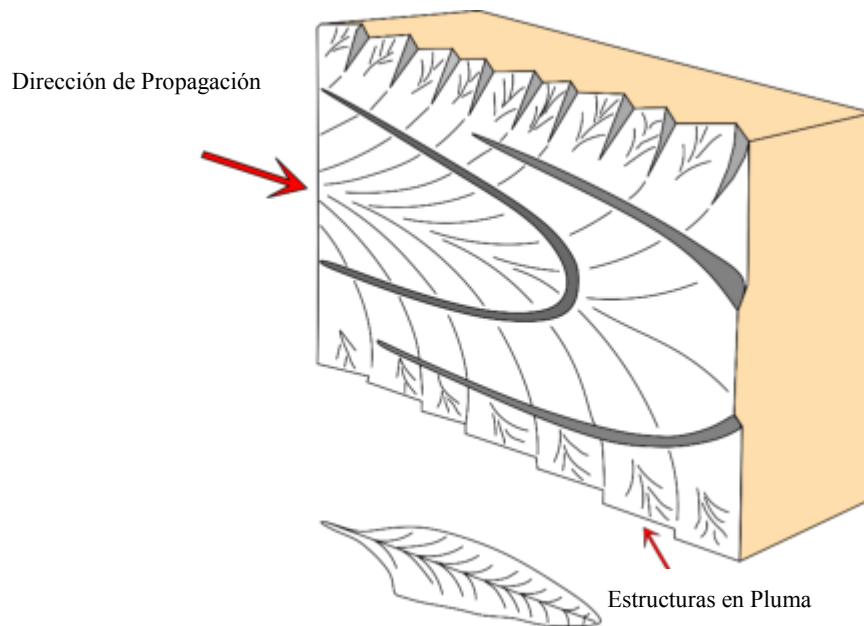


Figura 3.7. Estructura en pluma. Modificado de Structural Geology (p.250) por Fossen, 2010, Cambridge University Press.

C. Fallas (*faults*)

- **Terminología de fallas**

El término falla se puede definir como cualquier superficie o zona estrecha con visible cizallamiento por desplazamiento a lo largo de la zona (Fossen, 2010). Una falla es una fractura plana, a lo largo de la cual se produce un desplazamiento en una dirección y que, por lo general, es paralela al plano, como resultado de la aplicación de un esfuerzo (Niemeyer, 1999).

En ese sentido, se habla de falla cuando los dos compartimentos separados por la fractura se desplazan uno con respecto a otro (Mattaue, 1976). Las fallas son rupturas a lo largo de las cuales las paredes opuestas se mueven una en relación con la otra. La

característica esencial es el movimiento diferencial paralelo a la superficie de la fractura (Billings, 1954).

- **Geometría de las fallas**

Al considerar un bloque diagrama teórico de una falla que afecta a capas horizontales, se distinguen:

AB: Desplazamiento de Rumbo

BE: Desplazamiento de Buzamiento.

AE: Desplazamiento Neto.

BC: Rechazo Horizontal.

CE: Salto de Falla.

c: *pitch*.

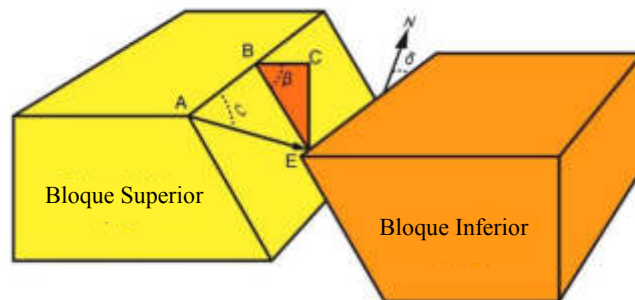


Figura 3.8. Ilustración esquemática de las partes de una falla. Modificado de Geología Estructural, (p.560), por Billings, 1974, Editorial Universitaria de Buenos Aires.

- **Clasificación de fallas**

- **Clasificación de fallas (Anderson, 1951)**

- ✓ *Falla Normal.* Es aquella en la que el bloque techo baja con respecto al bloque piso, o este último sube con respecto al primero.
- ✓ *Falla Inversa.* Es aquella en la que el bloque piso asciende con respecto al bloque techo, o este último desciende con respecto al primero.

- ✓ *Falla de Rumbo*. Es aquella en la que el plano es vertical o subvertical, y en la que uno de los bloques se ha desplazado con respecto a otro y con respecto a la horizontal.

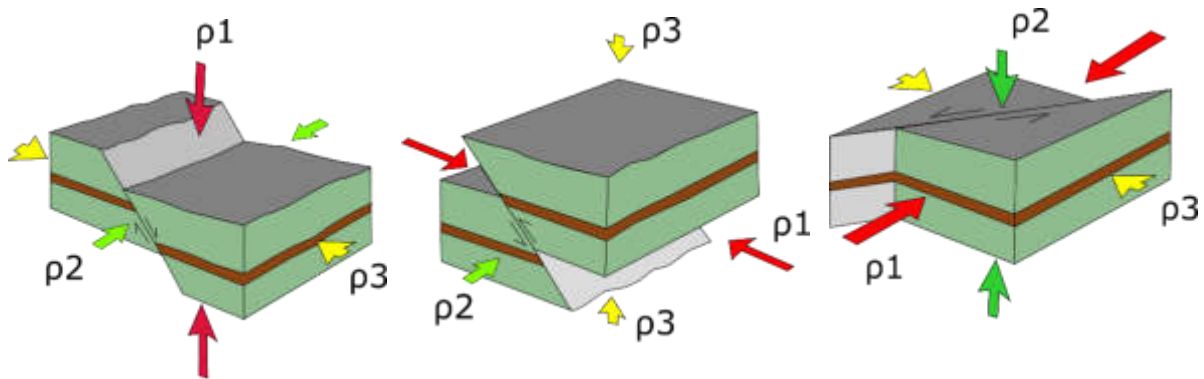


Figura 3.9. Ilustración de clasificación de fallas. Modificado de Structural Geology (p.250) por Fossen, 2010, Cambridge University Press.

➤ Clasificación geométrica de las fallas según el diseño

Las fallas tienden a ser zonas complejas de deformación, las cuales consisten en múltiples superficies de deslizamiento y fracturas secundarias (Fossen, 2010). El término *zona de falla* tradicionalmente significa una serie de fallas subparalelas o superficies de deslizamiento, una suficientemente cerca de otra (Fossen, 2010).

Dos fallas normales separadas, que se inclinan una hacia otra, crean un bloque derrumbado llamado *graben*; y aquellas fallas normales que se alejan crean un bloque hacia arriba llamado *horst*. En un área de falla, las mayores son llamadas *maestras* y se asocian a un grupo de fallas menores, las cuales pueden ser *sintéticas* o *antitéticas*. Estas últimas poseen un buzamiento contrario al de las llamadas fallas maestras o principales, mientras que las *sintéticas* tienen un buzamiento que suele coincidir con el de la principal (Fossen, 2010).

Los términos sintético y antitético solo tienen sentido cuando fallas de menor escala se relacionan de forma específica con fallas principales o de escala regional (Fossen, 2010).

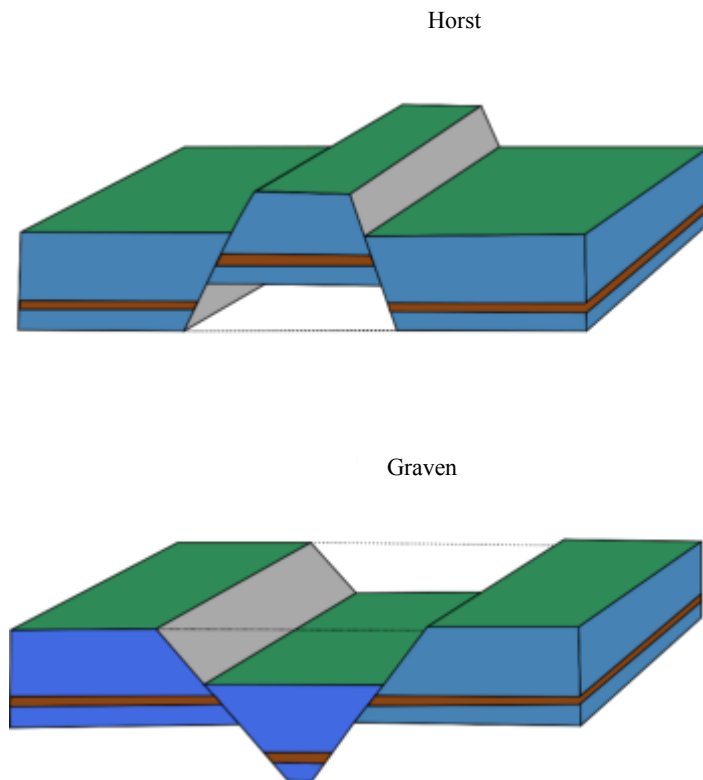


Figura 3.10. Ilustración de Graben y Horst. Modificado de Structural Geology (p.250) por Fossen, 2010, Cambridge University Press.

➤ Indicadores cinemáticos en fallas.

La deducción del sentido del movimiento en superficies con fallas ha sido un interrogante frecuente en la geología estructural por varios años, particularmente en áreas que se encuentran fuertemente deformadas. Como se ha visto, ya existe una relación muy fuerte entre el esfuerzo y el tipo de falla que se genera (Doblas, 1998).

El vector de desplazamiento puede ser encontrado en la superficie de falla al analizar ciertas estructuras que se encuentran sobre dicho plano. Una clasificación de dichas estructuras es citada por Doblas (1998), que se basa en 61 criterios, subdivididos en 11

clases; esto, teniendo en cuenta el patrón geométrico y morfológico. Además, esta clasificación menciona el grado de confianza del indicador cinemático, al denominarlo como “bueno” (good), “justo” (moderate) o “pobre” (poor); asimismo, considera la escala del indicador.

Por su parte, Doblas (1998) consideró un indicador como “bueno”, si este se cita en la literatura y es verificado por él en el campo. Igualmente, un indicador es “justo” cuando no ha sido verificado en el campo durante el curso de la investigación, pero sí ha sido citado en la literatura. Finalmente, un indicador se puede clasificar como “pobre” si no ha sido citado en alguna publicación o en la literatura (Doblas, 1998).

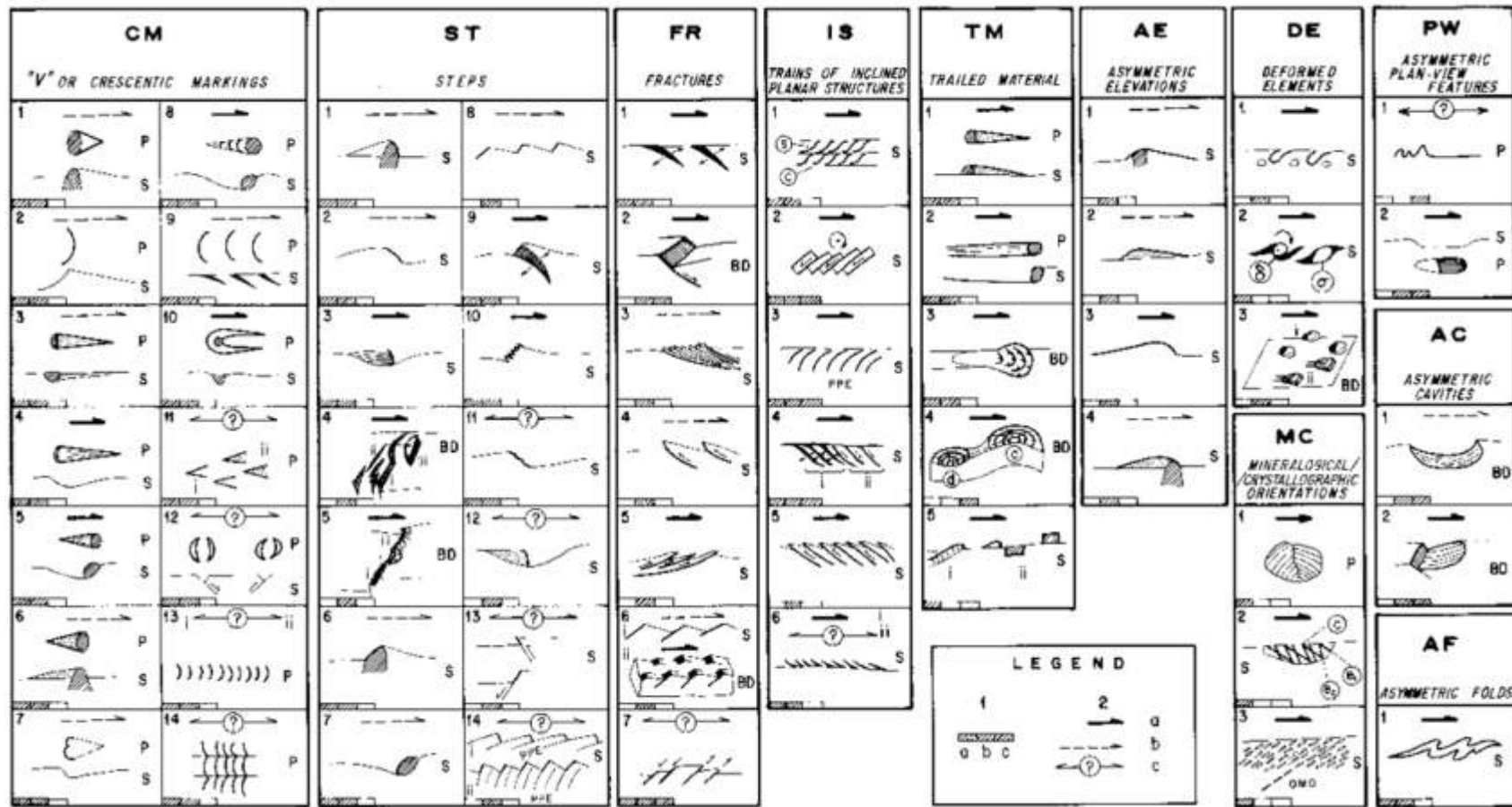


Figura 3.11. Clasificación de indicadores cinemáticos. Tomada de Doblas, 1998. Leyenda: escala 1 D de ocurrencia de los indicadores (a D microscópico; b D decenas de milímetros; c D métrica); 2 D tres tipos diferentes de flechas (apuntando en la dirección del movimiento del bloque faltante) indicar el grado de confianza en cada uno de los indicadores cinemáticos (a D bueno; b D regular; c D malo); Diagrama de bloques BD D; OMO D orientación mineralógica oblicua; EPI D elemento plano anterior; Plano P D; Sección S D.

D. Lineamientos

Un lineamiento es una línea interpretada o dibujada en relación con formas de terreno lineales o semilineales (Tiren, 2010). El primero en describir la relación entre densidad de fractura, fallas y vetas mineralizadas con las características topográficas fue el trabajo de Hopkins (1941); asimismo, otras publicaciones sobre lineamientos indican que las fracturas controlan la erosión de la roca (Daubree, 1979). Existe también una relación entre las características geomorfológicas y el patrón de fractura en la roca (Kjerulf, 1880).

En 1903, Hobbs describió los lineamientos como líneas significativas en la faz de la tierra. O’Leary y Friedman, en 1978, comentaron que la clasificación de los lineamientos se basa en el tamaño o la longitud de las características lineales. Así, la veracidad de una interpretación de lineamientos siempre debe verificarse con la disminución de la subjetividad (Wise, 1982).

Un lineamiento estructural constituye un rasgo físico o gráfico identificable en la superficie del terreno, de forma rectilínea o suavemente curvilínea (O’Leary et al., 1976), que puede ser simple o compuesto en función de la expresión de su complejidad en el terreno. Por lo tanto, este constituye “discontinuidades estructurales naturales” de la superficie del terreno y, por lo general, refleja fenómenos estructurales del subsuelo (Ohara, 1996; Flores, 1997).

3.1.4 Equipos móviles como brújula electrónica

Las salidas de campo son una parte esencial para la enseñanza de geología en las instituciones superiores, como lo describió Whitmeyer (2009). La metodología clásica de campo indica qué instrumentos se deben utilizar para realizar el trabajo; sin embargo, un creciente número de instituciones de educación superior está convencido de que los usos de tecnologías móviles son fundamentales para preparar a los estudiantes (Whitmeyer 2009).

Los teléfonos inteligentes están equipados con numerosos sensores que permiten la recopilación de datos de orientación para estructuras geológicas a un ritmo y una magnitud mucho mayores que las brújulas convencionales (Allmendinger 2017). Estos sensores permiten medir acertadamente la orientación del plano; para ello, se debe conocer la orientación del dispositivo en relación con el norte (Pollard, 2005). Estas aplicaciones se ejecutan en dispositivos como iPhones y iPads, los cuales están equipados con sensores que incluyen magnetómetros, giroscopios y acelerómetros (Barthold, 2011). Para los dispositivos móviles, de la misma forma que una brújula convencional, la orientación de una estructura plana, como un estrato, se mide al tomar el rumbo y el buzamiento (Twiss, 1992).



Figura 3.12. Esquema que muestra la toma de datos con un dispositivo móvil. Tomado de Reid, R (10 de julio de 2016) ¿Ha llegado finalmente el mapeo digital? <http://www.orefind.com/blog/>.

Los afloramientos también son una importante fuente de información, desde la cual se puede derivar una gran variedad de datos geológicos (Cawood et al., 2017). Captar la mayor cantidad de datos en un tiempo limitado es todo un reto para el geólogo de campo, sobre todo si lo que se desea es construir un modelo geológico en 3D. Las reconstrucciones 3D necesitan una gran gama de estudios que van desde la sedimentología, la estratigrafía (Hodgetts et al., 2004; Enge et al., 2010; Fabuel-Perez et al., 2010; Eide and Howell, 2014; Rarity et al., 2014; Rittersbacher et al., 2014) y el modelo de yacimientos (Enge et al., 2007; Rotevatn et al., 2009; Buckley et al., 2010), hasta la geología estructural (Pringle et al., 2006; Buckley et al., 2008; Jones et al., 2009). Aunque la adquisición de este tipo de datos espaciales 3D requiere una costosa instrumentación y un conocimiento significativo del procesamiento de datos, la validez de estos modelos para la predicción de los afloramientos y del subsuelo ha sido abordada por varios trabajos (Jones, 2004; Gillespie, 2011; Gold, 2012).

Sin embargo, frente a las ya mencionadas ventajas, existen ciertos aspectos que se consideran desventajas con respecto al uso de una brújula convencional. La principal duda que presenta el uso de estos equipos se basa en la precisión y la calidad de los datos obtenidos. El equipo celular requiere tener un giroscopio, que se debe actualizar a intervalos regulares y, además, se debe calibrar con una brújula tradicional, recomendablemente, para disminuir el grado de error (Cawood, 2017).

Cuando se use un teléfono inteligente como herramienta de campo, se debe tener un cuidado especial; es decir, más allá del que se tiene con una brújula convencional (Allmendinger, 2017). Las mediciones de las brújulas electrónicas tienen una precisión de hasta 5°, por lo que la calidad de sus datos es “muy buena” (Valley, 2015), dado que muestran mayor índice de confianza en dispositivos Apple que en dispositivos Android. (Cawood et al.,

2017). Igualmente, es necesario alejar fundas magnéticas, cierres e imanes que puedan estropear la lectura del teléfono; además, se deben eliminar accesorios del geólogo que podrían pasar desapercibidos, como relojes, lapiceros, lentes, tabletas, computadoras y navajas (Allmendinger, 2017).

Asimismo, se deben realizar calibraciones periódicas en un solo afloramiento, o cuando la lectura parezca no tener sentido (Allmendinger, 2017). El grado de error en la toma de datos está en el orden de 2° para el buzamiento (Blankenbach, 2011); sin embargo, en comparación con la aplicación, un error de hasta 5° sería tolerable (Hama et al., 2014). Por otro lado, la dirección de buzamiento tiene una historia diferente, pues los valores varían considerablemente entre 10° y 15° con respecto a la orientación tomada con brújula tradicional (Cawood, 2017) (para mayor detalle, ver Tabla 2.3.).

Existen cuatro recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de comparar la precisión del dato tomado por una brújula convencional y un dispositivo móvil:

- Ambas medidas pueden ser inciertas; además, las superficies reales en campo tienen irregularidades inherentes y naturales, por lo que hay que realizar múltiples mediciones (Allmendinger 2017).
- Se debe comparar la diferencia angular entre los polos de los planos y no la diferencia en el rumbo de los planos o el buzamiento de estos (Allmendinger 2017).
- Los usuarios deben monitorear el dispositivo cada cierto tiempo, hacer mediciones transitorias y prestar especial atención a la proximidad de los objetos metálicos externos. Quizá ese monitoreo pueda realizarse con alguna otra aplicación dentro de la Play Store o la App Store (Allmendinger 2017).

Comparar las mediciones, no solo con la brújula tradicional, sino con los datos obtenidos de un LIDAR¹³ (Allmendinger, 2017).

3.1.5 La teoría de los diedros rectos

Las fallas constituyen un elemento fundamental en cualquier tipo de análisis tectónico; el amplio rango de escalas en el que aparecen hace que su estudio pueda abordarse desde distintos enfoques (López, 2016). Uno de los métodos que ha tenido una mayor aceptación es el de los diedros rectos, quizá debido a que constituye una forma muy visual de representar los distintos tipos de esfuerzo (Angelier, 1977). La razón por la que este se utiliza radica en la necesidad de contar con un procedimiento gráfico simple que permita visualizar rápidamente la orientación aproximada de los ejes de esfuerzos, capaces de explicar el conjunto de fallas (Casas et. al., 1990) (ver Figura 2.13.).

El método de los diedros rectos se fundamenta en el concepto de plano nodal y de mecanismo focal; es una de las técnicas gráficas más utilizadas. Este fue concebido por Pegoraro (1972), y difundido y aplicado mediante ordenador por Angelier (1977); se trata de un método geométrico basado en limitar las zonas del espacio compatibles en compresión y extensión para cada falla.

Por otro lado, es posible determinar un campo de esfuerzos o fases tectónicas mediante diferentes métodos aplicados al procesamiento de planos de fallas estriados, que han actuado en la parte más superficial de la corteza y que están genéticamente relacionados con las estructuras presentes; así, contribuyen a la caracterización cinemática de fallas (Hancock, 1985, en Cortés y Casas, 1996).

¹³ Es una tecnología similar a RADAR que se puede utilizar para crear modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución con una precisión vertical de hasta 10 cm.

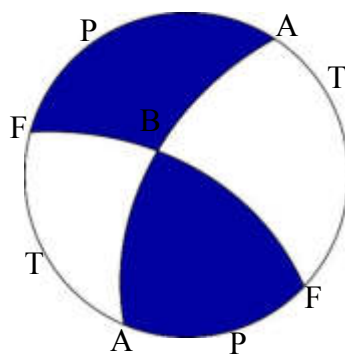


Figura 3.13. Ilustración de los diedros.

Tabla 3 4 Comparación de ventajas y desventajas entre Brújulas Manuales y Brújulas Electrónicas.

Se considera el valor negativo para las desventajas y positivo para las ventajas. La escala va de puntaje va de 1 siendo para calificación “Muy Baja” y 5 para calificación “Muy alta”.

<i>Dispositivo empleado para la toma</i>	<i>Rapidez en la toma del dato</i>	<i>Presición en la toma del dato</i>	<i>Rapidez en el procesamiento de la data en gabinete.</i>	<i>Experiencia requerida por el usuario.</i>	<i>Necesidad de calibración.</i>	<i>Susceptibilidad a daño frente a caídas y factores atmosféricos.</i>	<i>Capacidad de reemplazar otros equipos.</i>	<i>Precio del equipo.</i>	<i>Dificultad en operar el equipo.</i>	<i>Cantidad de datos a recolectar en una jornada diaria.</i>	<i>Puntaje final alcanzado.</i>
Brújula manual	+2	+5	+2	-4	-2	-1	+1	-4	-3	+3	-1
Brújula Electrónica	+5	+3	+4	-3	-3	-4	+3	-4	-1	+5	+5

3.1.6 La regla de la mano derecha

En geología estructural, la orientación de las estructuras es extremadamente importante; la regla de la mano derecha es una técnica muy conocida y utilizada en la mencionada rama. Esta técnica consiste en que el pulgar de la mano derecha debe coincidir con el rumbo del plano, mientras que los dedos restantes deben indicar la dirección de buzamiento¹⁴. Asimismo, es importante que el buzamiento se tome en la dirección del ángulo de máxima inclinación; las rocas grandes en el campo pueden aparecer como afloramiento, pero sus buzamientos no tienen un sentido más allá de la simple práctica o enseñanza¹⁵.

Método de uso

Como primer paso tenemos que:

1. Colocar la palma de la mano derecha sobre el plano o la superficie que se desea analizar.
2. Girar la mano derecha, de forma que los dedos apunten hacia la dirección de buzamiento.
3. Extender el pulgar en el mismo plano, de manera que la dirección a la que apunte el pulgar sea la dirección del azimut.

¹⁴ (<https://sanuja.com/blog/right-hand-rule-in-geology>)

¹⁵ (<https://sanuja.com/blog/right-hand-rule-in-geology>)



Figura 3.14. Ilustración del método de la mano derecha.

3.1.7 La tectónica y su relación a los flúidos mineralizantes

Lo primero es la autogeneración de permeabilidad estructural en diferentes regímenes de estrés por la migración de fluidos; su importancia en el ascenso de grandes volúmenes de flujo se basa en la necesidad de formar depósitos minerales (Sibson, 1996). Asimismo, la permeabilidad estructural también puede jugar un papel importante en la migración de hidrocarburos (Du Rouchet, 1981); y las fallas interconectadas con el esfuerzo extensional y las vetas-fallas puramente extensionales derivan en la formación de “mallas” que pueden preceder al desarrollo de desperfectos importantes (Sibson, 1996). Cuando a una roca sometida a esfuerzos tectónicos se le adiciona un fluido, el círculo se desplaza hacia la izquierda y se intersecta con la envolvente de falla, lo que ocasiona una fractura (Skarmeta, 2020) (para mayor detalle, ver Figura 2.15.).

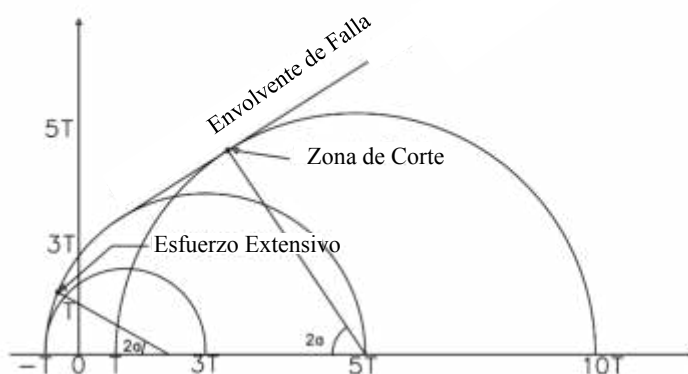


Figura 3.15. Envolvente de Falla. Modificado de Sibson (1996).

3.1.8 Conceptos de Geoquímica

3.1.8.1 Calculos normativos

La idea de calcular una “norma” o composición mineralógica virtual a partir del análisis químico fue introducida por la norma CIPW. Esta es una paragénesis mineral ideal que se presume como la cristalización de un magma anhidro. (Rivera, 2007).

3.1.8.2 Norma cipw

En 1903, se propuso un método para clasificar las rocas, este es, la norma CIPW, la cual fue sugerida por Kelsey (1965) y Cox et al. (1979). Esta se detalla en el **Anexo D**.

3.1.8.3 Diagrama TAS

El diagrama TAS [álcalis totales - sílice total] (Le Bas et al., 1986) es uno de los gráficos más utilizados para clasificar rocas ígneas, como lo muestran los trabajos publicados por la dra. Mamani, el M. Sc. Hugo Rivera, la M. Sc. Diana Pajuelo, entre otros autores.

3.1.8.4 Diagrama Harcker

Estos diagramas suelen ser gráficos de doble entrada en los cuales se representan los óxidos versus el SiO₂ (Harker, 1909).

El *software* libre está relacionado a la libertad, no al precio (Stallman, 2004); el error más común de concepción sobre este proviene de la ambigüedad del vocablo sajón *free*, que significa “libre”, pero también “gratis”, por lo que se da una confusión con la expresión *free software* (González, 2004). Hace ya tiempo que este dejó de ser algo marginal para convertirse en una realidad muy habitual para muchos usuarios (González Barahona, 2011).

3.1.8.5 Diagrama de Tierras Raras (REE)

Las REE son elementos que no forman parte de la fórmula de los minerales que los contienen, debido a que son considerados extraños por su concentración menor al 0,1 %. Estos elementos son: Rb, Ba, Pb, Sr, La-Lu, Th, U, Y, Zr, Hf, Ta, Cu, Co, Ni, Sc, V y Cr; aunque también se analizan las REE: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu.

En el diagrama de REE normalizadas, se da una regulación según diversos autores, conocido como Oddo - Harkins¹⁶ (Rivera, 2007). Para el análisis, se utilizó el diagrama de tipo Spider, a fin de regular las condritas, según lo que indicó Nakamura (1974).

3.1.8.6 Diagrama de Cocientes para Elementos Traza en las rocas volcánicas e intrusivas.

Estos gráficos se llevaron a cabo al tomar los valores de los elementos de REE. El diagrama Ce/Y versus SiO₂ (Mantle, 2008) que sirve, para conocer la profundidad aproximada de los magmas.

¹⁶ elementos como el carbono, de número atómico par, son más abundantes que los de número atómico impar

3.1.9 Conceptos de software libre

3.1.9.1 Definición de software

Este es un programa cuyos usuarios gozan de todas las libertades; en ese sentido, la redistribución de copias debería ser libre, con o sin modificaciones. Además, se pueden utilizar de manera privada, ya sea en el trabajo o durante el tiempo libre (Stallman, 2004).

3.1.9.2 Historia

Cuando nació el *software*, en las décadas de 1950 y 1960, los programas no eran algo que se comercializara por separado; en cambio, se compraba el ordenador y, con él, se tenía acceso al catálogo de programas del fabricante (González Barahona, 2011). Con el tiempo, las empresas tomaron conciencia de su importancia: primero fue IBM, en 1965, quien se negó a brindar el código fuente de su Software. (Viñas, 2003).

Como reacción a esta situación, en la década de 1980, varios grupos comenzaron a proponer los pilares del *software* libre, en especial, Richard Stallman. Este había sido programador en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), y sentó los puntos más resaltantes del *software* libre. En 1990, Linux se estableció como una opción viable en el mercado de sistemas operativos, sobre todo en servidores (González Barahona, 2011). Hoy, esta herramienta es una opción a considerar, puesto que no solo se valora por su costo, sino por las ventajas a mediano y largo plazo que puede ofrecer (González Barahona, 2011).

Hoy, el software libre, es una opción a considerar; ya que, no solo se valora por su coste, sino también, por las ventajas a mediano y largo plazo que puede ofrecer (González Barahona, 2011).

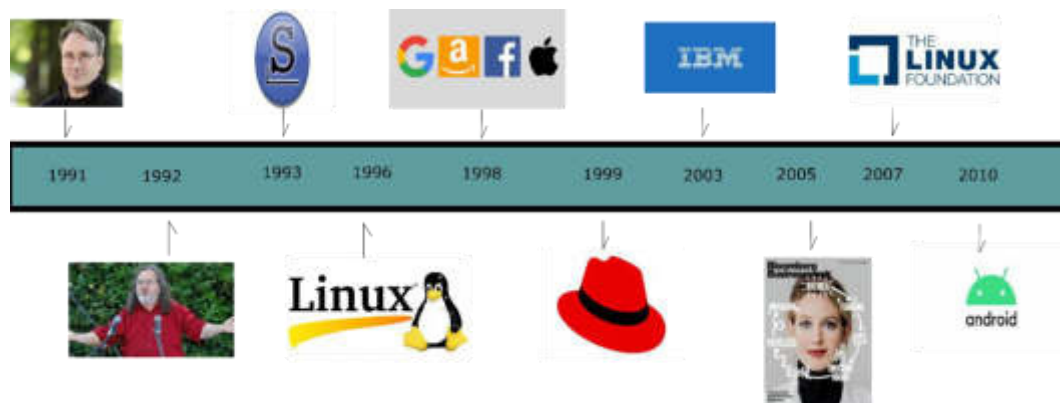


Figura 3.16. Infografía de la evolución histórica de GNU y LINUX. Tomado de 20 años de Linux, por The Linux Foundation, 2011, Woratek (www.woratek.com/2011/04/09/20-anos-de-linux-infografia/).

3.1.9.3 El software libre y el open source

En 1998, se empezó a utilizar el término *software open source*. El término *open source* se asoció rápidamente a algo distinto, a diversos criterios y filosofías (Stallman, 2004). El navegador Firefox, o el entorno ofimático Libre Office/Open Office, son, por ejemplo, programas libres y populares que funcionan en muchos entornos de escritorio. En el caso de los móviles, se sabe que Android está compuesto en gran medida por un *software* libre (González Barahona, 2011); la definición de este estipula los criterios por cumplir para que un programa sea considerado libre (Stallman, 2018).

“El *software* de código abierto, fue llamado de muchas formas: un movimiento, una moda, un virus, conspiración comunista, incluso el corazón y alma de la internet. Pero un punto es pasado por alto, el *software* de código abierto, también es un vehículo altamente efectivo, para la transferencia de riqueza del mundo industrializado a los países en desarrollo” (Leonard, 2011).

La línea que separa el *software* libre del *software open source* se basa en el hecho de tener la libertad de usar, ver, copiar, redistribuir y modificar una pieza de este, independientemente del precio (Rajani, 2003). Un programa es libre solo si se otorgan a los usuarios todas las libertades de manera adecuada; de lo contrario, no es libre (Stallman, 2018). *Software* libre no significa que no es comercial, pues un programa libre debe estar disponible para el uso y la programación (Stallman, 2018).

3.1.9.4 Formas de distribución de software

En la actualidad, existen diversas distribuciones para todo tipo de dispositivos, modificando el código y adaptándolo a tus necesidades (Viñas, 2003) (para mayor detalle, ver Tabla 2.8.).

3.1.9.5 El software libre en la universidad

Siempre contribuye al saber humano, al contrario del propietario. Por ese motivo, las universidades deberían fomentar el primero, a fin de aportar a la ciencia, deben animar a científicos y catedráticos universitarios, a publicar sus propios programas (Stallman, 2018).

Desde el punto de vista de los países en desarrollo, se sostiene que, aunque la libertad es de suma importancia en más de una forma, el aspecto del precio también es primordial. En países nórdicos, así como en muchos otros países europeos, la educación es considerada un hecho fundamental de la vida, y es gratuita tanto en términos de precio como de libertad (Rajani, 2003).

No todas las universidades tienen políticas financieras: Univates, en Brasil, y el Indian Institute of Information Technology, en Hyderabad, tienen el hábito de realizar publicaciones

de *software* con GPL¹⁷. Se plantea entonces el siguiente interrogante: ¿Debe la universidad contribuir al desarrollo del saber humano?, ¿o debe sólo preocuparse por la rentabilidad? (Stallman, 2018).

Las licencias de *software* libre pueden dividirse en dos:

- ✓ Licencias permisivas: no imponen condiciones especiales en la segunda redistribución; solo se especifica que la herramienta en cuestión se puede redistribuir o modificar sin imponer condiciones especiales, es decir, con o sin modificaciones. Las licencias BSD, MIT o Apache son de este tipo (González Barahona, 2011).
- ✓ Licencias *copyleft* o robustas: son las que imponen condiciones en caso de que se quiera redistribuir el programa, lo que fuerza a que se sigan cumpliendo las condiciones de la licencia, después de la primera redistribución. Las licencias GPL y LGPL son de este tipo (González Barahona, 2011).

3.1.10 Software Qgis

3.1.10.1 Presentación del Qgis

En los últimos años, el *software* libre Qgis se ha desarrollado sorprendentemente y se ha consolidado como una herramienta valiosa y una alternativa a los paquetes de SIG (Sistema de Información Geográfica) convencionales, como ArcGis. Es necesario indicar que esta tesis fue desarrollada con el *software* Qgis versión 3.4; asimismo, el autor de la tesis es usuario del programa desde el año 2015, desde cuando se capacita de forma activa en diversos cursos. Además, este ha desarrollado publicaciones y trabajos para el sector privado, y ha hecho uso de dicho programa en diversas ocasiones. Todo ello permite evidenciar la

¹⁷ La Licencia Pública General Affero (GPL) de GNU contiene una cláusula adicional que permite a los usuarios interactuar con el programa licenciado a través de una red para recibir el código fuente de ese programa.

experiencia para este capítulo, el cual ha tomado como base otros artículos publicados con anterioridad, tal es el caso de los artículos de Boxer (2019) y Alberti (2019). Igualmente, cabe resaltar que este capítulo no busca ser un manual para usuarios, sino mostrar, a través de ejemplos, el potencial que tiene Qgis y las herramientas más usadas para la geología.

3.1.10.2 Qgis para escritorio

En este, se pueden crear *plugins* para determinadas necesidades. Ya para el 2020, se ha implementado uno que permite visualizar los fondos de pozo y desarrollar un análisis geoquímico en roca, así como la data estructural; sin embargo, aún no se agrega uno para trabajar datos geofísicos en su totalidad. Otros objetivos, como el análisis hidrológico y ambiental, tienen muy bien desarrollados los *plugins*. Qgis presenta una interfaz amigable, similar a los demás SIG, pero en idioma español (se puede escoger el idioma al momento de instalar el programa).

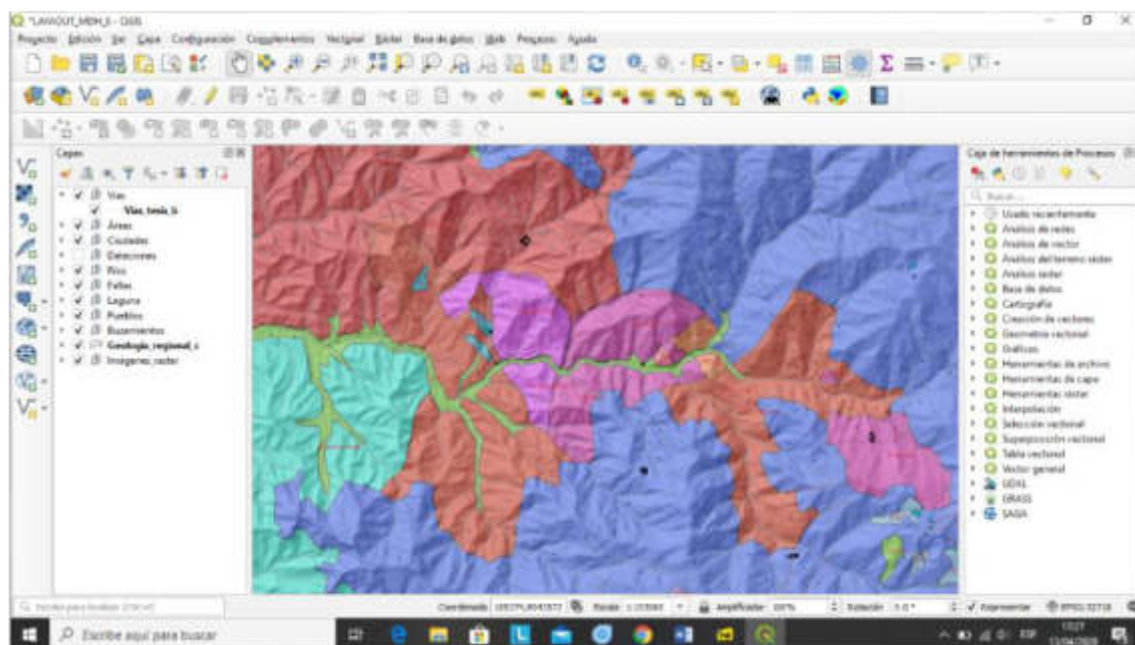


Figura 3.17 Interfaz mostrando el Mapa Geológico Regional, que fue elaborado utilizando Qgis.

Cabe resaltar que prácticamente el 80 % de las herramientas que tienen los SIG comerciales se pueden encontrar en Qgis; además, el 90 % de los procesos que se pueden realizar en SIG, más conocidos como ArcGis, se pueden realizar en este mismo.

3.1.10.3 Plugins más utilizados en Qgis para Geología.

Un complemento o *plugin* es un subprograma que se acopla o adapta a otros, con lo que mejora su funcionabilidad, contribuye al desarrollo de nuevas características y facilita la labor del usuario (www.cursosgis.com). Existen alrededor de 200 *plugins* (Boxer, 2019) que fueron creados con una finalidad específica por los usuarios de las distintas universidades y foros donde se comparten los avances. Estos son algunos de los *plugins* estándar que se recomiendan (Boxer, 2019).

Tabla 3. 5. Lista top de los principales proyectos Open Source.

<i>Ranking</i>	<i>Proyecto</i>	<i>Calificación</i>	<i>Categoría</i>	<i>Empresas Relacionadas</i>	<i>Puntuación en Google</i>	<i>Trabajos Publicados</i>	<i>Puntuación en Github</i>
1	Linux	100	IT Operations	Red Hat, Ubuntu	100	100	100
2	Git	31.1	DevOps	GitHub, GitLab	5	23	42
3	MySQL	25.23	Data & Analytics	Oracle	31	21	5
4	Node.js	22.75	DevOps	Nodesource, Rising Stack	7	9	59
5	Docker	22.61	DevOps	Docker	14	9	75
6	Hadoop	16.19	Data & Analytics	Cloudera, Hortonworks	7	23	11
7	Elastic search	15.72	Data & Analytics	Elastic	7	5	43
8	Sparck	14.99	Data & Analytics	Databricks	15	2	15

Nota: El listado detallado se puede ver en el sitio de Battery Ventures <http://urlm.co.uk/www.xenstreet.com>

Tabla 3. 6. Comparación entre los principales sistemas operativos.

<i>Sistemas Operativo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
	Mejor interfaz gráfica del mercado. Generalmente están inmunes a ataques por virus. Se distingue por su diseño el cual incluye innovaciones en el área técnica. Excelente manejo de contenidos multimedia. Excelente duración de la batería.	Tienden a ser muy costosos. Centros de preparación no son tan accesibles. Los repuestos suelen ser costosos. En algunos casos la capacidad de expandirlas es muy limitada. En el aspecto de juegos no es tan variada como Windows.
	Tiene más software desarrollado. Es sencillo conseguir soluciones a los problemas que se presentan. Centros de Reparación sumamente accesibles. Se puede expandir la capacidad.	Es muy propenso de ser afectado por virus. Requiere actualizaciones constantemente. Comunica de forma constante diversos mensajes. Requiere licencia para la mayoría de programas.
	El mejor costo del mercado, suele tener un costo mínimo. Tienes una enorme cantidad de software libre para el sistema, sin problemas de virus. Es más estable por ende lo usan en servidores de alto rendimiento.	Debes manejar el Lenguaje de Programación para ciertas cosas. La mayoría de los ISP no dan soporte para algo que no es Windows. No existe mucho Software comercial.

Tabla 3. 7. Comparación entre programas open source para geoquímica magmática.

Software	Idioma	Dificultad de instalación	Dificultad de uso	Cantidad de formatos de exportación.	Versatilidad de gráficos.	Posibilidad de edición.	Complejidad del Formato de input.
T-IGPET	Inglés	Tenemos que seguir los pasos del manual.	La plataforma es un poco desordenada	Solo se puede copiar y pegar	Los básicos y algunos de tierras raras y granitoides	Tiene más posibilidad de editar el grafico desde el programa	Hay que editarlo desde el programa. Formato txt
PETROGRAPH	Inglés	La instalación es intuitiva, basta con seguir las indicaciones.	Es mucho más amigable	Solo se puede copiar y pegar formatos wfm	Los básicos algunos de tierras raras	No cuenta con muchas opciones para editar	Se puede editar desde el Excel. Formato CSV
GCDKit	Inglés	Se programa en R	Amigable y desordenada	Tiene hasta 4 posibilidades de exportar y abrirse en cs2	El más completo de los 3	No cuenta con muchas opciones para editar	Hay que editarlo desde el programa. Formato TXT.

Tabla 3. 8 Comparación entre programas open source utilizados para análisis de paleoesfuerzos en Geología Estructural / Tectónica.

Programa	Autor	Archivos de entrada	Formato de entrada	Sentido del rake	Interfaz	Resultados	Método de análisis	Adicional
Faultkin.	Diseñado por Rick Allmendinger.	Se puede ingresar la data desde Excel o desde un archivo txt.	Stike /Dip Mano derecha	Signo positivo siempre	Amigable y simple	Dirección de Paleoesfuerzos, Diagrama de rosas, proyección estereográfica.	Diedros de Rectos	Es un software que en los últimos años ha sido muy difundido por diversos instructores.
Tectonics Fp.	Diseñado por Franz Reiter y Peter Acs	Se puede ingresar la data desde Excel o desde un archivo txt.	Dip/Dip Dir. Mano derecha	Requiere indicar el trend y plunge	Amigable pero un poco más complejo que otros.	Dirección de Paleoesfuerzos, Diagrama de rosas, proyección estereográfica.	Diedros de Rectos y PBT Axes.	Ajusta los valores de los sigmas dentro de un rango con un intervalo de confianza
Win Tensor.	Diseñado por D. Delvaux.	Se puede ingresar la data desde Excel o desde un archivo txt.	Stike /Dip Mano derecha	El signo depende de la orientación	Amigable y simple	Dirección de Paleoesfuerzos, Diagrama de rosas, proyección estereográfica.	Diedros de Rectos y PBT Axes.	Pondera o ajusta el mejor método de análisis y muestra el círculo de Morh.

Tabla 3 9 Principales distribuciones de Software Libre y Open Source.

<i>Distribución</i>	<i>Logo Representativo</i>	<i>Descripción</i>
Slackware		Fue creada por Patrick Volkerding y gozó de gran aceptación los primeros años (Viñas, 2003).
Debian		Marca las distancias entre el software libre del que no lo es, permitiéndonos solo utilizar programas sin licencia (Viñas, 2003).
RedHat		Es una de las distribuciones más populares. Está creada por una empresa de EUA. Tiene un interfaz amigable, que hace sencilla su instalación (Viñas, 2003).
SuSe		Es muy completa y fácil de instalar, aunque en algunos aspectos no se siguen los estándares de la comunidad (Viñas, 2003).
Knoppix		Muy recomendado y útil para nuevos usuarios en el sistema (Viñas, 2003).

Tabla 3 10 Principales Plugins en Qgis.

Número	Plugin	Funciones
1	GPS Tools	Muestra los waypoints en capas de puntos, mientras que las rutas y los tracks se muestran en capas de cadenas de líneas.
2	QGIS2Threejs	Visualiza DEM y datos vectoriales en 3D en navegadores web. Además, puede guardar el modelo 3D en formato glTF para impresión 3DCG o 3D.
3	Profile Tools	Traza línea de perfil desde capas ráster o capa vectorial de puntos con campo de elevación. Admite varias líneas y la exportación de gráficos a archivos svg, pdf, png o csv.
4	Qprof	Genera perfiles topográficos y geológicos. Se pueden determinar intersecciones entre afloramientos geológicos o fallas.
5	Line Direction Histogram	Crea un diagrama de rosa que se puede utilizar para investigar la distribución de las direcciones de los segmentos de línea de un conjunto de datos vectoriales de línea o polígono.
6	Qgsurf	Estima la aptitud de superficies geológicas subplanares dados tres o más puntos en una superficie topográfica y grafica datos geológicos en una estereonet.

Capítulo 4

Configuración Geológica

4.1 Geología Regional

4.1.1 Estratigrafía

4.1.1.1 Unidades estratigráficas del Jurásico

A) Formación Chicama (Titoneano)

Consiste en areniscas grises, cuarzosas, sublíticas a subarcosas, interestratificadas con lutitas pizarrosas gris oscuro y en estratos cuyos grosores varían entre 10 y 80 cm. Esta secuencia es notoriamente areniscosa (Cobbing, 1972).

4.1.1.2 Unidades estratigráficas del Mesozoico

A) Grupo Gollarisquizga (Neocomiana - Aptiano)

Está constituido por una serie detrítica con edades que van del Neocomiano al Aptiano; esta se encuentra en la denominada cuenca occidental peruana (Wilson, 1963) y está conformada por cuatro formaciones: Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat (Benavides, 1956).

B) Formación Chimú (Valanginiano inferior)

Denominada de esta manera por Benavides (1956). En la zona este del área de estudio, sus afloramientos se encuentran restringidos hacia el valle del río Santa, con el que se forman algunos anticlinales al norte de Huaraz, en el poblado de Lucma, y al noreste de Carhuaz. Hacia la zona oeste, se conforman también estructuras de anticlinales en el caserío de Anchín y hacia el noreste del poblado de Huacho.

Litológicamente, está constituida de arenisca cuarzosa de grano medio a fino, de coloraciones blanquecinas, en estratos con grosores que varían entre 0,5 y 1,2 m. Se intercalan

con ocasionales capas de lutitas pardas amarillentas, en capas de 0,25 a 0,4 m. Hacia la parte inferior, se aprecian algunos mantos de carbón antracítico (Chávez, 2016).

No se reportan fósiles para esta unidad, por lo cual su edad ha sido determinada por correlaciones estratigráficas. De esta manera, y al infrayacer en concordancia con las capas de la formación Santa, se le asigna una edad valanginiana inferior (Wilson, 1967).

C) Formación Santa (Valanginiano superior)

Definida en el Callejón de Huaylas por Benavides (1956) como una secuencia marina conformada principalmente por calizas y dolomitas. Sus afloramientos se encuentran ubicados en el valle del río Santa, cerca al distrito de Huata, en inmediaciones de los cerros Parina y Cauques, en Carcapampa, y al noreste del poblado de Huacho.

Esta formación está constituida por capas de calizas mudstone, de coloración gris oscura. Se halla dispuesta en capas de 0,3 a 0,5 m, que se intercalan con lutitas arenosas de color gris. En la zona de Huacho, se intercalan con capas de pizarras y areniscas calcáreas (Chávez, 2016).



Figura 4.1. Calizas gris oscuro correspondientes a la Formación Santa.

D) Formación Carhuaz (Valanginiano Superior)

Esta es definida, de igual modo, por Benavides (1956), en el Callejón de Huaylas. Los afloramientos de esta formación están ampliamente distribuidos en el área de estudio, con los que se conforman numerosos anticlinales y sinclinales amplios; estos se encuentran bien expuestos en la carretera de Caraz a Pampalomas.

Litológicamente, está constituido en intercalaciones de areniscas de grano medio, rojizas, violáceas y grises; capas de areniscas cuarzosas blanquecinas a amarillentas, en estratos delgados de 0,1 a 0,15 m; lutitas grises, gris amarillentas a violáceas, en capas de 0,2 a 0,3 m de espesor; areniscas grises a gris rojizas, con laminación interna y estructuras de sobrecarga, al tope de la secuencia se intercalan con algunos niveles de limolitas rojizas y calizas en capas medianas. Esta formación se caracteriza por relieves moderados a suaves (Chávez, 2016).



Figura 4.2. Rocas sedimentarias del Grupo Gollarisquisga, Formación Carhuaz.

E) Formación Farrat (Aptiano)

Wilson (1967) la definió como formación y sugirió su constitución en depósitos de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, con una selección moderada a pobre. La morfología de los afloramientos es conspicua, de forma alargada, y sobresale debido a su alta resistencia a la erosión. El área de estudio está limitada en los alrededores del poblado de Cajabamba (oeste de Caraz), y forman parte de esta los cerros Huajrapunta y Pariahuanca; igualmente, esta aflora en pequeños remanentes en la quebrada de Ushco y al pie del cerro Pacusin. Esta formación está constituida por capas de areniscas cuarzosas de grano fino, con laminación interna, las cuales poseen color blanquecino a beige, y se ven dispuestas en capas tabulares de 0,5 a 0,6 m. Al tope, se intercalan con delgados horizontes de limoarcillitas pardoamarillentas (Chávez, 2016).

Aunque no se cuenta con evidencia paleontológica, a las anteriores se les asigna una edad correspondiente al Aptiano; ello, debido a que sobreyacen en la formación Carhuaz, e infrayacen a las formaciones de edad Albiana. El espesor total no sobrepasa los 250 m (Pajuelo, 2015).

F) Formación Pariahuanca, Chulec y Pariatambo (Albiano)

Se han reconocido varios afloramientos, localizados principalmente al oeste del valle del río Santa. En estos depósitos, no ha sido posible llevar a cabo una individualización, por lo que se ha optado por cartografiarlas como una sola unidad que comprende las formaciones Pariahuanca, Chulec y Pariatambo. Está constituida, de la base al tope, por intercalaciones de margas, calizas gris claras, areniscas calcáreas y limolitas dispuestas en capas delgadas a medianas. Se intercalan con ocasionales niveles de limoarcillitas laminadas, de coloraciones rojizas a amarillentas y parduscas; areniscas grises de grano fino, cubiertas por calizas gris oscuras a negras, wackstone y packstone; algunas capas con abundantes nódulos; lutitas calcáreas, gris oscuras; y, al tope, por calizas mudstone, de color negro bituminoso, con olor fétido, en capas de 0,3 a 0,5 m y abundante contenido fósil, intercaladas con margas y arcillitas. Las calizas, en gran parte, son cortadas por vetillas de calcita (Chávez, 2016).

Estas secuencias calcáreas sobreyacen concordantemente con la formación Farrat o a la formación Carhuaz. De igual modo, infrayacen en discordancia erosional a la formación Huaylas (Wilson, 1995).

4.1.1.3 Unidades estratigráficas del Cenozoico

A) Grupo Calipuy (Paleógeno - Neógeno)

Los depósitos volcánicos del grupo Calipuy fueron estudiados por Wilson (1967, 1995) y Cobbing et al. (1981). Ambos autores, coincidieron en la división realizada a los depósitos volcánicos Calipuy en dos secuencias: la parte inferior, caracterizada por rocas piroclásticas, aglomerados y un conglomerado a la base; y en la parte superior, mediante una discordancia, está constituida esencialmente por flujos piroclásticos dacíticos a riolíticos y algunas lavas porfíricas. Cobbing et al. (1996), en el levantamiento del cuadrángulo geológico de Huaraz, dividió el grupo Calipuy en tres unidades: a) la unidad inferior, conformada principalmente por flujos de lavas con intercalaciones de rocas sedimentarias; b) la unidad media, principalmente piroclástica con intercalaciones de rocas volcanoclásticas; y c) la unidad superior, conformada principalmente por flujos de lavas con intercalaciones piroclásticas. Enríquez (1999) reconoció y subdividió a los volcánicos cenozoicos de la cordillera Negra con un modelo para la interpretación de la estratigrafía del grupo Calipuy; esto, al presentar una recategorización estratigráfica, donde se reconocieron tres unidades volcánicas: Irmán, Ututo y Chururo, y se definieron dos ejes de magmatismo: Ututo y Chururo. Estos controlaron el emplazamiento de aparatos volcánicos actualmente destruidos.

El Calipuy está emplazado en la cordillera Negra y se dispone como una franja de rumbo NO-SE, que tiene una anchura entre 25 y 40 km; este sobreyace, con una gran discordancia, a todas las formaciones sedimentarias mesozoicas y, en parte, cubre al Batolito de la Costa y plutones cenozoicos. Estas últimas están cubiertas cerca al valle del río Santa, por los piroclastos de la formación Yungay, los conglomerados de la formación Lloclla y los depósitos cuaternarios recientes (Cobbing, 1996).

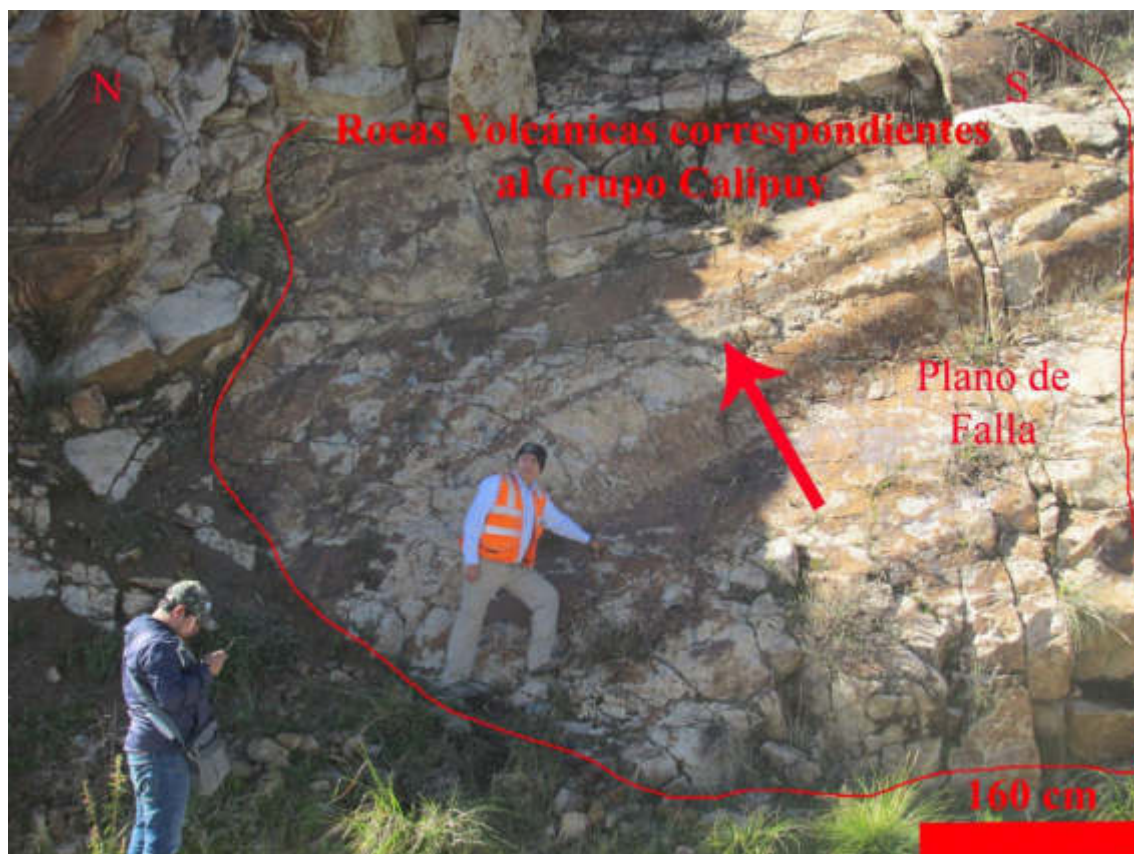


Figura 4.3. Rocas Volcánicas del Grupo Calipuy.

B) Formación Yungay (Neógeno)

Se encuentra conformada por una secuencia de tobas blanquecinas estratificadas, compuestas por cristales de cuarzo y biotita en una matriz feldespática; además, presenta ignimbritas y dacitas. Sobreyace al Cretáceo y al Grupo Calipuy, con una potencia promedio de 150 m (Wilson, 1995).



Figura 4.4. Tobas de la Formación Yungay.

C) Batolito de la Costa / Super Unidad Paccho (Albiano)

Solamente cinco pequeños plutones han sido asignados a esta superunidad dentro del área. Los intrusivos están al norte de Reipa, en el valle de Culebras; al este de San Miguel, que alcanza la parte superior del río Huarmey; y en la parte baja de la quebrada Cotaparco, un tributario sobre el flanco sur del valle de Huarmey. El stock de Reipa está algo alterado por la presencia de óxidos de magnesio, pero se encuentra claramente cubierto por el volcánico Calipuy y tiene una relación con las tonalitas de Santa Rosa (Cobbing, 1996).

D) Batolito de la Costa / Super Unidad Santa Rosa Clara (Santoneano)

La variedad clara de la tonalita Santa Rosa y la granodiorita ocurre esparcida a través del cuadrángulo de Culebras y parte del cuadrángulo de Huaraz, en plutones discretos de tamaño pequeño a mediano, los cuales cortan discordantemente a los volcánicos del grupo Casma. Se encuentra constituido, en su mayoría, por tonalita y granodiorita (Cobbing, 1996).

E) Batolito de la Costa / Complejo de Pariacoto

Cerca de 2 km al noreste del pueblo de Pariacoto, en el río Casma, ocurren un grupo de intrusivos, los cuales son un poco difíciles de clasificar o agrupar con otros miembros del batolito. El grupo es algo variable, va desde el rango monzogranito a sienogranito; y hay una fuerte posibilidad de que al menos dos magmas separados estén presentes en su formación. Los intrusivos de Pariacoto, sin embargo, son de edad cretácea o más joven, debido a que cortan sedimentitas cretáceas (Cobbing, 1996).

F) Tonalita Pira

Es un stock de tonalita y granodiorita ubicado en los alrededores del pueblo de Pira; este se ha emplazado entre las sedimentitas de las formaciones Santa y Carhuaz y los volcánicos del grupo Calipuy, lo que ocasiona cierta alteración en los volcánicos de la parte occidental. La tonalita es de grano medio a fino, mesócrata con plagioclasas, cuarzo y biotita en hojuelas distribuidas irregularmente (Cobbing, 1996).

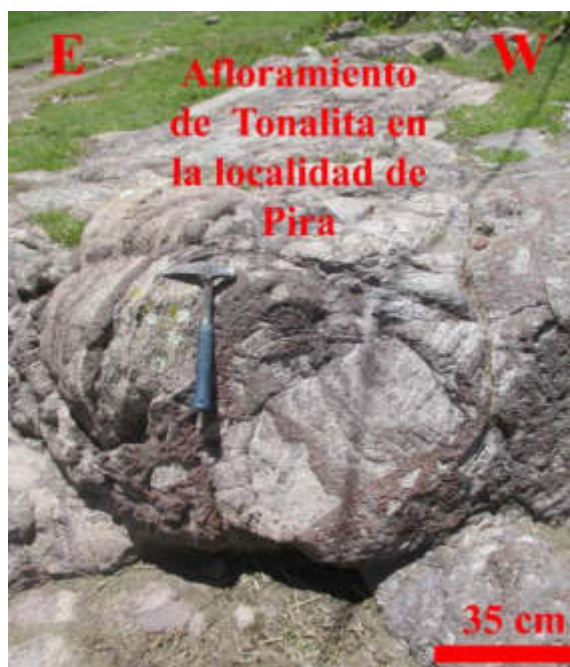


Figura 4.5. Afloramiento rocoso en la localidad de Pira.

G) Batolito Cordillera Blanca (Plioceno)

El batolito de la cordillera Blanca es un complejo plutónico que aflora ampliamente y se ubica en la parte central de la cordillera occidental (Rivera, 2016). La falla de la cordillera Blanca (CBSZ) es una normal, de 200 km de largo (Hughes et al., 2019). Se pueden apreciar algunos de los tipos de rocas que constituyen el complejo plutónico y sus relaciones generales (Wilson et al., 1967).

La larga zona de cizalladura, de sentido normal en los Andes peruanos, ocurre casi por completo en el batolito granodiorítico de la cordillera Blanca (Atherton y Sanderson, 1987; Petford y Atherton, 1992; McNulty et al., 1998), que se emplazó hace 14-5 Ma (U-Pb zircon; Mukasa, 1984; McNulty et al., 1998; Giovanni, 2007).

Al oeste de la cordillera Blanca, se encuentra la cordillera Negra, un arco volcánico de 54–15 Ma relacionado con la subducción normal a lo largo de la trinchera Perú-Chile (Petford y Atherton, 1992; Scherrenberg et al., 2014, 2016). A partir de los 15 Ma, el magmatismo migró hacia el este, hecho que culminó en la intrusión y cristalización del batolito de la cordillera Blanca desde $13,7 \pm 0,3$ Ma a $5,3 \pm 0,3$ Ma (circón U-Pb; Mukasa, 1984; Giovanni, 2007); y en la erupción de los ignimbritos asociados a Yungay y Fortaleza entre $8,7 \pm 1,6$ y $4,5 \pm 0,2$ Ma (40 Ar / 39 arbiotita; Bonnot, 1984; Giovanni et al., 2010), y entre $6,2 \pm 0,2$ y $4,9 \pm 0,2$ Ma, respectivamente (biotita K-Ar; Wilson, 1975; Cobbing et al. al., 1981). Estos eventos marcan el último episodio de magmatismo de arco en esta región (Cobbing et al., 1981; Bonnot, 1984; Mukasa, 1984; Petford y Atherton, 1996; McNulty et al., 1998; McNulty y Farber, 2002; Giovanni, 2007; Giovanni et al.2010). La cordillera Blanca del Perú es el único ejemplo de extensión activa de gran magnitud (McNulty y Farber, 2002).

El batolito de la cordillera Blanca (8-5 Ma) es un plutón alargado, emplazado a ~6 km de profundidad, en las rocas sedimentarias jurásicas del país. Esta falla normal se describe

como activa, a pesar de la falta de sismicidad histórica. Los mecanismos focales indican un componente transtensivo sinistral en la falla normal de la cordillera Blanca y un régimen regional extensional en el área de la cordillera Negra (Margirier et al., 2015). Los plutones cretáceos del batolito costero se introdujeron en el Jurásico plegado y las rocas volcánicas del Cretácico superior, lo que indica una fase de acortamiento en el Cretácico superior que se conoce como “fase mochica” en la literatura (Jaillard, 1996).

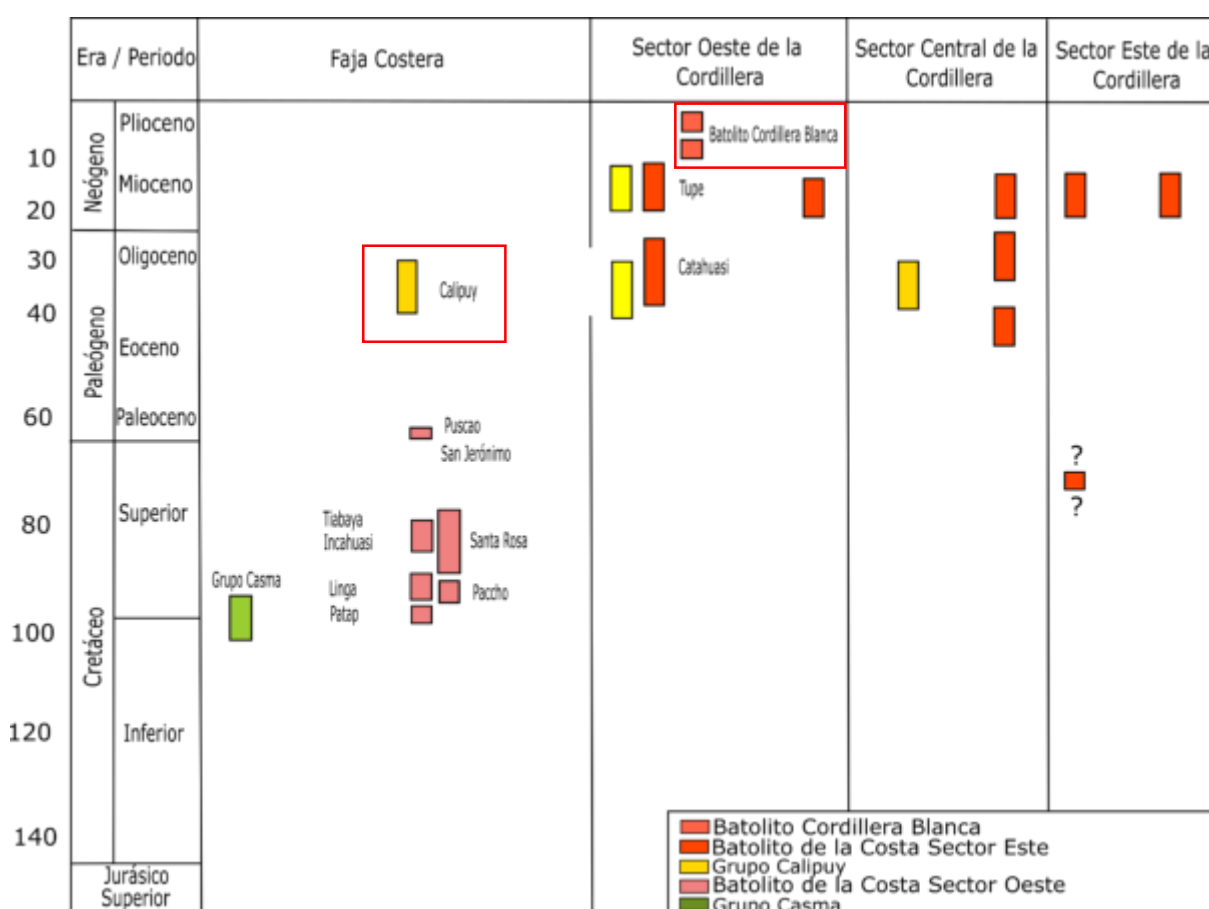


Figura 4.6. Distribución espacial del magmatismo en los Andes Centrales. Modificado de Piffner (2016). Se remarca en rojo las unidades estratigráficas que fueron objeto de estudio en esta investigación.

H) Depósitos Pleistocénicos

Los depósitos son de origen glaciario, morrenas y glacio-fluviales.

- **Depósitos morrénicos**

Se originaron a causa de la última glaciación, a manera de lomadas con cresta morrénica, y se encuentran constituidos por bloques y gravas, en una matriz areno-limosa mal clasificada. Tienen una dirección centrípeta y centrífuga: la primera corre hacia la base de la depresión y la segunda está emplazada en los bordes (Cobbing, 1996).



Figura 4.7. Depósito morrénico a lo largo de la carretera.

- **Depósitos glaciofluviales**

También conocidos como morrena fluvioglaciario, su composición es muy heterogénea y anisotrópica. Contienen fracciones, desde gravas gruesas a limos, con bloques y bolones de diferente tamaño; estas son polimíxticas, no están clasificadas y su granulometría es

heterogénea. Así, se presentan fracciones más finas, por lo que predominan los limos y algo de arcilla.

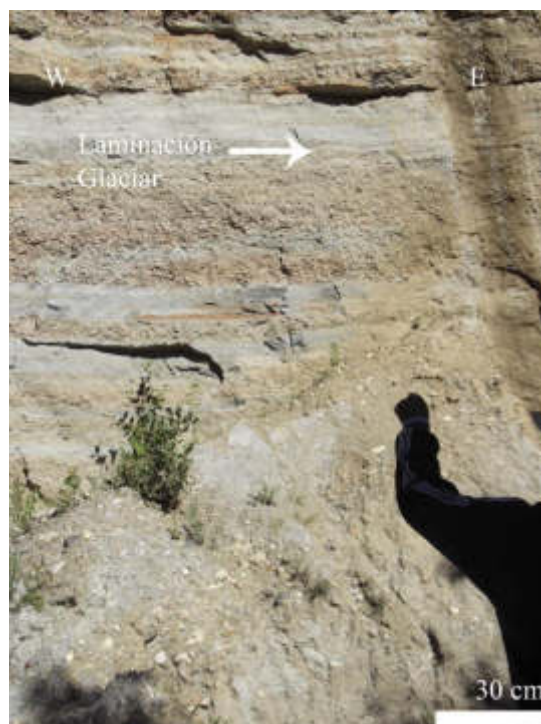


Figura 4.8. Depósito glaciofluviales a lo largo de la carretera.

- **Depósitos coluviales**

Conformado por depósitos mal clasificados y clastos angulosos con bastante matriz areno-limosa y una ligera estratificación. En algunos lugares, cubren parcialmente los depósitos morrenos y glacio-fluviales; estos fueron originados por el desprendimiento de rocas, a causa de los deslizamientos, derrumbes y acción intempérica (Cobbing, 1996).

4.1.2 Geomorfología

4.1.2.1 Abanico de piedemonte

Un abanico aluvial es una forma de relieve depositacional originada en la base o el pie (piedemonte) de un frente montañoso. Se encuentra genéticamente asociado a las descargas sólidas (sedimentos) de un curso de agua (río o quebrada) que drena, desde un área topográficamente elevada, a un área más baja y plana adyacente. Posee una sedimentación que es promovida principalmente por los fuertes cambios (disminución) de pendiente experimentados por el cauce a lo largo de su recorrido (Méndez, 2016).

4.1.2.2 Colina y lomada en roca intrusiva

Corresponde a afloramientos de rocas intrusivas, reducidas por procesos denudativos, con lo que se conforman elevaciones alargadas, con laderas disectadas y de pendientes moderadas a bajas (Valderrama, 2013).

4.1.2.3 Colina y lomada en roca sedimentaria

Son elevaciones de terreno con pendiente suaves, constituidas por depósitos clásticos, los cuales son recubiertos por materiales coluviales como consecuencia de la meteorización del afloramiento (López, 1996).

4.1.2.4 Colina y lomada en roca Volcano – Sedimentaria

Esta se relaciona con los afloramientos de rocas volcano-sedimentarias, reducidas por procesos denudativos, las cuales conforman elevaciones alargadas, con laderas disectas y de pendiente moderada a baja (López, 1996).

4.1.2.5 Colina y lomada en roca volcánica

Esta forma de relieve, litológicamente, está compuesta por rocas volcánicas reducidas por la erosión. Se caracterizan por presentar laderas de pendiente moderada a baja (Valderrama, 2013).



Figura 4.9. Colina en roca volcánica dentro del área regional.

4.1.2.6 Llanura o planicie inundable

Son superficies bajas, adyacentes a los ríos principales, y en el mismo curso fluvial. Morfológicamente, se distinguen como terrenos planos compuestos de material no consolidado y removible (Valderrama, 2013).

4.1.2.7 Meseta volcánica lávica

Esta es una zona elevada del terreno, caracterizada por tener una cima plana y con lados abruptos. Se encuentra relacionada con depósitos de origen volcánico efusivo (Valderrama, 2013).

4.1.2.8 Montaña con cobertura glaciar

Es una unidad muy distinguida en la región y se caracteriza por mostrar elevaciones naturales de terreno con gran altura y por presentar una cobertura glaciar continua (Zavala, 2015).



Figura 4.10. Se muestra la Cordillera Blanca.

4.1.2.9 Montaña en roca intrusiva

Son zonas de elevaciones naturales del terreno de gran altura, constituidas por materiales y/o depósitos de roca intrusiva, donde estos son recubiertos por materiales detríticos, debido a la meteorización y erosión de los afloramientos (Zavala, 2015).

4.1.2.10 Montaña en roca sedimentaria

Estos relieves naturales son elevaciones de terreno que poseen gran altura; están conformados por depósitos de material de roca sedimentaria recubiertos de detritos, debido a los procesos de meteorización (Zavala, 2015).

4.1.2.11 Montaña en roca volcano – sedimentaria

Estas geoformas se caracterizan por ser zonas de morfología ondulada a moderada y se relacionan con la litología de origen volcano-sedimentario, en la que se evidencian los efectos erosivos (Zavala, 2015).

4.1.2.12 Montaña en roca volcánica

Son zonas de elevaciones naturales del terreno de gran altura, constituidas por materiales y/o depósitos volcánicos; estos son recubiertos por materiales detríticos, debido a la meteorización y erosión de los afloramientos (Valderrama, 2013).

4.1.2.13 Montaña estructural en roca intrusiva

Se le denomina de esta forma a las elevaciones asociadas a roca de naturaleza intrusiva que presentan un alineamiento montañoso, con una pendiente alta a moderada (Valderrama, 2013).

4.1.2.14 Morrenas

Son aquellos depósitos clásticos, principalmente arcillosos, provenientes de glaciares, los cuales están constituidos por clastos heterogéneos, generalmente de aristas redondeadas por el poco transporte sufrido (Valderrama, 2013).



Figura 4.11. Depósito morrénico a lo largo de la carretera.

4.1.2.15 Terraza Aluvial

Son terrenos ubicados encima de un cause o llanura de inundación fluvial; en sus márgenes suele generarse erosión fluvial, y socavamiento en los taludes inferiores. Esto, a menudo, desencadena derrumbes (Zavala, 2015).



Figura 4.12. Terreza aluvial a lo largo de la carretera.

4.1.2.16 Valle Glaciar con laguna

Los valles glaciales se encuentran restringidos a las zonas altas, generalmente por encima de los 3900 msnm. Se caracterizan por conformar incisiones de laderas rectas con una típica sección transversal en forma de U (López, 1996).

4.1.2.17 Vertiente coluvial de Detritos

Acumulación de material heterogéneo, de tamaño variado, poco consolidado y ubicado en la base de la montaña. Por lo general, se encuentra asociado a movimientos en masa (López, 1996).



Figura 4.13. Vertiente coluvial de detritos.

4.1.2.18 Vertiente glacial

Las rocas de la vertiente son consecuencia de los procesos erosivos típicos del ambiente glacial. En algunos casos, presentan una rotura de la roca debido a las tensiones que estas soportan al congelarse (Acosta, 2006).

4.1.2.19 Vertiente glacio – fluvial

Depósito de sedimentos en formas irregulares que bordean aquellas montañas que han sufrido procesos de deglaciación (López, 1996).

4.1.2.20 Vertiente o piedemonte aluvio torrencial

Son depósitos asociados a flujos de detritos y de lodos de tipo excepcional. Poseen una pendiente suave, generalmente compuesta por fragmentos rocosos heterométricos (López, 1996).

4.1.2.21 Vertiente o piedemonte coluvio - deluvial

Son acumulaciones de laderas originadas por procesos de movimientos en masa; por lo general, material detrítico erosionado por la escorrentía superficial que se acumula en las laderas (López, 1996).



Figura 4.14. Vertiente o piedemonte coluvio - deluvial.

4.1.3 Tectónica

La estratigrafía del área fue controlada por una actividad intermitente a lo largo de las fallas regionales que fueron establecidas al final de la orogenia paleozoica (Cobbing, 1976).

A la orogenia paleozoica, le sucedió el cinturón orogénico mesozoico, que fue desplazado hacia el oeste; y las cuencas sedimentarias fueron desarrolladas en áreas negativas como resultado de movimientos a lo largo de bloques fallados de la corteza. (Cobbing, 1976). La geología estructural está caracterizada por la presencia de dos grandes sistemas de fallas, además de pliegues (Peña, 2014).

La subducción posee características como ángulo y velocidad variable a lo largo de la zona de convergencia y a lo largo del tiempo. El ángulo con el cual las dos placas se encuentran genera un campo de esfuerzos dentro del terreno continental; ello permite la formación de fallas regionales o zonas de apertura, las cuales facilitan el emplazamiento de cámaras magmáticas y su respectiva manifestación volcánica en la superficie (Pajuelo, 2015).

La variación del ángulo de subducción genera un cambio en la potencia, la formación de cámaras magmáticas y la migración de arcos magmáticos (Pajuelo, 2015); igualmente, en el norte del país, tiene un ángulo de subducción prácticamente plano (Pajuelo, 2015). Por otro lado, el aumento de la velocidad de convergencia produce mayor compresión (Martinod, 2010).

En el margen este del río Santa, se forma una altiplanicie fluvio-glaciar que sobreyace al grupo Calipuy, el cual presenta fallas normales (Bonnot, 1984). La cordillera Blanca aflora gracias una falla regional de orientación NE-SE y se prolonga a lo largo de 170 km al norte. El sistema de fallas corresponde al orden normal sinistral, en su último movimiento (Giovanni, 2007).

Según el marco tectónico regional del sector del norte de la cordillera Negra, en el área van a predominar las estructuras regionales con dirección NO-SE; estas forman parte del sistema de fallas que controlaron y controlan la geodinámica de cuencas, el emplazamiento magmático y la mineralización (Chávez, 2016).

4.1.3.1 Sistema de Fallas Tapacocha (SFT)

Estas son fallas inversas con movimiento hacia el oeste, las cuales limitan al suroeste con el dominio de la cuenca cretácica Casma (Romero, 2008). Tal sistema de fallas se acuña con el sistema de fallas de la cordillera Blanca a la altura del poblado de Ticllos, en Chiquián (Cobbing, 1996).

4.1.3.2 Sistema de Fallas Huacllán – Churín (SFHCH)

Son fallas inversas con movimiento hacia el oeste que limitan la cuenca jurásica-cretácica. Se ha reconocido el sistema de fallas al noreste del poblado de Cochabamba, el cual se intersecta con otra falla inversa, cuyo movimiento se dirige hacia el sureste y afecta los depósitos volcánicos del grupo Calipuy (Chávez, 2016).

4.1.3.3 Sistema de Fallas Huaraz – Recuay (SFHR)

Este es un sistema de fallas inversas inferidas, con movimiento hacia el oeste (Romero, 2008). En ese sentido, delimita la cuenca del Santa hacia el noreste, cerca de los principales poblados de Huaraz, Carhuaz, Yungay y Caraz; mientras que al noreste se acuña con la CBSZ en el sector de Huallanca (Chávez, 2016).

4.1.3.3 Sistema de Fallas Cordillera Blanca

El movimiento de la falla ha sido interpretado como un deslizamiento principalmente normal, con un componente lateral sinistral (Bonnot et al., 1988; Sebrier et al., 1988; Petford y Atherton, 1992; McNulty, 1998). Una zona de fallas normales significativas se concentra en la cordillera Blanca del Perú; así, las cuaternarias y la sismicidad en la cordillera Blanca

proporcionan evidencia de las fallas normales con una orientación paralela (Yonekura et al., 1979; Dalmayrac y Molnar, 1981; Suárez et al., 1983; Schwartz, 1988).

Consecuentemente, la falla normal actúa como un solo segmento, con una punta fijada y la otra libre para propagarse; a medida que la falla se alarga, la cuenca aumenta en largo, ancho y profundidad. Asimismo, el deslizamiento acumulativo es mayor en ubicaciones más cercanas a la punta de falla fijada, y disminuye en la dirección de propagación. El resultado es un amplio sinclinal que aumenta en amplitud y longitud de onda, conforme se propaga la punta de falla (Schlische y Anders, 1996). Además, los sedimentos más jóvenes se depositan sobre una superficie más grande que los sedimentos más viejos; dichos sedimentos se superponen sobre los estratos más antiguos, en el "extremo final" del depocentro migratorio. Las unidades más antiguas están expuestas en la superficie cerca del origen (Giovanni et al., 2010).

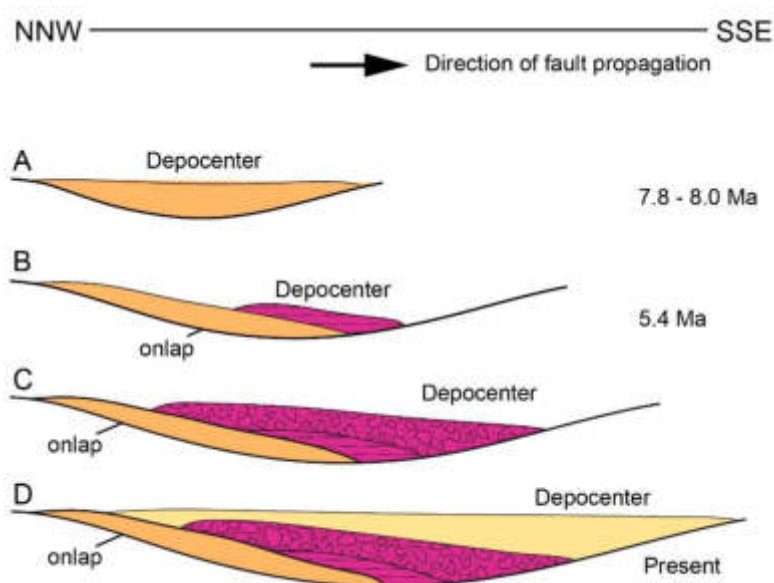


Figura 4.15. Crecimiento de la Falla Cordillera Blanca. Modificado de Giovanni et al., 2010.

4.2 Geología Local

Las principales unidades litológicas identificadas durante la campaña de campo son:

4.2.1 Litología

4.2.1.1 Andesita Porfirítica

Roca ígnea, de color verdoso, con textura porfídica, en una matriz afanítica, con presencia de fenocristales de plagioclasas (20%) < 4mm, de forma tabular, alterados a sericita y carbonatos. También presenta fenocristales de ferromagnesianos (10%) con forma prismática largos (anfíboles), laminares (biotita), alterados a carbonatos. Se observa epidota, óxidos de titanio y cloritas.



Figura 4.16. Andesita Porfirítica.

4.2.1.2 Pórfido Dacita

Roca ígnea, de textura porfídica y matriz afanítica. Se observan fenocristales de plagioclasa (35%) <1 cm de formas tabulares, alterados a sericita, con presencia de ojos de cuarzo (15%) <4 mm que presentan bahías de corrosión y ferromagnesianos (10%) laminares (biotita), en su mayoría alteradas a cloritas. Además de ello, se observa óxidos de hierro y

titanio, en una matriz color verde muy pálido, con pequeñas venillas de carbonatos y óxidos de manganeso.



Figura 4.17. Pórfido Dacita.

4.2.1.3 Dacita

Roca ígnea de estructura isotrópica y textura inequigranular, conformada por cristales <2 mm de biotita (7%), cuarzo (25%) y feldespatos (40%), que se encuentran inmersos en una matriz microcristalina alterada a arcillas y sericita. Los feldespatos presentan alteración a carbonatos, además tiene una densidad y dureza media.



Figura 4.18. Dacita.

4.2.1.4 Latita Porfirítica

Roca ígnea volcánica compacta, de color parduzco y de textura porfirítica. Presenta un porcentaje de SiO_2 de 60 % y álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) de 9 %. Está conformada por cristales de plagioclasas y moldes de minerales ferromagnesianos, que se encuentran en una matriz afanítica, en la que se presentan óxidos de hierro.

4.2.1.5 Toba Litocristalina

Roca piroclástica de color gris claro parduzco, textura clástica fragmental. Presenta una distribución de tamaño equigranular, con fragmentos piroclásticos del tamaño de cenizas y está compuestas de cristales, fragmentos de cristales (principalmente, fragmentos de plagioclasas de formas tabulares, cristales anhedrales de cuarzo, fragmentos de cristales de anfíbol y micas negras). Además, se observan algunos clastos y fragmentos de roca indiferenciable, dispuestos en una matriz vítrea, de ceniza y arcilla.



Figura 4.19. Toba Litocristalina.

4.2.1.6 Toba Lapillicristalina

Roca volcánica de color gris claro pardo – blanquecino, con textura clásito fragmental. Presenta fragmentos piroclásticos de tamaño de cenizas y lapilli, compuesta de cristales y fragmentos de cristales (principalmente, fragmentos de cristales anhedrales de plagioclasas, cristales anhedrales de cuarzo y fragmentos de anfíbol), dispuestos en una matriz vítrea, de cenizas y abundantes arcillas.



Figura 4.20. Toba Lapillicristalina.

4.2.1.7 Toba Cristalina

Roca de tipo textural clástico fragmental, de naturaleza piroclástica, color gris amarillento, patrón textural fanerítico, de grado de cristalinidad holocristalino, tamaño de cristales fino a medio (menor a 5mm) con distribución de tamaño inequigranular, fragmentos piroclásticos del tamaño de cenizas, y compuesta esencialmente de cristales y fragmentos de cristales (en especial fragmentos de plagioclasas anhedrales, fragmentos de cuarzo redondeados y fragmentos de cristales de anfíbol y micas negras), todo ello dispuesto en una matriz vítrea moderadamente silicificada.



Figura 4.21. Toba cristalina.

4.2.1.8 Tonalita

Roca intrusiva compacta de textura fanerítica, de grano grueso, holocristalino inequigranular, color gris blanquecino compuesta de plagioclasas (50%), cuarzo (35%), anfíboles, biotita, piroxenos (15%). Presenta un ligero magnetismo, peso específico alto y dureza alta.



Figura 4.22. Tonalita.

4.2.2. Secciones Delgadas

4.2.2.1. M7

Roca volcánica lávica, de textura intergranular de grano fino. La roca está compuesta principalmente por plagioclasas (con alteración a arcillas y carbonatos) y algunos moldes de cristales de anfíboles prismáticos, de sección basal de 6 lados reemplazados totalmente a carbonatos, cloritas y minerales opacos; cloritas (según ferromagnesianos) intergranulares. También se observan algunas venillas de carbonatos y cloritas. Cuarzo secundario rellenando porosidades secundarias.

Clasificación: Andesita

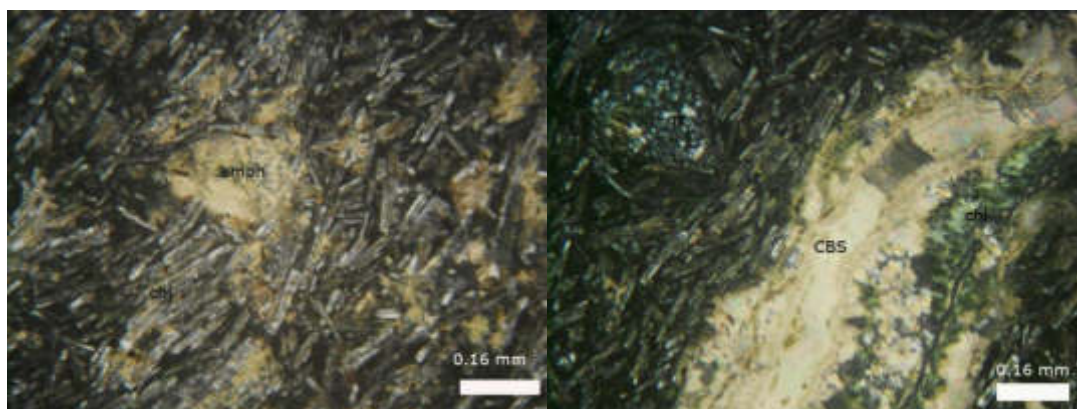


Figura 4.23. Muestra de Andesita vista al microscopio.

4.2.2.2. M10

Roca volcánica piroclástica de textura esencialmente vitrofídica relíctica. Escasos líticos <5mm y cristales de cuarzo I <1mm, en una matriz constituida esencialmente por vidrio volcánico relíctico desvitrificado y/o alterado a cuarzo II y/o material arcilloso, con fracturamiento concéntrico del vidrio de la matriz resultando en una textura parcialmente perlítica (ver círculo), a veces impregnados por óxidos.

Clasificación: Toba

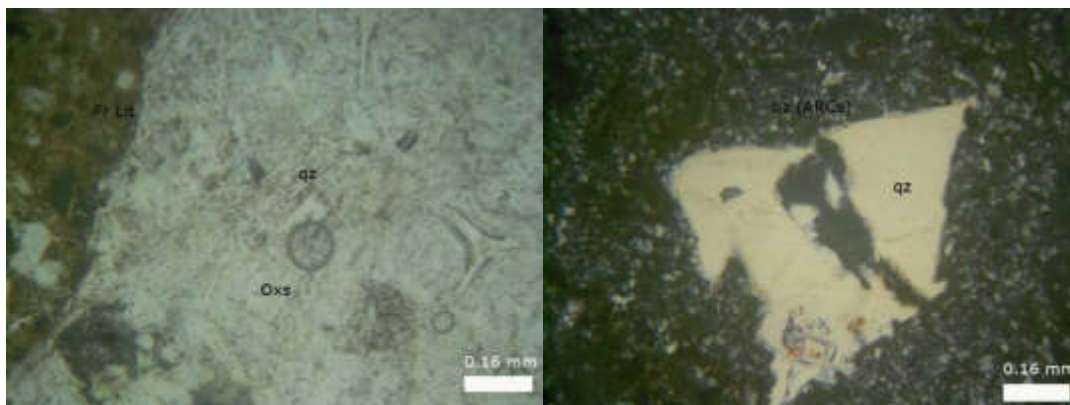


Figura 4.24. Muestra de Toba de cenizas, vista al microscopio.

4.2.2.3. M8

Roca subvolcánica de textura porfídica. Formado por fenocristales de plagioclasas <6mm y moldes de fenocristales, escasos líticos <5mm y cristales de cuarzo I <1mm, en una matriz constituida esencialmente por vidrio volcánico relictico desvitrificado y/o alterado a cuarzo II y/o material arcilloso, con fracturamiento concéntrico del vidrio de la matriz resultando en una textura parcialmente perlítica (ver círculo), a veces impregnados por óxidos.

Clasificación: Andesita porfídica

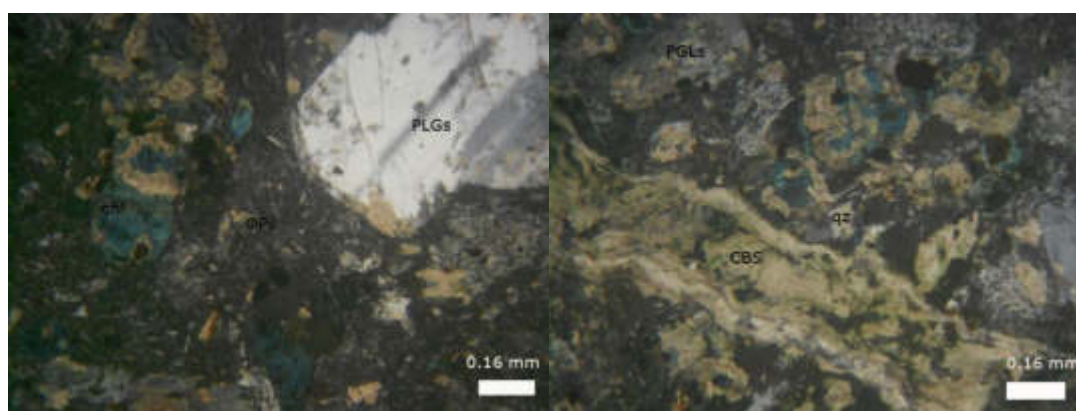


Figura 4.25. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.

4.2.2.4. M9

Roca subvolcánica de textura porfídica, inequigranular. Formado por fenocristales de plagioclasas maclados <6mm y moldes de fenocristales. Escasos cristales de anfíboles <1mm, en una matriz microcristalina, constituida esencialmente por cristales de plagioclasas y ferromagnesianos alterados a clorita impregnados por óxidos.

Clasificación: Andesita porfídica.

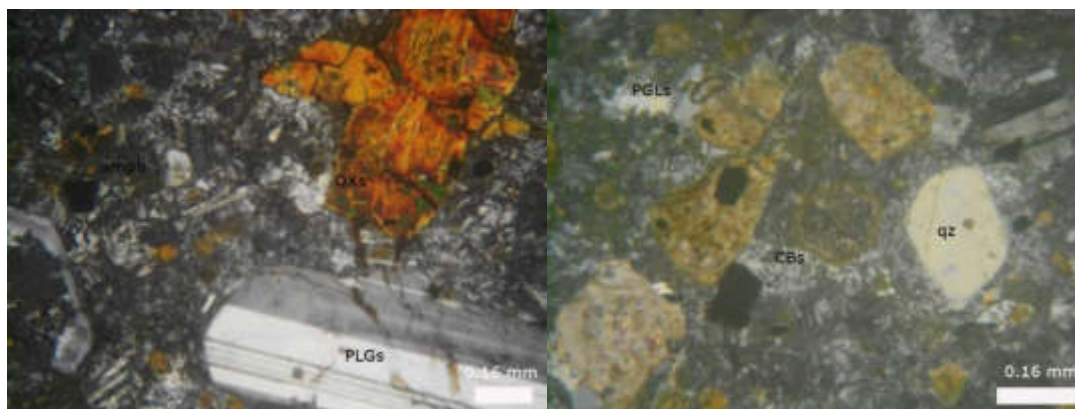


Figura 4.26. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.

4.2.2.5. M11

Roca volcánica de textura porfídica, obliterada. Formado por fenocristales de plagioclasas tabulares en su mayoría maclados y moldes de fenocristales. Escasos líticos <5mm y cristales de cuarzo I <1mm, en una matriz microcristalina ligeramente silicificada y vidrio volcánico relictico desvitrificado y/o alterado a cuarzo II y/o material arcilloso, con alteración a carbonatos. Se evidencia microlitos orientados.

Clasificación: Andesita porfídica

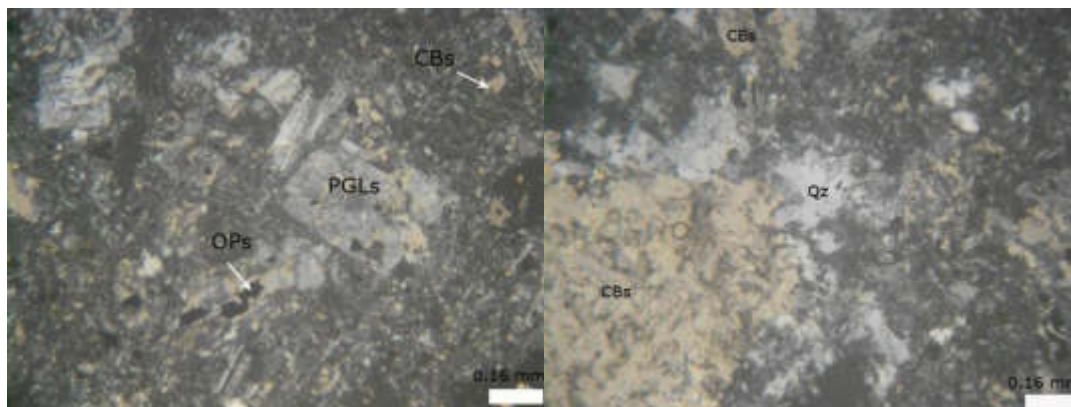


Figura 4.27. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.

4.2.2.6. M12

Roca volcánica de textura porfídica variando a microcristalina. Formado por fenocristales de plagioclasas, en una matriz constituida esencialmente por vidrio volcánico relíctico desvitrificado y/o alterado a carbonatos, con presencia de argilizacion. Se observa algunos fenocristales reemplazados por moldes de carbonatos, impregnados por óxidos y venillas de epidota con cuarzo.

Clasificación: Andesita porfídica.

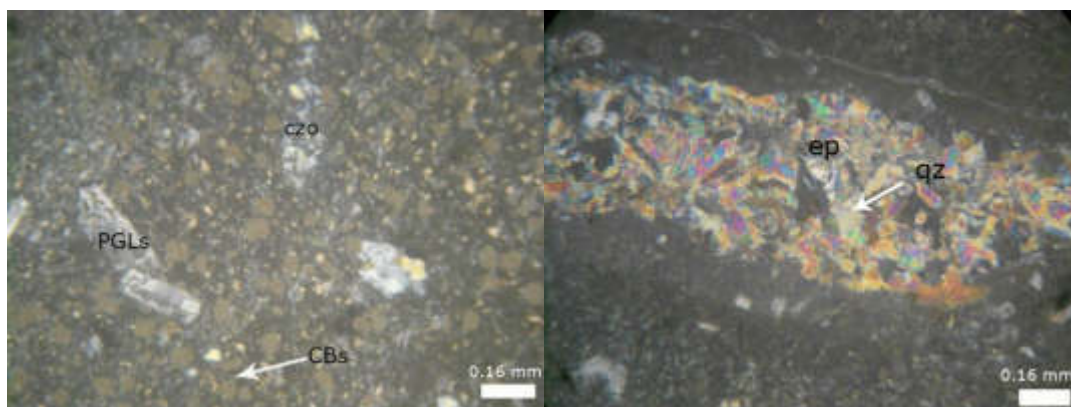


Figura 4.28. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.

4.2.2.7. M13

Roca volcánica explosiva de textura fragmental. Formado por fenocristales de plagioclasas y moldes de fenocristales. Escasos líticos <5mm y cristales de cuarzo I <1mm. Se encuentra constituida en una matriz criptocristalina compuesta por cristales rotos y fragmentos líticos, absorbidos por vidrio volcánico. Se aprecia óxidos en la matriz.

Clasificación: Toba Cristalina.

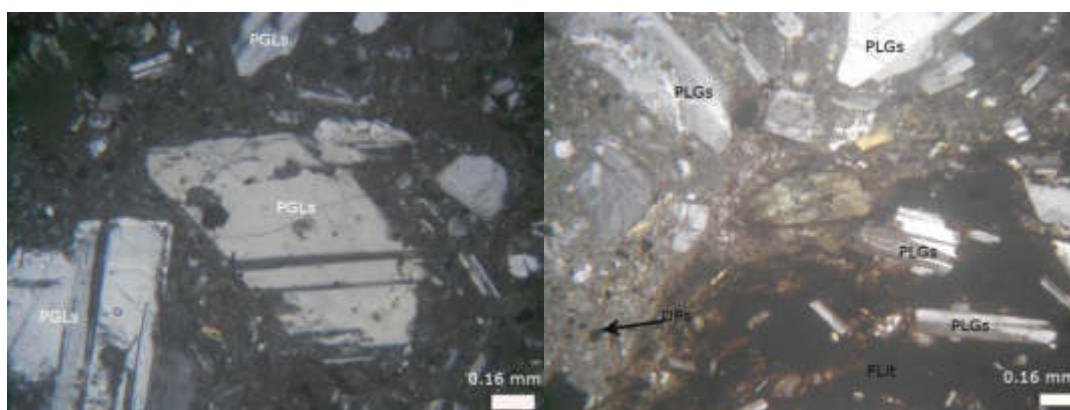


Figura 4.29. Muestra de Toba Cristalina, vista al microscopio.

4.2.2.8. M14

Roca volcánica lávica de textura porfídica. Formado por fenocristales de plagioclasas y anfíboles, en una matriz constituida esencialmente por microcristales de plagioclasas, con cierta orientación. Se observa microfracturas en los cristales de anfíboles y plagioclasas con presencia de sericita y clorita al borde de los cristales.

Clasificación: Andesita porfídica

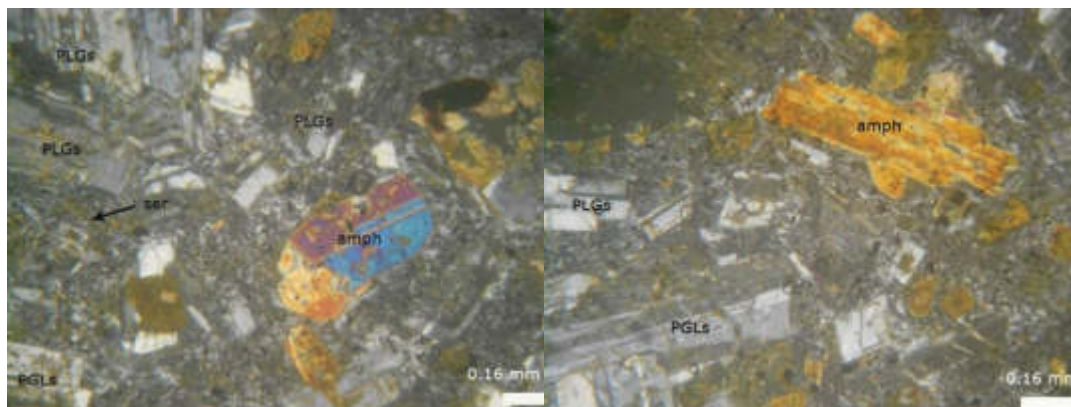


Figura 4.30. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.

4.2.2.9. M6

Roca volcánica piroclástica de textura vitrea. Formado por cristales de plagioclasas y cuarzo, en una matriz constituida esencialmente por vidrio volcánico relíctico desvitrificado con venillas de cuarzo II y material arcilloso principalmente.

Clasificación: Toba de Cenizas.

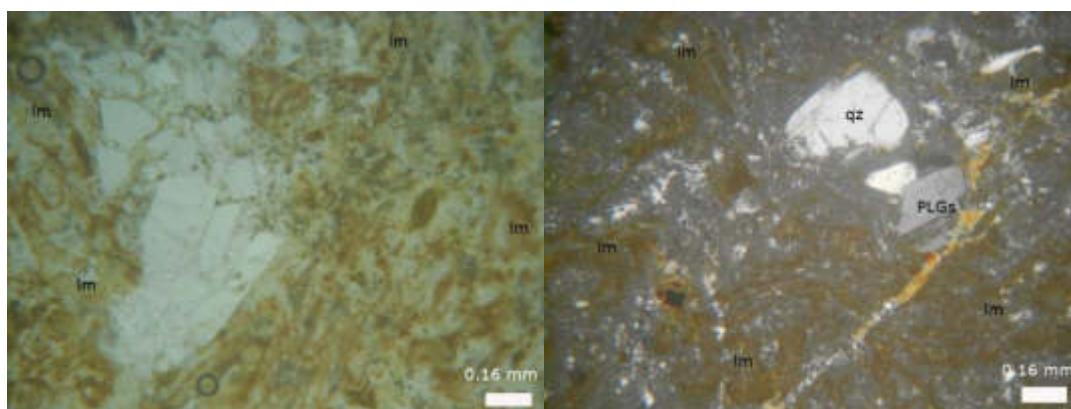


Figura 4.31. Muestra de Toba de Cenizas, vista al microscopio.

4.2.2.10. M1

Roca volcánica piroclástica de textura porfídica. Formado por fragmentos de plagioclasas y cuarzo, en una matriz criptocristalina desvitrificada a material arcilloso. Se identifican cristales de biotita y plagioclasa alterada, existe presencia de opacos en la Matriz.

Clasificación: Toba Cristalina.

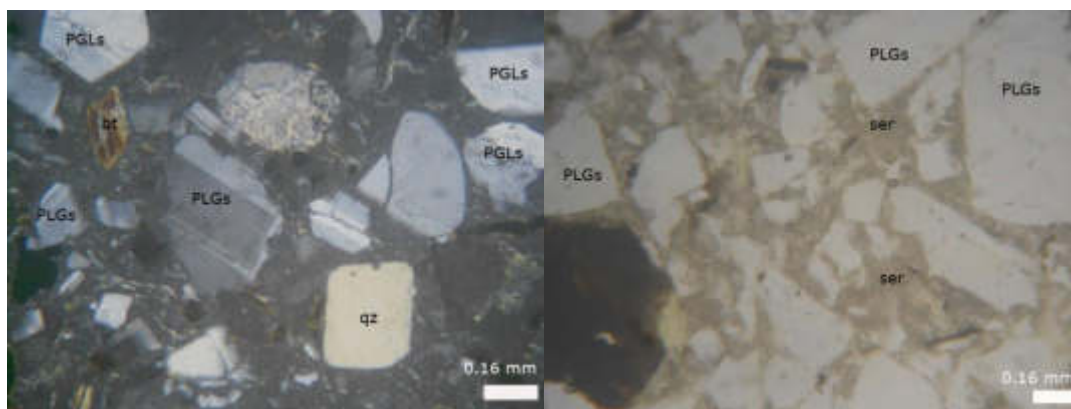


Figura 4.32. Muestra de Toba Cristalina, vista al microscopio.

4.2.2.11. M9

Roca volcánica de textura porfídica inequigranular. Formado por finos cristales de plagioclasa y biotitas, envueltos en una matriz criptocristalina. Se observa zonas con fenocristales de feldespato potásico y microfracturas rellenas por micas e impregnación de óxidos.

Clasificación: Andesita porfídica

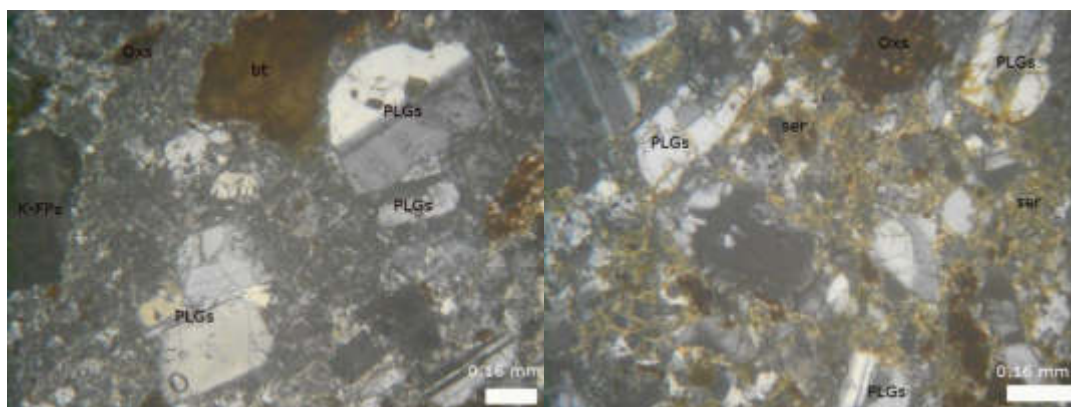


Figura 4.33. Muestra de Andesita Porfírica, vista al microscopio.

4.2.2.12. M5

Roca volcánica de textura porfídica. Formado por fenocristales de plagioclasas y microlitos en una matriz constituida esencialmente por fragmentos y parches de carbonatos.

Clasificación: Andesita porfídica

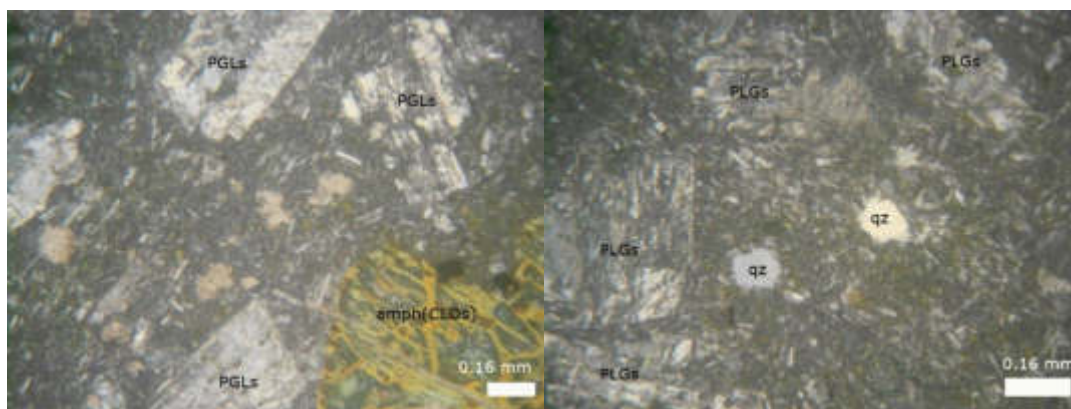


Figura 4.34. Muestra de Andesita Porfirítica, vista al microscopio.

4.2.2.13. M15

Roca volcánica de textura porfídica. Formado por fenocristales de biotitas, cuarzo primario y una matriz de feldespatos con moldes alterados a carbonatos y/o material arcilloso, impregnado de óxidos.

Clasificación: Dacita porfídica

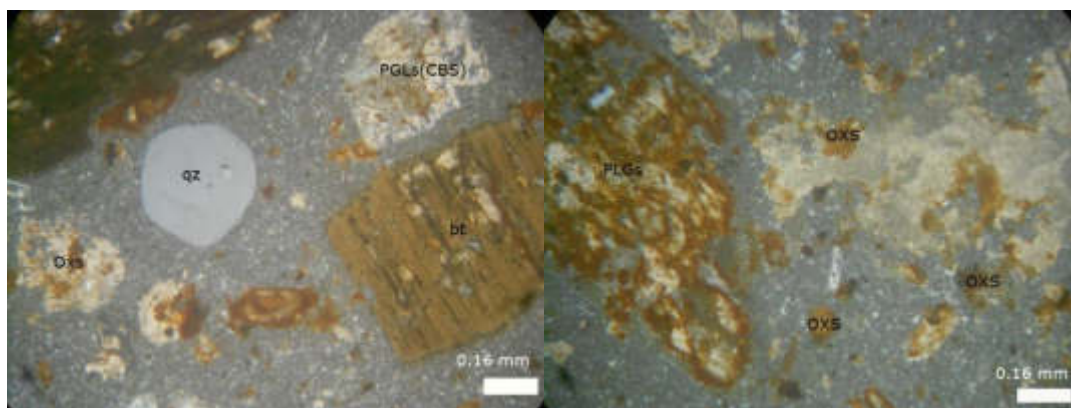


Figura 4.35. Muestra de Dacita Porfirítica, vista al microscopio.

4.2.2.14. M16

Roca volcánica de textura porfídica. Formado por anfíboles sericitizados en una matriz criptocristalina con microlitos orientados. Presencia de anfíboles en una matriz criptocristalina con moldes de anfíboles reemplazados por cloritas.

Clasificación: Andesita porfídica

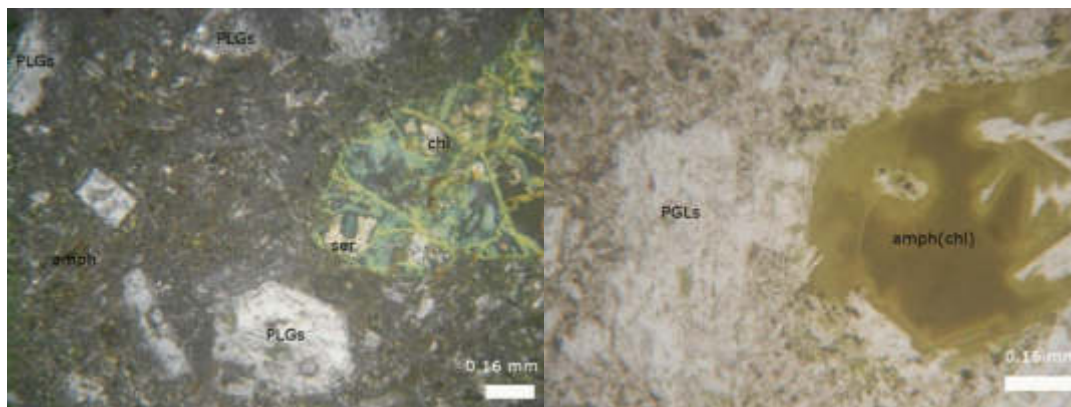


Figura 4.36. Muestra de Andesita Porfirítica, vista al microscopio.

4.2.2.15. M3

Roca volcánica piroclástica de textura fragmental. Formado por fragmentos de vidrio y cuarzo en una matriz constituida esencialmente por vidrio volcánico relíctico desvitrificado y/o alterado a cuarzo II y material arcilloso, posible presencia de hematita con óxidos.

Clasificación: Toba Lítica

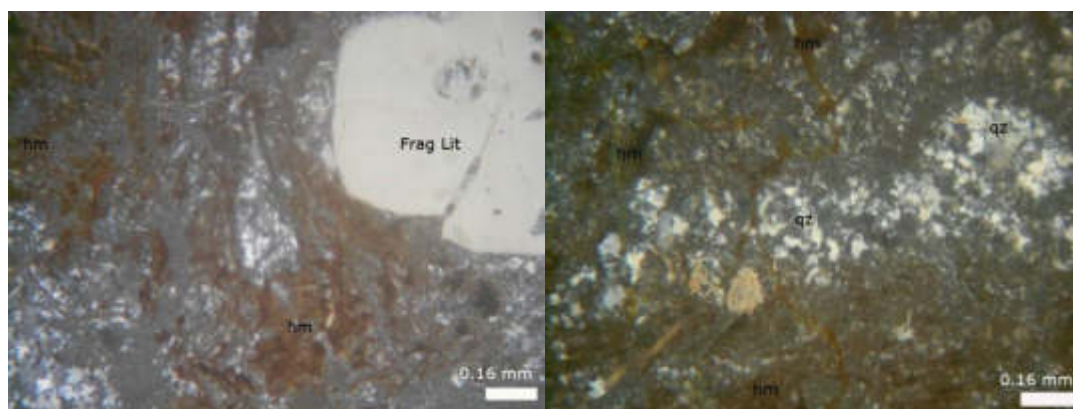


Figura 4.37. Muestra de Toba Lítica, vista al microscopio.

4.2.3. Geología económica del área

El área regional de esta tesis, así como en el resto del departamento de Ancash, posee una gran cantidad de yacimientos mineros. La mayoría de los depósitos metálicos presentes tiene preferencia por las rocas volcánicas a manera de *breccia pipe*, rellenos de fracturas *stock work*, que contienen valores comerciales de Pb, Zn, Ag, Au, Sb, Mo (Sánchez, A., 1996).

4.2.3.1. Gran y mediana minería

El ingeniero César Vilca mencionó que la cordillera Negra posee más potencia en Ag y polimetálicos que la Blanca, la cual es más rica en oro; esto lo expresó mediante una conversación vía Zoom, el 30 de mayo de 2020. En las rocas sedimentarias, se reconocen minerales de Pb, Zn, Ag, Cu y trazas de oro (Sánchez, A., 1996). La mineralización habría migrado a través de fallas translitosféricas (profundas), relacionadas a cuerpos subvolcánicos e intrusivos; estos fueron emplazados con posterioridad a la acumulación y deformación de rocas cretáceas y, en muchos casos, después del grupo Calipuy (Sánchez, A., 1996).

Por su parte, Palacios (2012) mencionó que la mina Adriana pertenece a la empresa minera Shuntur, ubicada en el distrito de Pira, en el departamento de Ancash. La concesión minera abarca un área de 600 hectáreas, y el manto estructural corresponde a varias fallas gravitacionales; así, el control estructural se debe a dos grandes fallas escalonadas. Los minerales de mena son: Cu, Fe, Zn, Pb y Au.

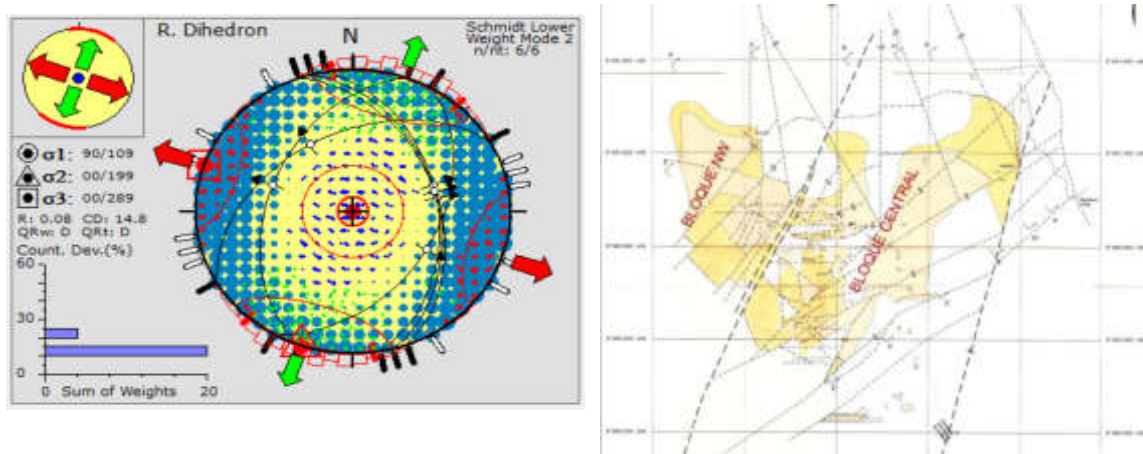


Figura 4. 38. Orientación de Esfuerzos elaborado por el autor y Mapa Estructural de la Mina Adriana, tomado de Palacios (2012).

Igualmente, Geldres (2019) refirió que la mina Anita, de la Compañía Minera Parón, ubicada a 300 km al norte de la ciudad de Lima, en la provincia de Carhuaz, es un yacimiento epitermal. Esto quiere decir que las estructuras que canalizan los fluidos mineralizantes son fallas normales, márgenes de grabens, unidades clásticas gruesas de relleno de fosas de calderas, fracturas radiales y diques en anillo. Los minerales de mena son Au, Ag, Cu, Fe y Zn.

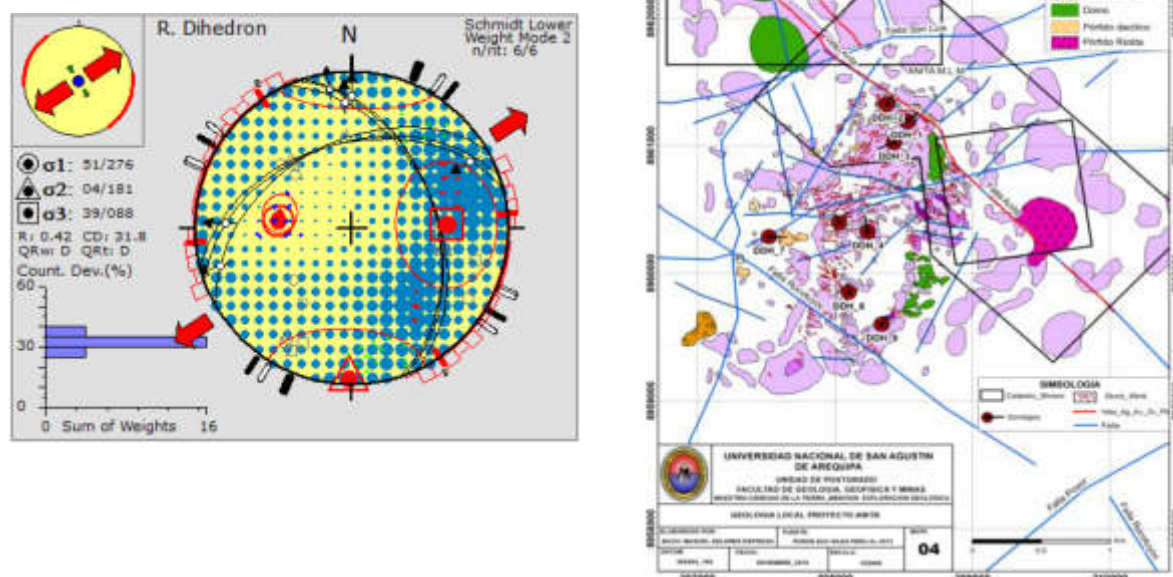


Figura 4.39. Orientación de Esfuerzos elaborado por el autor y Mapa Estructural de la Mina Anita, tomado de Geldres (2019).

Asimismo, Carrasco (2017) mostró referencias en su trabajo de tesis, realizado en la mina Huinnac, la cual se ubica en el distrito de La Merced, provincia de Aija. Los alineamientos de las fallas indican esfuerzos de compresión casi E-W, asociada con una distensión NE-SW. La mineralización es polimetálica, principalmente de sulfuros como Pb, Ag, Fe y Cu.

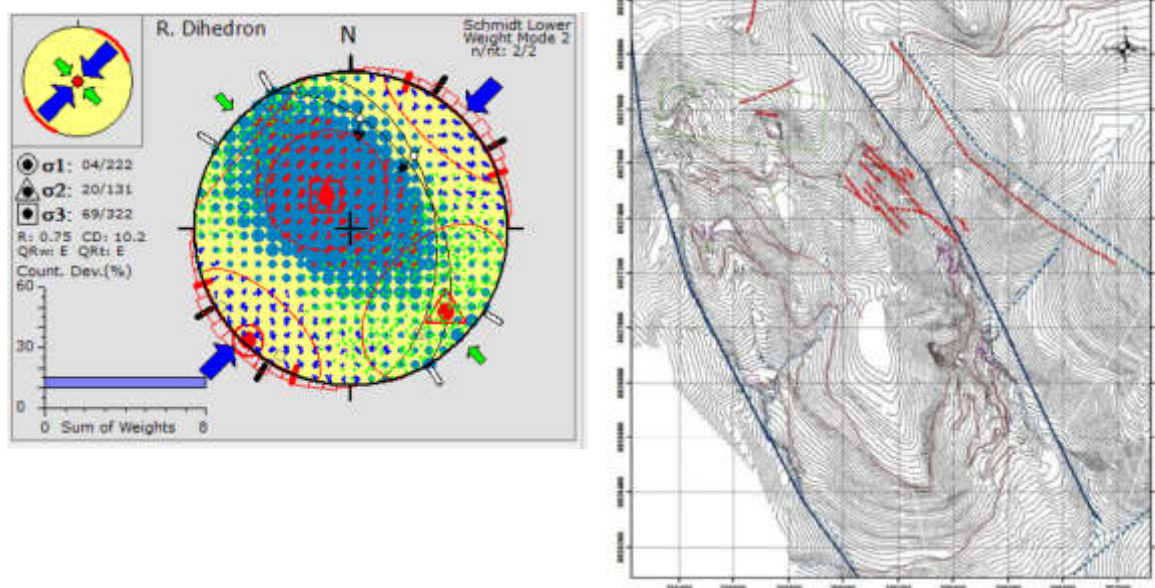


Figura 4. 40. Orientación de Esfuerzos elaborado por el autor y Mapa Estructural de la Mina Huinac, tomado de Carrasco (2017).

Por otra parte, De la Costa (2016) realizó una tesis en la mina Huncapeti de la empresa minera Lincuna, la cual se encuentra en el distrito de Aija; este señaló que el sistema posee una dirección predominante NW-SE. En el sistema, se han generado fallas normales secundarias subparalelas, con orientaciones NE-SW y NW-SE y con buzamiento casi subvertical. La mineralización es polimetálica de Ag, Pb y Zn.

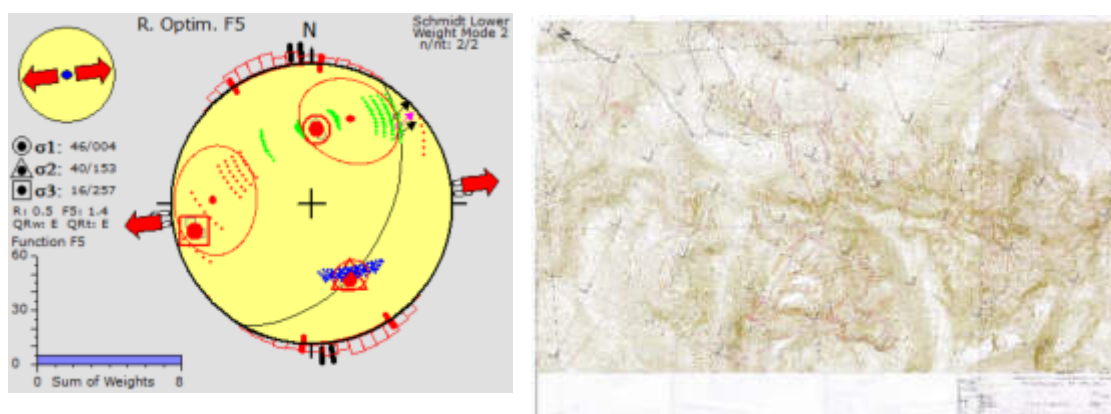


Figura 4.41. Orientación de Esfuerzos elaborado por el autor y Mapa Estructural de la Mina Huacapeti tomado de De la Costa (2006).

Según la tesis de maestría de Manrique (2010) sobre el yacimiento de la mina Pierina, la cual se encuentra ubicada en el distrito de Jangas, en la provincia de Carhuaz, este es de tipo epitermal de alta sulfuración de Au y Ag. La geodinámica interna ha permitido la formación del sistema de fallas regionales Katty, Roxana y Tinyash, que originaron, de forma alternada, sistemas de fallas inversas, tensionales y de rumbo; así, la mineralización se dio a través de las fallas de cizalla.

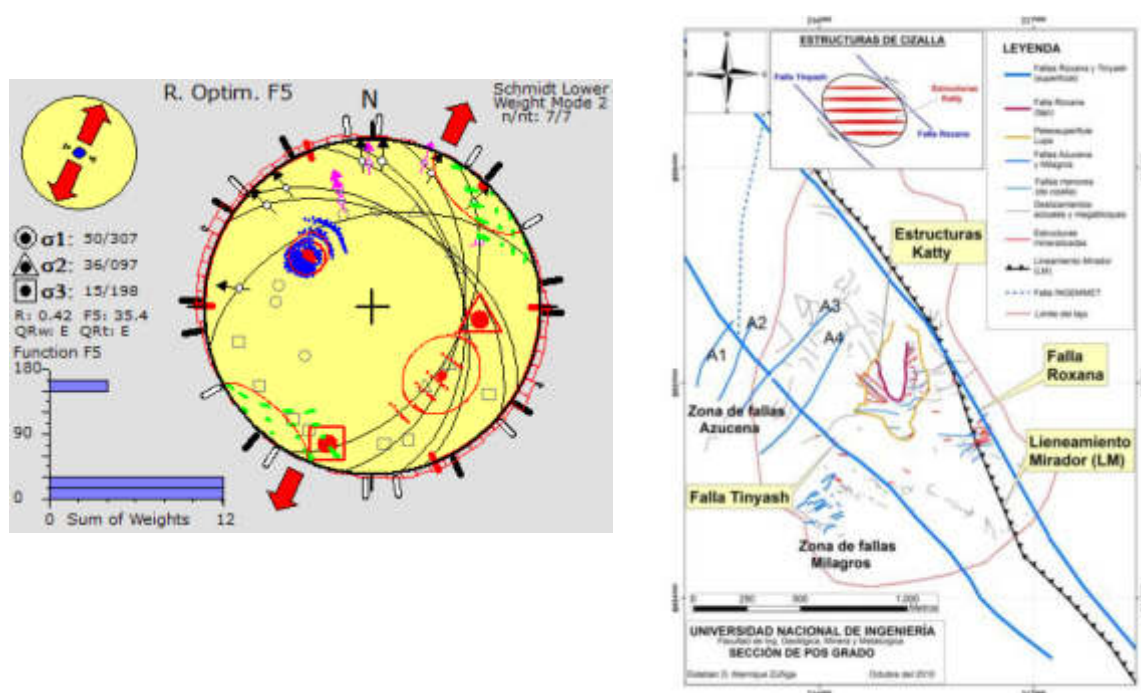


Figura 4.42. Orientación de Esfuerzos elaborado por el autor y Mapa Estructural de la Mina Pierina, tomado de Manrique (2010).

Por otro lado, Caycho (2019) realizó una tesis en la que menciona al yacimiento Santo Toribio, en el que indicó que este es epitermal indiferenciado y se encuentra emplazado en lavas andesíticas. De la misma manera, posee un sistema de fallas de cinemática sinistral.

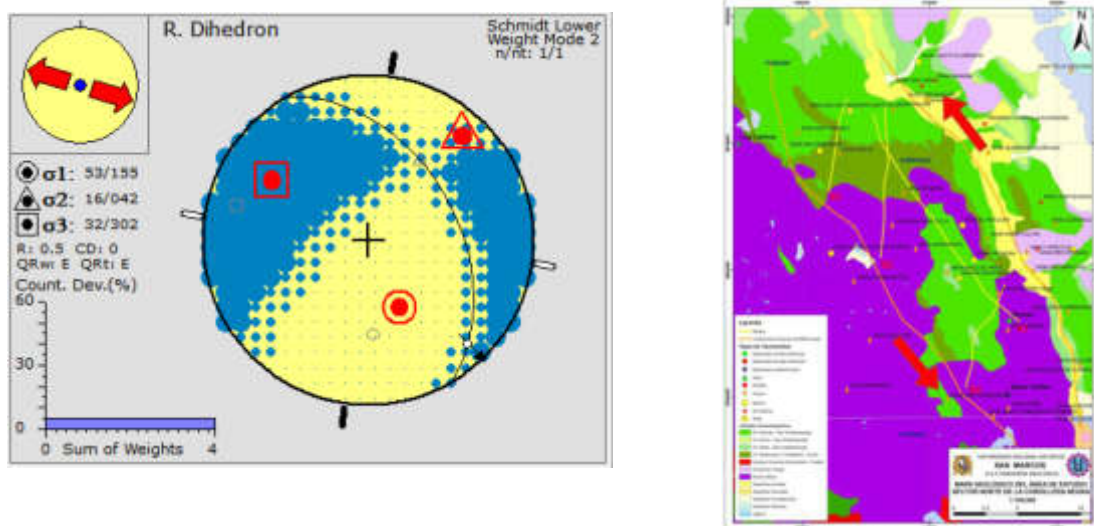


Figura 4.43. Orientación de Esfuerzos, elaborado por el autor y Mapa Estructural de la Mina Santo Toribio, tomado de Caycho (2019).

4.2.3.2. Pequeña minería y minería artesanal

En el Perú, la pequeña minería y la minería artesanal se han masificado por una combinación de supervivencia y oportunidad (San Martín, 2018). Esta última constituye una importante actividad en la región Ancash (Arcos, 2019). Durante el desarrollo de este trabajo, se ubicaron 26 minas artesanales dentro del área, las cuales se observan en el mapa de configuración tectónica, en el *plano KZ2016 – GEO – 004*. Las fuentes para elaborar dicho listado fueron la página de Osinergmin¹⁸, el repositorio de Ingemmet¹⁹ y el repositorio del Instituto Mineralógico de Hudson²⁰.

Según Arcos (2019), en un boletín de Ingemmet acerca de las minas artesanales San Jorge y Bienvenida, se observa el emplazamiento de un stock granodiorítico, donde se evidencian las secuencias volcánicas del grupo Calipuy. Bajo control estructural E-O, se han emplazado vetas hidrotermales, a fin de rellenar fallas en la zona de contacto entre los

¹⁸ www.osinergmin.gob.pe

¹⁹ <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2240>

²⁰ <https://www.mindat.org/feature-3692405.html>

intrusivos y los volcánicos. Los minerales que se extraen son covelita, bornita, calcopirita y galena; y para las minas de Lliplli y de Virgen de Cocharcas, se señaló que las estructuras mineralizadas tienen una tendencia de E-O.

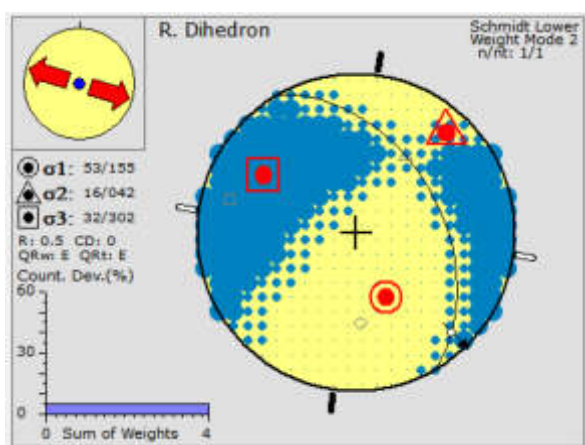


Figura 4.44. Orientación de Esfuerzos elaborado por el autor y Foto de San Jorge tomado de Arcos (2019).

Capítulo 5

RESULTADOS

5.1 Lineamientos Estructurales

Dentro del área regional del proyecto de tesis, se desarrolló el análisis y la interpretación preliminar de lineamientos estructurales, los cuales se corroboraron en la etapa de campo para considerarse como fallas geológicas, de acuerdo con las evidencias encontradas.

En el área regional, se identificaron tres tipos de lineamientos estructurales, teniendo en cuenta la longitud de estos para su clasificación, así como la longitud mínima promedio de las estructuras mostradas en el mapa geológico de Huaraz escala 1: 100 000.

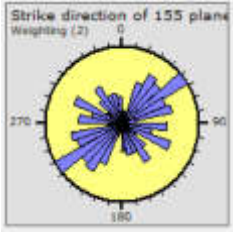
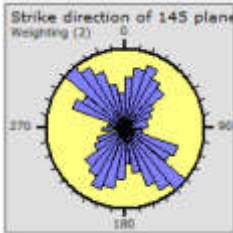
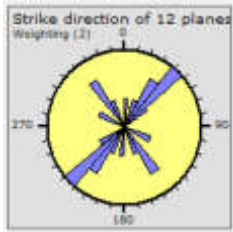
Los lineamientos de primer orden, o primarios, presentaron mayor longitud, pues alcanzaron valores de hasta 19 km. Asimismo, se identificaron 155 lineamientos; estos presentaron orientaciones NE-SW, NW-SE, las cuales variaron ligeramente a W-E. La mayoría de estos lineamientos se comprobaron en campo y se interpretaron como áreas de alta intensidad tectónica, descritas ahora como fallas geológicas.

Los lineamientos de segundo orden, o secundarios, presentaron longitudes variables, las cuales fueron desde 1 km hasta los 3 km; en total, se identificaron 145 lineamientos estructurales, que presentaron orientaciones NW-SE y NE-SW. Estos también fueron reconocidos en el campo, y la unión de un buen porcentaje de ellos se describe ahora como una falla geológica o como una zona de influencia de las fallas regionales, lo que coincide con los de primer orden.

Los lineamientos de tercer orden, o terciarios, presentaron longitudes variables, hasta los 0,95 km. Igualmente, se identificaron 12 lineamientos con orientaciones NE-SW, las

cuales variaron a NW-SE; estas se asocian preferentemente a vetas y fallas locales (para mayor detalle, ver Tabla 5.1.).

Tabla 5 .1 *Resumen de Orientaciones.*

<i>Orden</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Longitud</i>	<i>Orientación</i>	<i>Diagrama de Rosas</i>
Primer Orden	155	> 3 km	NE-SW, NW-SE	
Segundo Orden	145	1 – 3 km	NW-SE y NE-SW	
Tercer Orden	12	< 1 km	NE-SW y NW-SE	

5.2 Fallas

Durante las labores de mapeo estructural, se identificaron los principales sistemas de fallas, asociados a la deformación tectónica, así como tres sistemas de falla principales. Los afloramientos más importantes están constituidos por rocas ígneas volcánicas e intrusivas que penetraron a lo largo de las zonas débiles en la roca, como fallas y fracturas y rocas sedimentarias. A continuación, se describen las características de los cuatro sistemas principales de las fallas identificadas.

5.2.1 Fallas NW a N

El sistema principal, asociado con la falla regional de la cordillera Blanca, se encuentra ubicado al este del área regional y posee una cinemática de tipo normal, con cierto componente sinistral. Este sistema incluye las fallas que mineralizan los yacimientos de Pierina, Santo Toribio, San Luis, Soledad, Lincuna y San Judas Tadeo.

5.2.2 Fallas E-W

Este sistema de fallas está asociado a la falla regional Pira - Quilcay, que coincide con el trazo de la carretera Huaraz - Casma; dichos sistemas son de tipo normal y atraviesan la ciudad de Huaraz. Este incluye las fallas que mineralizan los yacimientos de Adriana, Bienvenida, San Jorge, Pachapaqui y Huáscar; además, se encuentra relacionado con la inestabilidad en ciertos puntos de la carretera.

5.2.3 Fallas NE

Este sistema se puede observar dentro del área local al cortar la carretera Huaraz - Casma; es de tipo normal, con componente dextral en su mayoría. En este sistema, se incluyen las fallas secundarias asociadas a los dos sistemas anteriores.

5.3. Procesamiento y Análisis de Fallas

Los datos estructurales de fallas se agruparon en tres zonas: una este, una central y una oeste, según su ubicación.

5.3.1. Sector Este

Se procesaron las fallas contenidas en este sector, lo cual sugiere un tensor con orientación de 354/62 para el ρ_1 , 113/15 para ρ_2 y 210/23 para ρ_3 .

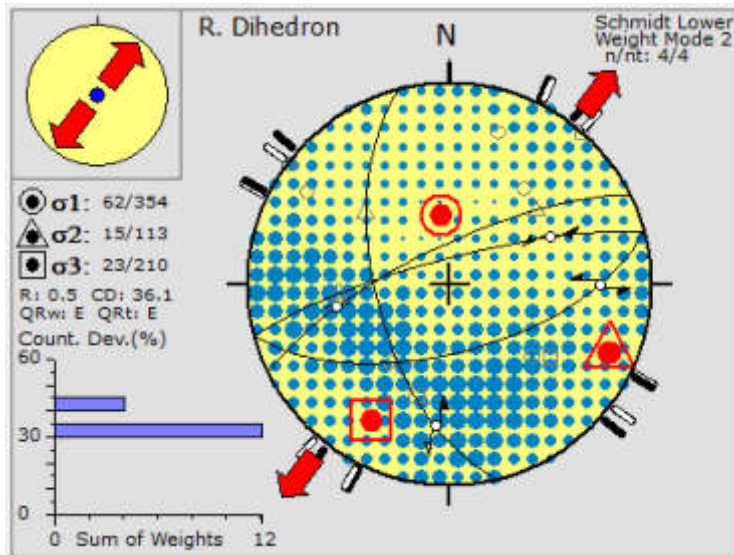


Figura 5.1. Se muestra el procesamiento de las fallas del sector Oeste.

5.3.2. Sector Centro

Se procesaron las fallas contenidas en este sector, lo cual sugiere un tensor con orientación de 238/77 para el ρ_1 , 080/12 para ρ_2 y 349/04 para ρ_3 .

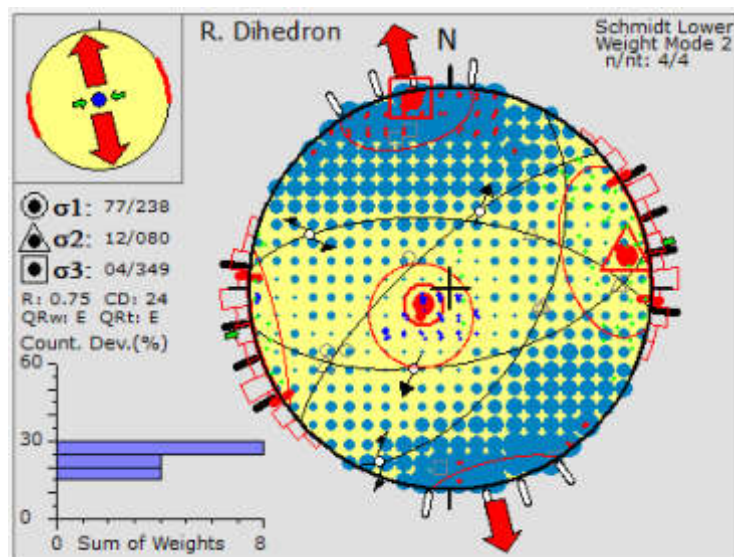


Figura 5.2. Se muestra el procesamiento de las fallas del sector Centro.

5.3.3. Sector Oeste

Se procesaron las fallas contenidas en este sector, lo cual sugiere un tensor con orientación de 089/66 para el ρ_1 , 233/24 para ρ_2 y 324/02 para ρ_3 .

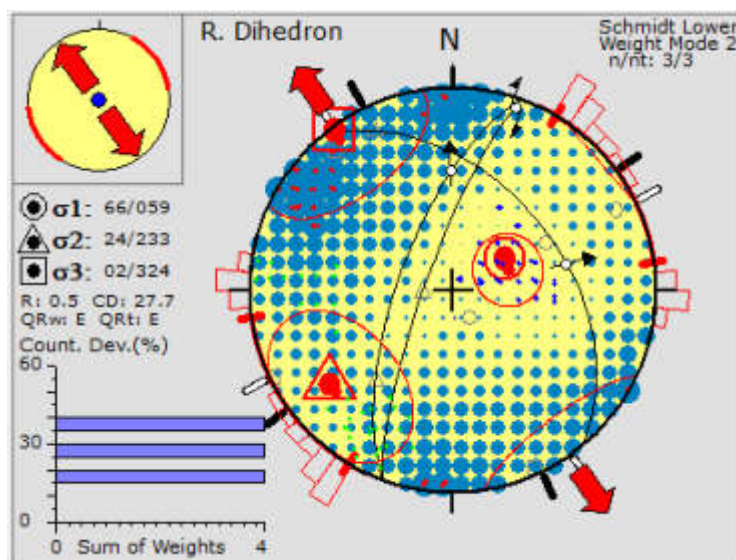


Figura 5.3. Se muestra el procesamiento de las fallas del sector Centro.

5.4 Fracturamiento

Tales estructuras están ligadas a la deformación del macizo rocoso o afloramiento generado por esfuerzos de tracción y compresión, es decir, los sistemas de falla principales. En esta etapa del estudio, se realizó el análisis en conjunto de los datos estructurales, se registraron las fallas regionales, los sistemas de diaclasas y se realizó un análisis estadístico de toda la información mediante el *software* Win Tensor (Delvaux & Sperner, 2003. Tensor de tensiones de inversión de fallas indicadores cinemáticos y focales de datos mecanismo: el programa TENSOR. En: Nuevos conocimientos sobre la interpretación *online* estructural y Modelado; D. Nieuwland Ed. Geological Society, Londres, Publicaciones Especiales, 212: 75-100).

El motivo por el cual se utilizó este programa es la facilidad con la que permite realizar los análisis estadísticos de la totalidad de datos estructurales, lo que, a su vez, permite visualizar diagramas de concentración de polos, planos de discontinuidades principales, círculos de Morh y diagramas de rosas. Dichos diagramas se han elaborado a partir de los datos registrados durante el mapeo geológico estructural y son presentados en el ***plano KZ2016 - GEO - 008***.

5.5 Dominios estructurales

Para definir los dominios estructurales del área de tesis, en primer lugar, se identificaron los contactos litológicos que sirvieron como límites preliminares. Posteriormente, se registraron los datos estructurales mediante el mapeo y se agruparon las estructuras que presentaron características similares.

Los límites de los dominios estructurales son determinados, finalmente, donde las orientaciones de las principales estructuras tienden a cambiar. Para la interpretación estructural de los datos evaluados, se utilizó el estereograma equiareal de Schmidt, que representa adecuadamente la distribución espacial de todos los datos registrados.

De la interpretación de la data de campo obtenida en el área de tesis, se identificaron ocho dominios estructurales, bien diferenciados. En el ***plano KZ2016 - GEO - 008***, se observan los dominios estructurales, los cuales presentan las características descritas a continuación.

5.5.1. Zona Este - Sector Este

Presenta un tensor con orientación de 135/85 para el ρ_1 , 351/04 para ρ_2 y 261/03 para ρ_3 . Para más detalle ver el plano KZ2016 - 007- A.

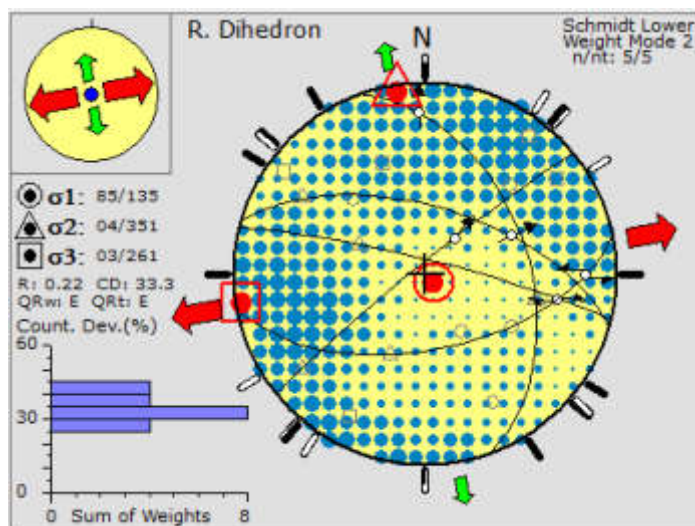


Figura 5.4. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Este - Sector Este.

5.5.2. Zona Centro - Sector Este

Presenta un tensor con orientación de 146/65 para el ρ_1 , 356/22 para ρ_2 y 261/11 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- A.

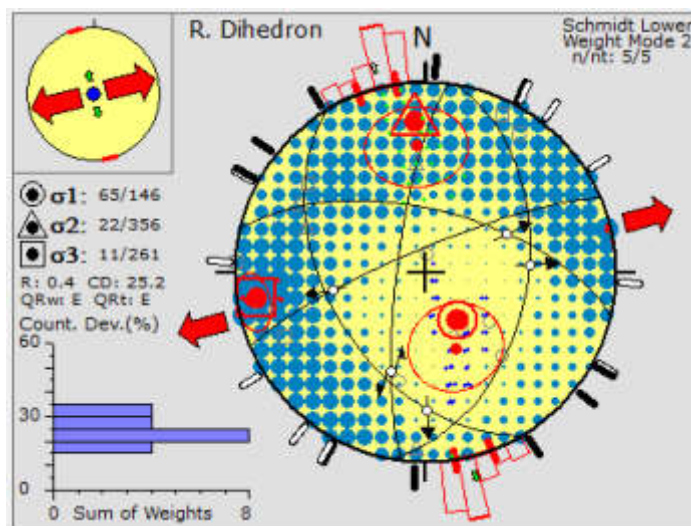


Figura 5.5. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Centro - Sector Este.

5.5.3. Zona Oeste - Sector Este

Presenta un tensor con orientación de 196/81 para el ρ_1 , 302/02 para ρ_2 y 033/09 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- A.

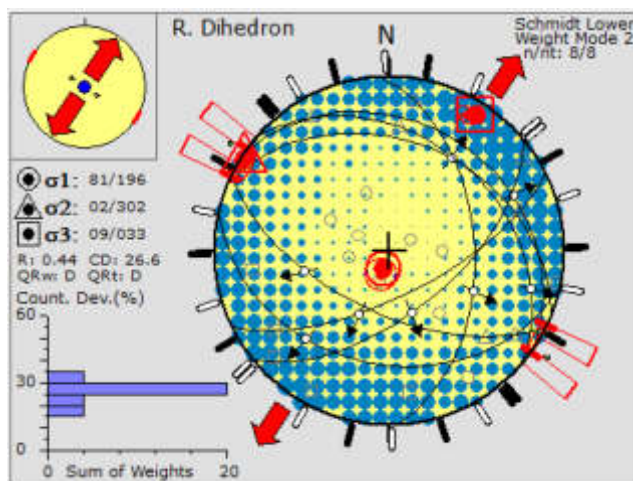


Figura 5.6. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Oeste - Sector Este.

5.5.4. Zona Este - Sector Centro

Presenta un tensor con orientación de 112/66 para el ρ_1 , 216/06 para ρ_2 y 309/23 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- B.

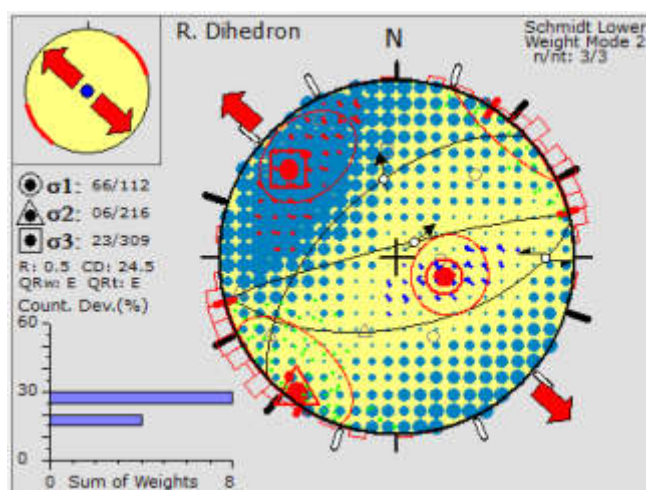


Figura 5.7. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Este - Sector Centro.

5.5.5. Zona Centro - Sector Centro

Presenta un tensor con orientación de 084/78 para el ρ_1 , 197/05 para ρ_2 y 288/11 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- B.

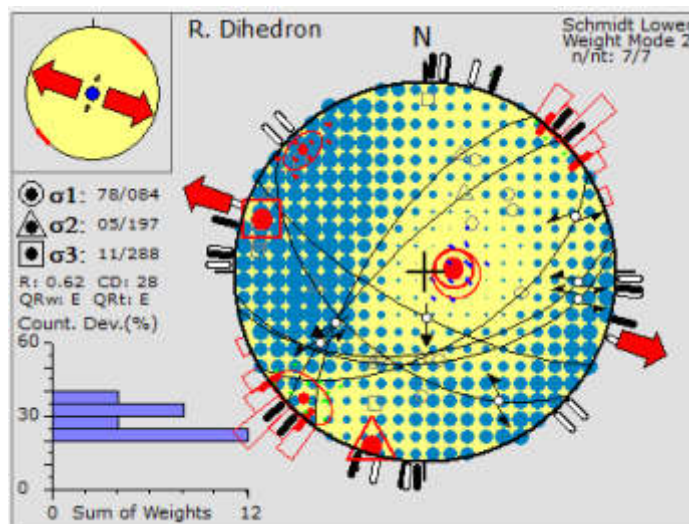


Figura 5.8. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Centro - Sector Centro.

5.5.6. Zona Oeste - Sector Centro

Presenta un tensor con orientación de 069/14 para el ρ_1 , 206/71 para ρ_2 y 335/12 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- B.

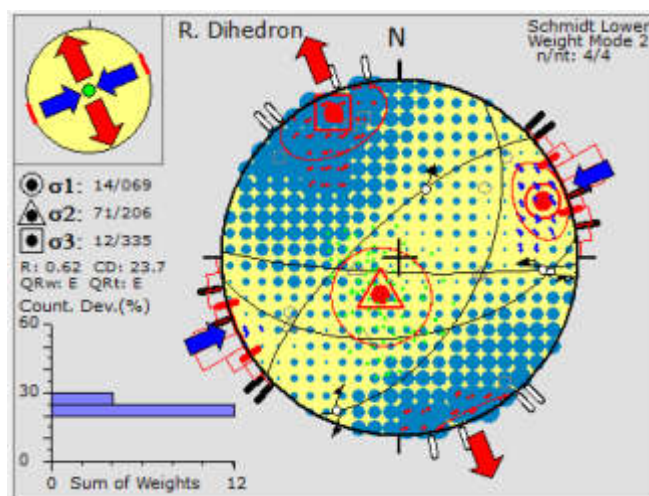


Figura 5.9. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Oeste - Sector Centro.

5.5.7. Zona Este - Sector Oeste

Presenta un tensor con orientación de 041/78 para el ρ_1 , 246/11 para ρ_2 y 155/05 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- C.

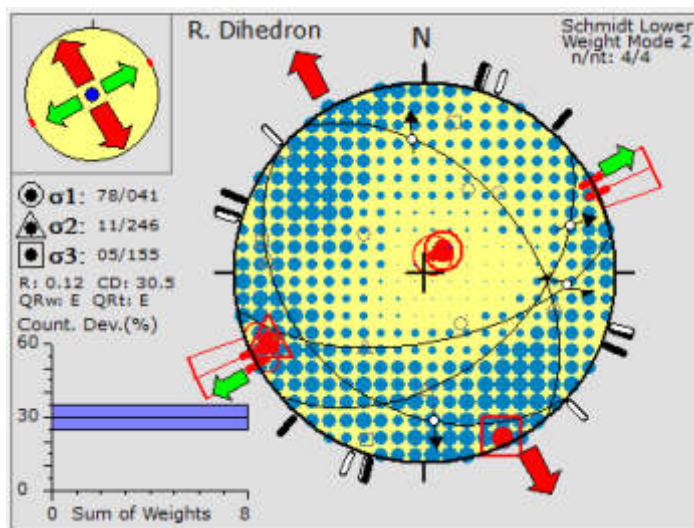


Figura 5.10. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Este - Sector Oeste.

5.5.8. Zona Oeste - Sector Oeste

Presenta un tensor con orientación de 041/78 para el ρ_1 , 246/11 para ρ_2 y 155/05 para ρ_3 . Para más detalle ver el mapa KZ2016 - 007- C.

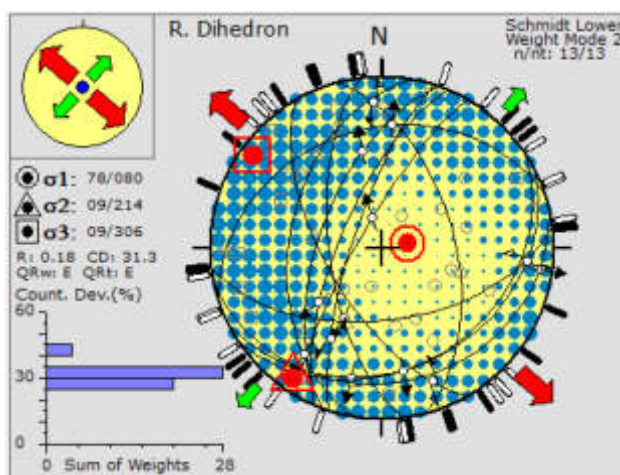


Figura 5.11. Se muestra el procesamiento de las fallas del dominio estructural Zona Oeste - Sector Oeste.

5.6 Geoquímica

Para el desarrollo de la presente tesis, se procesaron datos obtenidos por el análisis de roca total, el cual fue descargado del portal web de Ingemmet²¹. La información geoquímica de elementos mayores fue expresada en porcentaje en peso %, y se usó la norma CIPW (Kelsey, 1965 y Cox et al., 1979) para normalizar los datos. Por otro lado, para recalcular la data, ahora con base anhidra, se usaron plantillas de Excel; esto, con la finalidad de que sirva como patrón de comparación de resultados. Seguidamente, se graficaron los valores en los diferentes diagramas; para ello, se utilizaron los *softwares* GCDkit, que permiten normalizar la data con la misma norma.

Cabe indicar que también se procesaron los datos con ayuda del programa Microsoft Excel, a fin de comparar los resultados. Como fruto de este proceso, se encontró que ambos arrojaron resultados idénticos, siempre que se utilizara la misma norma.

Para la Normalización en plantillas de Excel se utilizó la siguiente fórmula :

$$\frac{\Sigma[\text{óxidos}] - [\text{volátiles}]}{[\text{óxidos}_i]} = \frac{100\%}{X_i\%}$$

Figura 5.12. Fórmula para Normalizar los Elementos Mayores. Tomado de Rivera (2014).

²¹ <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin>

5.6.1 Elementos Mayores

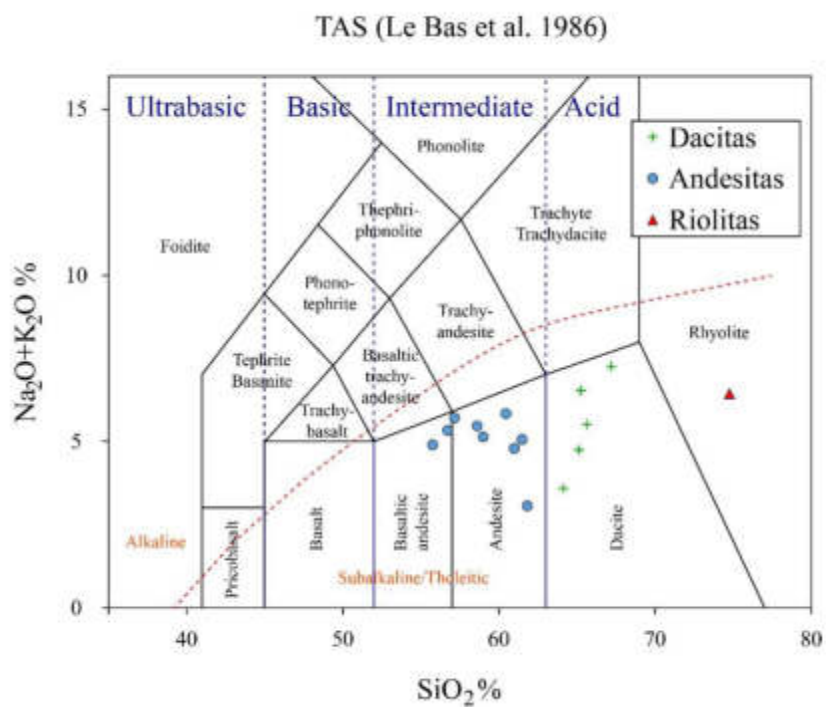


Figura 5.13. Diagrama Tas para clasificación de rocas volcánicas. Modificado de Cox (1979).

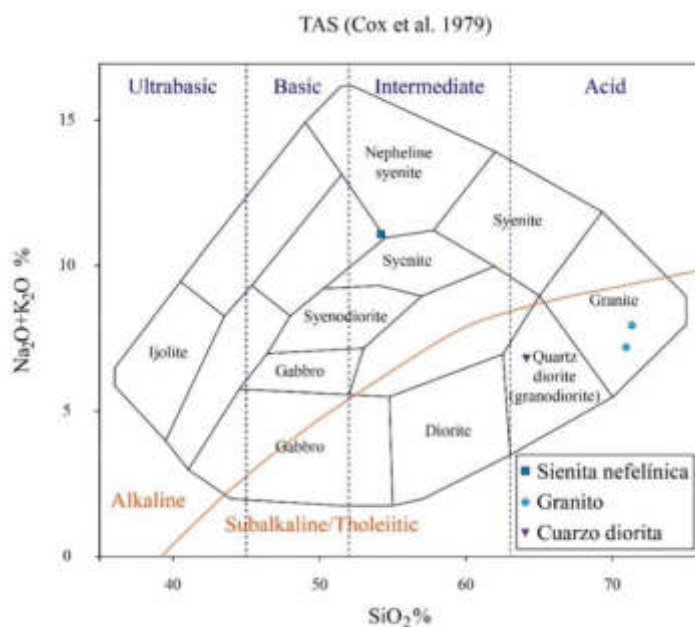


Figura 5.14. Diagrama Tas para clasificación de rocas intrusivas. Modificado de Cox (1979).

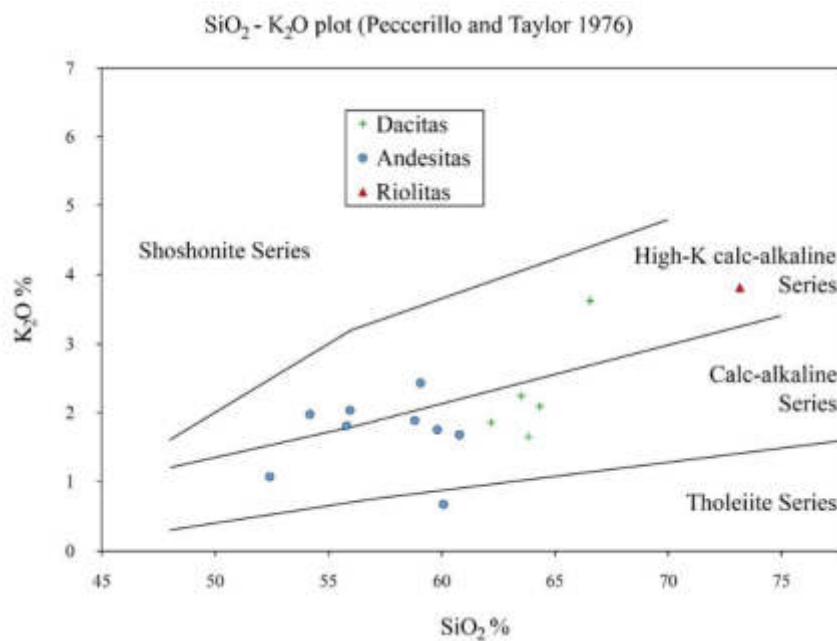


Figura 5.15. Diagrama SiO₂ vs K₂O para rocas volcánicas. Modificado de Peccerillo (1976).

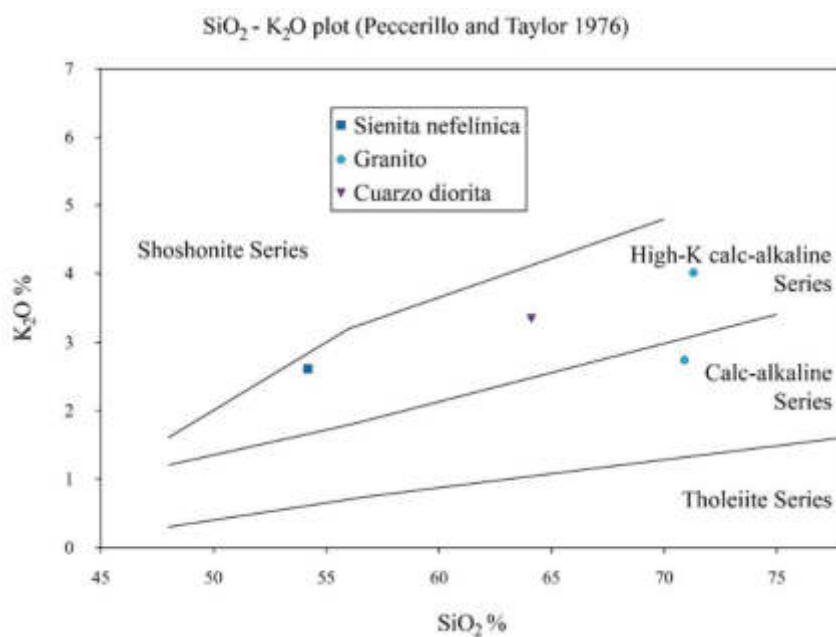


Figura 5.16. Diagrama SiO₂ vs K₂O para clasificar los álcalis en las rocas. Modificado de Peccerillo (1976).

Después de la sílice, otro componente importante es la alúmina (Rivera, 2007).

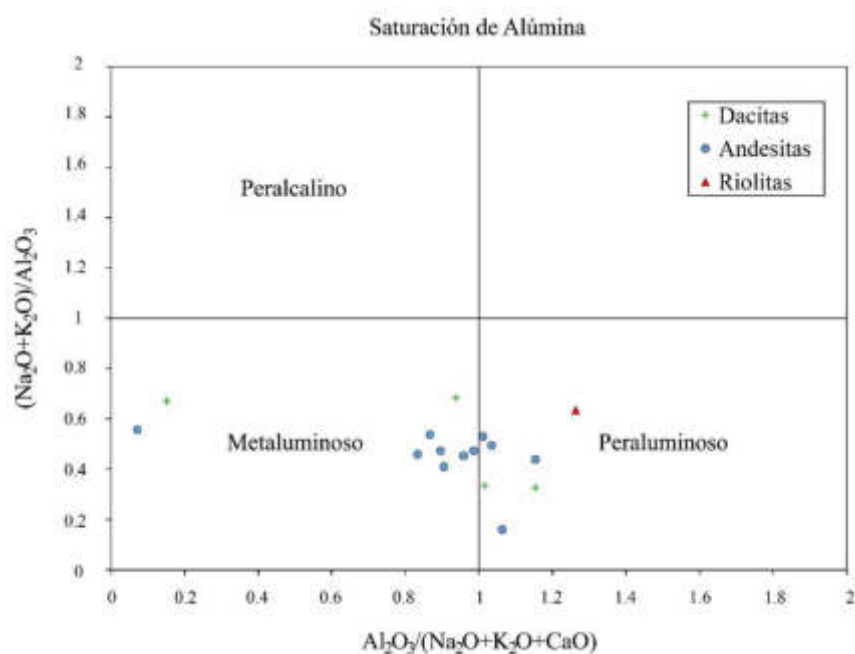


Figura 5.17. Diagrama de Saturación de Alúmina. Modificado de Rivera (2014).

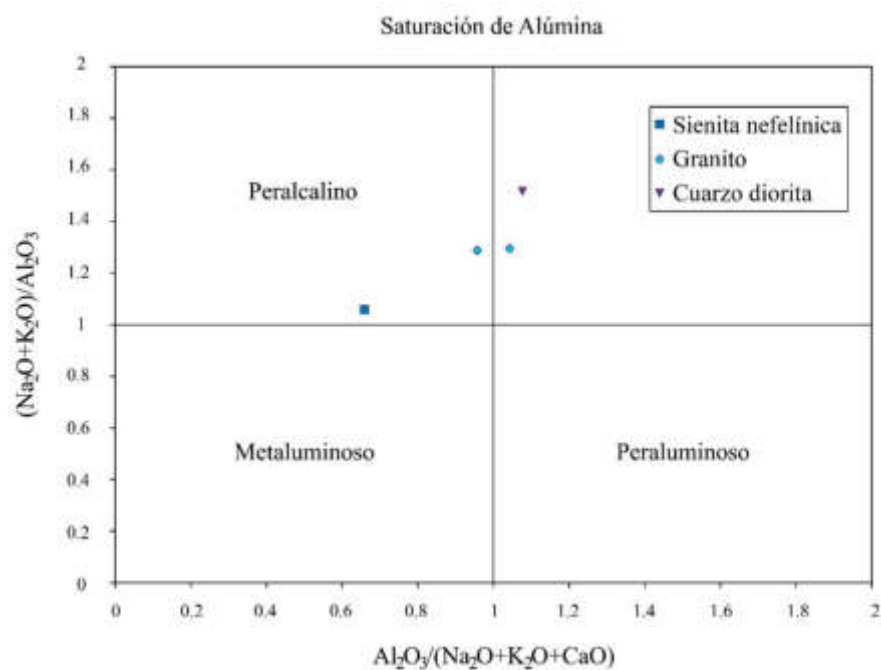


Figura 5.18. Diagrama de Saturación de Alúmina. Modificado de Rivera (2014).

6.6.2 Diagramas de tipo Harker

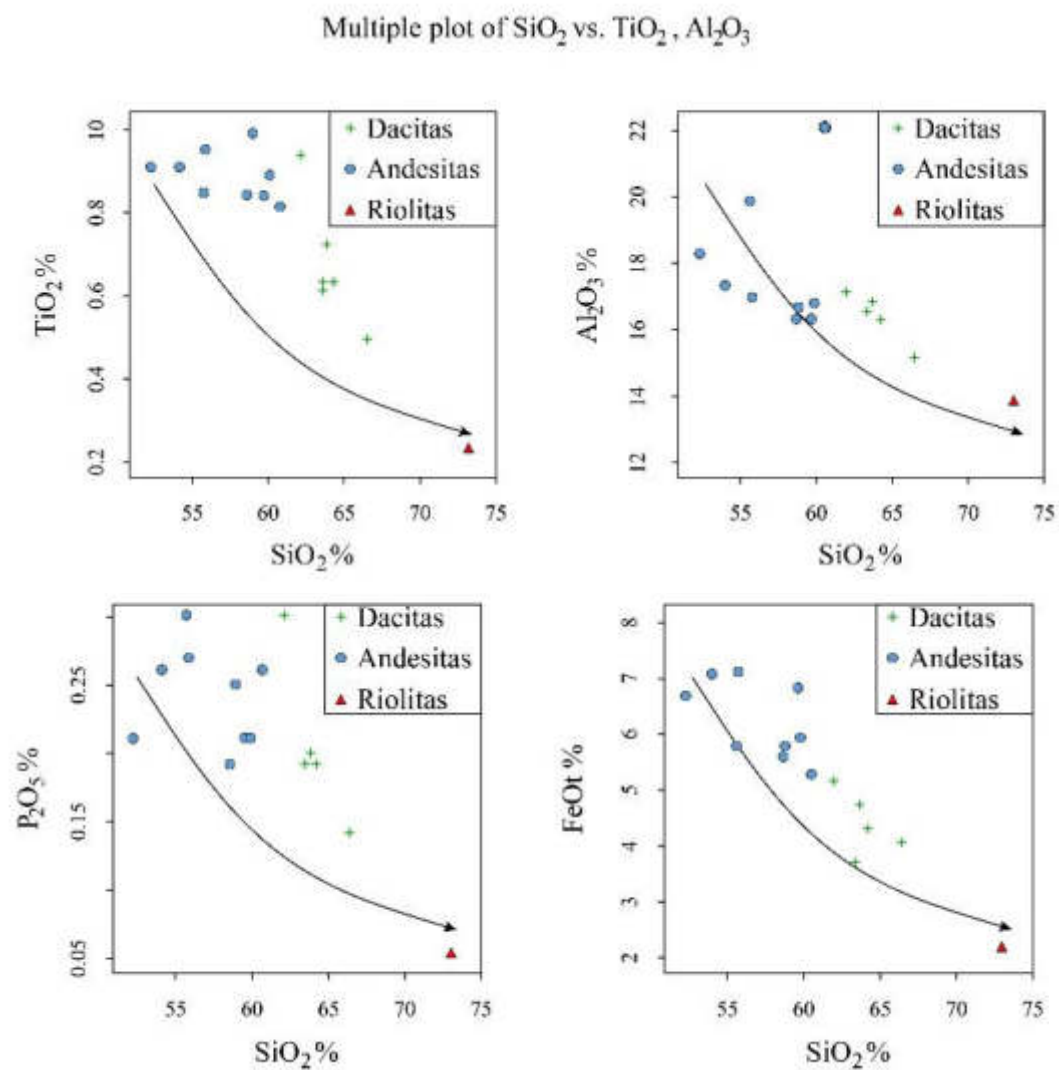


Figura 5.19. Diagrama de Harker. Modificado de Harker (1909).

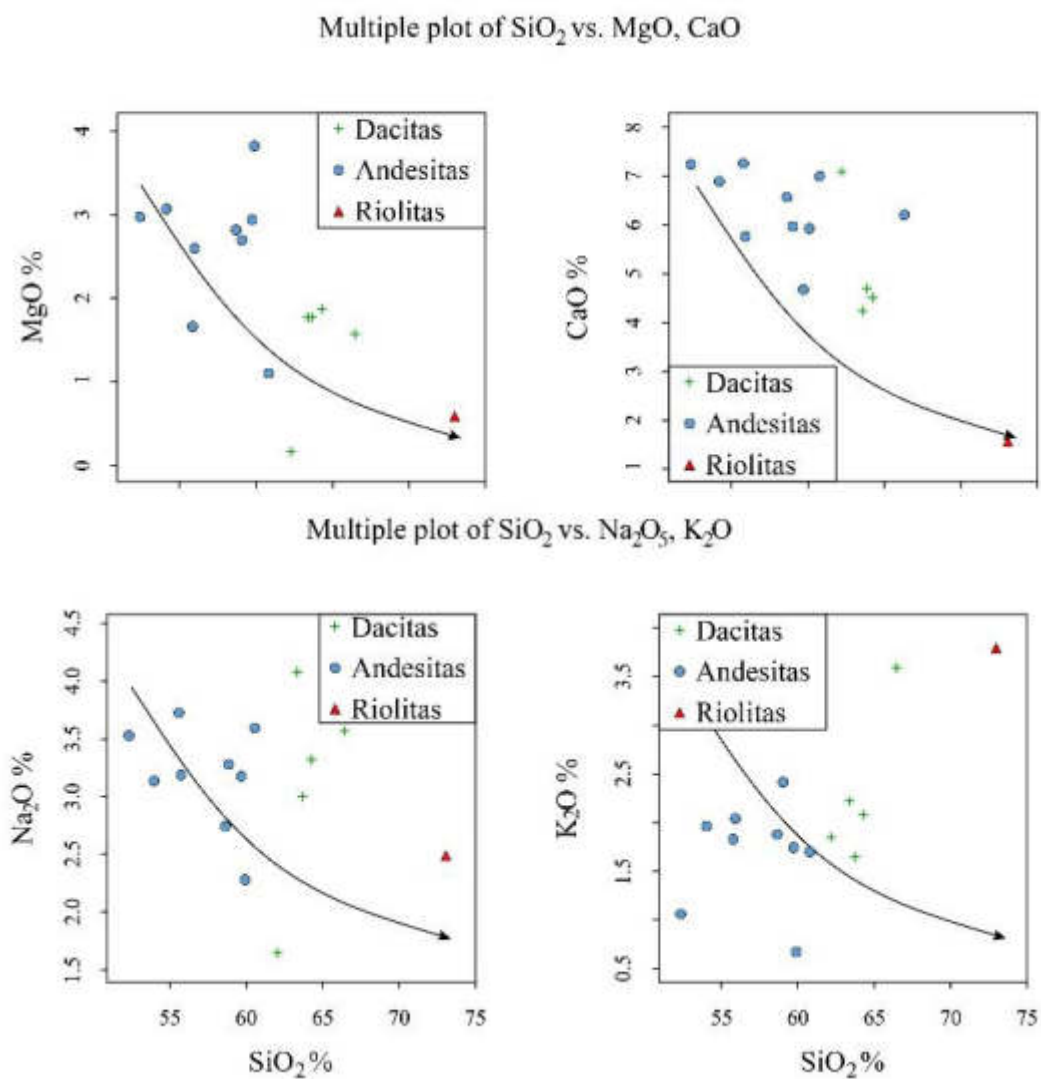


Figura 5.20. Diagrama de Harcker. Modificado de Harker (1909).

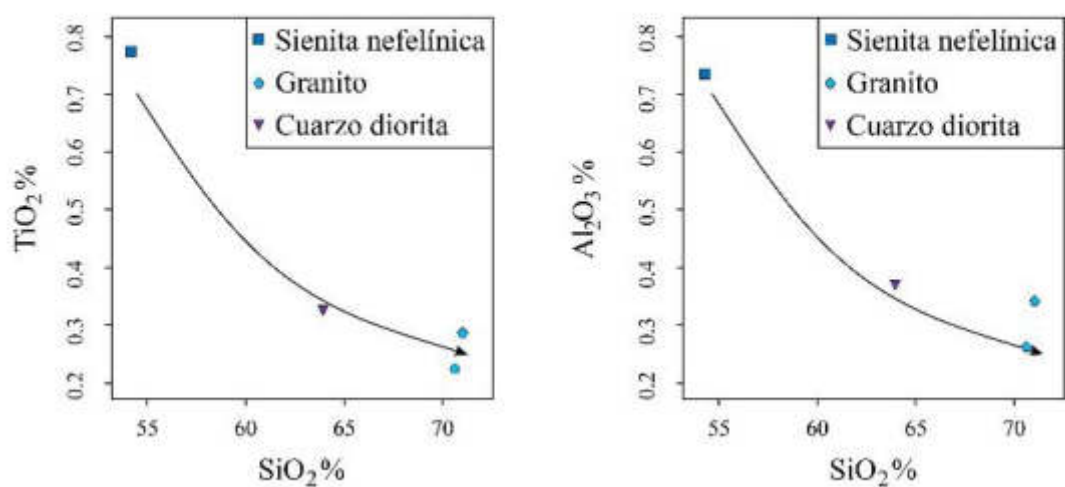
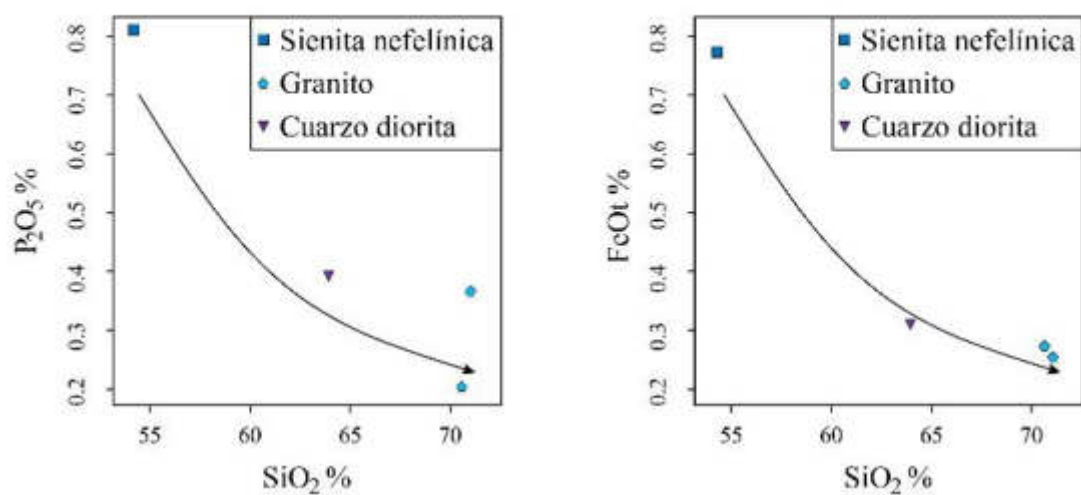
Multiple plot of SiO_2 vs. TiO_2 , Al_2O_3 Multiple plot of SiO_2 vs. P_2O_5 , FeOt 

Figura 5.21. Diagrama de Harcker. Modificado de Harker (1909).

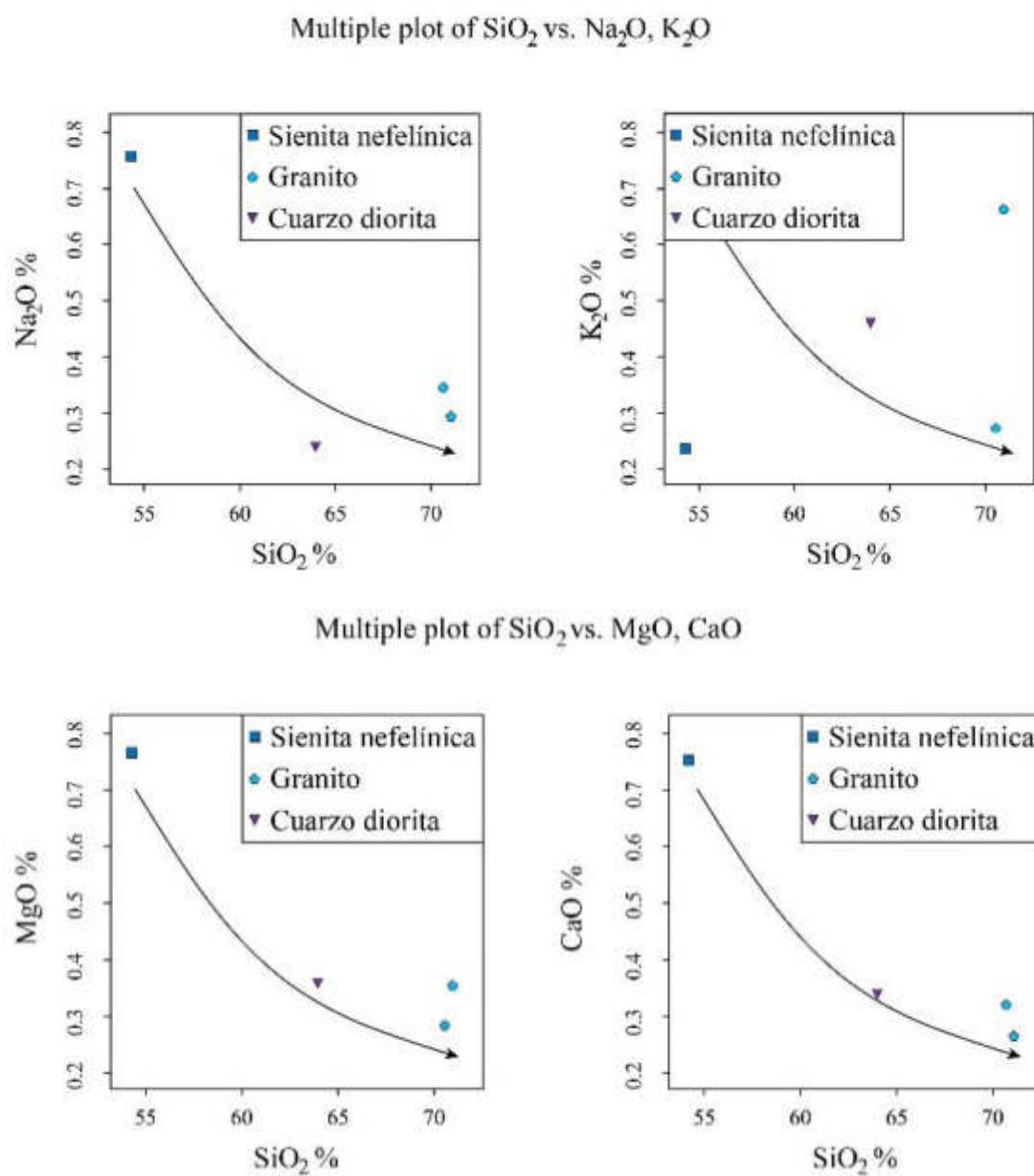


Figura 5.22. Diagrama de Harker. Modificado de Harker (1909).

6.6.3 Diagramas de Tierras Raras Normalizadas

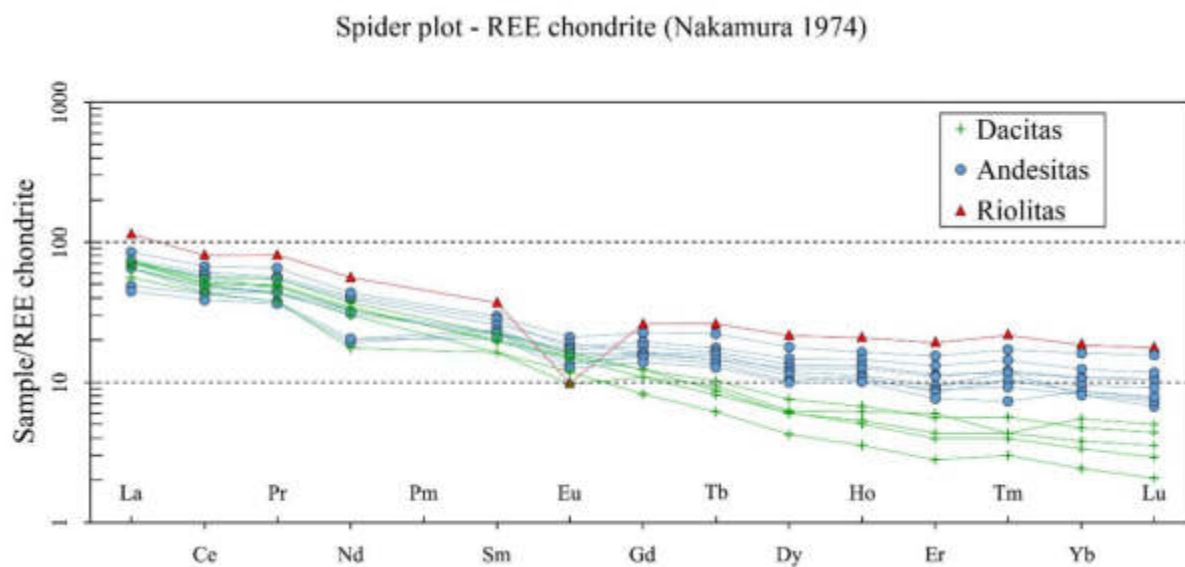


Figura 5.23. Diagrama de REE. Modificado de (Nakamura 1974).

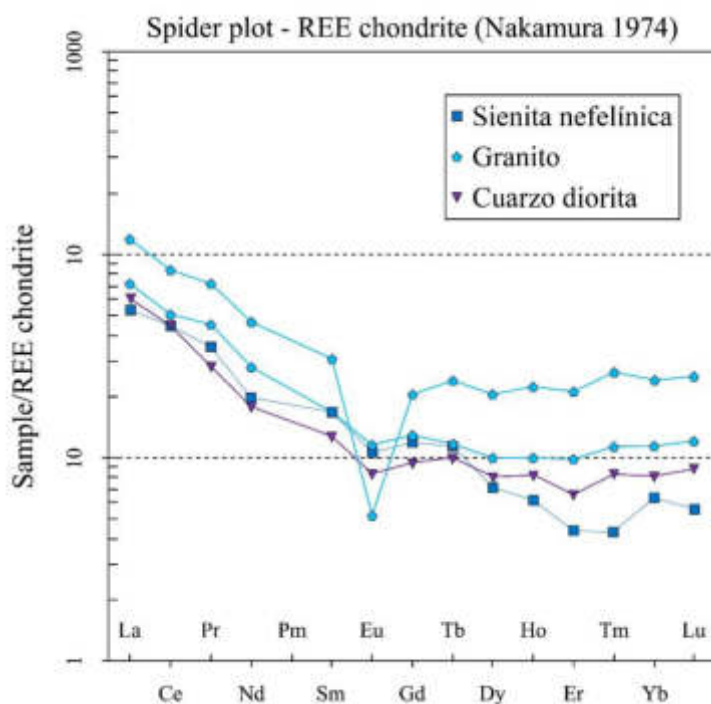


Figura 5.24. Diagrama de REE. Modificado de Nakamura (1974).

6.6.4 Diagramas de Cocientes para Elementos Traza en las rocas volcánicas e intrusivas.

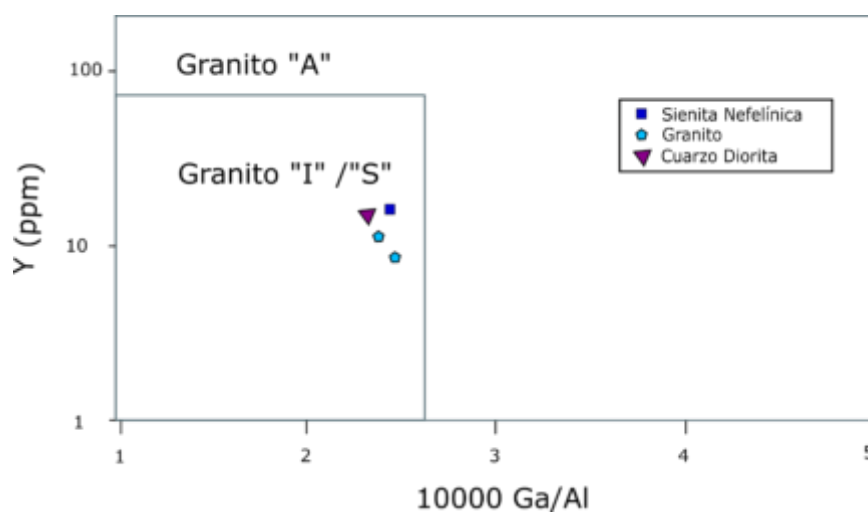


Figura 5.25. Diagrama de Whalen. Modificado de Whalen (1987).

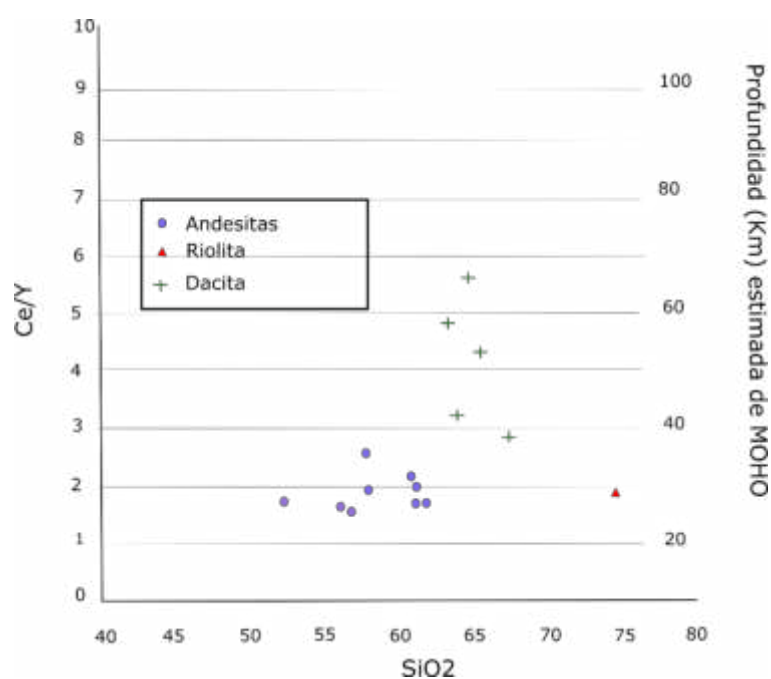


Figura 5.26. Diagrama de Cocientes Ce/Y vs SiO₂ para rocas volcánicas. Modificado de Chávez (2016).

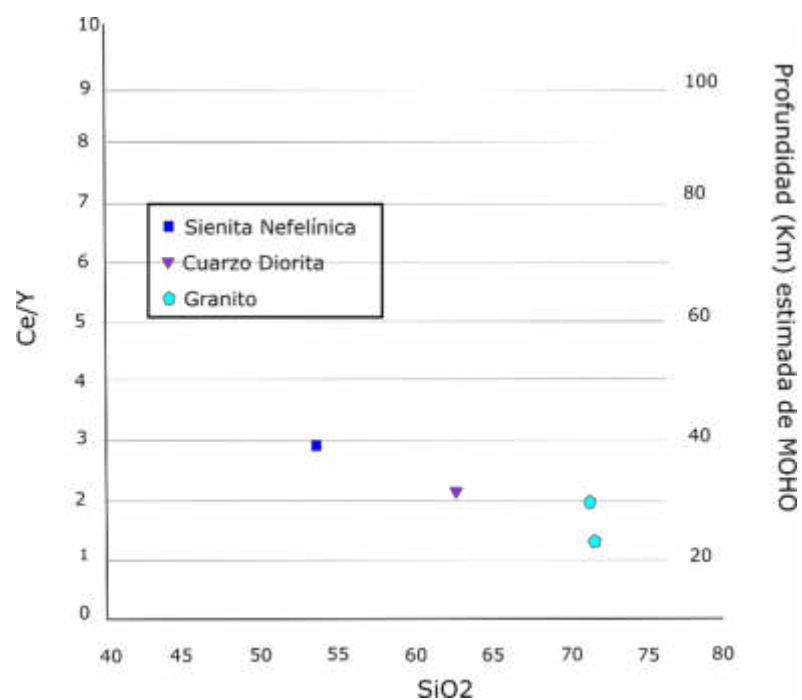


Figura 5.27. Diagrama de Cocientes Ce/Y vs SiO₂ para rocas intrusivas. Modificado de Chávez (2016).

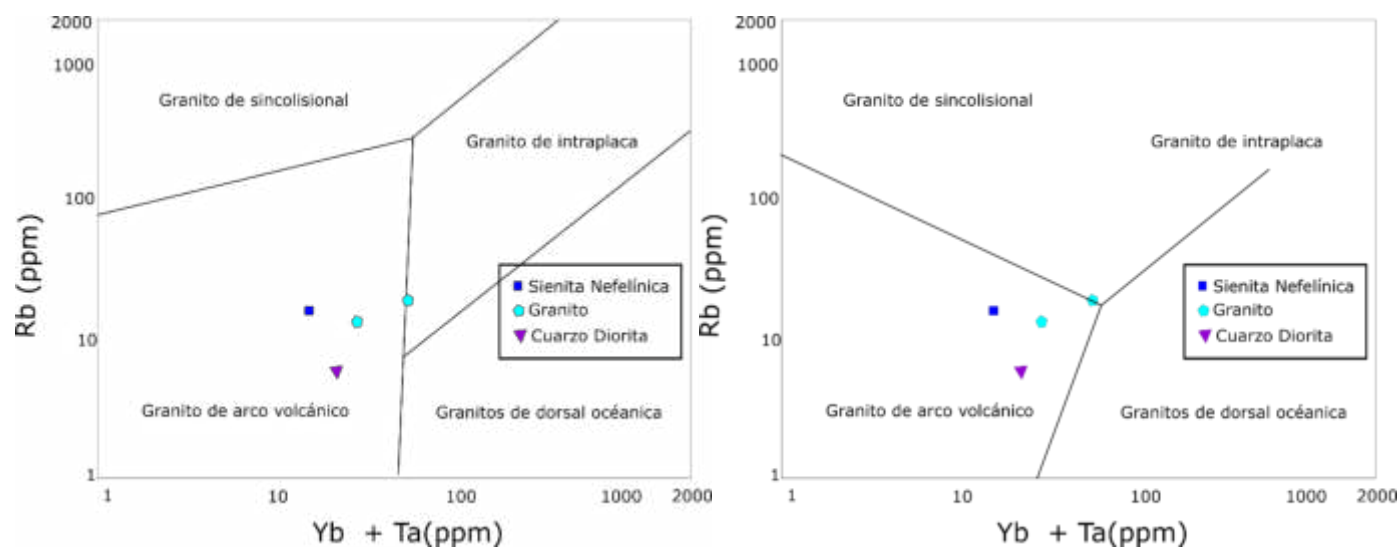


Figura 5.28. Diagrama de discriminación tectónica para rocas intrusivas Pearce. Modificado de Pearce (1984).

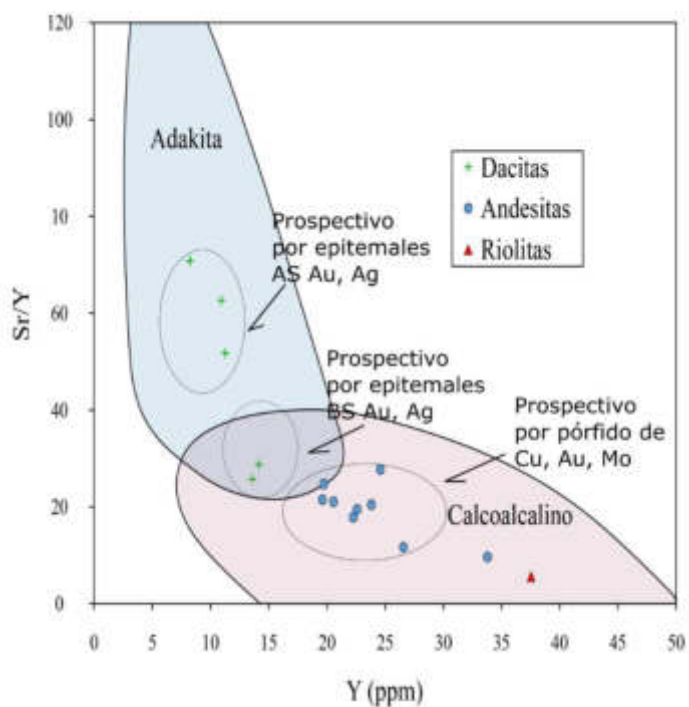


Figura 5.29. Diagrama de cocientes Sr/Y vs Y . Modificado de Drummond y Defant (1990).

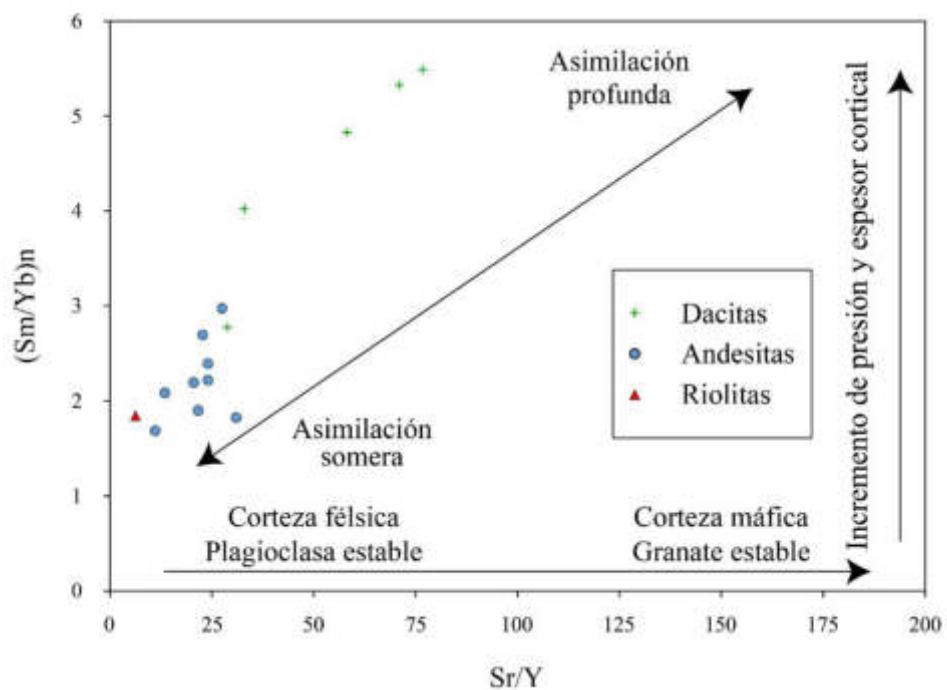


Figura 5.30. Gráfico de asimilación $(Sm/Yb)_n$ vs Sr/Y . Modificado de Pajuelo (2015).

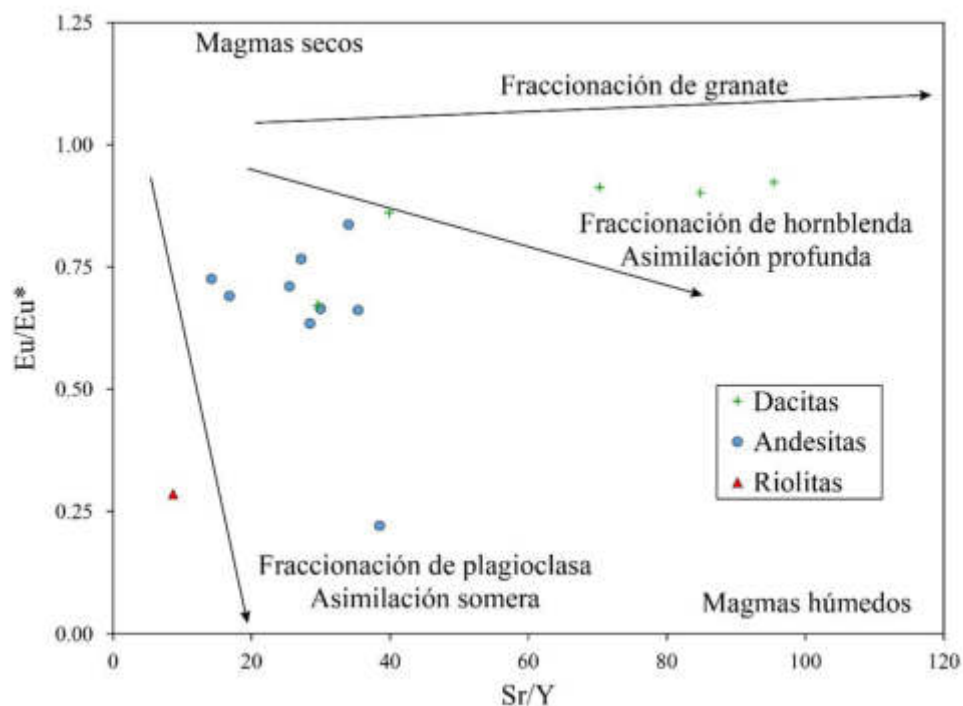


Figura 5.31. Gráfico Eu/Eu^* vs Sr/Y . Modificado de Pajuelo (2015).

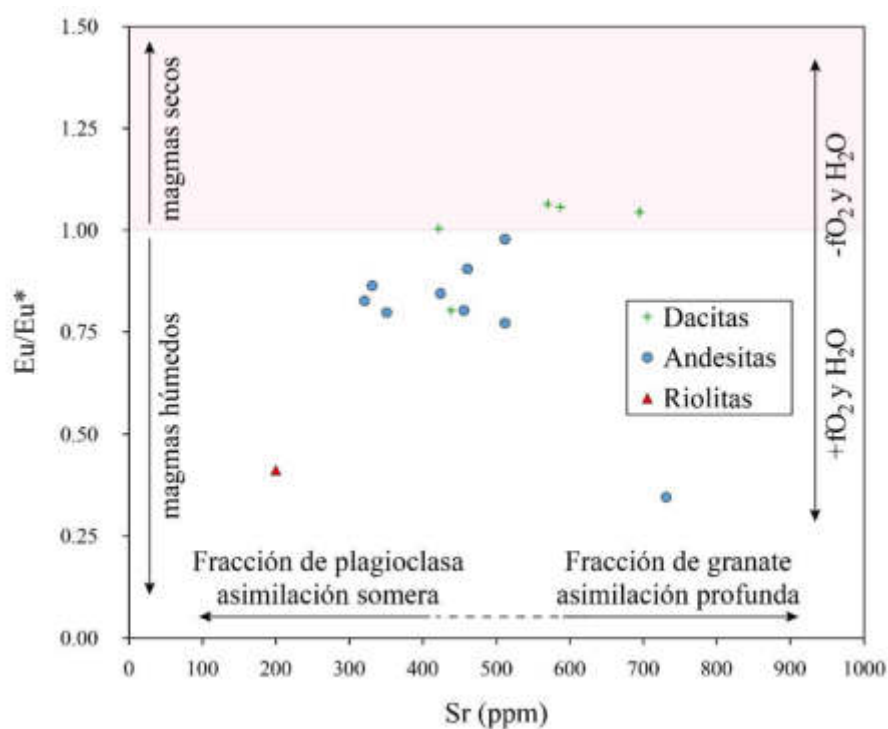


Figura 5.32. Gráfico de asimilación Eu/Eu^* vs Sr . Modificado de Pajuelo (2015).

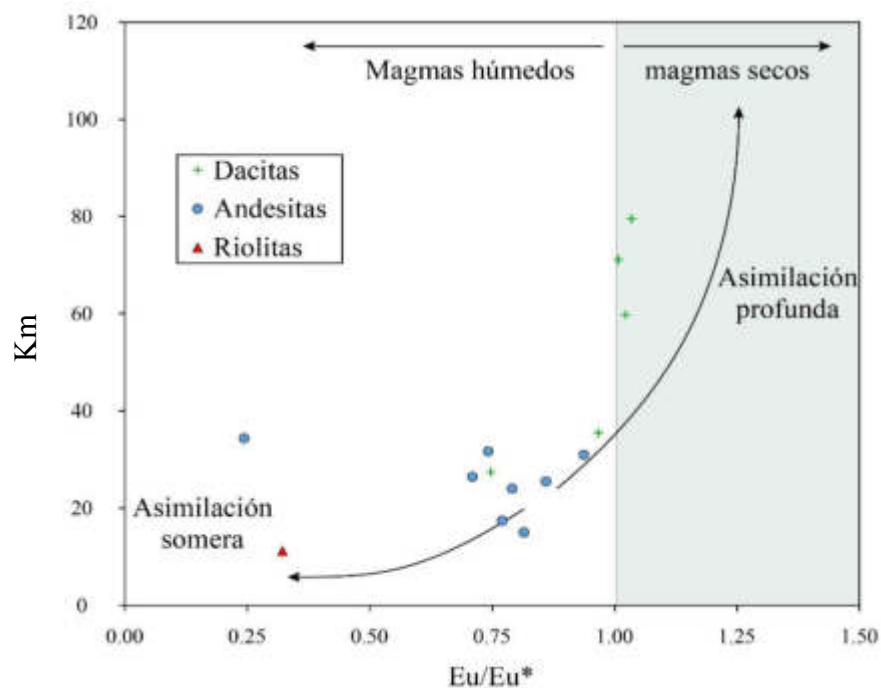


Figura 5.33. Gráfico de asimilación Eu/Eu^* vs Km. Modificado de Pajuelo (2015).

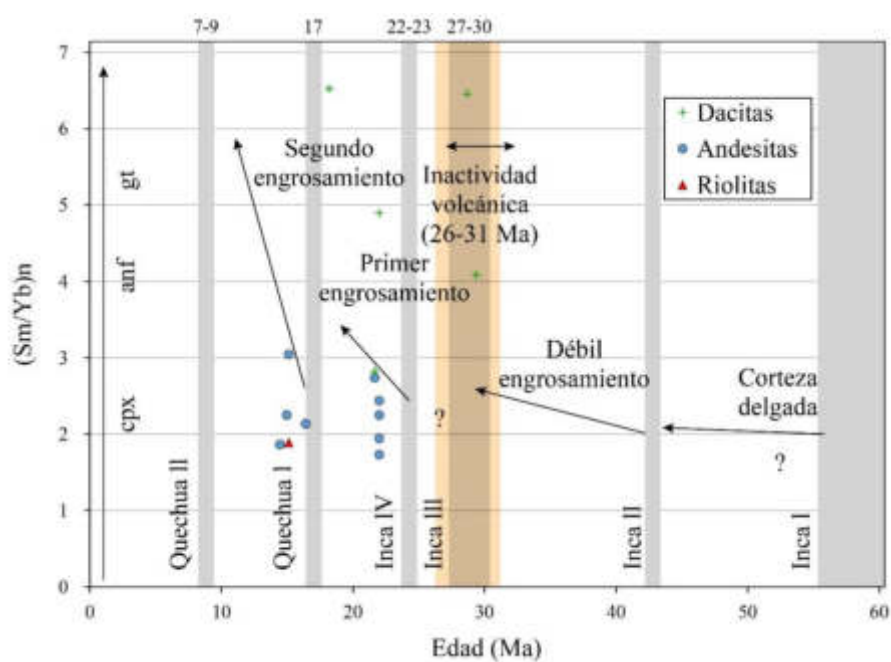


Figura 5.34. Gráfico de $(\text{Sm}/\text{Yb})_n$ vs edad. Modificado de Mamani (2010).

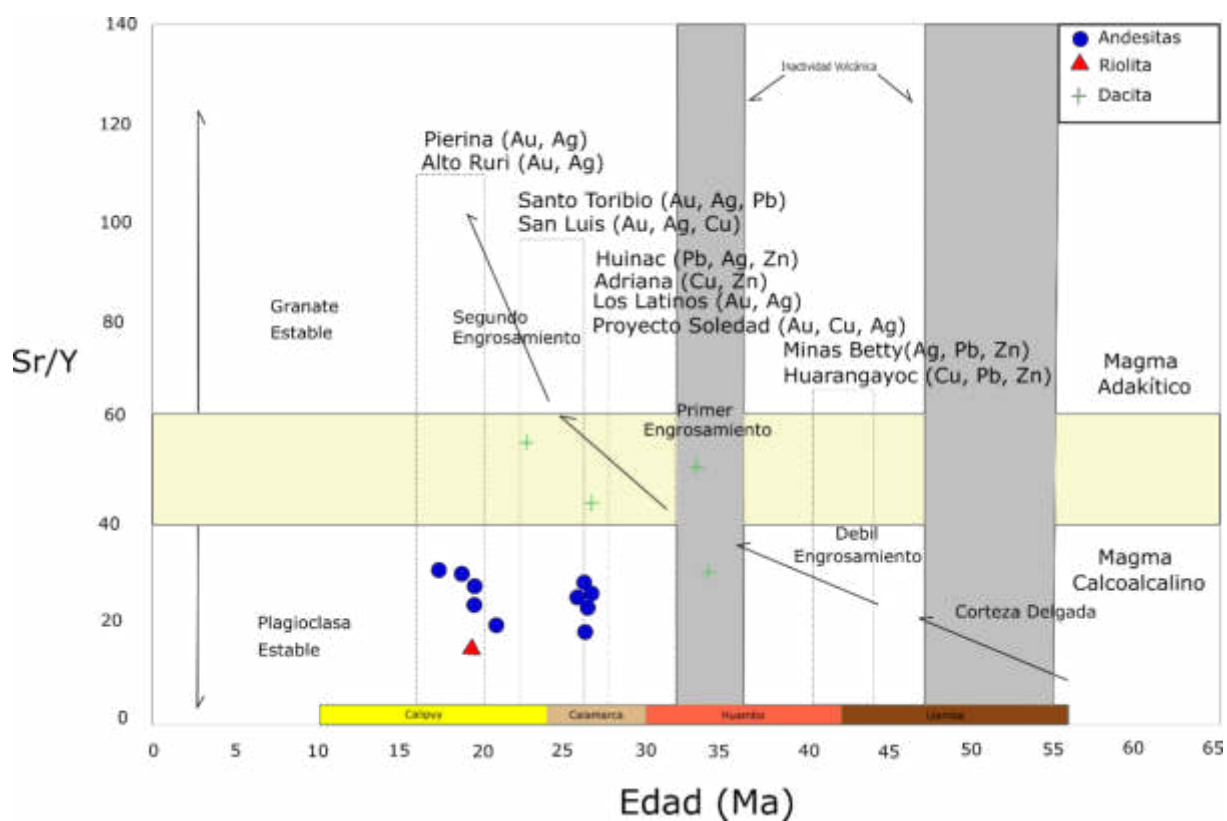


Figura 5.35. Gráfico Sr/Y vs edad. Modificado de Mamani (2010).

Capítulo 6

Discusión

La comparación entre las brújulas convencionales y las brújulas electrónicas, arroja como resultado que, estas últimas son muy efectivas y útiles en campo para desarrollar los trabajos más recurrentes en geología. Cabe resaltar que las brújulas electrónicas, nos permite optimizar tiempo en la fase de gabinete.

Con los contrastes realizados entre los diferentes programas, tanto para geología estructural y para geoquímica, se deduce que, para el primer caso, el programa más completo para realizar los análisis es Win Tensor. Para geoquímica, el programa que nos ofrece la mayor cantidad de gráficos disponibles, es GCDKit.

El análisis de Lineamientos estructurales nos muestra que, existen 3 órdenes de lineamientos. Los lineamientos de primer orden, tienen tendencias dominantes de NE –SW y NW – SE. Los lineamientos de segundo orden, poseen orientaciones predilectas de NW-SE y NE-SW. En cambio, los lineamientos de tercer orden, muestran orientaciones NE –SW y NW – SE. Para determinar el orden de los lineamientos, se tomó como criterio base, la longitud de los mismos. Los de primer orden, poseen longitudes mayores a los 3km, los de segundo orden, tienen longitudes que varían entre 1km y 3 km. Finalmente, los lineamientos de tercer orden, con longitudes menores a 1km.

El mapa de densidad de lineamientos, nos muestra una relación directa, entre la ubicación de los yacimientos y el grado de concentración de lineamientos. Con ello se deduce que, las áreas donde existe mayor concentración de líneas (en nuestro caso esto es sinónimo de deformación frágil), es también un área favorable para formación de posibles yacimientos mineros. El método de trazado de Lineamientos estructurales en este trabajo, nos muestra una validez de hasta 85%.

El estilo tectónico predominante en el área, es evidenciado por los 8 dominios estructurales encontrados, que demuestran una tectónica de tipo extensiva, con cierta componente de rumbo. Esto coincide, con el estilo tectónico de la falla Cordillera Blanca, que es de tipo Normal.

El estudio petrográfico realizado en rocas volcánicas nos muestra que, en área de tesis las rocas varían desde tobas de textura fragmental a andesitas y andesitas porfíricas con matriz microcristalina en su mayoría. Mientras que, el estudio realizado en las rocas de naturaleza intrusiva varía entre granodiorita y tonalita con textura granular y presencia de minerales como biotita, plagioclasas y feldespato alcalino.

La clasificación TAS para las rocas volcánicas, nos muestra una alta gama de rocas que abarcan desde riolitas (6%), dacitas (30%) y andesitas (64%). En líneas generales está constituida en su mayoría de rocas intermedias a ácidas. Ver Figura 5.13.

De manera similar, la clasificación TAS (Le Bas et al., 1986) para las rocas intrusivas nos muestran rocas que abarcan desde granitos (50%), granodioritas (25%), y Sienitas Nefelínicas (25%). En líneas generales está constituida en su mayoría de rocas intermedias a ácidas. Ver Figura 5.14.

Según el diagrama K₂O vs Sílice (Peccherillo y Taylor 1976), podemos observar que, conforme crece el porcentaje de SiO₂, aumenta el contenido de K₂O. Las muestras pertenecen a la serie calco alcalina de alto potasio, con tendencia a contener minerales ferromagnesianos, característicos de Andesitas. Esta característica refleja el incremento de contaminación cortical en el ascenso. Ver Figura 5.15.

De forma análoga, el diagrama K₂O vs Sílice (Peccherillo y Taylor 1976), observamos que conforme aumenta el contenido de sílice, crece el porcentaje de K₂O. Las muestras pertenecen a la serie calco alcalina de alto potasio. Ver figura 5.16.

La caracterización geoquímica de los elementos mayores, que resulta del análisis de los diagramas de Harker realizados, permite colegir un fraccionamiento lineal donde la sílice aumenta de un 52% a un 74%. Se evidencia también una desintegración de potasio en el tiempo, aumentando los álcalis con el incremento gradual de la Si, mientras que de forma contraria los óxidos descienden en porcentaje. Ver Figuras 5.17 y 5.18.

El decrecimiento del MgO, puede deberse a su incorporación dentro de la cristalización de piroxenos, el Al_2O_3 , CaO, Na_2O , se asimilan para la formación de plagioclasas como la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Por otro lado, la disminución de Hierro y titanio podría deberse a la formación de magnetita, anfíboles y piroxenos. El K_2O , en una primera etapa es un elemento incompatible, por lo que va incrementando su porcentaje en peso a medida que aumenta la Si y disminuyen los óxidos. Además de ello, van cristalizando la ortosa y muscovita que asimilan el potasio.

El contenido de SiO_2 , varía entre 52% y 74%. En cuanto al contenido de óxidos mayores, existe un predominio en abundancia de SiO_2 , Al_2O_3 , MgO, CaO. La abundancia de Al_2O_3 , varía entre 13% y 22% MgO, se encuentra entre 0.5% y 4%, por otro lado, el porcentaje de CaO fluctúa entre 2 y 6%. Ver Figuras 5.19 y 5.20.

La caracterización geoquímica de los elementos mayores que resulta del análisis de los diagramas de Harker para los intrusivos se puede inferir como un fraccionamiento lineal donde la sílice aumenta de un 52% a un 72%. Se evidencia también una desintegración de K en el tiempo, aumentando los álcalis con el aumento gradual de sílice, mientras que de forma contraria los óxidos decrecen en porcentaje. Ver Figuras 5.21 y 5.22.

Los diagramas de Tierras Raras, nos demuestran la cristalización fraccionada, hay un enriquecimiento en Tierras Raras ligeras por encima de 10, luego un empobrecimiento de Tierras Raras pesadas, por debajo del intervalo de 10. La anomalía negativa del Eu, con

respecto al Sm y Gd en el espectro de Tierras Raras Normalizadas, nos estaría indicando la separación de plagioclasas por cristalización fraccionada de la roca fuente. Además de ello, el comportamiento de Eu y de Nd son característicos de la cristalización del granate. Si el Eu no se evidencia de forma tan fuerte, lo que indicaría que dicho fraccionamiento no tuvo lugar. La relación Sr/Y también nos demuestra que, el Y fue absorbido durante la cristalización del granate. Ver Figura 5.23.

Para el caso de los intrusivos, los diagramas de Tierras Raras nos demuestran la cristalización fraccionada, muestra también un enriquecimiento en Tierras Raras ligeras por encima de 10, luego un empobrecimiento de tierras raras pesadas por debajo del intervalo de 10. Los valores anómalos negativos de Eu, en comparación al Sm y Gd en el gráfico de Tierras raras Normalizadas nos estaría indicando la separación de plagioclasas por cristalización fraccionada de la roca fuente. La anomalía en el caso del Eu nos indica el fraccionamiento para cristalización de granate. Ver Figura 5.24.

En cuanto al tipo de granitoides, en el caso de los intrusivos, para poder clasificarlos se utilizó el diagrama de Whalen 1987. Con ello se determinó que, las rocas intrusivas analizadas pertenecen al campo de los Granitoides tipo “I” caracterizado por ser metaluminoso de naturaleza sódica y Granitoides tipo “S” relativamente potásicos y fuertemente metaluminoso. Ver figura 5.25.

Las muestras tienen valores de Ce/Y desde 1.7 a 5.6% con un espesor cortical que varía de entre 30Km a 40Km. Por otro lado, las rocas intrusivas presentan porcentajes de SiO₂ entre 52% a 71% con espesores de 20 a 40 km. Ver Figura 5.26 y 5.27.

Para los diagramas de discriminación tectónica, utilizamos los gráficos de Pearce 1984, en los que podemos observar que las muestras tienen un origen tectónico de granitoides de arco volcánico. Ver Figura 5.28.

Por otro lado, podemos observar el aumento de los valores Sr/Y y un decrecimiento de los valores de Y con el tiempo, lo cual nos muestra que las muestras de roca volcánica analizadas pertenecen en su gran mayoría a un campo de arco Normal. En cuanto a la relación de cocientes $(Sm/Yb)_n$ vs Sr/Y, nos estaría indicando que la mayoría de las muestras presentan una asimilación somera, de corteza félsica. Ver Figuras 5.29 y 5.30.

Para el caso del diagrama Eu/Eu* versus concentraciones de Sr, nos permite reafirmar las conclusiones anteriores con respecto a la mineralización. Es conocido también que, la mayoría de los yacimientos minerales están relacionados de forma estrecha a la signature de las Adakitas, en el caso de los pórfidos y epitermales, lo cual hace que esta característica sea muy importante en la búsqueda de futuros yacimientos. Ver Figura 5.31.

De la relación Eu/Eu* versus Sr/Y, indican que la mayoría de muestras están caracterizadas por pertenecer a magmas hidratados, los cuales son favorables para la mineralización. Según se observa los valores de $Sr/Y > 20$ y $Eu/Eu^* < 1$, se corresponde a magmas con asimilación somera prospectables para yacimientos Epitermales de Baja Sulfuración (Au, Ag, Zn – Pb – Cu). Ver Figura 5.32.

El gráfico Eu/Eu* versus la profundidad en Kilómetros, se logra apreciar que la mayoría de las rocas volcánicas (83%) son de asimilación somera y magmas húmedos. Mientras que, el 17% son de asimilación profunda, caracterizadas por la presencia magmas secos. Ver Figura 5.33.

Del diagrama $(Sm/Yb)_n$ vs edad, se puede afirmar que, las muestras señaladas pertenecen a un primer y segundo engrosamiento, relacionados directamente con las Fases tectónicas Quechua I y Quechua IV. Ver la Figura 5.34. De forma análoga, la Figura 5.35 nos muestra que las rocas analizadas, coinciden con un segundo engrosamiento y se relacionan con los yacimientos más importantes del área.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

1. Luego de realizar esta tesis se puede afirmar que, es factible y rentable realizar una evaluación estructural y tectónica, con una buena precisión y calidad, utilizando software libre a muy bajo costo.
2. En cuanto respecta al uso efectivo de las brújulas electrónicas, frente a las brújulas convencionales y la calidad de los trabajos realizados, se puede afirmar que la calidad es óptima y la precisión es aceptable, frente al hecho irrefutable de que una brújula electrónica contribuye en el trabajo geológico de campo de forma tal que, se agilizan muchos procesos, lo que se traduce a larga en una disminución de costos.
3. De las comparaciones realizadas entre los diversos softwares para procesamiento de data geoquímica, se puede afirmar que el programa GCDkit es el más completo, sin embargo, no se desmerece la utilidad de Petrograph ni de T – igpet.
4. La comparación hecha entre los programas para análisis estructural, hace posible aseverar la utilidad y beneficios, de realizar el procesamiento de los datos estructurales del programa Win tensor, frente a otras alternativas de software libre y comercial. Ello se debe a que, presenta un interfaz simple y ofrece un análisis más completo y detallado que otros.
5. Se logró determinar, a una escala mucho más precisa, las principales características estructurales, litológicas de los afloramientos en campo. El fruto de este análisis, nos permite contribuir de forma importante al conocimiento geológico del área.
6. Durante el desarrollo de esta tesis, se propone una metodología para el trazado de lineamientos estructurales y el procesamiento de los mismos. Dicho procedimiento

tuvo una etapa de verificación en campo, con una validez de hasta un 85%, lo cual lo se encuentra dentro de un rango elevado de confianza.

7. El mapa de densidad de lineamientos, nos muestra la relación directa entre los yacimientos ubicados en el área y la concentración de lineamientos estructurales. Con ello podemos postular que, la mayor concentración de deformación frágil es también, el área donde suele ser más elevada la probabilidad de encontrar un nuevo yacimiento.

8. En el área de tesis se determinaron 8 dominios estructurales en total, que apoyan las evidencias encontradas en campo.

9. El mapeo estructural realizado en campo, nos permite colegir que, el estilo tectónico predominante en el área es de tipo extensivo, con una componente de rumbo; en especial a lo largo de la carretera Huaraz – Casma, la cual está construida a lo largo del plano de falla regional Pira – Quilcay el cual no encuentra reflejado en el actual mapa geológico a escala 1: 100 000 ni 1: 50 000.

10. Los diferentes eventos tectónicos de deformación dentro del área, contribuyen de forma favorable a la formación de yacimientos, en especial yacimientos polimetálicos (Pb, Zn, Cu, Fe, Ag, Au) muy característicos de la cordillera negra.

11. De las campañas de campo realizadas, se puede afirmar que, el volcánico Calipuy está constituido de este a oeste por una sucesión de eventos volcánicos efusivos y explosivos. La zona Este, se caracteriza por la predominancia de cenizas y tobas, que evidencian un vulcanismo explosivo, conforma vamos avanzando hacia la parte Oeste del área, se puede evidenciar un cambio litológico caracterizado por la presencia de flujos andesíticos y el aumento de cuerpos intrusivos.

12. El estudio petrográfico realizado en rocas volcánicas, nos muestra que, en área de tesis las rocas varían desde tobas de textura fragmental a andesitas y andesitas porfíricas con matriz microcristalina en su mayoría. Mientras que, el estudio realizado en

las rocas de naturaleza intrusiva varía entre granodiorita y tonalita con textura granular y presencia de minerales como biotita, plagioclasas y feldespatos alcalinos.

13. Las dataciones radiométricas recopiladas de INGEMMET nos muestran que el volcánico calipuy en el área de tesis presenta una edad radiométrica promedio de 20 M.a. y dentro del estadio del primer engrosamiento de la corteza, el cual coincide con el periodo de mineralización de los yacimientos de Huinac (Ag, Pb, Zn), Adriana (Cu, Zn), San Luis y Santo (Ag, Au, Pb) Toribio (Ag, Au, Pb).

14. La caracterización geoquímica muestra que los magmas son hidratados, evolucionados a niveles someros menores de 40 km y con fraccionamiento de plagioclasas. De los resultados de geoquímica podemos afirmar, además que la naturaleza de la corteza es de tipo félsica y el magma se formó a presiones moderadas, por lo que el área es prospectiva tanto para yacimientos Epitermales de baja sulfuración polimetálicos (Au, Ag, Zn – Pb, Cu) y yacimientos de tipo pórfido Cu-Au-Mo.

15. Con respecto al software libre Qgis, se puede concluir que, en cuanto a calidad y cantidad de procesos, con su similar comercial ArcGis, el programa se encuentra en la actualidad prácticamente al mismo nivel con muchas probabilidades de superarlo en el tiempo.

7.2. Recomendaciones

1. Con respecto al software libre Qgis, se puede concluir que, en cuanto a calidad y cantidad de procesos, con su similar comercial ArcGis, el programa se encuentra en la actualidad prácticamente al mismo nivel con muchas probabilidades de superarlo en el tiempo.

2. Utilizar sin prejuicios las diferentes herramientas que hoy existen para realizar los diversos trabajos geológicos optimizando tiempo y costos.

3. Realizar más campañas de campo, con la finalidad de ejecutar un muestreo geoquímico a una escala más detallada, con mayor énfasis en el caso de los cuerpos intrusivos.
4. Realizar un estudio estratigráfico detallado, para correlacionar columnas y secciones geológicas.
5. Se recomienda incluir las fallas geológicas encontradas en campo en los diferentes mapas geológicos a 50 000 y 100 000.
6. Sería bueno, tener en cuenta este trabajo, con miras a la futura prospección de yacimientos en el área por parte de pequeños mineros y mineros artesanales.
7. Realizar estudios de dataciones radiométricas en el área con la finalidad de precisar la edad de mineralización de los yacimientos que se encuentran ubicados dentro de la misma.
8. Sería ideal, ejecutar un análisis de inclusiones fluidas, que ayuden a caracterizar mejor los yacimientos artesanales para poder definir las temperaturas y las condiciones de formación de dichos yacimientos.

Referencias Bibliograficas

Se utilizó el software Mendeley (Elsevier) para la elaboración del listado de referencias bibliográficas, con el estilo del *Journal of Structural Geology*.

- Agrawal, S., Guevara, M., Verma, S., (2008). Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log-transformed ratios of immobile trace elements. – *International Geology Review*, 50, 1057–1079.
- Ague, J. (1994). Mass transfer during Barrovian metamorphism of pelites, south–central Connecticut; I, Evidence for changes in composition and volume. – *American Journal of Science*, 294, 989–1057.
- Alberti, M. (2019). GIS analysis of geological surfaces orientations: the qgSurf plugin for QGIS. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.27694v1>.
- Allmendinger, R., Siron, C., Scott, C. (2017). Structural data collection with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices. *Journal of Structural Geology* 102, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.07.011>
- Arana, J., González, J., 2010. Mecánica de Fractura.
- Araujo, G. (2018). Evaluación Geodinámica de Peligros Geológicos en el cerro Ayamachay e Itapa CCasa-Tambo.
- Arcos, F. (2019). Actividad Minera Artesanal en las Regiones de Ancash y Cusco. *Journal of Chemical Information and Modeling* 53, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Arlegui, L., Soriano, M., (1998). Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain). *International Journal of Remote Sensing* 19, 3169–3185.

- Armijo, R., Lacassin, R., Coudurier-Curveur, A., Carrizo, D., (2015). Coupled tectonic evolution of Andean orogeny and global climate. *Earth Sci. Rev.* 143, 1–35.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.01.005>.
- Atherton, M., Pitcher, S., Warden, V., (1983). The Mesozoic marginal basin of Central Peru. *Nature* 305, 303–306. <https://doi.org/10.1038/305303a0>.
- Atherton M., Warden V., Sanderson. (1985). "The Mesozoic Marginal Basin of Central Perú a Geochemical Study of Within-Plate-Edge Volcanism" " In W. S. Pitcher et al, eds. *Magmatism at a Plate Edge. The Peruvian Andes*. Blackie, pp. 47-58.
- Atherton, M. (1984). The Coastal batholith of Peru. *Andean Magmatism: Chemical and Isotopic Constraints* x, 168–179. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7335-3_12.
- Atherton, M., Webb, S., (1989). Volcanic facies, structure, and geochemistry of the marginal basin rocks of central Peru. *Journal of South American Earth Sciences* 2, 241–261.
[https://doi.org/10.1016/0895-9811\(89\)90032-1](https://doi.org/10.1016/0895-9811(89)90032-1)
- Atherton, M.P., 1990. The coastal batholith of Peru: the product of rapid recycling of “new” crust formed within rifted continental margin. *Geol. J.* 25, 337–349.
<https://doi.org/10.1002/gj.3350250316>.
- Baghdadi, N., Mallet, C., Zribi, M., (2018). QGIS and Generic Tools, QGIS and Generic Tools. <https://doi.org/10.1002/9781119457091>.
- Bonnot, D., M. Sebrier, and J. Mercier (1988), Evolution geodynamique plio-quaternaire du bassin intra-cordillera du Callejon de Huaylas et de la Cordillera Blanca, Perou, *Geodynamique*, 3(1–2), 57–83.
- Beckinsale, R.; Sánchez, A., Brook, M., Cobbing, E., Taylor, W. & Moore, N., 1985. Rb-Sr whole-rock isochron and K-Ar age determinations for the coastal batholith of Peru. En: Pitcher, W., et al. (eds.), *Magmatism at a plate edge: the Peruvian Andes*, John Wiley, New York, p. 177-202.

- Benavides, R., (2018). La Minería Responsable y sus Aportes al Desarrollo del Perú. 168.
- Benito, R., López-Ruiz J.(1992). ANATEX.BAS: A program for calculating the mineralogy of the residual solid and trace element fractionation in partial melting, *Comput.Geosci.*, 18(5), 603–615.
- Bevins, R., Kokelaar, B., Dunkley, P. (1984). Petrology and geochemistry for lower to middle Ordovician igneous rocks in Wales: A volcanic arc to marginal basin transition, *Proc. Geol. Assoc.*, 95, 337–347.
- Blake, S., (1990). Lava Flows and Domes: Emplacement Mechanisms and Hazard Implications, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74379-5_5
- Boit B. (1965). Diferencias entre el batholito longitudinal de los andes y los de la cordillera blanca. Publicaciones del Museo de Historia Natural "Javier Prado" UNMSM. Serie C.
- Boxer, G., (2019). Using QGIS v3 in Mineral Exploration. 6, 130.
- Boynton, W., (1984). Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies, in *Rare Earth Element Geochemistry*, edited by P. Henderson, pp. 63–114, Elsevier, New York.
- Bureau of Mineral Resources. 1989. Symbols Used on Geological Maps. Geoscience Australia, publication GA21883.
- Carr, M., (1995). IgPet for Windows.Terra Softa, Somerset, New Jersey, U.S.A.
- Carrasco, D. (2017). Caracterización Geológica y Distribución Geoquímica en el Diseminado Polimetálico Huinac.
- Casas, A., Gil, I. y Simón, J. (1990). Los Métodos de análisis de Paleoesfuerzos a partir de Poblaciones de fallas: sistematica y técnicas de Aplicación, Zaragoza, España. *Estudios geológicos*, 46(5-6), 385-398.

- Christenson, B., Németh, K., Rouwet, D., Tassi, F., Vandemeulebrouck, J., Varekamp, J.C. (2015). Volcanic Lakes, *Advances in Volcanology*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_1.
- Clarke, D., Mengel, F., Coish, R. A., Kosinowski, M. (1994). NewPet for DOS, version 94.01.07. – Department of Earth Sciences, Memorial University of Newfoundland, Canada.
- Cobbing, E., Pitcher, W. (1984). The Coastal batholith of Peru. *Andean Magmatism: Chemical and Isotopic Constraints*, 168–179. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7335-3_12.
- Cobbing, E., Sanchez, A., Martinez, W., Zarate, H. (1996). Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquian y Yanahuanca. *Ingemmet, Boletín, Serie A : Carta Geológica Nacional*, 76, 281p.
- Coney, P. (1972). Cordilleran Tectonics and North America Plate Motion, 603-628.
- Cossío, A., 1964. Geología de los cuadrángulos de Santiago de Chuco y Santa Rosa (Hojas 17-g y 18-g). In: *Boletín del INGEMMET. Serie A, Carta Geológica Nacional*. vol. 8.
- Cox, K., Bell, J. and Pankhurst, R. (1979). *The Interpretation of Igneous Rocks*, 450 pp, Allen and Unwin, St Leonards, NSW, Australia.
- D’Orazio, M. (1993). A Macintosh BASIC program for the interactive testing of combined assimilation and fractional crystallization, *Comput. Geosci.*, 19(4), 483–492.
- Davies, C (2002). Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the Cajamarca mining district, northern Peru. Unpub PhD. Thesis, James Cook University, Australia.
- De La Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, & Marchal M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R 1 R 2 - diagram and major element analyses - its relationships with current nomenclature. *Chem Geol* 29: 183-210 doi: 10.1016/0009-2541(80)90020-0.

- Debon, F., Le Fort, P. (1983). A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. – Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 73, 135–149.
- Defant, M. J., Nielsen, R. L. (1990). Interpretation of open system petrogenetic process: Phase equilibria constrains on magma evolution, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(1), 87–102.
- Delvaux, D., Sperner, B. (2003). Geological Society, London , Special Publications New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. 75–100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>.
- DePaolo, D. (1981). Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, 189–202.
- Doblas, M. (1998). Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics* 295, 187–197. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00120-6).
- Dougal, J., Petford, N. (2011). The Field Description of Igneous Rock.
- Drury, S.A., Peart, R.J., Deller, M.E., 2001. Hydrogeological potential of major fractures in Eritrea. *Journal of African Earth Sciences* 32, 163– 177.
- Du Rouchet, J. 1981. Stress fields, a key to oil migration. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.* 65, 74-85.
- Erban, V., Janoušek, V., Farrow, C., Šmíd, J., 2003. Geochemical Data Toolkit (GCDkit): a key for magmatic geochemist to the treasury of data analysis, statistics and graphics in *R. Geolines* 16, 25-26 ST-Geochemical Data Toolkit (GCDkit): a k.
- Farber, D., G. Hancock, R. Finkel, and Rodbell, D., (2005), The age and extent of tropical alpine glaciation in the Cordillera Blanca, Peru, *J. Quat. Sci.*, 20(7–8), 759–776.

- Farrar, E., Noble, D. (1976). Timing of late Tertiary deformation in the Andes of Peru. Geological Society of America Bulletin, v. 87, p. 1247-1250.
- Fifarek, R., Rye, R. (2005). Stable-isotope geochemistry of the Pierina high-sulfidation Au-Ag deposit, Peru: Influence of hydrodynamics on SO₄²⁻-H₂S sulfur isotopic exchange in magmatic-steam and steam-heated environments. Chemical Geology 215, 253–279. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.040>
- Francis, P. (1995). Volcanoes. A planetary perspective. Claredone Press, EEUU, 443p.
- García, F., Carreras, J., Druguet, E., (2016). Estudio de la fracturación alpina en el sistema zócalo-cobertera de la zona de Boadella-Darnius (Pirineo Oriental). Geogaceta 35–38.
- Geldres, M. (2019). Geología y Alteraciones Hidrotermales Epitermales del Proyecto Anita - Cordillera Negra, Ancash - Perú.
- Gifkins, C., Herrmann, W., Large, R. (2006). Altered Volcanic Rocks; A Guide to Description and Interpretation., Economic Geology. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.8.1664>.
- Giovanni, M. K., S. L. Beck, and L. Wagner (2002), The June 23, 2001 Peru earthquake and the southern Peru subduction zone, Geophys. Res. Lett., 29(21), 2018, doi:10.1029/2002GL015774.
- Giovanni, M.K., 2007, Tectonic and thermal evolution of the Cordillera Blanca detachment system, Peruvian Andes: Implications for normal faulting in a contractional orogen [Ph.D. thesis]: Los Angeles, University of California Los Angeles, 237 p.
- Giovanni, M.K., Horton, B.K., Garzzone, C.N., McNulty, B., and Grove, M., 2010, Extensional basin evolution in the Cordillera Blanca, Peru: Stratigraphic and isotopic records of detachment faulting and orogenic collapse in the Andean hinterland: Tectonics, v. 29, TC6007, <https://doi.org/10.1029/2010TC002666>

- González Barahona, J. (2011). El concepto de software libre. *Revista Tradumàtica: Traducció i Tecnologies de La Informació i La Comunicació* 5–11.
- González Daniel, (2004). Software libre en los institutos. 1, 1–147.
- Graser A. (2016). *Learning QGIS – Third Edition*. PACKT Publishing, Birmingham.
- Haakon Fossen. (2010). *Structural Geology*.
- Hama, L., Ruddle, R., Paton, D. (2014). Geological Orientation Measurements using an iPad : Method Comparison. *EG UK Computer Graphics & Visual Computing*.
<https://doi.org/10.2312/cgvc.20141207>.
- Harris, N., Pearce, J., Tindle, A. (1986). Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. – In: Coward, M. P. – Ries, A. C. (eds): *Collision Tectonics*, 67–81, Geological Society Special Publications 19. London.
- Hollocher, K., Robinson, P., Walsh, E., Roberts, D. (2012). Geochemistry of amphibolite-facies volcanics and gabbros of the Storen Nappe in extensions west and southwest of Trondheim, western gneiss region, Norway: a key to correlations and paleotectonic settings. *Amer J Sci* 312: 357–416 doi: 10.2475/04.2012.01.
- Hughes, C.A., Jessup, M.J., Shaw, C.A., Newell, D.L., 2019. Deformation conditions during syn-convergent extension along the Cordillera Blanca shear zone, Peru. *Geosphere* 15, 1342–1367. <https://doi.org/10.1130/GES02040.1>
- Hutchison, C. (1975). The norm, its variations, their calculation and relationships. *Schweiz Mineral Petrogr Mitt* 55: 243–256.
- Ihaka, R., Gentleman, R. (1996). R: A language for data analysis and graphics: *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5: 299–314.
- Irvine T., Baragar W. (1971). A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. *Canad J Earth Sci* 8: 523–548 doi: 10.1139/e71-055.

- Janousek V. (2000). Norman, a QuickBasic programme for petrochemical re-calculation of whole-rock major-element analyses on IBM PC. *J. Czech Geol. Soc.*, 46: 9–13.
- Janousek V., Farrow C. M., Erban V. (2006). Interpretation of Whole-Rock Geochemical Data in Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, vol. 47, no. 6, p 1255-1259.
- Janoušek, V., Farrow, C., Erban, V. (2005). Calculations and plotting in igneous geochemistry: ¡corvée abolished at last! [GCDkit 2.00 released]. – *Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft*, 151, 54.
- Kalinowski A., Oliver S. (2004). ASTER Mineral Index Processing Manual. Geoscience Australia, publication no. GA7833.pdf.
- Lechner, P., Tupper, A., Guffanti, M., Loughlin, S., Casadevall, T. (2018). Volcanic Ash and Aviation—The Challenges of Real-Time, Global Communication of a Natural Hazard, *Advances in Volcanology*. https://doi.org/10.1007/11157_2016_49.
- Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., Oh, J., Song, J., Chen, Y., Lu, G., Perdana, A. (2012). Structural Geology The Mechanics of deforming Metamorphic Rocks , *Journal of Chemical Information and Modeling*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Lehr, R., Marchand, A. (1972). *Synthesis and Structural Analysis, Orbital Symmetry*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-441156-2.50011-8>.
- Llambías, E. (2001). *Geología de los cuerpos ígneos*.
- López, M. (2006). *Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental*.
- Lutgens, F., Tarbuck, E., (2005). (Spanish Edition) Edward J. Tarbuck, Frederick K. Lutgens, Dennis Tasa-Ciencias de la Tierra_ Una Introduccion a la Geologia Fisica with CDROM-Pearson Educacion (2006).

- Mabee, S.B., Hardcastle, K.C., Wise, D.W., 1994. A method of collecting and analyzing lineaments for regional-scale fractured bedrock aquifer studies. *Ground Water* 32, 884–894.
- Maniar P., Piccoli P. (1989). Tectonic discriminations of granitoids. *Geol Soc Amer Bull* 101:635-643. doi: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- Manrique, E. (2013). Geología Estructural del Neógeno en la Cordillera Negra, implicancias en el origen y estabilidad de Taludes del Yacimiento Aurífero Epitermal de Alta Sulfuración: Pierina.
- Mariño, O. (2017). Caracterización de La cinemática y cálculo de paleo- tensores de esfuerzo para el conjunto principal de fallas en el Valle de Aburrá, Implicaciones Tectónicas. 1–24
- Marsh, B., (2010). Fundamentals of Physical Volcanology, Eos, Transactions American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/2010eo170006>.
- McNulty, B. A., and D. L. Farber (2002), Active detachment faulting above the Peruvian flat slab, *Geology*, 30(6), 567–570.
- McNulty, B. A., D. L. Farber, G. S. Wallace, R. Lopez, and O. Palacios (1998), Role of plate kinematics and plate-slip-vector partitioning in continental magmatic arcs: Evidence from the Cordillera Blanca, Peru, *Geology*, 26(9), 827–830.
- McQueen K., (2017). Identifying Geochemical Anomalies. Downloaded from http://crcleme.org.au/Pubs/guides/gawler/a7_id_anomalies.pdf, 2nd April 2017.
- Miyashiro A., (1974). Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Am J Sci* 274, 321-355. doi: 10.2475/ajs.274.4.321.
- Mukasa, S.B., 1984, Comparative Pb isotope systematics and zircon U-Pb geochronology for the Coastal, San Nicolás, and Cordillera Blanca batholiths, Peru [Ph.D. thesis]: Santa Barbara, University of California, Santa Barbara, 148 p.

- Nakamura N., (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim Cosmochim Acta* 38: 757-775 doi: 10.1016/0016-7037(74)90149-5.
- Navarro, P., Rodriguez, F. (2008). Estratigrafía y volcanismo cenozoico (Grupo Calipuy) : segmento cordillera negra. Resultados preliminares. INGEMMET, Dirección Regional. 70p.
- Navarro, P., Rivera, M., Monge, R., 2010. Geología y Metalogenia del Grupo Calipuy (Volcanismo Cenozoico), Segmento Santiago de Chuco, Norte del Perú. In: Boletín del INGEMMET. Serie D. vol. 28.
- Navarro, P., 2013. Nuevas dataciones en el segmento sur de Cajamarca. *Bol. Soc. Geol. Perú* 107, 31–35.
- Németh, K., Martin, U., 2007. Practical Volcanology - Lecture Notes for Understanding Volcanic Rocks from Field Based Studies, Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary.
- Nevin, C., (1932). Principles of Structural Geology., *The Geographical Journal*.
<https://doi.org/10.2307/1784542>.
- Niemeyer, H. (1999). Apuntes de geología estructural, Stress: The International Journal on the Biology of Stress. <https://doi.org/10.1007/s00381-010-1386-5>.
- Nieto-Samaniego, Á, Ojeda-García, Á., Alaniz-Álvarez, S., Xu, S. (2012). Geology of the Salamanca region, Guanajuato, Mexico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana* 64, 411–425. <https://doi.org/10.18268/BSGM2012v64n3a10>.
- Noble, D.C., McKee, E.H., Farrar, E., Petersen, U., 1974. Episodic Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of Peru. *Earth Planet. Sci. Lett.* 21, 213–220.
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(74\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(74)90057-0).

- Noble, D.C., McKee, E.H., Mégard, F., 1978. Eocene uplift and unroofing of the coastal batholith near Lima, Central Peru. *J. Geol.* 86, 403–405.
<https://doi.org/10.1086/649700>.
- Noble, D.C., McKee, E.H., Mégard, F., 1979. Early tertiary “Incaic” tectonism, uplift, and volcanic activity, Andes of Central Peru. *Geol. Soc. Am. Bull.* 90, 903–907.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90<903:ETITUA>2.0.CO](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<903:ETITUA>2.0.CO).
- Noble, D., McKee, E., Mourier, T. y Mégard, F. (1990). Cenozoico stratigraphy, magmatic activity, compressive deformation, and uplift in northern Perú. *Geological Society of American Bulletin*, 102: 1105-1113.
- Noble, D.C., McKee, E.H., 1999. The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru. In: Skinner, B.J. (Ed.), *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. vol. 7. Society of Economic Geologists, Littleton, CO, pp. 155–193.
<https://doi.org/10.5382/SP.07.05>. Special Publication. Noble, D.C., Wise, J.M., 2016. Timing of Incaic deformation and subsequent erosion, middle Eocene volcanism, and plutonism in central southern Peru with implications for mineralization. In: XVIII Congreso Nacional de Geología, Resúmenes Extendidos
- Novakova, L., Pavlis, T. (2017). Assessment of the precision of smart phones and tablets for measurement of planar orientations: A case study. *Journal of Structural Geology* 97, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.02.015>.
- Ochoa A., García G., Martínez E., Lozano L., Ríos P., Oviedo J. (2016). Cartografía geológica de la plancha 87 – sardinata departamento de norte de santander.
- Ortner, H., Reiter, F., Acs, P. (2002). Easy handling of tectonic data: The programs TectonicVB for Mac and TectonicsFB for Windows TM. *Computers and Geosciences* 28, 1193–1200. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00038-9).

- Pajuelo D., Mamani, M., Navarro, P., Chávez, L., Ordoñez, E. (2012). Relieves de Erosión de los Volcanes en los Segmentos del Grupo Calipuy. INGEMMET, Dirección de Geología Regional. 5p.
- Pajuelo D., Navarro, P., Chávez, L., Ordoñez, E., Rodríguez F. (2012). Evolución Volcánica del Centro Eruptivo Paltacayan del Grupo Calipuy, Cordillera Negra - Ancash. INGEMMET, Dirección de Geología Regional. 5p.
- Palacios, R., 2013. Plan de Minado en Minería Subterránea para la utilización de Explosivos y accesorios de Voladura.
- Pari, W., Silva, C., Lionel, F. (2013). Laguna Palcacocha y su influencia en la Ciudad de Huaraz Cordillera Blanca Región Ancash. 86.
- Peacock, D., Knipe, R., Sanderson, D. (2000). STRUCTURAL GEOLOGY Glossary of normal faults.
- Pearce J. (1983). Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. Continental Basalts and Mantle Xenoliths. Shiva, Nantwich, pp 230-249.
- Pearce J. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos 100: 14-48 doi:10.1016/j.lithos.2007.06.016.
- Pearce J., Harris N. & Tindle A. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. J Petrology 25: 956-983. doi:10.1093/petrology/25.4.956.
- Pearce J., Stern R. (2006). Origin of back-arc basin magmas: Trace element and isotope perspectives. Back-Arc Spreading Systems: Geological, Biological, Chemical, and Physical Interactions. Geophysical Monograph Series 166. American Geophysical Union, pp 63-86.

- Pearce J., Stern R., Bloomer S., Fryer P. (2005). Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: implications for the nature and distribution of subduction components. *Geochem Geophys Geosyst* 6: doi: 10.1029/2004GC000895 doi: 10.1029/2004GC000895.
- Peccerillo A., Taylor S. (1976). Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib Mineral Petrol* 58: 63-81 doi: 10.1007/BF00384745.
- Pedrinaci, E.(2010). Enseñanza de las Ciencias de la Tierra ha publicado... Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra 18, 125–126.
- Pedrinaci, E. (2010). Enseñanza de las Ciencias de la Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra 18, 125–126.
- Peña, F. (2019). Estudio Geológico, Hidrogeológico y Geoquímica de Aguas y Sedimentos, INGEMMET. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Petford, N., and M. P. Atherton (1992), Granitoid em- placement and deformation along a major cristal lineament: The Cordillera Blanca, Peru, *Tectono- physics*, 205, 171–185.
- Petford, N., and Atherton, M., 1996, Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru: *Journal of Petrology*, v. 37, p. 1491–1521, <https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1491>.
- Petrelli M, Poli G, Perugini D, Peccerillo A (2005) PetroGraph: A new software to visualize, model, and present geochemical data in igneous petrology. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6: 1-15
- Pitcher, W. (1985). A multiple and composite batholith: in Pitcher, W. S., Atherton, M. P., Cobbing, E. J., and Beckinsale, R. D. (Eds) “Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes”, John Wiley & Sons, 93-101.

- Pitcher, W.; Atherton, M.; Cobbing, E. & Beckinsale, R. (1985). - Magmatismo en el borde de una placa: los Andes peruanos. British Geological Survey. 365 pp.
- Rainbow, A., Clark, A.H., Kyser, T.K., Gaboury, F., Hodgson, C.J. (2005). The Pierina epithermal Au-Ag deposit, Ancash, Peru: Paragenetic relationships, alunite textures, and stable-isotope geochemistry. *Chemical Geology* 215, 235–252.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.050>
- Rajani, N. (2003). Free as in Education. Significance of the Free / Libre and Open Source Software for Developing Countries. 178.
- Richner, R. (2011). Research Collection. BRISK Binary Robust Invariant Scalable Keypoints 12–19. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010782581>.
- Rickwood P. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos* 22: 247-263 doi: 10.1016/0024-4937(89)90028-5.
- Rodriguez G., Navarro P., Cereceda, C. (2004). Determinación de alteración Hidrotermal mediante imágenes Aster, Oeste de Cajamarca. INGEMMET, Dirección de Geología Regional. 6p.
- Rodriguez G., Navarro P., Cereceda, C. (2004). Determinación de alteración Hidrotermal mediante imágenes Aster, Oeste de Cajamarca. INGEMMET, Dirección de Geología Regional. 6p.
- Sander, P., Chesley, M.M., Minor, T.B., 1996. Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. *Hydrogeology Journal* 4, 40–49.
- Sander, P., Minor, T.B., Chesley, M.M., 1997. Ground-water exploration based on lineament analysis and reproducibility tests. *Ground Water* 35, 888–894

- Sebrier, M., J. L. Mercier, F. Megard, G. Laubacher, and E. Carey-Gailhardis (1985), Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of south Peru, *Tectonics*, 4(7), 739–780, doi:10.1029/TC004i007p00739.
- Sebrier, M., A. Lavenu, M. Fornari, and J.-P. Soulas (1988a), Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia, and Northern Chile) from Eocene to present, *Geodynamique*, 3(1–2), 85–106
- Sebrier, M., J. L. Mercier, J. Marchare, D. Bonnot, J. Cabarez, and J. L. Blanc (1988b), The state of stress in an overriding plate situated above a flat slab: The Andes of central Peru, *Tectonics*, 7(4), 895–928, doi:10.1029/TC007i004p00895
- Schandl E., Gorton M. (2002). Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97: 629-642. doi: 10.2113/97.3.629.
- Schandl E., Gorton M. (2002). Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97: 629-642. doi: 10.2113/97.3.629.
- Schlische, R. W., and M. H. Anders (1996), Stratigraphic effects and tectonic implications of the growth of normal faults and extensional basins, in *Reconstructing the History of Basin and Range Extension Using Sedimentology and Stratigraphy*, 303, edited by K. K. Beratan, Spec. Pap. Geol. Soc. Am., Boulder, Colo.
- Sempere, T. (2004). Las «fases tectónicas» en los andes centrales: esplendor y decadencia de un paradigma geológico. *Sociedad Geológica Del Perú* 5, 203–216.
- Shand S. (1943). *Eruptive rocks*, 2nd ed. John Wiley, New York, pp 1-444.
- Sibson, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology* 18, 1031–1042. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00032-6)

- Silver Standard Resource, 2009. Updated Mineral Resource Estimate San Luis Project, Ancash Department, Perú.
- Simón Gómez, J., Gil Peña, I., Casas Sainz, A. (1990). Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistemática y técnicas de aplicación. *Estudios Geologicos* 46, 385–398. <https://doi.org/10.3989/egeol.90465-6469>
- Stallman, R. (2004). Software libre para una sociedad libre.
- Stallman, R. (2018). GNU Software Libre.
- Steinmann G. (1929). Geología del Perú. Heidelberg. Carl Winters Universitätsbuchhandlung. 448 pp.
- Stoppa, F. (2012). Updates in Volcanology - A Comprehensive Approach to Volcanological Problems, Updates in Volcanology. <https://doi.org/10.5772/925>.
- Sun S., McDonough W. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry M (eds) *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London Special Publications 42, pp 313-345.
- Toselli, A. (2013). “Elementos Básicos de Petrología IGNEA.” *Journal of Chemical Information and Modeling* 53(9): 1689–99.
- Velarde, M. (2012). Prospección Geológica y Geoquímica del Diseminado Polimetálico Huinac - La Merced - Aija - Ancash.
- Viñas, R. (2003). Sistema Operativo GNU/Linux básico. 11.
- Whalen, J., Currie, L., Chappell, B. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib Mineral Petrol* 95: 407-419. doi: 10.1007/BF00402202.

- Wilson, J.; Reyes, L. (1967).- Geología de los Cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari. Bol. N°16, Servicio de Geología y Minería-Lima.
- Wilson M. (1989). Igneous Petrogenesis. Chapman & Hall, London
- Wilson, P.A., 1975, Potassium-argon age studies in Peru with particular reference to the chronology of emplacement of the Coastal batholith [Ph.D. thesis]: Liverpool, UK, University of Liverpool, 299 p.
- Yonekura, N., T. Matsuda, M. Nogami, and S. Kaizuka (1979), An active fault along the western part of the Cordillera Blanca, Peru, J. Geogr., Tokyo, 88, 1–19.

ANEXOS

Anexo A. Artículos Publicados a partir de esta Tesis.

Anexo B. Panel Fotográfico

Anexo C. Mapas

Anexo D. Norma Cipw

Anexo E. Manuales