

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



TESIS

**MODELAMIENTO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA DETERMINAR
LA GEOMETRÍA Y EVOLUCION DEL ANTICLINAL DE PUQUIN,
REGION CUSCO - 2022**

PRESENTADO POR:

Br. Yessenia Puma Enriquez

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO GEÓLOGO**

ASESOR:

Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque

Financiado por: Programa de Fortalecimiento de
Investigación “Yachayninchis Wiñarinanpaq” –
UNSAAC

**CUSCO — PERÚ
2023**

DEDICATORIA

De manera muy especial a mi padre difunto, Saturnino Puma Hanco que Dios lo tiene en su gloria y ahora es un ángel en mi vida y sé que se encuentra muy orgulloso de su hija y desde donde está me bendice.

A mi madre Cirila Enriquez Quillahuamán, que estuvo siempre a mi lado brindándome su mano amiga, por creer en mí, por ser mi inspiración, por motivarme a ser mejor cada día, a dar lo mejor de mí en todo momento, por enseñarme a no rendirme nunca y vencer cada obstáculo que se presente en el camino.

A mis hermanos Alfredo, Beltran, Juvenal, Pamela, Nay Ruth y Gary, por su cariño, amistad, compañía y apoyo infatigable. Son la mayor bendición de mi vida, los amo infinitamente.

A mis pequeños sobrinos Alexander, Jamelith y Tamara por regalarme siempre una sonrisa y llenarme los días de alegría.

Y a todas aquellas personas que alguna vez me supieron guiar.

Yessenia Puma Enriquez

AGRADECIMIENTOS

Al final de más de un año de tesis, muchos son los que han aportado y merecen mi agradecimiento.

Quiero expresar mi gratitud a Dios, por todas las bendiciones que derrama sobre mí día a día.

Agradezco a mi madre, por todo su amor, paciencia, confianza y comprensión, por todo su apoyo incondicional, por todo lo que me brindó para crecer en lo personal y profesional, sin ella no sería lo que hoy soy. Gracias por siempre empujarme a cumplir mis sueños.

Agradezco a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Vicerrectorado de investigación y al financiamiento de tesis de pre-grado convocatoria 2022-1, Programa de Fortalecimiento de Investigación “Yachayninchis Wiñarinanpaq” con número de resolución R-408-2022-UNSAAC y contrato N° 005 –VRIN-2022-UNSAAC, por darme la oportunidad y el apoyo para la realización de este trabajo de tesis.

Agradezco a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, por estos 5 años de cobijo y a mis docentes por los conocimientos inculcados durante mi carrera profesional.

Agradezco a mi asesor externo Wilson Humberto López Abanto, por todas sus enseñanzas, por toda la exigencia, por todos sus consejos, por su constante apoyo, motivación, por enseñarme que cuando uno es perseverante todo es posible y por la confianza en mí para la realización de este trabajo de tesis.

Agradezco a mi asesor interno José Dionicio Cárdenas Roque, por su dedicación y esmero al impartir sus conocimientos durante mis estudios universitarios, por todo su apoyo y motivación a través de sugerencias y recomendaciones durante la realización y culminación de este trabajo de tesis.

Agradezco a la Ph. D. Maysa Vega, Ph. D. Ana Ibis Despaigne, Ph. D. Willy Gil y al Ph. D. Fernando Martínez por sus comentarios, recomendaciones y correcciones a este trabajo de tesis.

Agradezco a los ingenieros Ronald Zavaleta y Dennys Dueñas por compartirme sus conocimientos, guiarme para ser una mejor persona y profesional.

Agradezco a mis hermanos por siempre motivarme y preocuparse por mí, lo valoro mucho y los quiero mucho.

Agradezco a mis amigos Gwren, Heiner, Gabriela, Marilyn, Yoel, Oliver, Diana, Yenifer y Francisco por los buenos momentos que hemos compartido, por haberme demostrado su apoyo y brindado sus ánimos y consejos.

Agradezco a mis compañeros Nancy, John, Renberth, César, Yuliana, Isaías, Amadeus, Analy y Jayluz por el apoyo en la toma de datos en campo y la motivación durante la realización y culminación de este trabajo de tesis. Probablemente olvidaré algunos, por favor Perdóneme...

Finalmente agradezco a todas las personas que me apoyaron para sacar adelante este trabajo de tesis, ahora puedo decir: ¡lo logre!

Yessenia Puma Enriquez

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	3
1.1 UBICACIÓN.....	3
1.2 ACCESIBILIDAD	3
1.3 BASES TEÓRICAS.....	5
1.3.1 ANTECEDENTES	5
1.3.2 MARCO CONCEPTUAL	6
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	35
1.4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	35
1.4.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	35
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	36
1.6 OBJETIVOS.....	36
1.6.1 OBJETIVO GENERAL	36
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	36
1.7 HIPÓTESIS.....	36
1.7.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	36
1.7.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	36
1.8 VARIABLES	37
1.8.1 VARIABLES INDEPENDIENTES	37
1.8.1 VARIABLES DEPENDIENTES	37
1.9 METODOLOGÍA	37
1.9.1 MÉTODO CIENTÍFICO	37
1.9.2 MÉTODO DE TRABAJO.....	38
CAPITULO II: CONTEXTO GEOLÓGICO	40
2.1 GEOMORFOLOGÍA	40
2.1.1 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	40
2.1.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL	45
2.2 ESTRATIGRAFÍA.....	59
2.2.1 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	59

2.2.2 ESTRATIGRAFÍA LOCAL.....	69
2.3 MARCO TECTÓNICO.....	86
2.3.1 SECCIONES REGIONALES	92
CAPÍTULO III: MODELAMIENTO GEOLÓGICO.....	98
3.1 CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL	98
3.1.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES (COMBINACIONES RGB).	98
3.1.2 CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO EN CAMPO.	102
3.1.3 SECCIONES TRANSVERSALES.	113
3.2 MODELO EN 2.5D.....	116
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	117
4.1 FOTOINTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL.....	117
4.2 ESTACIONES ESTRUCTURALES	119
4.2.1 ESTACIÓN 1- E1.....	119
4.2.2 ESTACIÓN 2- E2.....	121
4.2.3 ESTACIÓN 3- E3.....	122
4.2.4 ESTACIÓN 4- E4.....	123
4.2.5 ESTACIÓN 5- E5.....	125
4.2.6 ESTACIÓN 6- E6.....	126
4.2.7 ESTACIÓN 7- E7.....	126
4.2.8 ESTACIÓN 8- E8.....	127
4.2.9 ESTACIÓN 9- E9.....	127
4.2.10 ESTACIÓN 10- E10.....	129
4.2.11 ESTACIÓN 11- E11.....	131
4.2.12 ESTACIÓN 12- E12.....	133
4.2.13 ESTACIÓN 13- E13.....	135
4.2.14 ESTACIÓN 14- E14.....	135
4.2.15 ESTACIÓN 15- E15.....	136
4.2.16 ESTACIÓN 16- E16.....	137
4.2.17 ESTACIÓN 17- E17.....	138
4.2.18 ESTACIÓN 18- E18.....	139
4.2.19 ESTACIÓN 19- E19.....	140
4.2.20 ESTACIÓN 20- E20.....	140

4.2.21 ESTACIÓN 21- E21.....	141
4.2.22 ESTACIÓN 22- E22.....	142
4.2.23 ESTACIÓN 23- E23.....	142
4.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS ESTACIONES ESTRUCTURALES	144
4.3.1 ANÁLISIS DE ESTRATIFICACIONES.....	144
4.3.2 ANÁLISIS DE VETILLAS.....	148
4.3.3 ANÁLISIS DE FOLIACIONES	152
4.3.4 ANÁLISIS DE FRACTURAS	154
4.3.5 ANÁLISIS DE FALLAS.....	157
4.4 ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO EN SECCIONES DELGADAS ORIENTADAS.....	190
4.4.1 DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE LAS MUESTRAS ORIENTADAS.	191
4.4.2 MICROTTECTÓNICA A PARTIR DE MUESTRAS ORIENTADAS.	192
4.4.3 ANÁLISIS DE SECCIONES ORIENTADAS.	197
4.5 GEOMETRÍA DEL ANTICLINAL	219
4.6 EVOLUCIÓN DEL ANTICLINAL.....	221
4.6.1 NORTE (D-D').....	221
4.6.2 CENTRO (E-E').....	224
4.6.3 SUR (F-F').....	226
4.7 EVOLUCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	228
CAPITULO V: DISCUSIONES.....	233
CONCLUSIONES	240
RECOMENDACIONES.....	241
BIBLIOGRAFÍA	242
ANEXOS	267
ANEXO 1	268
ANEXO 2	269
ANEXO 3	308
ANEXO 4	316

RESUMEN

El anticlinal de Puquín ubicado al Sur del Perú, en el departamento de Cusco, provincia de Cusco a 3399 m s. n. m., abarca los distritos de Poroy, Cusco, Ccorca y Santiago. El área total aproximada cubierta en este trabajo es de 186.88 km², geomorfológicamente ubicada entre la Cordillera Oriental y el Altiplano.

El objetivo principal de esta tesis consiste en determinar la geometría y desarrollar un modelo de evolución del anticlinal de Puquín que presenta un eje de pliegue de dirección N-S; a través de la determinación de unidades geológicas y del análisis estructural a partir del cartografiado geológico-estructural, estaciones estructurales, construcción de secciones transversales y el uso de proyección estereográfica.

El mapa geológico generado del área de estudio a una escala de 1:75000 a partir del cartografiado de campo, información bibliográfica vectorial de INGEMMET y procesamiento de imágenes satelitales muestran las unidades cretácicas como las formaciones Maras y Puquín, unidades paleógenas como las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza.

Del análisis estructural a partir de la fointerpretación de estructuras usando las combinaciones de bandas en tres tipos de imágenes Lansat 8 OLI [RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4], Aster L1T (RGB 3-2-1) y Sentinel 2A (RGB 4/3-4/2-11/12), de acuerdo a la frecuencia de azimut se tuvo 4 tendencias principales con direcciones NE-SO, NNO-SSE, ENE-OSO y NE-SO respectivamente. Además, a partir del ajuste Gaussiano polimodal se tuvo 6 tendencias principales T1 (50,54°), T2 (171,22°), T3 (80,16°), T4 (24,80°), T5 (139,50°) y T6 (115,88°).

Mediante el uso de softwares libres Stereonet, FaultKin 8.1, Orient 3.7.1, Estereografía Web, Win-Tensor y MIM, se realizó el análisis estructural de estratificaciones, vetillas, foliaciones, fracturas y fallas, a partir de la recolección de datos en las 23 estaciones estructurales. Con los datos de fallas con cinemática se determinó cinco eventos de deformación, evento 1 NO-SE de régimen transpresivo, evento 2 OSO-ENE de régimen transtensivo, evento 3 NO-SE de régimen de rumbo puro, evento 4 ONO-ESE de régimen de extensión pura y evento 5 NNO-SSE que representa el evento de deformación actual en el área de estudio con régimen tectónico de extensión pura. A partir de las estaciones estructurales que se llevaron a cabo en campo, en la Formación Puquín se reconoció estructuras típicas de extensión como horst y graben invertidos, siendo un evento más antiguo que el evento 1 reconocido a partir del análisis estructural; así también se realizó el análisis microtectónico de 10 muestras orientadas y se determinaron los eventos D1n, D2n, D3n', D3n y D4n que se correlacionaron con los eventos determinados en el análisis estructural macroscópico. Además, se determina la geometría del pliegue, a través de secciones geológicas de los sectores norte, centro y sur; y su proyección estereográfica, según la clasificación de pliegue por Fleuty (1964) a partir de la inclinación del plano axial y el plunge de la línea de charnela, el pliegue en el sector norte es un pliegue casi recto con inmersión suave, el sector centro y sur es un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada; tomando en cuenta el ángulo de interflanco, el pliegue en el sector norte y centro es un pliegue cerrado y en el sector sur es un pliegue abierto. Se interpreta el anticlinal de Puquín como un pliegue por propagación de falla transportado hacia el oeste.

Finalmente, se desarrolló tres modelos de evolución cinemática del anticlinal de Puquín, usando el método trishear que se realizó con el software Fault Fold Forward, con acortamientos totales de las secciones norte (15.1%), centro (12.1%) y sur (12%); y un modelo de evolución del área de estudio, relacionando la tabla de edades de las unidades estratigráficas y el régimen tectónico.

Palabras clave: Anticlinal; Puquín; análisis estructural; evolución; modelamiento

ABSTRACT

The Puquín anticline located in southern Peru, in the department of Cusco, province of Cusco at 3399 m s. n. m., covers the districts of Poroy, Cusco, Ccorca and Santiago. The approximate total area covered in this work is 186.88 km², geomorphologically located between the Eastern Cordillera and the Altiplano.

The aim of this thesis is to determine the geometry and develop an evolution model of the Puquín anticline that presents a fold axis in the N-S direction; through the determination of geological units and structural analysis from geological-structural mapping, structural stations, construction of cross sections and the use of stereographic projection.

The geological map generated of the study area at a scale of 1:75000 from field mapping, INGEMMET vector bibliographic information and satellite image processing show Cretaceous units such as the Maras and Puquín formations, Paleogene units such as the Quilque, Chilca, Kayra, Soncco formations and the Tacaza Group.

From the structural analysis from the photointerpretation of structures using the combinations of bands in three types of images Landsat 8 OLI [RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4], Aster L1T (RGB 3- 2-1) and Sentinel 2A (RGB 4/3-4/2-11/12), according to the azimuth frequency, there were 4 main trends with NE-SW, NNW-SSE, ENE-OSO and NE-SW directions respectively. Also, from the polymodal Gaussian adjustment, there were 6 main trends T1 (50.54°), T2 (171.22°), T3 (80.16°), T4 (24.80°), T5 (139.50 °) and T6 (115.88°).

Through the use of free software Stereonet, FaultKin 8.1, Orient 3.7.1, Estereografía Web, Win-Tensor and MIM, the structural analysis of stratifications, veinlets, foliations, fractures and faults was carried out, from the data collection in the 23 structural stations. With the fault data with kinematics, five deformation events were determined, event 1 NW-SE of transpressive regime, event 2 WSW-ENE of transtensive regime, event 3 NW-SE of pure strike regime, event 4 WNW-ESE of regime of pure extension and event 5 NNW-SSE that represents the current deformation event in the study area with a tectonic regime of pure extension. From the structural stations that were carried out in the field, typical extension structures such as horst and inverted graben were recognized in the Puquín Formation, being an event older than event 1 recognized from the structural analysis; Thus, the microtectonic analysis of 10 oriented samples was also performed and the events D1n, D2n, D3n', D3n and D4n were determined, which were correlated with the events determined in the macroscopic structural analysis.

Also, the geometry of the fold is determined, through geological sections of the northern, central and southern sectors; and its stereographic projection, according to the fold classification by Fleuty (1964) based on the inclination of the axial plane and the plunge of the hinge line, the fold in the northern sector is an almost straight fold with smooth immersion, the central sector and south is an abrupt dipping fold with moderate dip; Taking into account the interflank angle, the fold in the northern and central sectors is a closed fold and in the southern sector it is an open fold. The Puquín anticline is interpreted as transported west fault propagation fold.

Finally, three models of kinematic evolution of the Puquín anticline were presented, using the trishear method that was carried out with the Fault Fold Forward software, with total shortenings of the northern (15.1%), central (12.1%) and southern (12%) sections; and a model of evolution of the study area, relating the age table of the stratigraphic units and the tectonic regime.

Key Words: Anticline; Puquín; structural analysis; evolution; modeling

INTRODUCCIÓN

Los pliegues son definidos por Sitter (1976) como estructuras dúctiles, aun cuando a menudo llevan asociadas estructuras frágiles. Esto es debido a que algunas rocas, principalmente las sedimentarias, tienen un comportamiento dúctil, incluso a temperatura ambiente, al menos hasta adquirir una cierta cantidad de deformación.

El presente trabajo busca determinar la geometría y evolución del anticlinal de Puquín, el cual es una estructura geológica ubicada en la región de Cusco, en el núcleo del anticlinal afloran rocas sedimentarias de la Formación Puquín que está dividida en tres miembros llamados M1, M2 y M3; así también en los flancos del anticlinal afloran rocas sedimentarias de las formaciones Quilque, Chilca, Kayra y Soncco.

En la tesis se hará uso de información bibliográfica existente del área de estudio, se llevará a cabo el procesamiento de imágenes satelitales Aster L1T, Landsat 8 OLI y Sentinel 2A de la USGS Earth Explorer para determinar unidades y estructuras geológicas. Se desarrollará tres campañas de campo con un total de 30 días, la primera de 3 días con el reconocimiento del área de estudio, la segunda de 12 días realizando el cartografiado geológico - geomorfológico, comprobación de la fotointerpretación en la etapa de pre-campo y levantamiento de columnas estratigráficas; la tercera de 15 días, realizando estaciones estructurales en distintos puntos del área de estudio haciendo la recolección de datos estructurales (estratificaciones, fallas, foliaciones, vetillas, fracturas y más) y la toma de muestras orientadas.

Se generará secciones transversales a partir del mapa geológico actualizado, el cual nos dará información geométrica del anticlinal de Puquín y nos ayudarán en la realización del modelo en 2.5D. Para el análisis de estructuras geológicas se utilizará la proyección estereográfica, que es una herramienta esencial para los geólogos que permite que los datos de orientación tridimensionales sean a la vez representados y manipulados. Además, haremos uso de softwares libres como Stereonet (Allmendinger et al., 2012), FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990), Orient 3.7.1 (Vollmer, 2015), Estereografía Web (Cristallini, 2022), Win-Tensor (Delvaux, 2012) y MIM (Yamaji, 2000), determinando poblaciones de datos, paleoesfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3) y según la interpretación el régimen tectónico al cual pertenece. Con esta información se determinará la geometría y se desarrollará modelos cinemáticos directos en el software Fault Fold Forward, a partir de esto podremos inferir la evolución del anticlinal de Puquín, además se logrará entender la evolución tectónica del área de estudio.

Finalmente, el cuerpo de la tesis se organizará en los siguientes capítulos; Capítulo I Aspectos generales, se hará hincapié en la ubicación, descripción de las bases teóricas y metodología; Capítulo II Contexto geológico, se desarrollará la geomorfología, estratigrafía y marco tectónico; Capítulo III Modelamiento geológico, se describirá el cartografiado geológico-estructural con el procesamiento de imágenes satelitales, cartografiado en campo y generación de secciones transversales, además se presentará un modelo en 2.5D; Capítulo IV Análisis estructural, a partir de la fotointerpretación estructural, estaciones estructurales, análisis de las estructuras recopiladas en campo, análisis microtectónico, descripción de la geometría, evolución del anticlinal y área de estudio; Capítulo V Discusiones, desarrollamos la relación de los resultados con la información bibliográfica. Así también se presenta las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1 UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicado al Sur del Perú, en el departamento de Cusco, provincia de Cusco a 3399 m s. n. m., y abarca los distritos de Poroy, Cusco, Ccorca y Santiago (Figura 1. 1). El área total aproximada cubierta en este trabajo es de 186.88 km², entre la Cordillera Oriental y el Altiplano. Se encuentra limitada por el sistema de coordenadas proyectadas WGS_1984_UTM_Zona_18S.

1. X:816626.77 m Y:8507578.54 m
2. X:828877.88 m Y:8507582.29 m
3. X:828878.14 m Y:8492409.69 m
4. X:816564.30 m Y:8492409.48 m

1.2 ACCESIBILIDAD

El área de estudio está relativamente cerca de la ciudad, por lo que es accesible mediante vías terrestres, como carreteras y vías no asfaltadas, estas se describen a continuación.

El acceso a la zona norte del área de estudio, se realiza partiendo del centro de la ciudad del Cusco en dirección al poblado de Poroy a 60 minutos de viaje (Tabla 1. 1), se puede acceder en transporte público y/o privado hasta este sector que está a 8 km de la ciudad, posterior a este se toma vías locales, algunas asfaltadas, trocha carrozable y caminos de herradura para distribuirnos a otros puntos de este sector norte en busca de información.

El acceso a la zona central del área de estudio, se lleva a cabo mediante la carretera asfaltada que va hasta el sector de Puquín (Figura 1. 1), partiendo del centro de la ciudad del Cusco, con 30 minutos de viaje, se puede acceder en transporte público y/o privado hasta este sector, posterior a este se puede tomar un colectivo que parte de Puquín hacia la comunidad de Ccorca con 80 minutos de viaje (Tabla 1. 1), si se dispone de transporte privado se toma la misma vía, para realizar la recolección de información, en la parte central se toma vías alternas de trocha carrozable o caminos de herradura para los puntos que estén poco más alejados de la vía que va hacia Ccorca.

El acceso a la zona sur del área de estudio, se efectúa mediante la carretera asfaltada que va hasta el sector de Huancaro, partiendo del centro de la ciudad del Cusco, con 30 minutos de viaje, se puede acceder en transporte público y/o privado hasta este sector, posterior a este se puede tomar un colectivo que parte de Huancaro hacia la comunidad de Occopata con 50 minutos de viaje (Tabla 1. 1), si se dispone de transporte privado se toma la misma vía, al llegar a Occopata se toma vías de trocha carrozable y caminos de herradura para ir a los puntos objetivos dentro de este sector sur.

Zona	Trayecto	Distancia (km)	Tiempo Aproximado (min)
Norte	Cusco-Poroy	8	60
Centro	Cusco-Ccorca	11	110
Sur	Cusco-Occopata	8	80

Tabla 1. 1: Accesibilidad a las zonas dentro del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

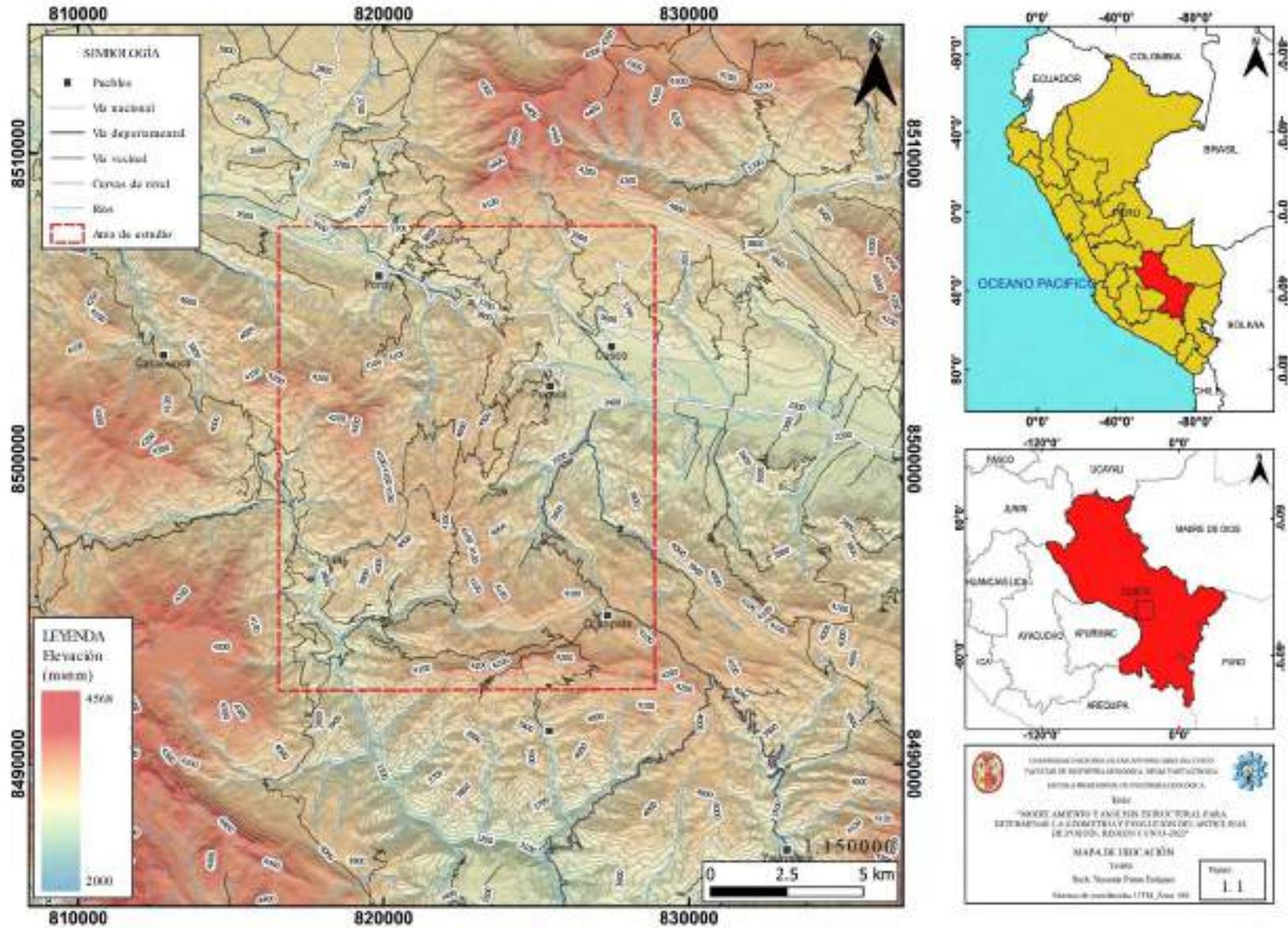


Figura 1. 1: Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

1.3 BASES TEÓRICAS

1.3.1 ANTECEDENTES

Existen pocos trabajos regionales que abarcan el área de estudio, destacando el trabajo de geología del cuadrángulo de Cusco 28-s (Carlotto et al., 2011).

EN 2011, Carlotto et al., "GEOLOGÍA DEL CUADRÁNGULO DE CUSCO/ Hoja 28-s".

La Formación Puquín está dividida en tres miembros llamados M1, M2 y M3, y aflora ampliamente en el núcleo del anticlinal de Puquín. La Formación Quilque aflora al oeste de la ciudad de Cusco, en los flancos del anticlinal de Puquín. La Formación Kayra aflora ampliamente al sur de la ciudad del Cusco, donde forma parte del sinclinal de Anahuarqui y anticlinal de Puquín.

Los estudios de Córdova (1986) y Carlotto (1998) han demostrado la existencia de subcuencas en el Altiplano del Cusco. Estas subcuencas corresponden a depresiones formadas por movimientos tectónicos dextrales entre 52 y 43 Ma (cuenca Kayra), que jugaron sobre antiguos accidentes, siendo los más importantes las fallas Huanoquite Accha, el anticlinal Monjaspata, el anticlinal de Puquín y la falla Anyarate-San Juan de Quihuas (Carlotto, 1998). Se sabe también que alrededor del Eoceno medio (43 Ma), las fallas comienzan a cabalgar y a formar pliegues de amortiguamiento.

Según Carlotto et al. (2011) las subcuencas de San Jerónimo, Ancaschaca y Ccorca se depositaron más de 3000 m de areniscas y lutitas fluviales que venían principalmente del sur. A partir de 43 Ma y hasta 30 Ma, por efecto de la tectónica andina llamada Inca 1, estas cuencas fueron sometidas a compresión mientras que la sedimentación continuaba, y en consecuencia se formaron discordancias progresivas en los bordes activos como el anticlinal de Monjaspata, el sinclinal de Occopata y en Ccorca, estas últimas asociadas al anticlinal de Puquín. Por lo tanto, en los bordes de estas estructuras es donde se ven discordancias progresivas, mientras que en los otros flancos se ve que todas las capas son concordantes.

EN 2019, Aramendia et al., "Las estructuras tectónicas andinas en las nacientes del arroyo Taquimilán (37°35'S), faja plegada y corrida del Agrio, Cuenca Neuquina".

Realiza un estudio del acortamiento en un área situada 20 km al sudoeste de Chos Malal, que abarca el límite entre la zona interna y externa de la faja plegada y corrida del Agrio, se adquirieron datos de campo que permitieron elaborar un mapa detallado, identificando cinco anticlinales con un rumbo aproximado N-S y vergencia dominante al este. En la zona interna la unidad más antigua aflorante es la Formación Tordillo, expuesta en el núcleo de un anticlinal con una longitud de onda de ~5 km considerado una estructura de primer orden que involucra al basamento. En la zona externa los pliegues tienen una longitud de onda de ~3 km, y forman estructuras de segundo orden que afectan principalmente al Grupo Mendoza. Un apretado anticlinal cuya longitud de onda es ~1 km, se interpreta como un pliegue de tercer orden que involucra a la Formación Agrio y unidades suprayacentes. Se elaboró una sección estructural balanceada O-E a los 37°35'S que permitió caracterizar el estilo estructural de la región y establecer una estrecha relación entre las estructuras de distinto orden, mediante corrimientos unidos a diferentes despegues en la cubierta sedimentaria que transmiten la deformación desde las estructuras de mayor escala a las de menor. La restitución

de la sección estructural interpretada permitió calcular un acortamiento tectónico de 7,24 km (27%). Mediante un modelo cinemático se visualiza la secuencia relativa de la deformación y la estrecha vinculación entre las estructuras de piel gruesa y piel fina en la región estudiada.

EN 2021, Frías et al., "Análisis geométrico y cinemático del anticlinal Chos Malal, provincia del Neuquén".

Realiza el análisis geométrico y cinemático del anticlinal Chos Malal (Argentina), el cual involucra a las secuencias sedimentarias del Jurásico Superior – Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina, se extiende ~9 km con un rumbo N-S y tiene una longitud de onda de ~3 km. Puede caracterizarse como un pliegue asimétrico, cerrado, volcado hacia el oeste y con eje doblemente buzante que se hunde 9°N y 9°S. El limbo frontal está invertido, presenta un adelgazamiento de ~19-23 % y es atravesado por un retrocorrimiento. Por sus características el anticlinal Chos Malal es interpretado como un pliegue por propagación de falla transportado. El acortamiento calculado a partir de dos secciones estructurales balanceadas es de 1.6 km (27.6 %) y 2 km (32 %) para las zonas norte y sur respectivamente. El análisis del patrón de fracturación en rocas de la Formación Mulichinco en distintos sectores del anticlinal permitió distinguir cuatro juegos de diaclasas: N-S, E-O, NE-SO y ONO-ESE. Estas fracturas son compatibles con un esfuerzo máximo compresivo (σ_1) en dirección E-O, similar al que originó el anticlinal Chos Malal.

1.3.2 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se menciona algunas de las teorías más trascendentales en el análisis estructural y en las que se fundamenta la presente investigación:

Stearns (1968) planteó la hipótesis de que las fracturas en rocas plegadas se componen de un conjunto de tres fracturas cuyas orientaciones son controlados por las orientaciones de los ejes principales de estrés.

Boyer y Elliott (1982), presentan un artículo acerca de los sistemas compresivos, en el cual proponen los principales marcos geométricos y su evolución, así como sus implicaciones mecánicas y la adición de nuevos modelos geométricos.

Elliott (1982), muestra cuáles son los datos que se necesitan para la interpretación estructural. Este autor discute los términos de viabilidad y admisibilidad de las interpretaciones estructurales.

Suppe (1985), resume los modelos geométricos de pliegues para sistemas compresivos y explica sus características. Jamison (1987); Dahlstrom (1990); Homza y Wallace (1995); Epard y Groshong (1995); Poblet y McClay (1996); Atkinson (2002); Los pliegues de despegue se forman cuando una unidad competente se acorta por encima de una unidad relativamente incompetente.

Cristallini (2000), pliegues de despegue, pliegues formados en relación con un cabalgamiento paralelo a las capas (despegue) en uno o más niveles de alta ductilidad. Se generan debido a esfuerzos compresivos horizontales que pliegan la secuencia, de modo que el material dúctil migra hacia el núcleo de la estructura, este mecanismo se denomina tectoquinesis.

Poblet (2004), analiza la cinemática de los distintos tipos de pliegues relacionados con fallas.

Pliegues geológicos. Los pliegues son estructuras dúctiles, aun cuando a menudo llevan asociadas estructuras frágiles. Esto es debido a que algunas rocas, principalmente las sedimentarias, tienen un comportamiento dúctil, incluso a temperatura ambiente, al menos hasta adquirir una cierta cantidad de deformación (Sitter, 1976).

Según Allmendinger (2015) las rocas plegadas son algunas de las estructuras geológicas más agradables desde el punto de vista estético y son muy importantes desde el punto de vista económico como trampas de hidrocarburos, así como en otras ramas de la geología. Cuando las rocas plegadas se cruzan con la superficie irregular de la Tierra, los patrones resultantes pueden ser bastante complejos. En un mapa, el pliegue generalmente se representa por la traza de la superficie axial (la intersección entre la superficie de la tierra, la superficie axial) y a veces la línea de la cresta. Para pliegues con buzamiento axial superficial (es decir, pliegues yacentes) el rastro puede ser bastante complejo.

Elementos geométricos de pliegues: Los elementos geométricos (Tabla 1. 2) se determinan en el perfil del pliegue (fold profile), siendo el perfil de un pliegue la sección transversal al mismo que es perpendicular a su eje.

Elementos geométricos de un pliegue			
Axial Surface	Superficie axial	Hinge points	Punto de charnela
Axial trace	Traza axial	Hinge line	Línea de charnela
Fold axis	Eje pliegue	Hinge zone	Zona de charnela
Inflection point	Punto de inflexión	Wavelength	Longitud de onda
Inflection line	Línea de inflexión	Amplitude	Amplitud
Non-cylindrical fold	Pliegue no cilíndrico	Limb	Flanco
Interlimb angle	ángulo entre flancos	Enveloping surface	superficie envolvente

Tabla 1. 2: Elementos geométricos de un pliegue. Fuente: Nabavi y Fossen (2021).

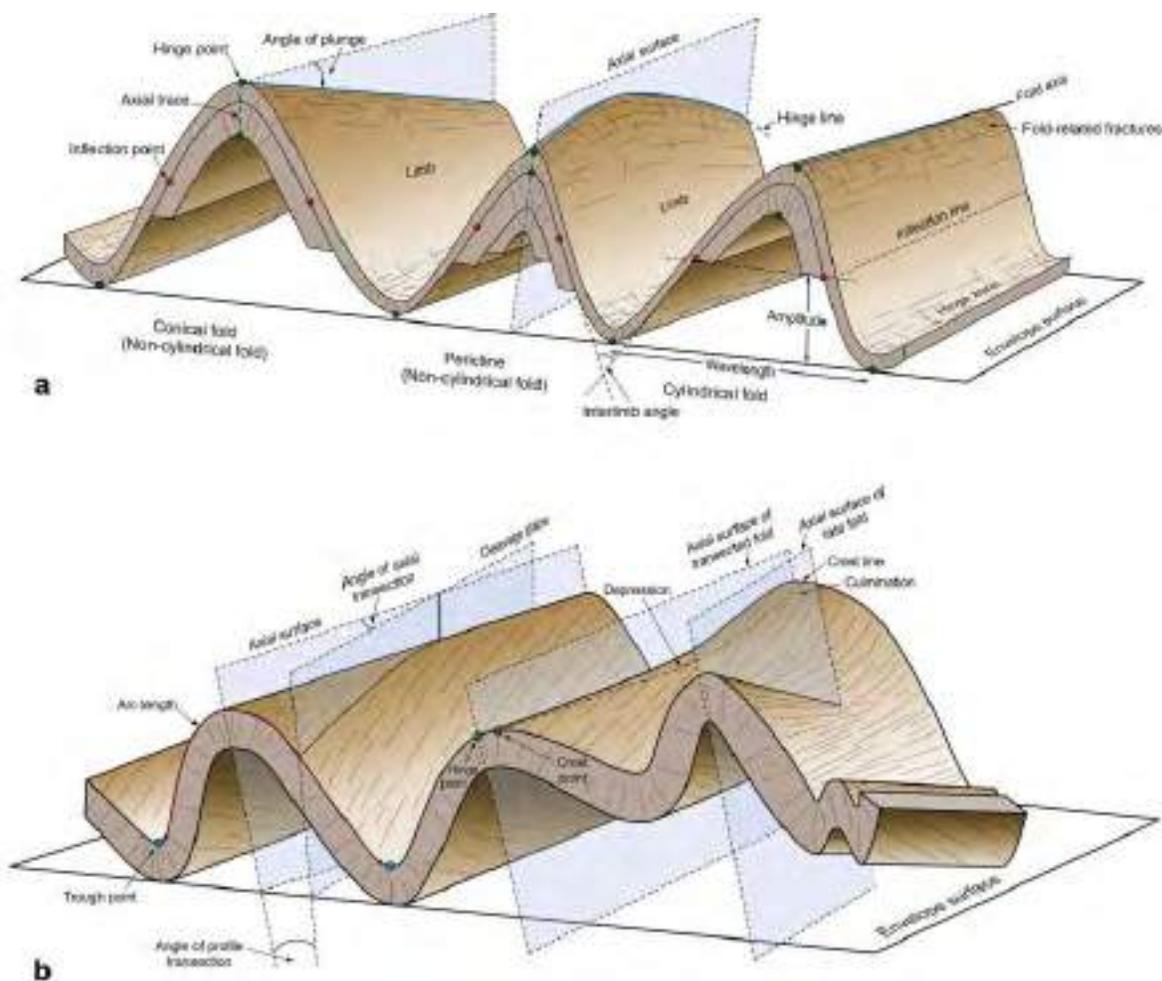


Figura 1. 2: a) Parámetros geométricos de pliegues cilíndricos y no cilíndricos (basado en Fossen, 2016). b) La relación entre el plano de ruptura, la superficie axial y superficie envolvente en pliegues con clivaje transecto y pliegue transecto. Fuente: Nabavi y Fossen (2021).

Pliegues cilíndricos y no cilíndricos. Buena parte de las clasificaciones de pliegues se basan en la forma de las superficies plegadas.

En un pliegue cilíndrico (Figura 1. 2), la forma de una superficie curvada puede ser generada llevando una línea recta y moviéndolo mientras se mantiene paralela a sí misma en el espacio.

Los pliegues que no pueden ser generados por la traslación de una línea recta son llamados no cilíndricos (Lisle, 2004).

Clasificación de pliegues según la inclinación del plano axial. Fleuty (1964) realizó la clasificación de los pliegues según la inclinación del plano axial y el plunge de la línea de charnela (Figura 1. 3), que fue modificada por Fossen (2010). Comúnmente se usan los términos, recto (para pliegues con plano axial vertical y línea de charnela horizontal) y recumbente (para pliegues con plano axial y línea de charnela horizontal).

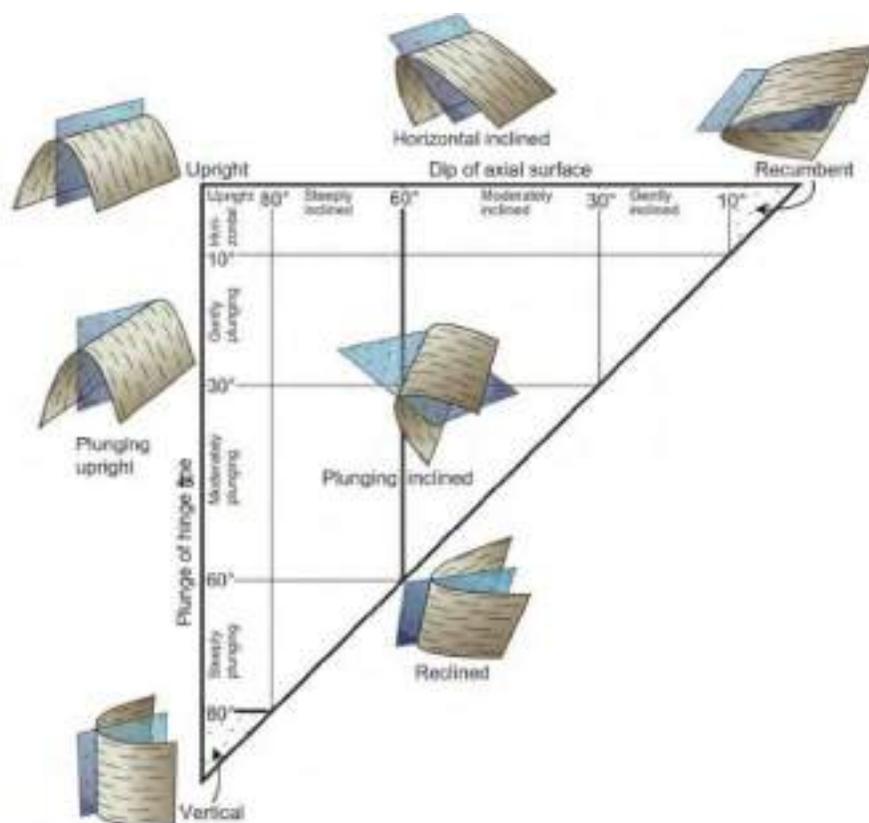


Figura 1. 3: Clasificación de pliegues basada en la orientación de la línea de charnela y el plano axial. Fuente: Fleuty (1964) y modificado por Fossen (2010).

Clasificación de pliegues por el ángulo de interflanco. Fleuty (1964) usó el ángulo entre flancos para describir la rigidez de los pliegues y diferenciar entre los siguientes tipos de pliegues (Figura 1. 4): suave ($180^\circ > \theta > 120^\circ$), abierta ($120^\circ \geq \theta > 70^\circ$), cerrada ($70^\circ \geq \theta > 30^\circ$), estrecha ($30^\circ \geq \theta > 0^\circ$), isoclinal ($\theta \approx 0^\circ$) (Tremlett, 1976) y elásticas o de hongo ($\theta < 0^\circ$ o menos de -3°). Las mediciones del ángulo entre los flancos se pueden obtener a partir de imágenes de perfiles de pliegues, por medición directa en el campo o trazando las extremidades de los pliegues en una red de áreas iguales.

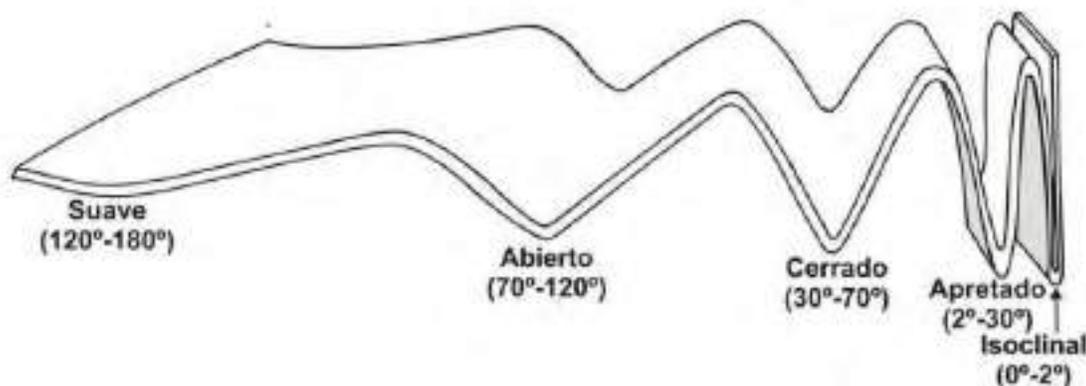


Figura 1. 4: Clasificación de pliegues por el ángulo de interflanco. Fuente: Fleuty (1964).

Secciones balanceadas. Una sección balanceada o perfil retrodeformable es un corte geológico profundo que representa el estado deformado de una región y puede ser geométricamente llevado a un estado no deformado sin que se produzca pérdida ni ganancia de material.

Debe existir un balance material entre el estado deformado y el no deformado, sin cambios de volumen. Para comprobar que no hubo cambios de volumen en una región estudiada, es necesario analizar la situación en tres dimensiones, lo cual es posible pero difícil de realizar. Una comprobación en dos dimensiones (perfiles) es más sencilla y más aún en una dimensión (longitud de líneas). Por ello, en rocas deformadas y metamorfizadas, un perfil retrodeformable solo es factible si el metamorfismo no superó un grado muy bajo. Si el perfil no es retrodeformable, el modelo no es posible y la solución con los datos disponibles es incorrecta.

- Un perfil balanceado no representa la realidad, es solo un modelo que tiene mayor posibilidad de ser correcto porque satisface limitaciones geométricas.
- Un perfil es admisible si las estructuras dibujadas en una sección son aquellas que se presentan en el área del perfil y pueden ser observadas en cortes naturales, cortes de caminos, fotografías aéreas, imágenes. Si además puede ser restituido a su estado no deformado, es también un perfil viable.
- Un perfil balanceado debe ser admisible y viable.

Suppe (1985) sugiere varios mecanismos de plegamiento para fajas plegadas y corridas:

Pliegues por flexión de fallas: Si la superficie de una falla no es plana, los bancos que se mueven por encima, tienden a acomodarse a su forma. El pliegue que se genera sobre una falla que cambia su inclinación, se denomina pliegue por flexión de falla o fault-bend fold (Figura 1. 5).

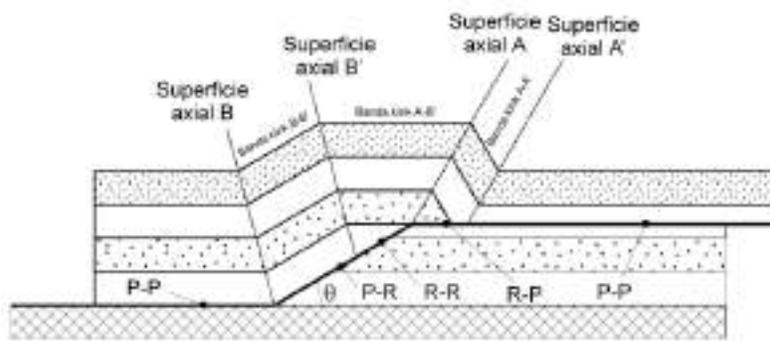


Figura 1. 5: Modelo de pliegue de flexión de falla. Fuente: Suppe (1983).

Los pliegues por flexión son los más simples de los vinculados a fallamientos. Este modelo se basa en conservación del área y de la longitud de las líneas estratales antes y después de la deformación. Implican cizalla paralela a la estratificación y por ende no contempla cambios en los espesores de los bancos. Este modelo produce pliegues simétricos.

Pliegues por propagación de falla: El modelo anterior no explica los pliegues vinculados a una falla, que tienen flancos frontales volcados. Así, Suppe y Medwedeff (1990), propusieron el plegamiento por propagación de falla, fault-propagation folding, modelo

que explica este tipo de pliegues. En este modelo se genera una falla que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento (Figura 1. 6).

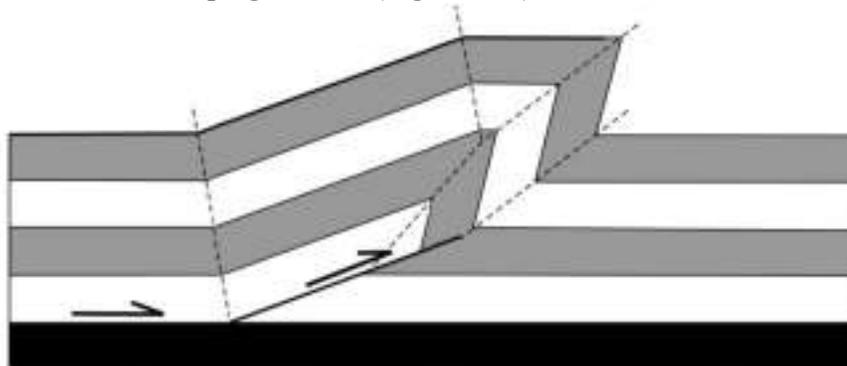


Figura 1. 6: Modelo por propagación de falla. Fuente: Suppe y Medwedeff (1990).

Pliegues por despegues (*detachment folds*): Se producen por la compresión de uno o más bancos de material de alta ductilidad (evaporitas, arcillitas, lutitas etc.) a los que sobreyacen bancos más consistentes. El espacio generado por debajo de la cúpula del pliegue puede ser rellenado por el material dúctil sin la necesidad de que existan rampas de fallas en el sistema (Figura 1. 7).

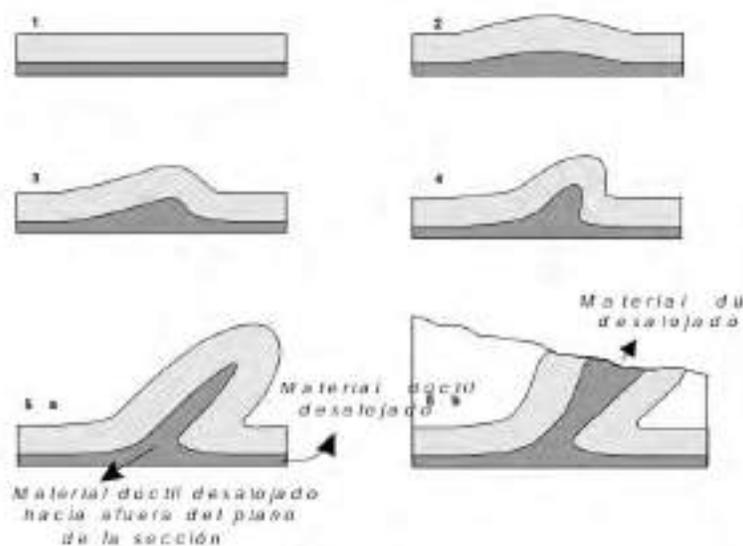


Figura 1. 7: Modelo de Pliegue por despegue. Fuente: Suppe y Medwedeff (1990).

Cálculo de acortamiento o estiramiento: Una vez realizada la restitución el acortamiento o extensión se expresa como porcentaje:

$$S = (l_i - l_f) \cdot 100 / l_i$$

l_i : es la longitud del banco antes de la compresión

l_f : después de la compresión.

En el caso de extensión

$$e = (l_f - l_i) \cdot 100 / l_f$$

Construcción de secciones transversales estructurales balanceadas.

Método Kink. Método de interpolación de pliegues paralelos kink solución de Coates (1945) y Gill (1953), recientemente popularizado por las secciones retrodeformables de Suppe (1983, 1985) y Kligfield y otros (1986). El método implica la extrapolación de buzamientos o ángulos de cabeceo en líneas rectas (Figura 1. 8) para formar "dominios de inmersión" separados por torceduras de planos de pliegue axial [los "rayos límite" de Coates (1945)]. Cuando las posiciones estratigráficas del lecho expuesto los contactos son desconocidos, la interpolación está sublimitada. Suponiendo espesores de flancos constantes, la torcedura del plano axial puede estar orientado para bisecar el ángulo entre los flancos, pero la ubicación de los planos es libre de estar en cualquier lugar dentro de la brecha de exposición, con las siguientes implicaciones para el espesor de los estratos entre las capas expuestas. Si se conocen las edades relativas de estos últimos, esta libertad está algo restringida (Es ingenuo ubicar un plano axial de pliegue a medio camino entre las inmersiones de los flancos expuestos sin considerar las edades relativas de los estratos de los flancos). Donde fusionarse hacia el núcleo de un pliegue de caja, en el medio del flanco es eliminado y un nuevo plano axial biseca los flancos exteriores como ángulo diedro.

Aunque se adaptan a ciertas litologías, las construcciones de kink a veces producen resultados excesivamente angulares y debe ser tratado como un caso extremo opuesto a las construcciones excesivamente redondas de Busk y Higgins (Declan y Dwight, 1988).

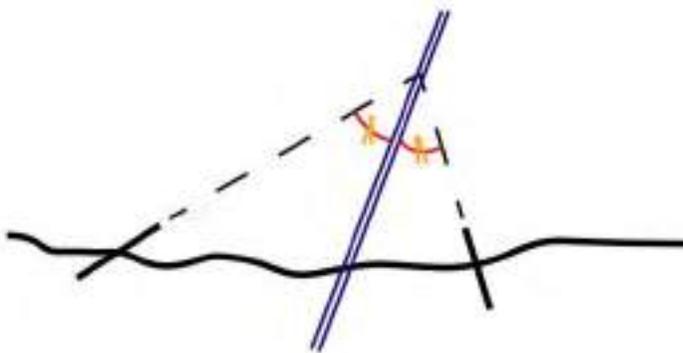


Figura 1. 8: Método de kink para dos lecturas de buzamiento en la misma capa. Si las capas tuvieran una edad relativa desconocida, la ubicación del eje de torcedura podría estar en cualquier parte del espacio de exposición. Fuente: Declan y Dwight (1988).

Para Faill (1973) el método Kink asume que las superficies geológicas plegadas se pueden simplificar en dominios planos de buzamiento (partes de la estructura donde el buzamiento de los estratos puede considerarse el mismo y simplificarse en una superficie plana), que cambian su buzamiento a través de superficies axiales, discordancias o fallas. Este método supone que el espesor de las capas permanece constante a lo largo superficies axiales y que las superficies axiales bisecan el ángulo entre los dominios planos de buzamiento. Si la sección transversal no es perpendicular al rumbo de las capas, los espesores serán aparentes, las superficies axiales no serán bisectrices, por lo tanto, el Método kink no es válido. Esta es otra razón por la que la línea de la sección transversal debe ser lo más perpendicular posible a las tendencias estructurales (Berta, 2019).

Pliegues de propagación de falla por la metodología de trishear. Los pliegues de propagación de falla propuestos por Suppe y Medwedeff (1990) son muy prácticos y fáciles de utilizar, sin embargo, constituyen solo una de las aproximaciones geométricas a las estructuras de este tipo que se encuentran en la naturaleza. En ejemplos naturales es muy común encontrar pliegues de propagación de falla de limbos curvos y con cambios de espesores de bancos. En modelos experimentales, los pliegues generados por propagación de falla son de charnelas curvas y se aprietan progresivamente con el aumento de rechazo. Esto no sucede en las geometrías recomendadas por Suppe y Medwedeff (1990) en el que el ángulo interlimbar se mantienen constante con el desplazamiento y solo depende del ángulo de corte. Erslev (1991) estudio estas diferencias en pliegues que involucran al basamento y sugirió un modelo por la metodología de trishear para explicar muchas de las geometrías encontradas en la naturaleza, al que domino pliegues de propagación de falla por la metodología de trishear (trishear fault propagation fold).

Para entender qué es lo que ocurre en una zona de cizalla triangular (trishear), se pueden imaginar dos bloques entre los que se genera una propagación de falla (Figura 1. 6). Se suponen ambos bloques como rígidos, excepto en el sector sombreado en que el movimiento de las distintas partículas puede no ser paralela y puede considerarse dúctil. La zona de cizalla triangular estará restringida al bloque colgante (Figura 1. 9), al bloque basal o ser simétrica y acomodarse entre ambos. En los dos primeros casos varía el área durante la deformación y el modelo no balancea. En el segundo el área se mantiene constante, por lo que el modelo es balanceable. Es así que Erslev (1991) propuso a las zonas de cizalla triangular como simétricas; sin embargo, como posteriormente demostraron Zehnder y Allmendinger (2000) si bien esta es lo más común, no es estrictamente necesario.

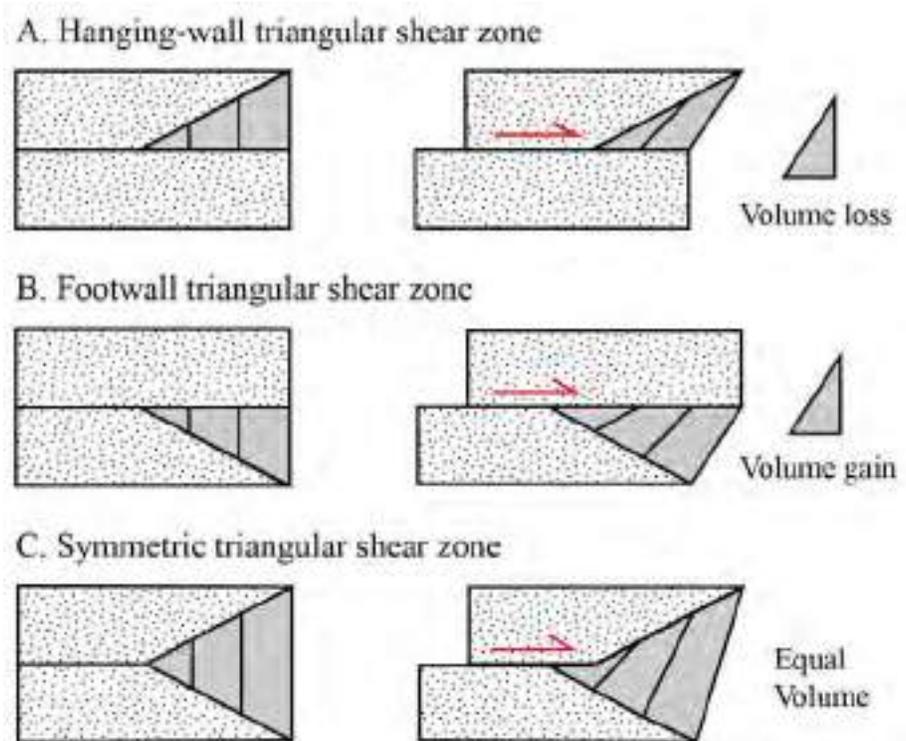


Figura 1. 9: Geometría simplificada de cizalla triangular (Trishear). Fuente: Erslev (1991).

El modelo de trishear fue propuesto por Erslev (1991) para pliegues que involucran al basamento y se adapta bien a pliegues en rocas dúctiles; sin embargo, también se puede aplicar a rocas sedimentarias en que los engrosamientos o adelgazamientos se resuelven con microfracturas o con el acomodamiento de algunos bancos más dúctiles. Es importante remarcar que la deformación dentro de la zona de cizalla triangular no es homogénea, por lo cual no se conserva el paralelismo de las líneas. Si bien el modelo está balanceado por áreas, no lo está por longitud de líneas (es decir, que no se conserva la longitud de los bancos antes y después de la deformación).

Allmendinger (1998) trazó la deformación dentro de la zona triangular (Figura 1. 10) definiendo círculos mediante puntos discretos que al moverse siguiendo los algoritmos de trishear se deforman en pseudo-elipses (al no ser homogénea la deformación, no se forman elipses verdaderas). Ajustando elipses verdaderas a dichos puntos, se pueden obtener los ejes principales y las líneas de no deformación finita de dichas elipses. Este método es sumamente potente para predecir patrones de fracturamiento en pliegues que se puedan explicar por trishear.

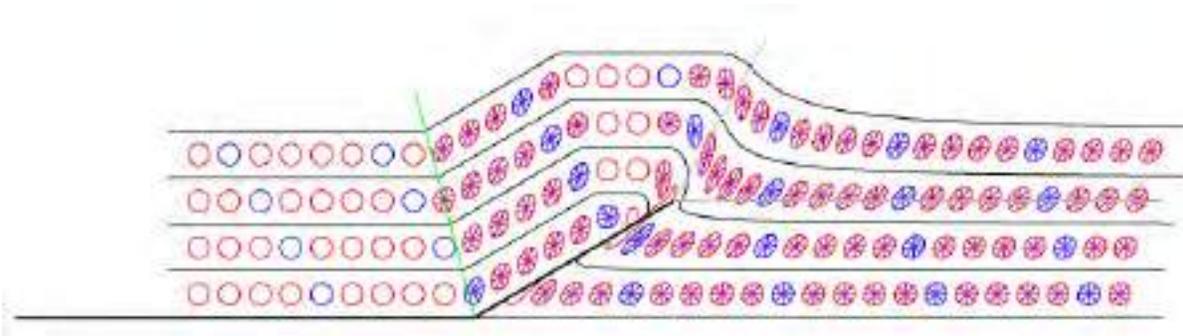


Figura 1. 10: La deformación dentro de la zona triangular definiendo círculos en el modelo original que se deforman a pseudo-elipses. Se pueden obtener los ejes principales y las líneas de no deformación finita de dichas pseudo-elipses. Fuente: Allmendinger (1998).

Los principales parámetros del modelo de trishear.

Erslev (1991) observó que las zonas de cizalla triangulares pueden estar fijadas al bloque basal o moverse junto con el bloque colgante (Figura 1. 11). Si el ápice del triángulo de cizalla está fijo a la pared basal, el basamento (en negro) entra en la deformación, pero si el ápice se fija a la pared colgante esto no ocurre. Hardy y Ford (1997) cuantifican la velocidad relativa de la zona de trishear respecto de los bloques colgante y basal mediante la relación propagación/desplazamiento (P/S). La propagación (P) representa la velocidad de avance del tip-line respecto al bloque basal y el desplazamiento (S de slip) la velocidad de avance del bloque colgante respecto al bloque basal. Esta relación (P/S) se convirtió en una de las variables más importantes del modelo y según lo investigado por Allmendinger (1999) controla más la geometría resultante que el propio ángulo ápice del trishear. Las otras variables que participan en el modelo, son el ángulo de falla, el ángulo ápice de trishear, desplazamiento (S) y posición inicial del tip-line. La Figura 1. 11 muestra algunas de las geometrías posibles generadas por el modelo de trishear y la influencia que tiene el cambio de las diferentes variables, la Figura 1. 12 muestra los parámetros para el trishear y la Figura 1. 13 muestra ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas.

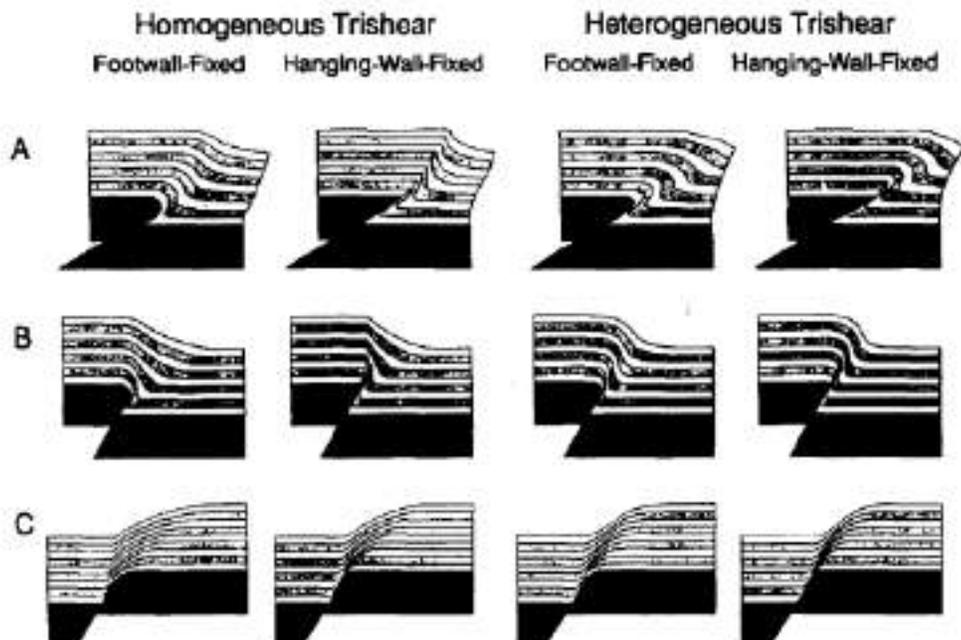


Figura 1. 11: Ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas de alto ángulo, corrimientos y fallas directas. Fuente: Erslev (1991).

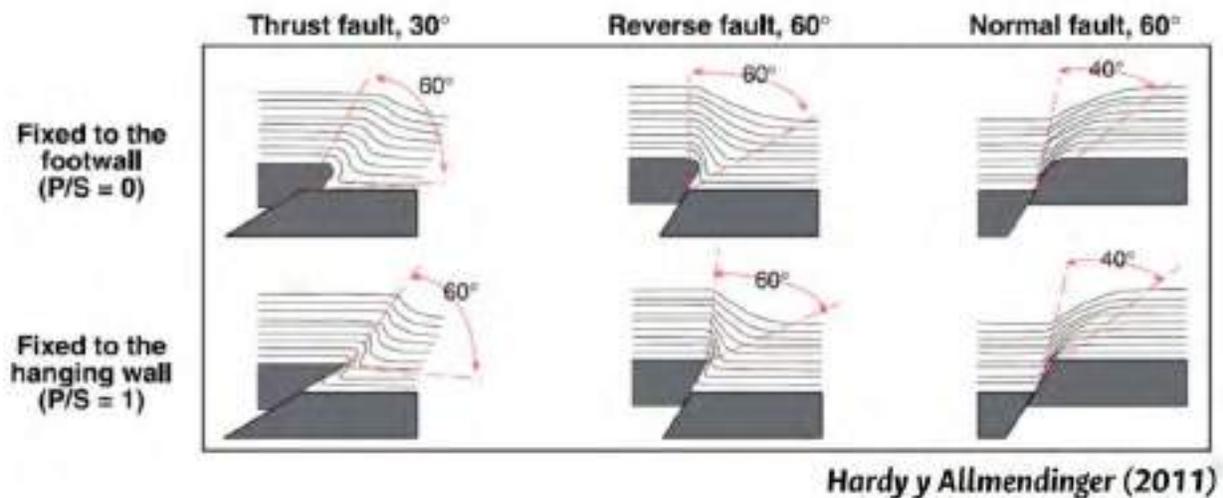


Figura 1. 12: Parámetros para el trishear. Fuente: Hardy y Allmendinger (2011).

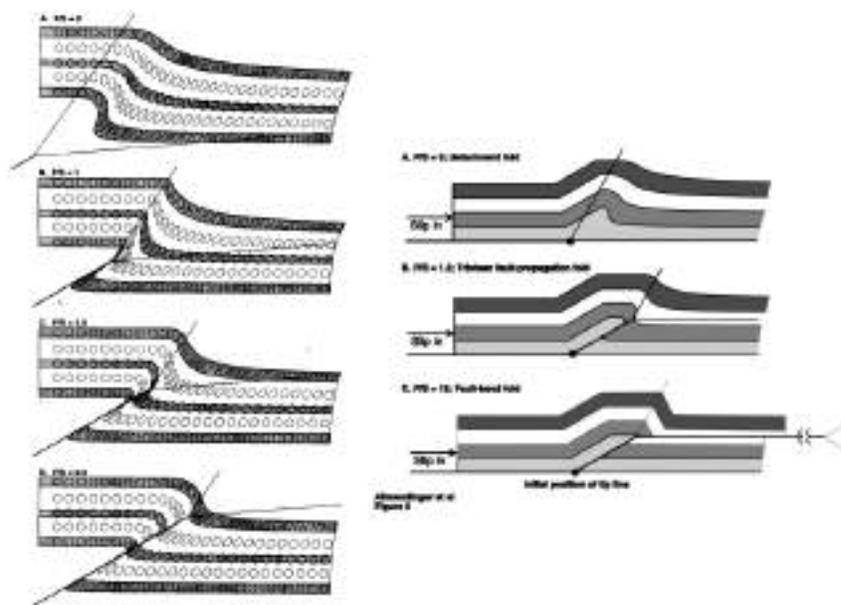


Figura 1. 13: Ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas. Fuente: Allmendinger (1998); Allmendinger y Shaw (2000).

Fault Fold Forward. Es un programa operativo tanto para Macintosh como Windows, sistemas que le permite crear hacia adelante modelos de secciones transversales de área equilibrada. El programa le permite especificar cualquiera similar o paralelo a pliegue por flexión de falla (Medwedeff 1989; Supe 1983; Supe 1990; Woodward 1989), produce pliegues de propagación de fallas utilizando cinemática trishear (Allmendinger 1998; Allmendinger y Shaw 2000; Cardozo et al.,2003; Erslev 1991; Hardy 1997a y Zehnder 2000). Las secciones pueden tener múltiples fallas y cada falla puede tener múltiples curvas. Las fallas individuales pueden ser normales o inversas. El programa también calcula la deformación a intervalos uniformemente espaciados en una sección. Se pueden simular secciones sorprendentemente complicadas (Figura 1. 14).

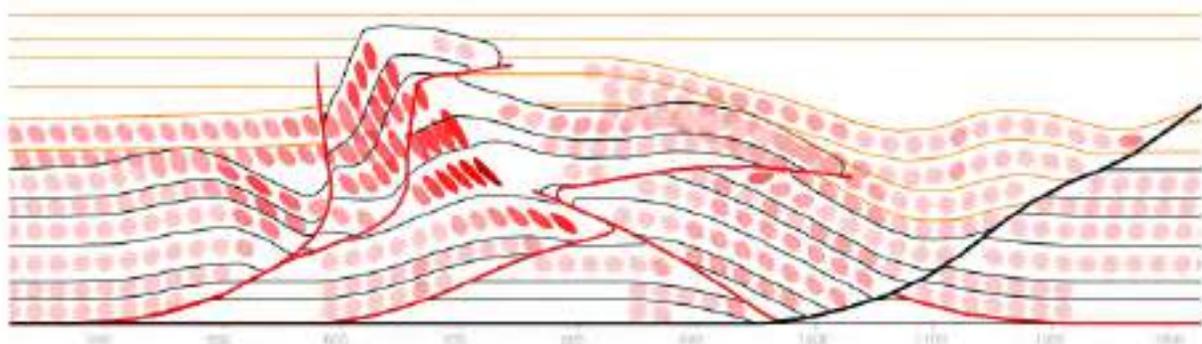


Figura 1. 14: Ejemplo de una secuencia complicada de fallas simuladas con Fault Fold Forward. La falla activa está en negro y las fallas inactivas en rojo. Varias generaciones de estratos de crecimiento están en naranja. Las elipses están sombreadas por la magnitud de la deformación. El diagrama no está retocado. Fuente: Allmendinger (2012).

Análisis estructural: los geólogos estructuralistas utilizan el análisis estructural en planos de falla con la finalidad de identificar y recoger la mayor cantidad de datos que den información acerca de la historia estructural de una región. Para tal fin se aplica el análisis cinemático y dinámico propuesto por Rowland (2007).

El análisis estructural está constituido por:

- Análisis descriptivo: identificación, observación, descripción geométrica de los cuerpos rocosos (desde este punto de vista de su clasificación en diversos grupos de rocas), análisis de la estructura y sus elementos estructurales.
- Análisis Cinemático: Interpretación de la deformación, reconstruye los movimientos de las partículas del cuerpo original, describir los desplazamientos (transcurrente, normal o inverso) que dan lugar a la formación de una estructura.
- Análisis Dinámico: Establecer un modelo de esfuerzo, reconstruye los esfuerzos que dieron origen a la deformación, su dirección y su magnitud (Martínez, 2003).

Esfuerzo y deformación. la deformación de una roca (por ejemplo, cizalla pura, de corte simple, etc.) está relacionado directamente con el esfuerzo, esto se explica cuando las magnitudes y las orientaciones de los esfuerzos principales se conocen. Pero esto no es así, en general, cuando la información de los esfuerzos se combina con estructuras observables en rocas deformadas, por lo general da más información acerca del tipo de deformación de un esfuerzo puntual (Fossen, 2010).

Fracturas.

Las fracturas son superficies a lo largo de las cuales se han roto rocas o minerales, creando dos superficies libres donde no existía antes; por tanto, serán superficies a través de las cuales la materia ha perdido cohesión. Las fracturas se encuentran entre las más comunes de todas las características geológicas; casi no existe ningún afloramiento rocoso que no tenga algunas fracturas a través de él. Son significativos por la información que proporcionan sobre la secuencia de eventos tectónicos durante los cuales se formaron las fracturas y por las características físicas que imparten a la roca en que ocurren.

Las fracturas son críticas, por ejemplo, en la determinación de la permeabilidad de la roca al flujo de fluidos y las propiedades de almacenamiento de fluidos de la roca, que son a la vez importante en la evaluación de las características del acuífero, el transporte de contaminantes y la migración de petróleo y gas. Ellos también afectan fuertemente las propiedades mecánicas de la roca, que son cruciales en el diseño de estructuras tales como presas y túneles.

Debido a que la escala del afloramiento es fácil de observar y es base de toda la geología de campo, enfatizamos las características descriptivas de las fracturas en la escala del afloramiento. Los estudios de fracturas en rocas; sin embargo, muestran que la geometría de la fractura es auto-similar, lo que significa que las fracturas tienen el mismo patrón geométrico y distribución espacial, independientemente de si la escala a la que están vistos es una escala microscópica, una escala de afloramiento o una escala regional (Figura 1. 15). Esta característica es fundamental para entender cómo las fracturas determinan las características físicas de las rocas en las que ocurren.

Distinguimos dos tipos básicos de fractura, extensión y fracturas por corte, de acuerdo con el movimiento relativo que ha ocurrido a través de la superficie de fractura durante la formación. Para las fracturas por extensión, el movimiento relativo, como la fractura se propaga, es perpendicular a las paredes de las fracturas, lo que se conoce como modo I de propagación (Figura 1. 15 A). Para las fracturas por corte, el movimiento relativo durante la propagación es paralela a la superficie. Dos miembros finales son posibles los modos de propagación de la fractura por cortante: Modo II la propagación ocurre si el movimiento de deslizamiento es perpendicular a la punta o borde de propagación de la fractura (Figura 1. 15 B); la propagación del modo III ocurre si el movimiento de deslizamiento es paralelo a la punta de propagación (Figura 1. 15 C). Por lo tanto, una fractura por cortante cuyo borde de propagación es un bucle cerrado en expansión implica tanto la propagación del modo II como del modo III, así como una combinación de ambos, dependiendo en la orientación local de la punta de la fractura en relación con la dirección del corte en la fractura.

Una fractura que tiene componentes de desplazamiento tanto perpendiculares como paralelas a la superficie de la fractura es una fractura de extensión oblicua.

El supuesto modo de propagación es a veces utilizado como base para clasificar las fracturas o para comprender la formación y el significado de las fracturas (Twiss y Moores 2007).

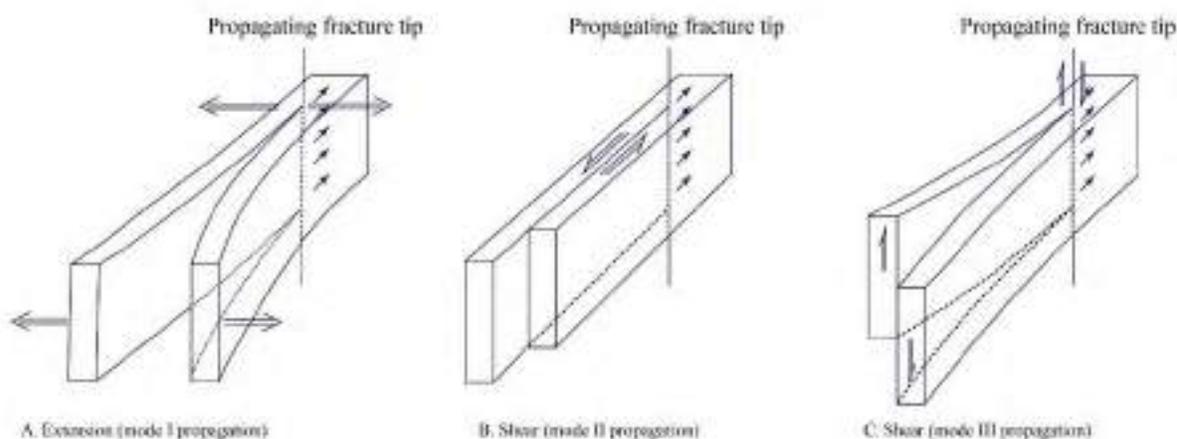
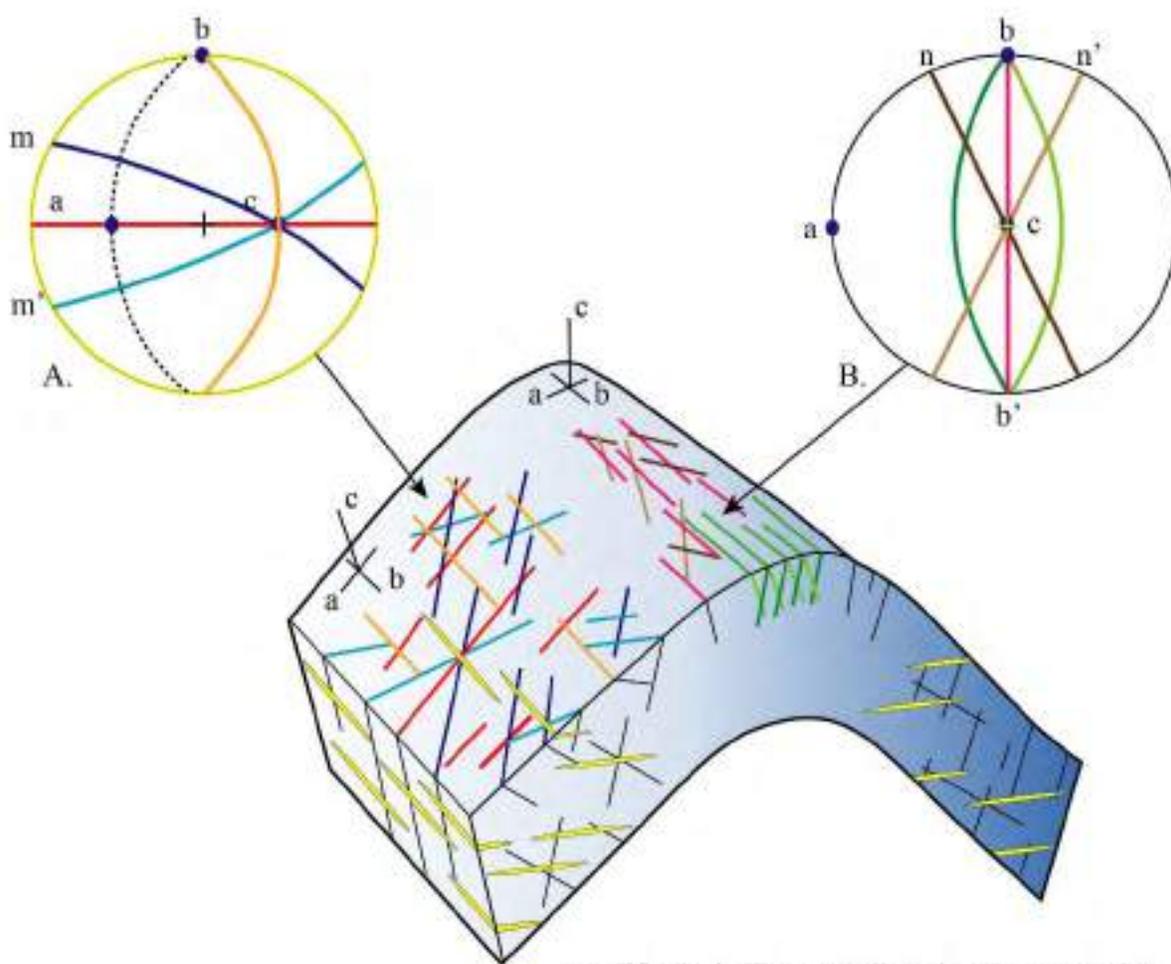


Figura 1. 15: Las distinciones entre los principales tipos de fracturas basados en el desplazamiento relativo del material en lados opuestos de la fractura. Fuente: Twiss y Moores (2007).

Fracturas asociadas con pliegues.

Las fracturas a menudo se desarrollan en las rocas en asociación con el plegamiento, una variedad de orientaciones relacionadas simétricamente con el pliegue, han sido reportados. Considerando tres ejes ortogonales entre sí: el eje a perpendicular al rumbo de la capa plegada, el eje b paralelo al rumbo (y paralelo al eje del pliegue) y el eje c perpendicular al plano de estratificación. En los conjuntos (A) y (B), la ac de color rojo o bc de color fucsia bisecan el ángulo agudo a dos conjuntos de fracturas, que son fracturas oblicuas. En el conjunto (A) las fracturas de color azul y celeste son oblicuas al eje del pliegue y suelen formar entre ambos juegos un ángulo de aproximadamente 60°, cuya bisectriz corresponde a la dirección del máximo esfuerzo compresivo, las fracturas bc de color anaranjado bisecan el ángulo obtuso entre las fracturas oblicuas, las fracturas inclinadas de

color verde oscuro y verde claro en el conjunto (B) son paralelas al eje de pliegue b y hacen un ángulo alto con la estratificación. Las fracturas en el conjunto (A) son particularmente comunes en los flancos del pliegue; el conjunto (B) tiende a asociarse con los lados convexos de un pliegue o como se conoce la charnela, donde la curvatura es más fuerte. Es posible que las fracturas de todas estas orientaciones se formaron en asociación con el plegamiento, que el ac sean fracturas de extensión y que el oblicuo o las fracturas inclinadas son fracturas por corte. Sin embargo, esta interpretación no se justifica simplemente sobre la base de patrón de fractura y orientación. Tales fracturas tienen demostrado que es anterior al plegamiento en algunos casos, y que lo pospone en otros (Figura 1. 16).



Modificado de Sibson (1996); Twiss y Moores (2007).

Figura 1. 16: Fracturas asociadas con pliegues. Fuente: Modificado de Sibson (1996); Twiss y Moores (2007).

Vetillas extensionales.

Las vetillas extensionales son muy comunes en las zonas de cizalla. Se encuentran típicamente rellenas de cuarzo y calcita y se forman a $\sim 45^\circ$ de la dirección de cizalla, paralelas al sigma 1 y perpendiculares al sigma 3. Una vez cristalizadas pueden ser plegadas y rotadas, con lo cual adquieren una geometría sigmoidal. Así mismo, pueden formarse nuevas generaciones de vetillas durante la deformación progresiva (Figura 1. 17).

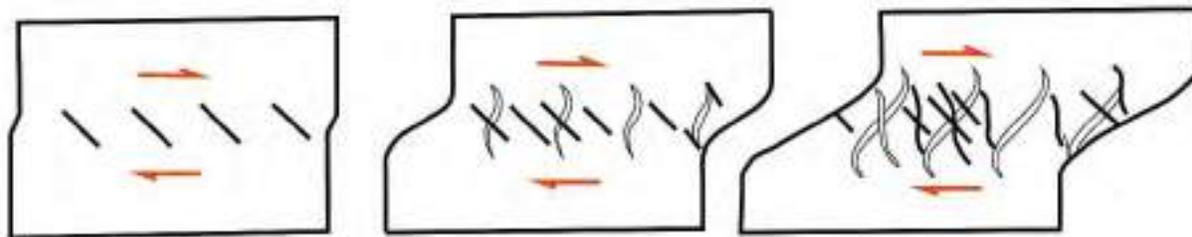


Figura 1. 17: Las vetillas escalonadas y su relación con los bordes de la zona de cizalla. Nótese la formación de distintas generaciones durante la deformación progresiva. Fuente: Durney y Ramsay (1973).

Fallas. Las grietas o fracturas que contengan desplazamiento se denominan fallas geológicas, puede ocurrir en una roca en uno, dos o tres modos fundamentales o en una combinación de estos, donde existen esfuerzos y periodos de relajación, lo cual da como resultado lo que denominamos estructuras geológicas (Allmendinger, 2015).

Las fallas son estructuras complejas o compuestas que pueden acomodar grandes cantidades de tensión, una falla es cualquier superficie o zona con visible desplazamiento a lo largo de esta zona (Fossen, 2010).

Dichos movimientos son puestos en evidencia por el desplazamiento de marcadores en los bloques o por pequeñas estructuras indicadoras en el plano de falla conocidas como tectoglifos (Figura 1. 18). Cada movimiento de la falla corresponde a la acción de un estado de esfuerzos (stress) temporal en el área. Existen fallas de todos los tamaños y con desplazamientos desde milímetros hasta cientos de kilómetros (Machare, 2018).

Los datos útiles para el análisis incluyen:

- Rumbo y buzamiento del plano de falla
- Indicadores cinemáticos:
 - Pitch de las estrías y su tipo
 - Distancia de elementos desplazados como contactos o vetas
 - Características del gouge o brecha de falla: potencia, granulometría, composición de clastos y matriz, textura.

Tectoglifos o microestructuras frágiles. Son una serie de estructuras pequeñas (milímetros a metros), desarrolladas en medio frágil y asociadas a fallas. Se emplean para determinar la dirección y sentido de desplazamiento sobre un plano de falla, por lo tanto, son datos esenciales en los análisis cinemáticos y dinámicos (Petit et al., 1983).

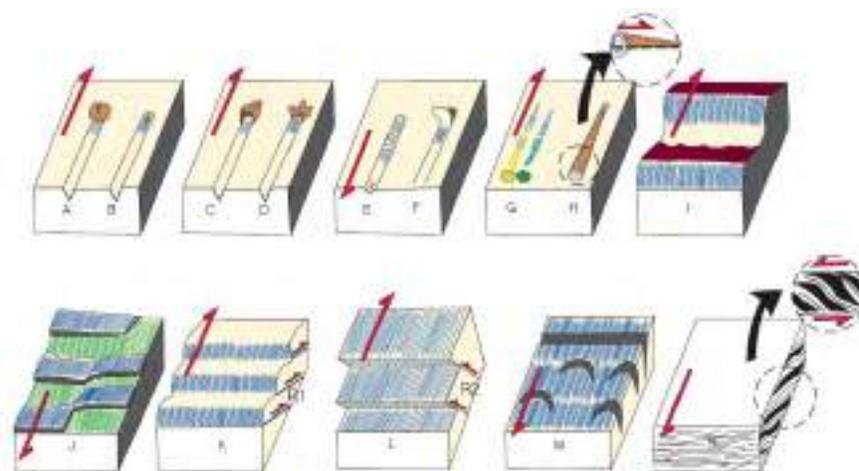


Figura 1. 18: Tectoglifos – criterios de sentido de movimiento de fallas. A) Elemento estriador al cabo de la estría, B) Material triturado al cabo de estría, C) Banqueta al cano de estría, D) escama de arrastre, E) Nichos de arranque, F) Escama de arranque, G) Colas de mineral. H) Lomos de abrigo, I) Planos ondulados: Faceta estriada VS, J) cristalización al abrigo, K) Riedel R, L) Riedel R2, M) Lúnulas de tracción y N) Lenticulaciones. Fuente: Modificado de Macharé (2006).

Tipos de fallas. Existen diferentes clasificaciones para fallas, de acuerdo a su geometría, al desplazamiento relativo de bloques, etc.; entre las más comunes tenemos las siguientes fallas.

- Normal: Falla en la cual el bloque techo ha descendido con relación al bloque piso (Figura 1. 19 a), también se denomina falla gravitacional.
- Inversa: Falla en la cual el bloque techo ha ascendido con relación al bloque piso (Figura 1. 19 b).
- Rumbo: Falla cuya traza es paralela al rumbo de las capas, esta falla no debe confundirse con la falla de desplazamiento de rumbo (Figura 1. 19 c).
- Lítrica normal: Falla cuya superficie es curva, con buzamiento alto hacia la superficie y bajo hacia la profundidad, el bloque techo ha descendido con relación al bloque piso (Figura 1. 19 d).
- Cabalgamiento: Falla inversa cuyo plano de falla presenta bajo ángulo de buzamiento (Figura 1. 19 e).
- Rotacional: Falla en la cual uno de los bloques ha rotado con respecto al otro, en uno de los extremos tiene comportamiento normal y en el otro inverso (Figura 1. 19 f).

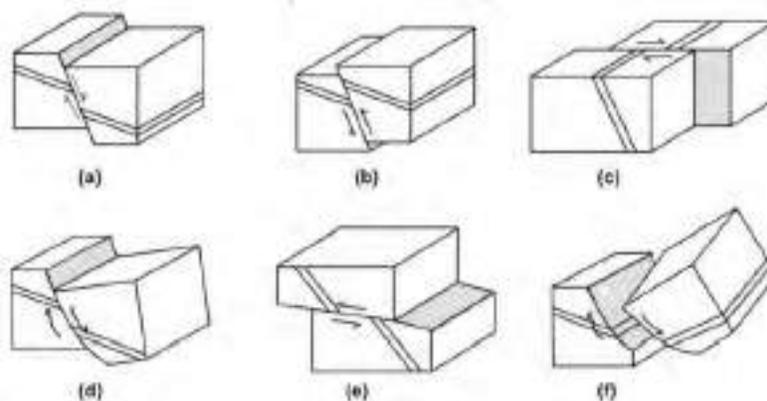


Figura 1. 19: Tipos de fallas. Fuente: Camargo (2015).

Transpresión y transtensión. Hemos visto que las curvaturas en fallas de rumbo pueden producir componentes locales de compresión o extensión. El tipo de deformación que se produce en tales curvaturas se conoce como “Transpresión” y “Transtensión”. Estos modelos de deformación no tienen que limitarse a fallas curvas, sino, pueden dominar toda la longitud de la falla de rumbo si la zona de falla o de cizalla no es puramente de rumbo. Para una zona de cizalla, esto significa una derivación de cizalla simple, donde contiene un componente adicional de acortamiento o la extensión perpendicular al plano de falla.

En general, el concepto “Transpresión” se refiere al espectro de combinaciones propias de un sistema strike-slip, la tensión que implica el acortamiento perpendicular a la zona (Figura 1. 20) y la transtensión abarca las combinaciones de cizalla y extensión perpendicular. Es decir; transpresión (transtensión) es la combinación simultánea de componentes strike-slip (falla de rumbo) o movimientos de cizalla simple a lo largo de una estructura y el acortamiento (extensión) es perpendicular a la misma.

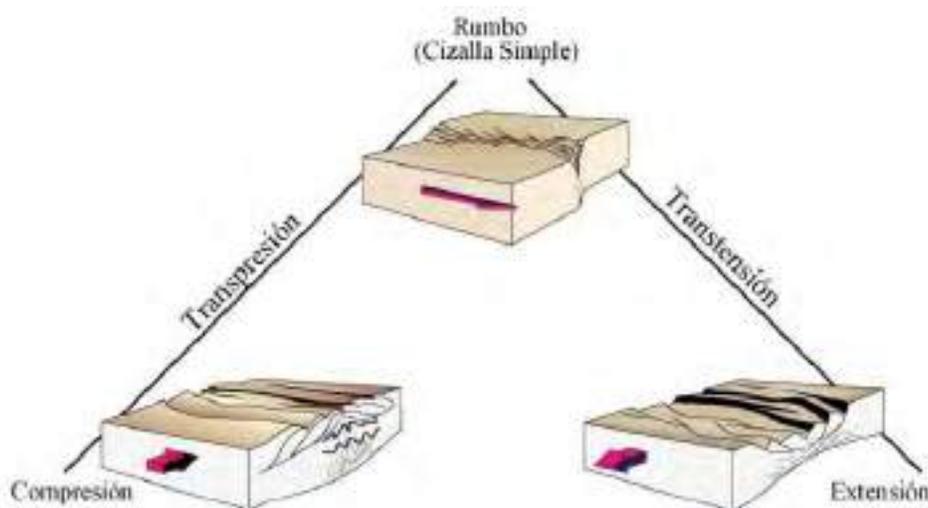


Figura 1. 20: Modelos de transpresión y transtensión conectados por estilos de compresión, strike slip (rumbo) y extensión.
Fuente: Fossen (2010).

Modelo de anderson para fallas. Anderson (1951) reconoció que las propiedades de las direcciones de esfuerzos principales en combinación con la ley Mohr-Coulomb requieren que cerca de la superficie de la tierra solo se pueden formar fallas de deslizamiento según la dirección (desgarre) y fallas de deslizamiento según el buzamiento (normales o inversas) (Babín Vich y Gómez, 2010). A partir de las orientaciones de las fallas que se han formado en un campo de esfuerzos dado, se puede evaluar estereográficamente la orientación de los esfuerzos principales que han dado lugar a estas fallas; o bien, conocida la orientación de los esfuerzos y el valor del ángulo de fricción interna de la roca, deducir la orientación y características de fallas resultantes. Dado la propuesta de Anderson (1951), se tendrá en cuenta las principales premisas:

- Los tres ejes principales de esfuerzos son perpendiculares entre sí.
- La línea de intersección de los círculos mayores en las fallas conjugadas es σ_2 .
- El plano perpendicular a σ_2 se denomina plano de movimiento y contiene a σ_1 y σ_3 .

La línea de intersección de los dos planos de falla en todos los casos coincide con el esfuerzo principal medio σ_2 . Anderson propone un modelo de clasificación dinámica para las fallas, basado

en el posicionamiento de los tres vectores principales σ_1 , σ_2 , σ_3 , ortogonales entre sí (Figura 1. 21).

Anderson restringe este modelo al siguiente requisito general de: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

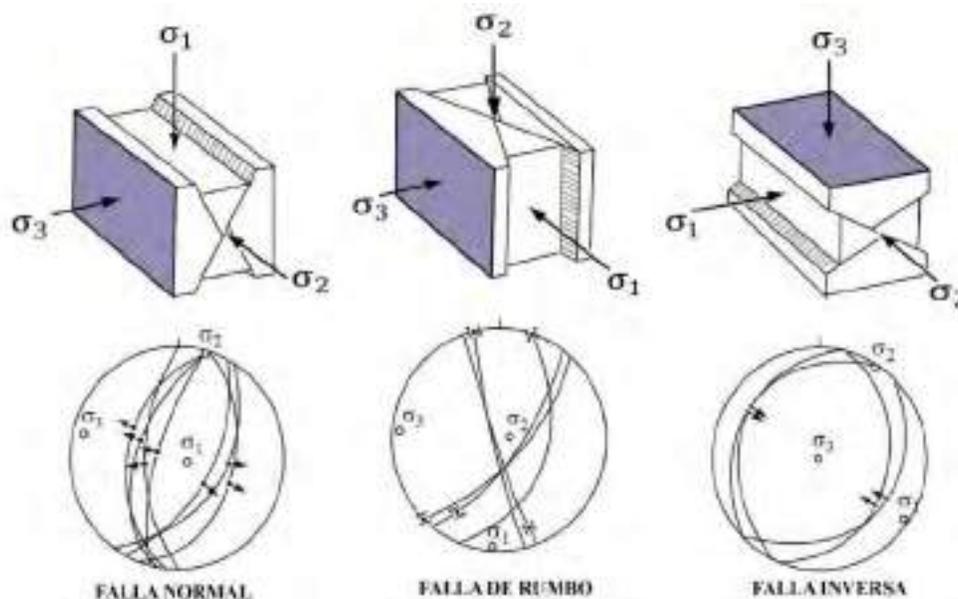


Figura 1. 21: Modelo de Anderson para clasificar fallas. Fuente: Modificado de Rowland (2007).

Representación estereográfica de la clasificación de Anderson. La relación existente entre el método poblacional de fallas (criterio en el cual se fundamenta el software FaultKin) y la clasificación andersoniana de fallas. Se basa en limitar para cada falla las zonas de espacio compatibles en compresión y en extensión (Figura 1. 22) superponiendo estos campos en proyección estereográfica (Babín Vich y Gómez, 2010).

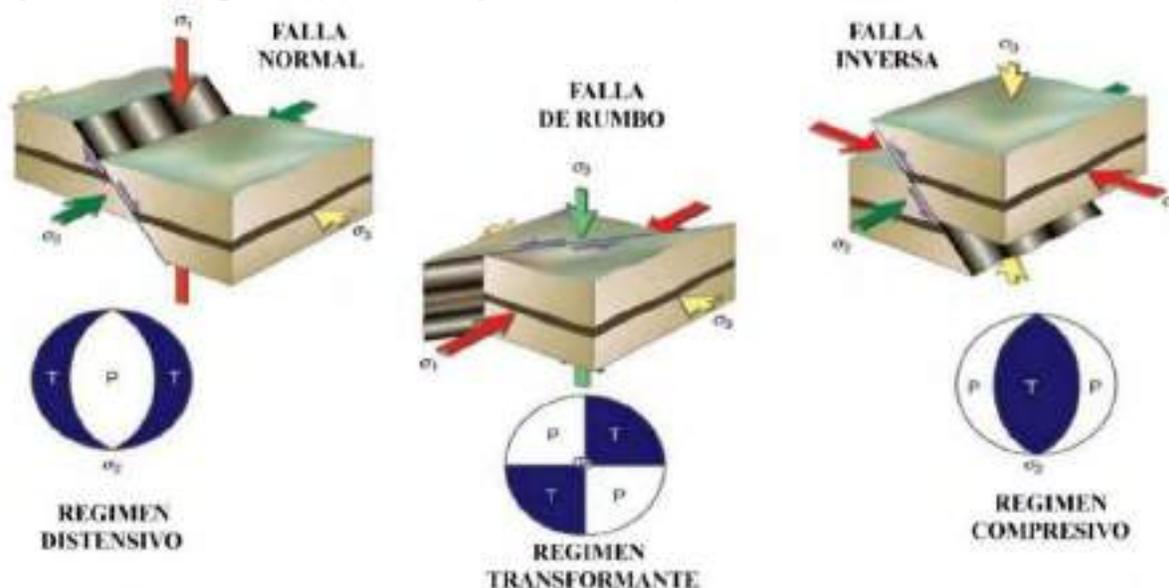


Figura 1. 22: Bloque diagrama derivado del modelo Andersoniano y su relación con la representación estereográfica en FaultKin. Fuente: Modificado de Fossen (2010).

Clasificación de Angelier (1994). Usando el buzamiento (eje X) y el pitch (eje Y), clasifica a las fallas en cuatro grupos (Figura 1. 23): fallas de desgarre, fallas de deslizamiento oblicuo (dextrales o sinestrales), fallas de deslizamiento oblicuo (normales o inversas) y fallas normales o inversas.

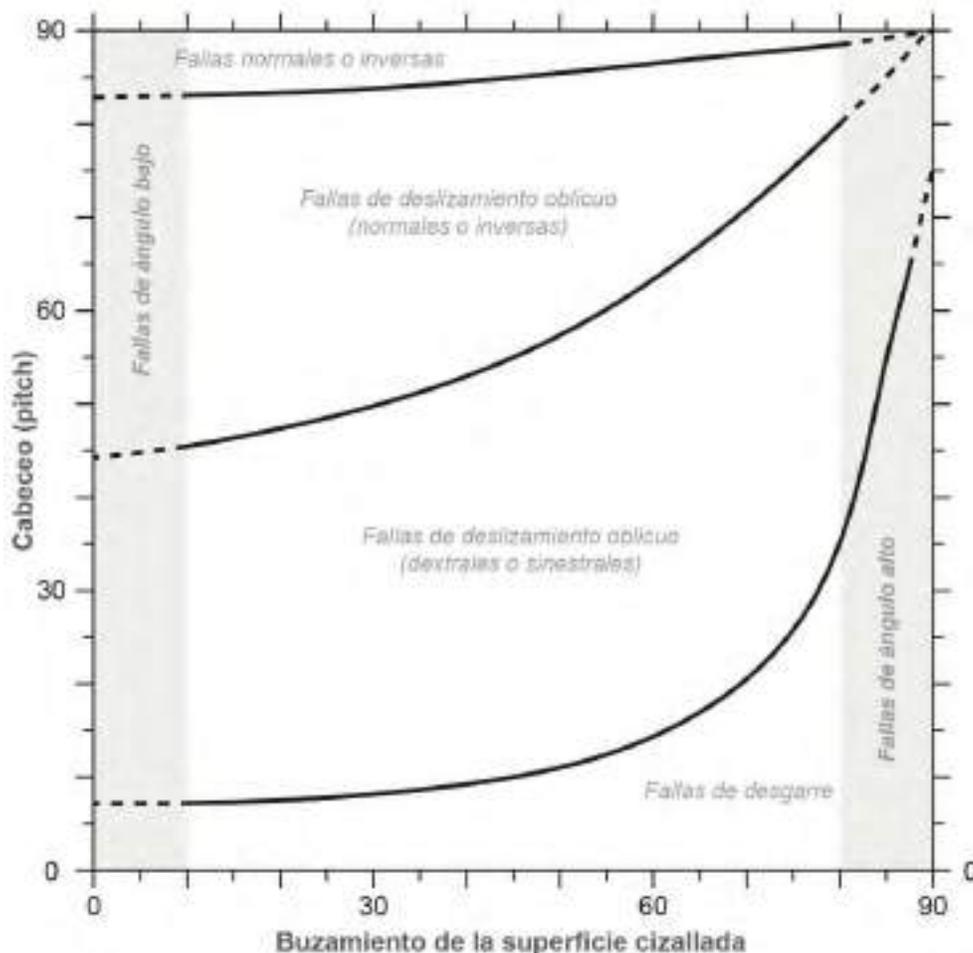


Figura 1. 23: Se muestra la relación entre el ángulo de buzamiento y pitch, para la clasificación cinemática de las fallas. Fuente: Angelier (1994).

Proyecciones estereográficas. Según Allmendinger (2015) los geólogos estructurales usan proyecciones estereográficas para mostrar datos de orientación cuando la relación espacial de las observaciones individuales entre sí es no importante. Las proyecciones estereográficas también se pueden utilizar para hacer cálculos complejos como rotaciones, calcular líneas de intersección, etc. colocando una hoja de papel de calco sobre la cuadrícula de líneas y girándola alrededor del centro. Esa función ha sido reemplazada en gran medida por programas de proyecciones estereográficas de computadora que son mucho más poderosos, precisos y precisa en términos de cálculo y proporciona gráficos con calidad de publicación automáticamente. Aquí, haremos uso del software libre Stereonet para mostrar datos de orientación.

Las proyecciones estereográficas que se emplean comúnmente: la red de área igual (Schmidt) y la red de ángulo igual (Wulff) red (Figura 1. 24).

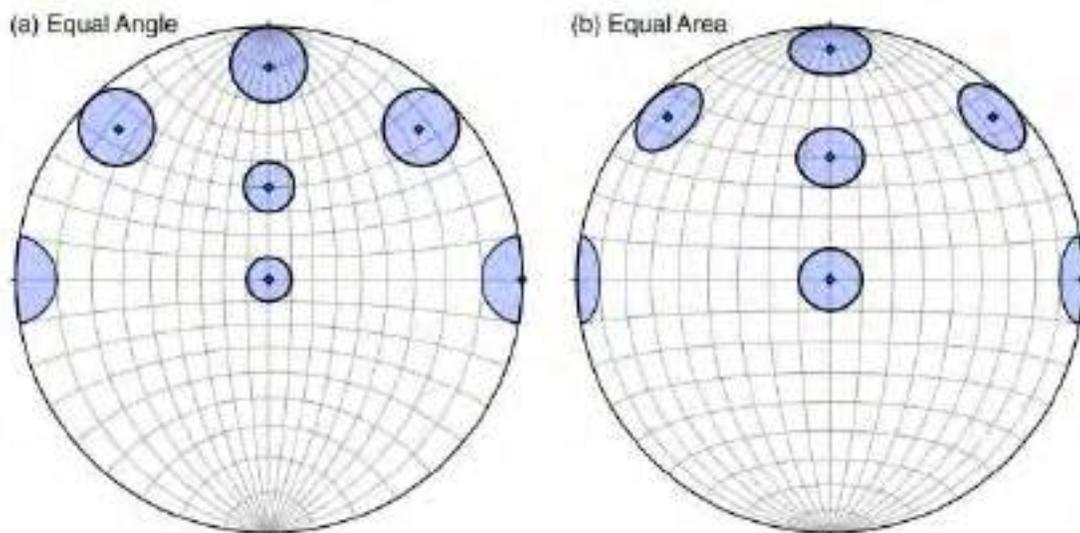


Figura 1. 24: Dos tipos de proyecciones estereográficas: (a) la red de igual ángulo o Wulff y (b) la de área iguales o Schmidt.
Fuente: Allmendinger (2015).

Las proyecciones estereográficas utilizadas en mineralogía, geología estructural y geofísica incorporan todos los mismos conceptos que nuestro globo. Las características planas se trazan como grandes círculos y las características lineales se trazan como puntos y existen diferentes tipos de distorsión dependiendo del tipo de proyección utilizada. De manera similar a nuestro ejemplo de un globo terráqueo, los mineralogistas usan una proyección del hemisferio superior, mientras que en geología estructural y geofísica usamos una proyección del hemisferio inferior (Figura 1. 25). La última proyección significa que estamos mirando hacia abajo en un tazón de cereales y viendo el interior de la cuenca proyectada sobre el plano horizontal a través del centro de la esfera (Allmendinger, 2015).

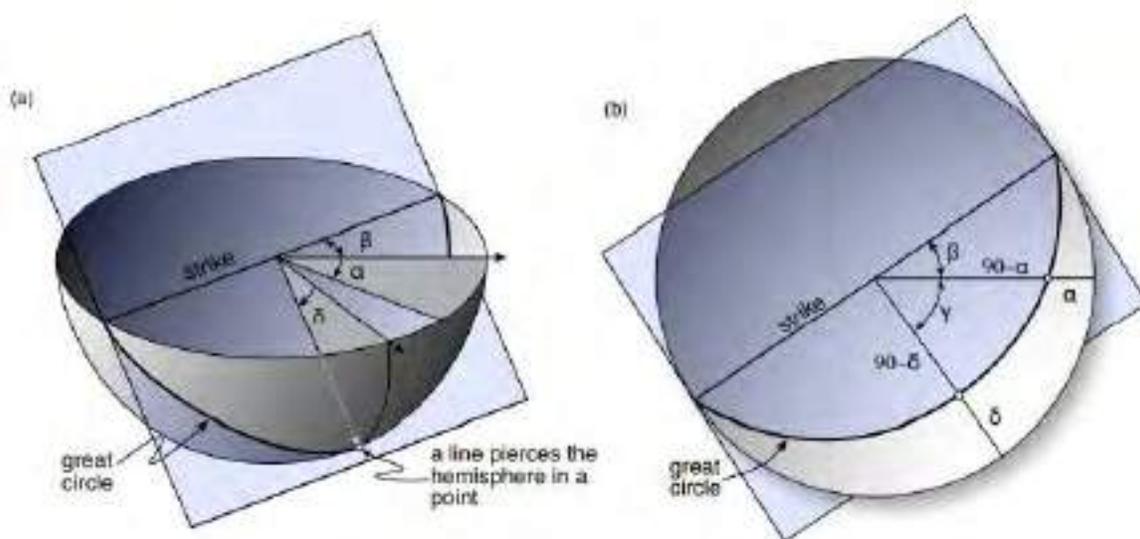


Figura 1. 25: Proyección del hemisferio inferior (a) vista oblicua y (b) vista superior. Fuente: Allmendinger (2015).

Metodologías para el procesamiento de estructuras geológicas.

Determinación del campo de deformación.

Método de los diedros rectos. Las fallas constituyen un elemento fundamental en cualquier tipo de análisis tectónico, si bien el amplio rango de escalas en el que aparecen hace su estudio pueda abordarse desde distintos enfoques. Uno de estos puntos de vista es el del análisis poblacional de fallas, que consiste en estudiar este tipo de estructuras desde un punto de vista estadístico y se realiza con la ayuda del software FaultKin.

Este método fue ideado por Pegoraro (1972) difundido y puesto en práctica, con medios informáticos, por Angelier y Mechler (1977). Se trata de un método geométrico basado en los mecanismos focales de terremotos. Mediante el trazado, en proyección estereográfica, de un plano auxiliar perpendicular a la estría, la región en torno a una falla queda dividida en cuatro cuadrantes. Dos de estos son de compresión y dos de extensión. Para cada falla, el esfuerzo principal mayor (σ_1) queda comprendido en los diedros en compresión y el menor (σ_3) en los de extensión (Figura 1. 26 A y B).

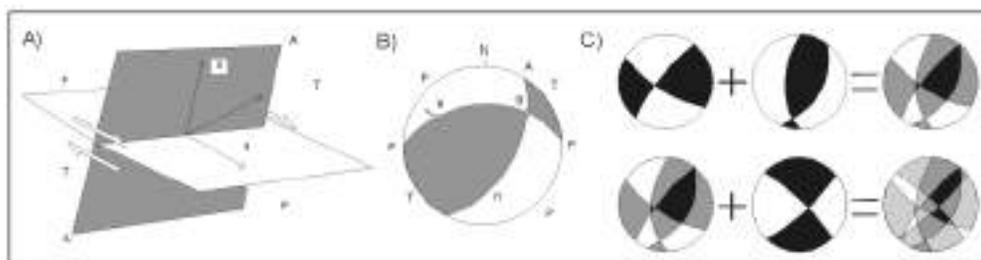


Figura 1. 26: A) Diedros rectos y mecanismo focal de una falla en perspectiva; donde: F, plano de falla; A, plano auxiliar; n, vector unitario normal al plano de falla; s, vector unitario de deslizamiento; B, intersección de los planos F y A; P, diedro compresivo; T, diedro extensivo. B) Procedimiento gráfico del Método de los Diedros Rectos (Angelier y Mechler, 1977) para dos fallas, en negro compresión y en blanco extensión. Fuente: Modificado de Muñoz (1997).

Cuando analizamos una población de fallas se suman las áreas de los cuadrantes en compresión y en extensión de cada una de las estructuras, hallando de este modo los campos compatibles en compresión y extensión para toda la población (Figura 1. 26 C).

El principal inconveniente que presenta es que, al tratarse de un método gráfico, las soluciones que aporta son cualitativas, en ocasiones con un grado de ambigüedad importante y en principio, no proporciona datos sobre la forma del elipsoide de esfuerzos causante del movimiento.

Para la determinación del campo de deformación se usa FaultKin, que es un programa que está diseñado principalmente para investigar la tensión de las poblaciones de fallas y terremotos, no el estrés. No puedes hacer lo que se llama inversiones de estrés con el programa. Sin embargo, FaultKin no ignora completamente el estrés. Por ejemplo, puede especificar una orientación de tensión particular y calcular el corte tensión resuelta en cualquier plano de falla y puede calcular la tendencia de deslizamiento en el programa (Allmendinger et al., 2012).

Es una técnica gráfica y numérica, que permite la cinemática cualitativa y cuantitativa, análisis de datos de deslizamiento de fallas mediante el cálculo de las orientaciones del acortamiento máximo (P) y los ejes de estiramiento máximo (T) asociados con cada plano de falla individual. Ejes P y T son una representación integrada y alternativa de la orientación y cinemática de una falla, ya que

el cálculo de ambos ejes requiere el conocimiento de la orientación del plano (de falla) y del vector de desplazamiento resuelto en tal (falla) plano (slickenline) (Marrett y Allmendinger, 1990).

Para un único datum de deslizamiento de fallas, la orientación de los ejes P y T se encuentra en el plano de movimiento, definido por el vector de corte máximo (estrías) y el polo de falla vector – a 45° del vector polar. El principal o representativo, se calculan las orientaciones de los ejes P y T para una población de fallas dada, asumiendo que los datos representan un campo de deformación uniforme (espacial y temporalmente). En este caso, los principales ejes P y T se calculan asumiendo que estos se agrupan siguiendo una distribución estadística de Bingham. Sin embargo, los ejes P y/o T no agrupados indican que esta población de datos de fallas es el resultado de fallas cinemáticamente heterogéneas, representadas por fajas o patrones multimodales de ejes de acortamiento y/o extensión. Heterogeneidad cinemática puede surgir por varias causas, como la deformación triaxial, la reactivación de la anisotropía, la tensión restricciones de compatibilidad y/o deformaciones polifásicas.

Debido a que los ejes P y T están relacionados con la orientación de los ejes principales de deformación incremental, es posible medir la forma del elipsoide de deformación utilizando la relación, $R=(E2-E3)/(E1-E3)$, donde E1, E2 y E3 son los valores propios del tensor de momento de Bingham obtenido para cada eje T, B y P agrupado respectivamente. Valores de R iguales a 1.00, 0.50 y 0.00 indican elipsoides ideales de aplanamiento, tensión plana y constricción, respectivamente. En un sentido general, con valores entre 0.00 y 0.35 indican un tipo constrictivo, mientras que valores entre 0,35 y 0,65 indican un tipo de deformación plana. Valores en el rango de 1,00 - 0,65 indican un elipsoide de deformación de tipo aplanado. Los datos de movimiento de falla necesarios para calcular el campo de esfuerzo y deformación incluyen: geometría del plano de falla (azimut y buzamiento), dirección de movimiento (rake), sentido de desplazamiento, orientación de la capa local, promedio desplazado y área superficial de falla (Figura 1. 27 a).

La reconstrucción gráfica de los datos de deslizamiento de fallas permite calcular el principal incremento de ejes de acortamiento (P) y extensión (T). Cada par de ejes se encuentra en el plano de movimiento que contiene el vector de deslizamiento y el vector normal (polo de falla) al plano de falla, hacer ángulos de 45° con los vectores T y P (Figura 1. 27 b y c). Los ejes cinemáticos de falla en un gráfico de representación conveniente para el análisis geométrico. Las orientaciones principales o representativas de los ejes P y T para una población de fallas dada son calculados si los datos se representan un campo de deformación uniforme (espacial y temporalmente). En este caso, los principales ejes P y T se calculan si se agrupan siguiendo una distribución estadística Bingham.

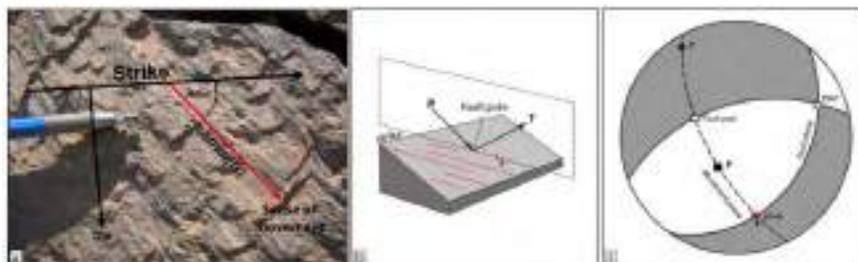


Figura 1. 27: (a) El esquema muestra los datos de deslizamiento de fallas utilizados para el análisis de deformación y esfuerzo (Veloso et al., 2015). El diagrama (b) y la proyección estereográfica de igual área del hemisferio inferior (c) muestran el plano de falla perpendicular a un plano común (plano de movimiento) que contiene ejes cinemáticos, dirección de deslizamiento y polo de falla con ejes P y T formando ángulos de 45° con la dirección de deslizamiento, el polo de falla (P) y el polo del plano de movimiento. Fuente: Marrett y Allmendinger (1990).

Determinación de grupos o cluster. La representación de los ejes P y los ejes T, es posible determinar si el campo de deformación de esfuerzos es homogéneo o heterogéneo, dependiendo de si hay o no variación en la distribución espacial o temporal del campo de esfuerzos. La deformación es homogénea cuando no presenta variación de los ejes P y T, formando un cluster (Figura 1. 28 a); mientras que, en una deformación heterogénea, los ejes se muestran dispersos, indicando variaciones en la deformación, formando más de dos cluster (Figura 1. 28 b). Solo cuando la deformación es homogénea es posible utilizar el método de los diedros o pelota de playa (diagrama solución), ya que al tener una deformación heterogénea cualquier interpretación que se realice carece de sentido geológico, debido a la superposición de más de un estado de esfuerzo, variaciones de la superficie de falla y rotaciones.

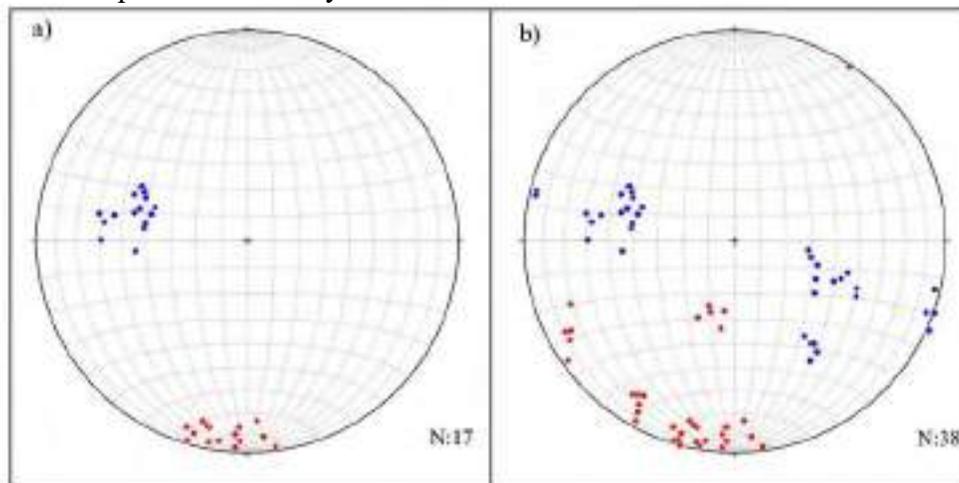


Figura 1. 28: a) deformación homogénea. b) deformación heterogénea. Ejes P (Azul) y ejes T (rojo). Fuente: Machuca (2022).

Las variaciones de los ejes P y T se puede agrupar formando clusters (Figura 1. 29) mediante el software Orient 3.7.1 (Vollmer, 2015) con la función Clúster Análisis y poder analizar estas variaciones de los esfuerzos.

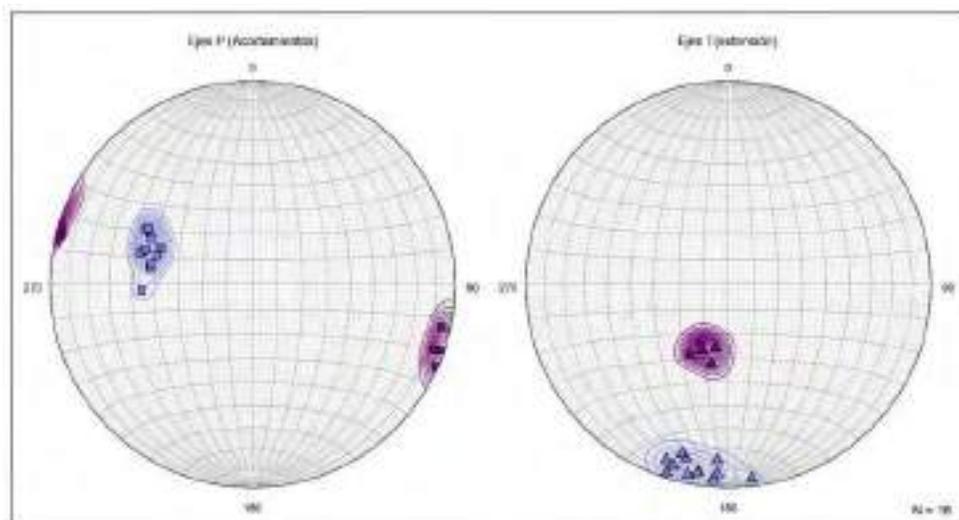


Figura 1. 29: Los ejes P y T presentan dos clusters (Azul y morado). Fuente: Machuca (2022).

El método inverso múltiple (MIM) para el análisis de fallas heterogéneas. El método inverso múltiple MIM se basa en un criterio geométrico, siendo una modificación del inverso clásico técnica de Angelier (1984). El método puede calcular y clasificar la orientación de ejes principales de tensión derivados de un conjunto heterogéneo de datos de deslizamiento de fallas mediante la generación de una combinatoria (Eq. 1) número de grupos que contienen cada k-número de elementos de datos de deslizamiento de fallas extraídos de todo el conjunto de datos (Yamaji et al., 2005). Luego se aplica el de Angelier (1984) técnica inversa a estos subconjuntos generados aleatoriamente.

$$C = \frac{N!}{k!(N-k)!} \quad (\text{Eq. 1})$$

Las orientaciones de los ejes de tensión calculados para cada grupo generado de datos de deslizamiento de fallas de número k se trazan en estereogramas separados: uno para los ejes σ_1 y otro para las subsoluciones de los ejes σ_3 (Figura 1. 30) (Otsubo et al., 2006; Yamaji, 2000). Cada subsolución se representa como un renacuajo que indica la orientación de uno de los ejes principales con una "cola" adjunta que apunta hacia la orientación del eje principal complementario (es decir, el renacuajo de σ_1 apunta hacia la orientación de σ_3 y viceversa) (Figura 1. 30). Este símbolo está, además, codificado por colores según la relación de tensión calculada ($\varphi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$). Así, grupos de renacuajos con colores similares y orientaciones similares de sus colas indican una solución de campo de tensión compatible (Federico et al., 2010; Otsubo et al., 2006; Veloso et al., 2015, 2009; Yamaji, 2000). En consecuencia, la distribución de valores de φ se utiliza para establecer un rango de valores de φ para la solución de ejes de tensión principal. En el caso de que los histogramas φ muestren una distribución bimodal, se calcula una solución de tensión de campo para cada rango de valores representativos de φ . Por lo tanto, para el esfuerzo de campo obtenido, el ángulo de desajuste o la diferencia entre la dirección de deslizamiento observada y teórica obtenido a partir de un supuesto estado de tensión se calcula. La solución de orientación de los ejes de tensión es calibrada, eligiendo la solución con el mayor número de fallas activadas con inadaptado ángulos de menos de 30° . Así, el régimen tectónico está definido por los principales ejes de orientación de la tensión como extensional, compresional o strike-slip (Ritz, 1994) (Figura 1. 31). El régimen de strike-slip podría ser un régimen transpresional o transtensional dependiendo del valor de la relación de tensión (φ).

Un $\varphi > 0,55$ representa un régimen tectónico transtensional, $\varphi < 0,45$ representa un régimen tectónico transpresional y régimen tectónico de $0,45 < \varphi < 0,55$ representan una tectónica de régimen de rumbo dominada por cizallamiento simple (ver discusión detallada sobre la interpretación del valor φ en Bellier y Zoback, 1995; Siame y Bellier, 2005).

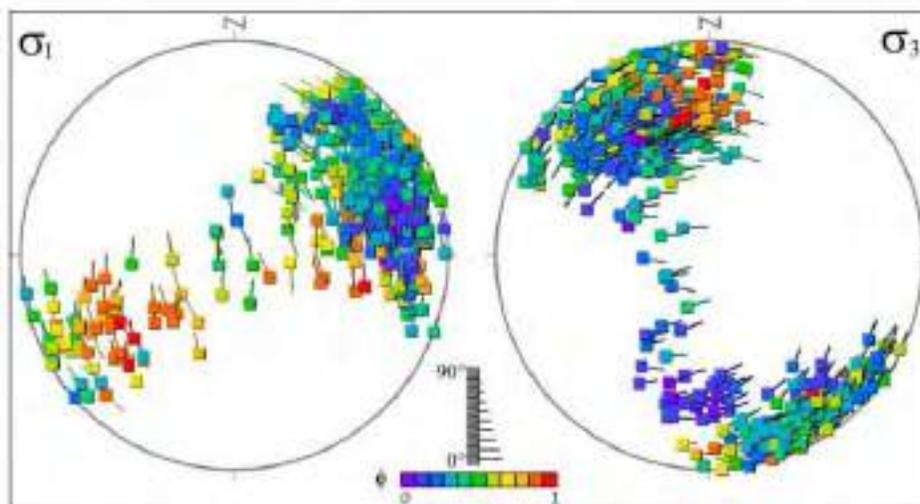


Figura 1.30: Los estereogramas muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 , el valor ϕ representado por un código de colores (de 0 a 1) y la caída de los ejes de estrés denotada por la longitud de las colas de los símbolos de renacuajo. Fuente: Machuca (2022).

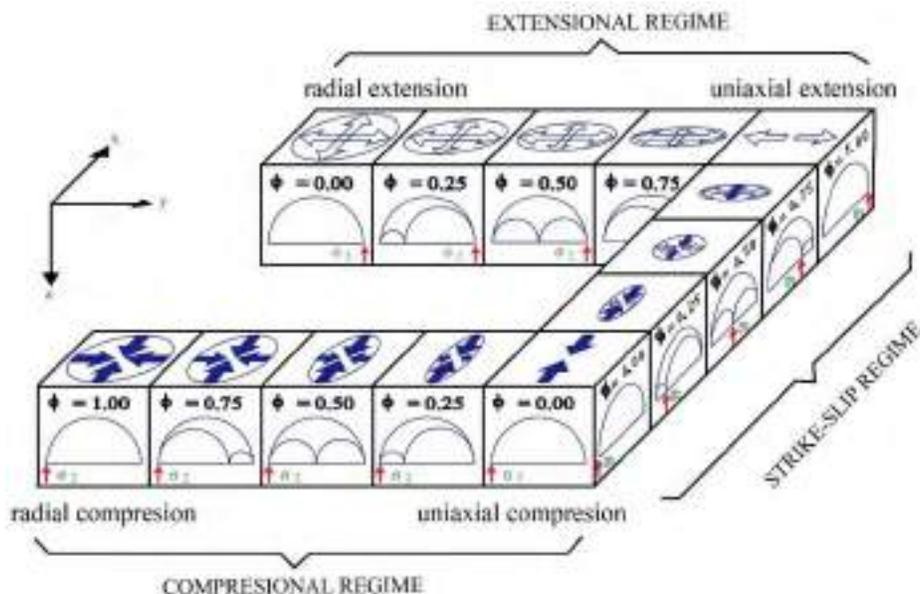


Figura 1.31: Clasificación de los diferentes tipos de régimen tectónico. Cada cubo representa un tensor de tensión que se simboliza por flechas y un diagrama de Mohr en el que se indica σ_2 . Fuente: Ritz (1994).

Si todos los ejes de esfuerzos de cada subgrupo se concentran formando cluster, significa que las fallas fueron afectadas por un único estado de esfuerzo, por lo tanto, son homogéneas. En cambio, si se grafican distintos clusters, los datos reflejan más de un régimen de esfuerzo.

Método de inversión de esfuerzos. WinTensor 5.9.2 programa que es utilizado considerablemente para determinar estados de esfuerzo/paleo-esfuerzo mediante el método de inversión de esfuerzos (Delvaux, 2012). Se sigue esta serie de procedimientos que son explicados a detalle por Velandia (2017) y Delvaux y Sperner (2003) como sigue:

- Luego de haber identificado la temporalidad de las diferentes familias de planos estriados a partir de relaciones de corte y superposición entre las superficies (etapa manual), los datos

son agrupados y convertidos a un formato (.txt) para luego ser ingresados al programa WinTensor 5.9.2.

- Se aplica un primer procesamiento con el método de Diedros Rectos Mejorado (I.R. Dihedr.) filtrando los datos hasta alcanzar valores de conteo (Counting value) de 0% y 100% para σ_1 y σ_3 , respectivamente, y una desviación de conteo (Counting deviation) < 30 . Esto permite filtrar los planos en el círculo de Mohr.
- Si la distribución de los datos está en el campo de neoformados y reactivados, se puede pasar del método de Diedros Rectos a R. Optim., si no, se pueden retirar manualmente del subconjunto los planos que se ubiquen en el campo estable o aplicar de nuevo un filtro en Diedros Rectos.
- Se aplica el método R. Optim. (Optimización Rotacional) con el respectivo filtro hasta alcanzar valores mínimos de α que en todo caso debe ser < 30 (ángulo promedio de desajuste entre las direcciones de deslizamiento modeladas y observadas) y al mismo tiempo la mejor calidad posible según los criterios incorporados por el programa: QRt y QRw.
- La solución de tensor obtenida se controla con el histograma de la Función F5 (probada por el programa como la mejor opción para la inversión de esfuerzos) mirando que no exista más de una población de datos y que la mayoría, se acerque a cero.
- Para verificar la compatibilidad mecánica de los datos en el subconjunto del tensor obtenido se revisa de nuevo el círculo de Mohr, con apoyo de orientaciones estereográficas tanto en Planos-estrías (proyección de Angelier) como en Tangent lineation (proyección de Hoepfner) para analizar la coherencia cinemática.
- Según la supervisión de estos aspectos es posible volver a incluir datos rechazados por el software, controlando que no se afecten negativamente los criterios de calidad del tensor. Así mismo, el subconjunto de los datos desechados puede tratarse nuevamente para sacar un nuevo tensor.

Microtectónica. La microtectónica es el estudio de la deformación en la escala microscópica y la escala de afloramiento, lo que agrupa a las estructuras meso y microscópicas. Otros autores la denominan como microfábrica o microestructuras de deformación. Hobbs et. al (1981), definen el concepto de microfábrica en relación con el de fábrica, el cual incluye la configuración espacial y geométrica de todos los componentes que constituyen la roca. Sin embargo, estos autores, señalan que las microestructuras se definen como un arreglo a pequeña escala de los elementos internos de una roca, hecho producido por un proceso de deformación.

Según Despaigne y Wilde (2020), el objetivo de la microtectónica es comprender los mecanismos de las deformaciones, la geometría de las estructuras y su relación con las macroestructuras. Tomar muestras orientadas permite tener la orientación real de la muestra y sus elementos estructurales (foliaciones, lineaciones, pliegues, fallas, etc.) en su relación espacial. Brinda información “oculta” de procesos que a simple vista pueden no reflejarse y permite observar procesos antiguos que pueden ser borrados totalmente en observaciones a nivel de afloramiento. Se puede correlacionar de forma fácil cualquier deformación en la muestra con su historia de campo y su posición geográfica. Así esos datos se pasan a los mapas geológicos.

Según Mattauer (1976), la microtectónica propone estudiar la deformación a escala del afloramiento, de la muestra y de la lámina delgada, por lo tanto, la escala de trabajo es del orden del milímetro hasta la del metro. Este autor plantea, además, que en el estudio microtectónico se debe conocer o aplicar ciertos métodos en función del cambio entre las distintas escalas de observación y estudio, estos son los objetivos de la microtectónica:

- Observaciones muy detalladas a fin de comprender la deformación y todos sus mecanismos.
- Estudio y comprensión de la geometría de las estructuras.
- Determinación de las relaciones que existen entre las microestructuras y las macroestructuras.

Las microestructuras se estudian para establecer las conexiones entre los procesos y el ambiente, puesto que estos representan una función de los procesos que se desarrollan en las rocas:

$$\text{Proceso} = \text{Fuerza} \times \text{cinemática} \quad (P = F \times C)$$

Al comprender esta relación se pueden interpretar las microestructuras en términos de la historia de la temperatura (T), presión (σ), la presión de CO₂ y otras condiciones límite (de borde) que controlan la fuerza y la cinemática (Figura 1. 32) (Hancock, 1985).

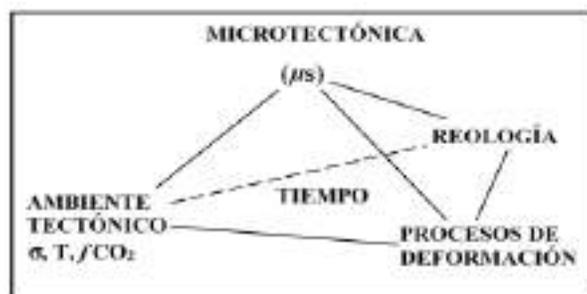


Figura 1. 32: Relación entre los procesos y el ambiente. Fuente: Hancock (1985).

Debido a la gran cantidad de observaciones a tomar sobre superficies muy reducidas, es imposible cartografiar las estructuras, por lo cual, en el análisis microtectónico, se usan datos y métodos estadísticos debido a la gran cantidad de medidas efectuadas en el trabajo de campo. Según Mattauer (1976), la microtectónica introduce un aspecto cuantitativo en la tectónica. Asimismo, como el estudio de las microestructuras debe estar relacionado a las macroestructuras, estas deben ser conocidas con anterioridad, es decir, para el trabajo microtectónico deben ser previamente conocidos todos los datos de la tectónica de la zona de trabajo.

Metodología para la toma de muestra orientada.

La metodología que se usa para la toma de la muestra orientada, es una técnica personal de Despaigne y Wilde (2020); (1) tomar la muestra en una zona fácil (límite entre fracturas), (2) saber cuál es el tope de la muestra, márkuelo con una X y en un lado una flecha que indica la dirección del tope, (3) escriba sobre la muestra la dirección del norte con una flecha (u otro punto cardinal). Si mide un elemento estructural (lineación, foliación, capa) ponga sobre la muestra también esa medición con el signo y la medida del ángulo de buzamiento o la inclinación (si es una línea), (4) ponga la muestra de nuevo sobre el lugar que la tomó y haga un dibujo en su libreta con todos los

detalles (posición de la muestra en el afloramiento, tope, norte, elemento medido) y oriente el afloramiento en su libreta, finalmente (5) tome foto orientada de la misma manera que el dibujo, indique la dirección de corte y empaquete la muestra.

Pasos de la muestra de mano a la sección delgada.

Un buen análisis de las microestructuras se basa en el correcto muestreo y en la elección correcta de la dirección en la que se cortan secciones delgadas de las muestras. Trataremos los pasos de recolección de muestras, elección del plano de corte y problemas involucrados en la interpretación de estructuras tridimensionales a partir de secciones bidimensionales.

Muestreo.

La elección de muestras para secciones delgadas depende del tema de interés y métodos que se van a utilizar. En cualquier caso, es importante que la estructura principal en el área sea entendida en líneas generales antes de que se tomen las muestras; las secciones delgadas suelen contener mucha información, lo cual es inútil si no existe un buen registro de campo. Por ejemplo, si una foliación se encuentra en una sección delgada que no ha sido reconocida en el campo, no se puede encajar en un modelo tectónico y es inútil a menos que se pueda hacer un nuevo viaje de campo para identificarlo. Los estudios de secciones delgadas suelen dar mejores resultados si se realizan para resolver un problema específico que ha sido definido antes de que se corten secciones (cf. Passchier et al., 1990b). Secciones delgadas cortar al azar para 'ver cómo se ve' será menos útil que las preparadas con un objetivo específico (Passchier y Trouw, 2005).

Orientación de muestras de mano.

Las muestras de mano para estudios estructurales deben orientarse en el campo. Esto se hace mejor marcando buzamiento y rumbo de una superficie plana del espécimen sobre esa superficie (Figura 1. 33). Nótese, sin embargo, que esto todavía deja dos orientaciones posibles, ya que la marca podría hacerse en la superficie superior o en la parte inferior de una muestra. Por lo tanto, una marca adicional es necesario; por ejemplo, una cruz en la superficie superior o una flecha indicando la parte superior (Figura 1. 33 b). Es fácil cometer errores al orientar las muestras y para las muestras más importantes (p. ej., las necesarias para determinar el sentido del corte), por lo tanto, es útil hacer una fotografía o un boceto simple de la muestra, su orientación en el cultivo y el marcado. Además, las muestras deben envolverse en bolsas de papel o plástico para evitar roturas y erosión de marcas y números (Passchier y Trouw, 2005).

Dónde muestrear en afloramiento.

Las zonas de cizalla deben ser muestreadas en el núcleo de alta deformación, en el borde de baja deformación y en la roca de la pared; en muchos casos, es útil comparar conjuntos minerales en la roca de pared no deformada con las de una zona de cizalla, con el fin de determinar qué condiciones metamórficas acompañaron a la deformación en la zona y cuáles son más antiguas.

Si se va a determinar el sentido de corte en una zona de corte, tenga cuidado debe tener en cuenta que las muestras estén correctamente orientadas y que las estructuras adecuadas a pequeña escala como los porfiroclastos están presentes en la muestra. En muchas zonas de corte dúctil, milonitas de grano fino y muestras representativas de partes deformadas de la zona de corte dan mejores resultados que muestras de dominios de baja tensión o de grano grueso (Passchier y Trouw, 2005).

Si existen gradientes en el estilo de una estructura sobre un área es útil tomar una serie de muestras a través de este gradiente en una sola litología. En todos los casos, es útil anotar en el campo con qué propósito se tomó una muestra. Las fotografías de los sitios de muestreo importantes también son esenciales y debe tomarse antes de extraer la muestra. En todos los casos se deben obtener las coordenadas GPS de los sitios de muestreo (Passchier y Trouw, 2005).

Muestras de corte.

Cuando se cortan muestras orientadas para hacer secciones delgadas, es crucial para evitar la pérdida de datos de orientación. Aunque varios métodos pueden ser utilizados, sugerimos el siguiente procedimiento. Después de hacer un corte de sierra, la orientación de la muestra debe ser copiado en ambos lados de la sierra cortada en imagen de espejo (Figura 1. 33); proponemos un sistema en el que una flecha con una se dibuja una lengüeta paralela a la lineación, con la lengüeta indicando la parte superior de la muestra. La flecha debe copiarse del fragmento de roca que se usa para hacer la sección delgada sobre el vidrio como se muestra en la Figura 1. 33. Al preparar las astillas de roca para secciones delgadas, tenga cuidado de que la orientación no se haya perdido o confundido. Alternativamente, una pequeña cicatriz cortada con sierra puede hacerse en la superficie superior de la viruta de roca utilizada para hacer la sección delgada. Esta cicatriz se puede encontrar en la sección delgada y reduce las posibilidades de confusión en su orientación (Passchier y Trouw, 2005).

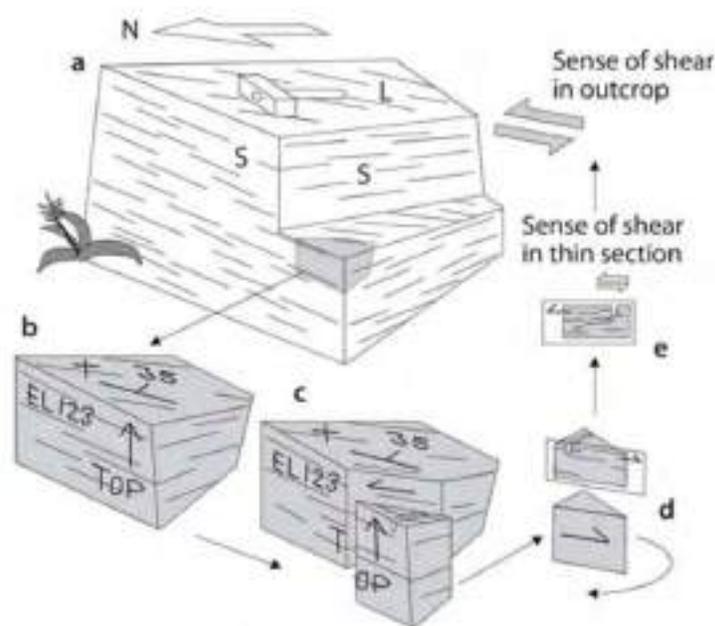


Figura 1. 33: Método para obtener una muestra orientada de un afloramiento y una sección delgada orientada de una muestra. Una muestra para estudios estructurales debe orientarse, por ejemplo, como se muestra en a y b un símbolo de rumbo-buzamiento (aquí 160-35) en la superficie superior plana de la muestra y una cruz (marcando la parte superior) fijar la orientación de la muestra en el espacio. Cuando una sección delgada se va a cortar paralela a la lineación (aquí 200/15), una viruta se corta de la muestra con una sierra de diamante. Para orientar el chip, una flecha con una sola púa que apunta en la dirección de la parte superior. La superficie se puede utilizar y se dibuja tanto en la muestra como en el chip. c Se debe tener cuidado de que esta flecha se copie correctamente en la sección delgada. d Como alternativa, se puede hacer una pequeña cicatriz con un corte de sierra en la superficie superior del chip, que se puede encontrar en la sección delgada. e Sentido de corte determinado en la sección delgada, por bandas de corte puede estar directamente relacionado con la muestra, y a través de la muestra con el afloramiento original. Aquí, el resultado está empujando hacia el NE. Fuente: Passchier y Trouw (2005).

Elección de la orientación de secciones delgadas

Las secciones delgadas deben cortarse en una orientación tal que obtenga la máxima cantidad de información de una estructura. Debe quedar claro que es importante tomar la geometría tridimensional de las estructuras en consideración, antes de elegir el plano de corte. Las lineaciones juegan un papel importante en la determinación de cómo se va a cortar una sección delgada. Lineaciones de objetos, tanto como agregado y lineaciones de grano son más útiles si se puede demostrar que representan el eje largo (X) de la deformación elipsoide; en tales casos, las lineaciones agregadas pueden referirse como lineaciones de estiramiento. Esto puede probarse si, por ejemplo, se deforman objetos claramente reconocibles como guijarros, enclaves o fósiles. Tenga en cuenta, sin embargo, que no todos los objetos con lineaciones representan la dirección X de la deformación finita, y que algunas alineaciones de trazas pueden parecerse mucho a las alineaciones de objetos (Passchier y Trouw, 2005).

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

No existe un trabajo de investigación detallado de modelamiento y análisis estructural para determinar la geometría y evolución del anticlinal de Puquín. La geología del área de estudio ubicada dentro del Altiplano (Carlotto et al., 2011), vienen ligados a procesos de geodinámica interna (fallas, anticlinales, sinclinales) y geodinámica externa (erosión, deslizamientos antiguos y recientes). Así también, en la región de Cusco y particularmente en el cuadrángulo de Cusco existen varias fallas activas que han sido estudiadas en detalle por Sebrier et al. (1982) y principalmente Cabrera (1988). Estas fallas han sido controladas por la evolución tectónica y sedimentaria pliocuaternaria de la región y particularmente de las cuencas Cusco y Ccatca. El anticlinal de Puquín se localiza al noroeste del distrito de Cusco, la configuración geológica y estructural en esta área es muy interesante, ya que presenta mucha variación, por lo cual es necesario realizar un modelamiento y análisis estructural actualizado para tener claro la geometría y evolución, así también serviría como base para otros estudios investigativos cercanos al área de estudio.

Esta investigación es de tipo mixta, con un nivel de investigación descriptivo-correlacional y se basará en los datos de fuentes bibliográficas y datos obtenidos por las técnicas geológicas efectuadas en campo y sistematizados para la obtención de mapas, estaciones estructurales y secciones que ayudarán al análisis estructural y modelamiento del anticlinal. Finalmente, se podrá dar conclusiones y recomendaciones adecuadas.

1.4.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

PROBLEMA PRINCIPAL

- ¿Cuál es la geometría y como es el marco evolutivo del anticlinal de Puquín?

PROBLEMAS SECUNDARIOS

- ¿Qué unidades geológicas y geomorfológicas forman parte del anticlinal de Puquín?
- ¿Cuál es el análisis estructural del anticlinal de Puquín a partir del cartografiado geológico-estructural, estaciones estructurales, construcción de secciones transversales y el uso de proyección estereográfica?
- ¿Cuál es el modelo en 2.5D del anticlinal de Puquín?

- ¿Cuál es el modelo de evolución de las estructuras que sirve para inferir una evolución estructural del anticlinal de Puquín?

1.5 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación proporciona conocimiento e información sobre el área de estudio, ya que existen pocos trabajos y que además son estudios netamente regionales; por lo tanto, la presente investigación se enfocará en la determinación de la geometría y evolución del anticlinal de Puquín a partir de la elaboración de mapas temáticos actualizados, columnas estratigráficas, secciones geológico-estructurales, un modelo geológico en 2.5D y el análisis estructural macroscópico y microscópico a partir de estaciones estructurales realizados en campo; así también ayudará a entender mejor la geología del anticlinal de Puquín y su configuración estructural con la geología de la región de Cusco.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la geometría y evolución del anticlinal de Puquín.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las unidades geológicas y geomorfológicas que forman parte del anticlinal de Puquín.
- Realizar el análisis estructural del anticlinal de Puquín a partir del cartografiado geológico-estructural, estaciones estructurales, construcción de secciones transversales y el uso de proyección estereográfica.
- Realizar el modelo en 2.5D del anticlinal de Puquín.
- Desarrollar un modelo de evolución de las estructuras para inferir una evolución estructural del anticlinal de Puquín.

1.7 HIPÓTESIS

1.7.1 HIPÓTESIS GENERAL

La geometría del anticlinal de Puquín de acuerdo a las clasificaciones de pliegues y representaciones estereográficas, representa un pliegue asimétrico (no cilíndrico) y en la evolución del anticlinal de Puquín la Formación Maras es la capa de despegue por el comportamiento dúctil y se presenta una falla que crece lenta y sincrónicamente deformando las capas más jóvenes (fault propagation fold).

1.7.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El anticlinal de Puquín forma parte del dominio estructural de los Andes en el cual la dirección de las estructuras es NO-SE; sin embargo, el eje de esta estructura tiene una dirección N-S. En general los ejes de plegamientos andinos tienen una dirección hacia el NO-SE, lo que plantea un mejor entendimiento de la génesis de este anticlinal.
- El análisis estructural del anticlinal de Puquín a partir del cartografiado geológico-estructural, estaciones estructurales, construcción de secciones transversales y el uso de proyección estereográfica muestra la geometría y el régimen tectónico de formación del anticlinal de Puquín, a través de una secuencia de eventos.

- A partir de las secciones geológicas por la metodología de kink con datos superficiales y metodología de trishear con interpretación de la configuración a profundidad se tiene el modelo en 2.5D del anticlinal de Puquín; sin embargo, en la zona de estudio los espesores no son constantes de un flanco a otro, lo cual plantea un problema estructural o sedimentológico que vendrá a determinar.
- Teniendo la tabla de unidades litoestratigráficas por formación, régimen tectónico y análisis de estructuras geológicas de campo se presenta una secuencia de eventos estructurales infiriendo la evolución del anticlinal de Puquín.

1.8 VARIABLES

1.8.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

- Modelamiento
- Análisis estructural

1.8.1 VARIABLES DEPENDIENTES

- Geometría del anticlinal de Puquín
- Evolución del anticlinal de Puquín

1.9 METODOLOGÍA

1.9.1 MÉTODO CIENTÍFICO

La investigación es:

Tipo: Mixta, predominantemente se realizan precisiones cuantitativas.

Nivel: Descriptiva - correlacional, la investigación se inicia con descripción de las características geológicas, finalmente se realiza el análisis estructural y modelamiento del anticlinal de Puquín, haciendo correlaciones de las variables se determina la geometría y evolución del anticlinal de Puquín.

Método: Cuasi Experimental

Diseño: Transversal, la investigación se basará en observar los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural en el momento actual.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Análisis documental	Fichas textuales y de resumen, recurriendo a fuentes documentales como: libros especializados, artículos oficiales e internet.
Cartografiado Geológico	Planos topográficos e imagen satelital, GPS, brújula, protactor, lupa, rayador, picota, tablero, libreta de campo, lápiz, entre otros.
Registro fotográfico	Cámara fotográfica.
Estaciones Geoestructurales	Tabla de recolección de datos geoestructurales.

Tabla 1. 3: Técnicas e instrumentos de recolección de datos. Fuente: Cerdán (2018).

1.9.2 MÉTODO DE TRABAJO

Para la realización de este trabajo la metodología a usar se divide en tres etapas, las cuales están encadenadas y ayudarán a alcanzar, de forma más efectiva, el objetivo de este trabajo. Estas etapas son:

Etapas de pre-campo

- a) Ubicación y delimitación del área de estudio.
- b) Recopilación bibliográfica de información existente en el área de estudio e investigaciones locales y regionales anteriores.
- c) Obtención de archivos vectoriales con información geológica, estructural y geomorfológica (GEOCATMIN, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET)
- d) Obtención e interpretación de imágenes satelitales Aster L1T, Landsat 8 OLI y Sentinel 2A de la USGS Earth Explorer del área de estudio.
- e) Delimitación de vías de acceso principales y secundarios en el área de estudio.
- f) Procesamiento e interpretación del material geológico utilizando los softwares Google Earth, Saga GIS y QGIS para realizar mapas: geológico, geomorfológico y estructural del área de estudio.
- g) Elaboración de un mapa preliminar de ubicación de estaciones estructurales a partir del mapeo geológico-estructural.
- h) Elaboración de mapas referenciales, topográfico e imagen satelital, para su respectiva comprobación en campo.
- i) Validación de información.

Etapas de campo

- a) Reconocimiento del área de estudio.
- b) Cartografiado geológico y geomorfológico y comprobación de la fotointerpretación realizada en la etapa de pre-campo del área de estudio.
- c) Levantamiento de columnas estratigráficas de las formaciones existentes en el área de estudio.
- d) Recolección de datos (fracturas, fallas y pliegues) realizando estaciones estructurales en las áreas definidas en la etapa de pre-campo.
- e) Obtención de muestras orientadas para estudios petrográficos y microtectónicos.

Etapas de post-campo

- a) Interpretación y validación de la información geológica, estratigráfica y estructural obtenida durante los trabajos de campo.
- b) Generación de mapas geológicos y geomorfológicos a detalle y actualizados.
- c) Elaboración de Columnas estratigráficas de las formaciones existentes en el área de estudio.
- d) Generación del mapa estructural actualizado.
- e) Elaboración de secciones geológicas-estructurales.
- f) Elaboración del modelo geológico en 2.5D

- g) Procesamiento de datos estructurales mediante el uso de proyecciones estratigráficas en los softwares Stereonet, FaultKin 8.1, Orient 3.7.1, Estereografía Web, Win-Tensor y MIM.
- h) Análisis estructural macroscópico y microscópico para determinar la evolución del anticlinal de Puquín.
- i) Evaluación de la información.
- j) Redacción de la tesis.

CAPITULO II: CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 GEOMORFOLOGÍA

2.1.1 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

La geomorfología de la región del Cusco está caracterizada por la asimetría del relieve y la gran variación en la elevación, modelada por factores climáticos, tectónicos y geológicos.

Regionalmente, el área de estudio forma parte del Altiplano, en el límite con la Cordillera Oriental (Figura 2. 1) que está constituida de montañas, vertientes, colinas, altiplanicies y valles (Figura 2. 2).

El Altiplano presenta un relieve subhomogéneo con alturas que van de los 3800 a 4000 m s. n. m. También muestra montañas que pueden sobrepasar los 4400 m s. n. m. y drenajes que las disectan, dándoles una configuración agreste. Está conformado por rocas mesozoicas de poco espesor, comparadas con la Cordillera Oriental. Asimismo, presenta capas rojas continentales del Terciario que conforman la mayor parte del afloramiento en superficie y la Cordillera Oriental, presenta un relieve heterogéneo abrupto, con picos elevados que varían de 4000 a 5000 m s. n. m.; asimismo, presenta depresiones, mesetas y valles con altitudes de entre 2900 y 3500 m s. n. m. Los picos más altos están conformados por afloramientos de rocas Silúrico-devonianas, mientras que, en los valles y depresiones, se encuentran presentes los depósitos cuaternarios. Se observan lomas de aspecto rugoso alineadas a los segmentos de fallas correspondientes a los emplazamientos volcánicos del Rumicolca (Palomino, 2020).

2.1.1.1 MONTAÑA DE ROCA SEDIMENTARIA (MoS).

Se ubica mayormente al sureste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), aunque se encuentra también en la parte noreste, su topografía es muy abrupta, estas montañas presentan laderas empinadas a muy empinadas, litológicamente se encuentran compuestas por rocas del Paleógeno y Cretácico entre ellas rocas de las formaciones Ayabacas, Puquín, Quilque, Chilca, Chilca-Quilque, Kayra y Soncco, sus elevaciones oscilan entre 3600 a 4500 m s. n. m.

2.1.1.2 MONTAÑA DE ROCA VOLCÁNICA (MoV).

Se ubica mayormente al suroeste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), aunque se encuentra también en la parte noreste, su topografía es fuertemente inclinado, litológicamente se encuentran compuestas por rocas del Paleozoico y Paleógeno, entre ellas rocas del Grupo Mitu y Grupo Tacaza respectivamente, sus elevaciones oscilan entre 3600 a 4500 m s. n. m.

2.1.1.3 VERTIENTE DE DEPÓSITOS GLACIO-FLUVIALES (VeQ-gl/fl).

Las vertientes en depósitos glacio-fluviales se encuentran al suroeste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2). Presenta un relieve relativamente llano a ligeramente inclinado, en esta unidad se observan depósitos glaciares cuaternarios y en poca cantidad depósitos fluviales, superpuestos litológicamente al Grupo Tacaza.

2.1.1.4 VERTIENTES DE DEPÓSITOS COLUVIALES (VeQ-co).

Las vertientes en depósitos coluviales se encuentran distribuidas en pequeños sectores en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), presenta un relieve que va desde ligeramente inclinado a fuertemente inclinado.

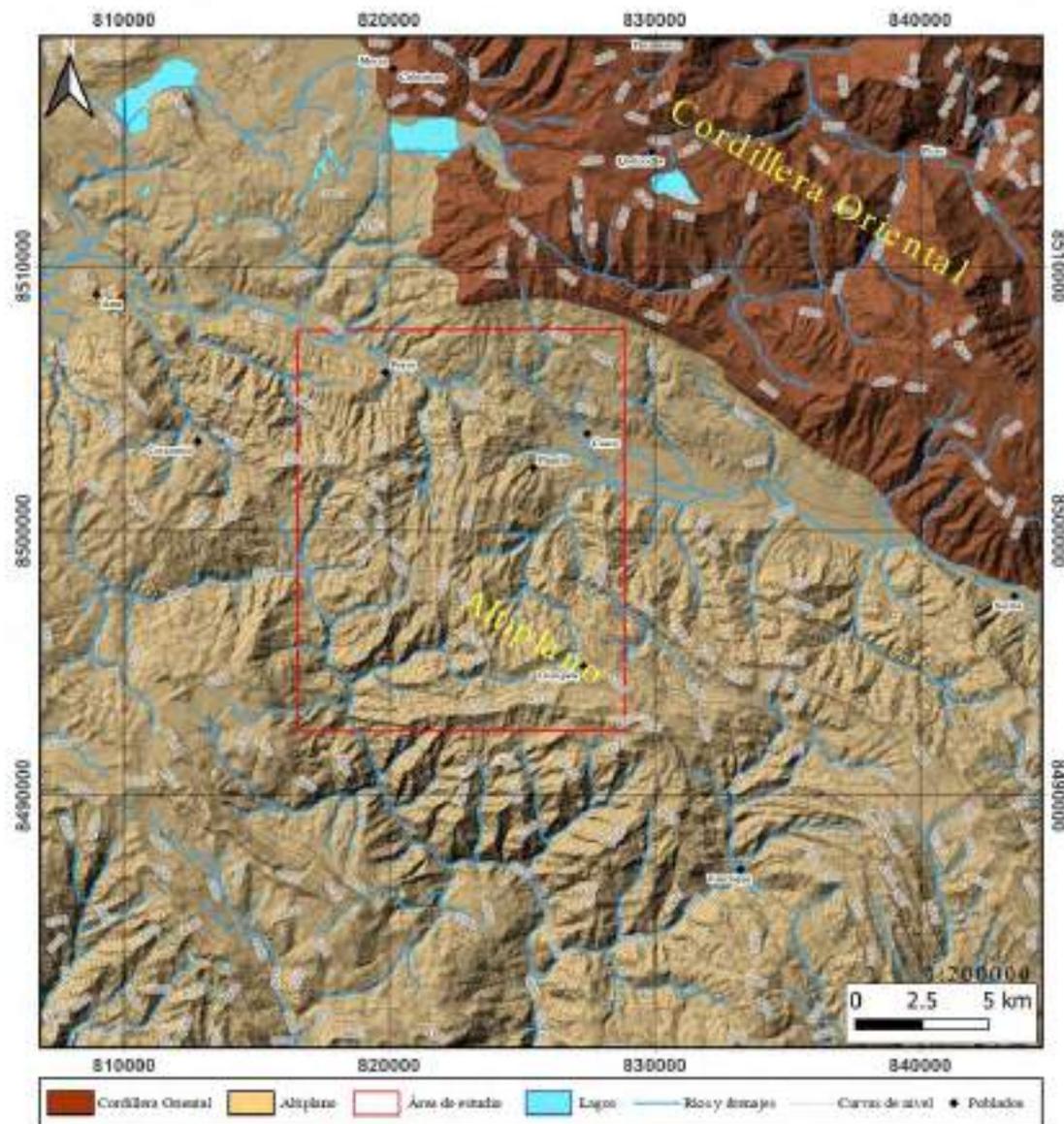


Figura 2. 1: Mapa de geoformas regional y ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.5 VERTIENTES DE DEPOSITOS ALUVIALES (VeQ-al).

Las vertientes en depósitos aluviales se encuentran distribuidas en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2) en pequeños sectores hacia el sur y predominantemente al norte, presenta un relieve que va desde ligeramente inclinado a fuertemente inclinado.

2.1.1.6 COLINA DE ROCA INTRUSIVA (CoI).

Esta unidad se encuentra al noroeste de la depresión del Cusco (Figura 2. 2) con elevaciones entre los 3500 y 3750 m s. n. m. Tiene un relieve fuertemente inclinado, se observan afloramientos de la edad Paleógena entre dioritas y tonalitas. Pertenece al intrusivo microdiorítico o el stock de Sacsayhuamán con una apófisis denominado El Rodadero que tiene aproximadamente 200 m de diámetro. Este cuerpo muestra superficies pulidas y acanaladas que cubren casi todo el afloramiento de diorita y constituyen una serie de resbaladeros naturales en forma de tobogán, de donde deriva su nombre (Dueñas, 1907; Gregory, 1914b, 1916; Gabelman, 1967; Marocco, 1978).

2.1.1.7 COLINA DE ROCA SEDIMENTARIA (CoS).

Esta unidad se encuentra predominantemente al noroeste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), con elevaciones entre los 3600 y 3850 m s. n. m. Tiene un relieve llano a ligeramente inclinado hasta moderadamente inclinado, se observan afloramientos del Mesozoico y Cuaternario, entre ellas rocas pertenecientes a las formaciones Maras y San Sebastián.

2.1.1.8 COLINA DE ROCA VOLCÁNICA (CoV).

Esta unidad se encuentra predominantemente al noreste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), con elevaciones entre los 3800 y 4200 m s. n. m. Tiene un relieve llano a ligeramente inclinado hasta moderadamente inclinado, se observan afloramientos del Neógeno, entre ellas rocas de la Formación Rumicolca que resalta la presencia de varios edificios volcánicos recientes de composición calco-alcalina con tendencia shoshonítica (Mendivil y Dávila, 1994).

2.1.1.9 ALTIPLANICIE DE ROCA SEDIMENTARIA (AIS).

Esta unidad se encuentra predominantemente al noroeste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), con elevaciones entre los 3400 y 3700 m s. n. m. Tiene un relieve llano a ligeramente inclinado, se observan afloramientos del Neógeno y Cuaternario, entre ellas rocas de la Formación Chinchero y Formación San Sebastián respectivamente.

2.1.1.10 MORRENAS DE DEPÓSITOS MORRENICOS (MrrQ-mo).

Esta unidad se encuentra al noreste y suroeste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), con elevaciones entre los 4200 y 4500 m s. n. m. Tiene un relieve moderadamente inclinado, se observan depósitos glaciares cuaternarios.

2.1.1.11 TERRAZA DE DEPÓSITO ALUVIAL (TrQ-al).

Esta unidad se localiza en los bordes del cauce principal del río Huatanay en la depresión de Cusco (Figura 2. 2), Así también hacia el norte en los bordes del cauce principal del río Vilcanota y hacia el sur en pequeños sectores donde discurren ríos pequeños. Tienen un relieve allanado o ligeramente inclinado.

2.1.1.12 VALLE DE DEPÓSITO ALUVIAL (VQ-al).

Esta unidad se localiza en pequeños sectores hacia el noroeste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2), con una dirección N-S y conformada por sedimentos clásticos de depósitos aluviales, tienen un relieve allanado o ligeramente inclinado, así también este valle presenta altitudes que van de los 3700 a 3750 m s. n. m.

2.1.1.13 VALLE DE DEPÓSITO GLACIAR (VQ-gl).

Esta unidad se localiza en pequeños sectores, hacia el suroeste con una dirección NO-SE y al noroeste con una dirección NE-SO, en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2); está conformada por sedimentos clásticos de depósitos glaciares, tienen un relieve allanado o ligeramente inclinado, así también este valle presenta altitudes que van de los 4200 a 4500 m s. n. m.

2.1.1.14 VALLE-LAGUNA DE DEPÓSITO GLACIAR (V-LQ-gl).

Esta unidad se localiza, al suroeste en una acumulación de pequeños sectores con una dirección NO-SE y al norte un pequeño sector con una dirección N-S, en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2); conformada por sedimentos clásticos de depósitos glaciares, tienen un relieve allanado o ligeramente inclinado, así también este valle presenta altitudes que van de los 4200 a 4400 m s. n. m.

2.1.1.15 CAUCE DEL RÍO (CrQ-fl).

Esta unidad se localiza, al noroeste y sureste con una dirección NO-SE siendo parte del río Huatanay en la depresión de Cusco y el río Vilcanota al noreste en el mapa geomorfológico regional (Figura 2. 2); conformada por sedimentos clásticos de depósitos fluviales, tienen un relieve allanado o ligeramente inclinado.

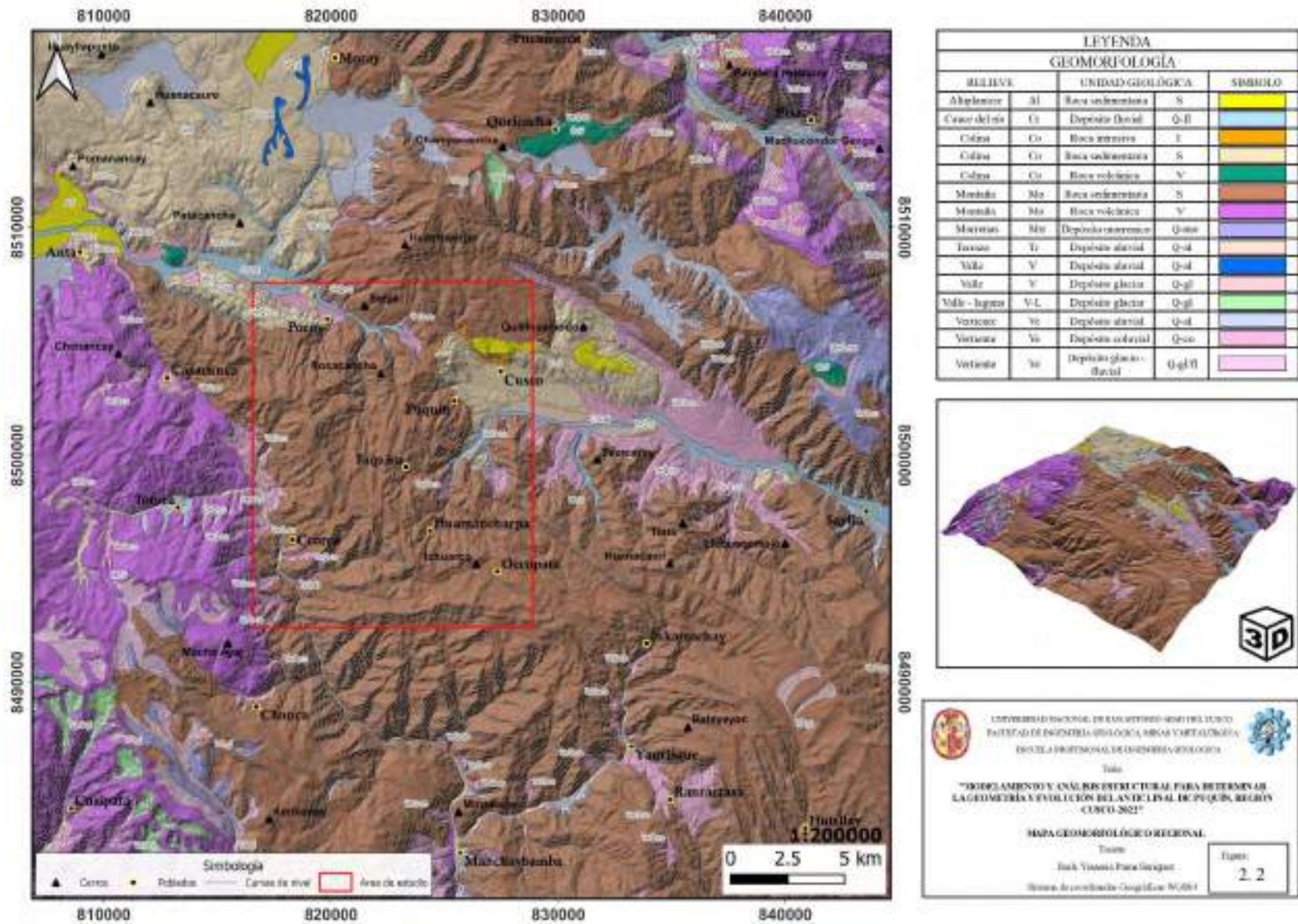


Figura 2. 2: Mapa geomorfológico regional. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

La geomorfología del área de estudio está caracterizada por la asimetría del relieve y la gran variación en la elevación, que reflejan episodios tectónicos y climáticos significativos durante la formación de la Cordillera de los Andes. Así también presenta una geomorfología variada, debido a las diferentes formaciones geológicas aflorantes en el área de estudio, las cuales presentan un comportamiento específico ante los agentes geológicos externos.

Se han identificado las unidades geomorfológicas locales o geoformas que han sido descritas tomando en consideración su ubicación, límites, relieve, litología y elevación. Este paisaje conformado por montañas, colinas, vertientes, piedemonte, peneplanicies, altiplanicies, terrazas y cauce de río, constituyen el Altiplano a manera regional (Figura 2. 23).

2.1.2.1 MONTAÑA

Montaña de roca intrusiva moderadamente empinada (Mo-I-Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza al norte dentro del área de estudio (Figura 2. 23) y limita en todas sus direcciones con la montaña de roca sedimentaria (Formación Maras) moderadamente empinada. Tiene un relieve 8% – 25% (Figura 2. 3), aflora la unidad Senja compuesta de cuarzomonzodiorita con elevaciones entre 3800 a 3820 m s. n. m.



Figura 2. 3: Montaña de roca intrusiva, tomada en el cerro Senja.

Montaña de roca sedimentaria moderadamente inclinada (Mo-S-Mi)

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al sureste del área de estudio, aunque en pequeños sectores al suroeste (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 4), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Maras, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y Puquín con elevaciones entre 3600 a 4200 m s. n. m.



Figura 2. 4: Montaña en roca sedimentaria, tomada al sur del poblado Huasampata.

Montaña de roca sedimentaria moderadamente empinada (Mo-S-Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al norte y centro del área de estudio, aunque en pequeños sectores al este y sur (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25% (Figura 2. 5), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Maras, Chinchero, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y Puquín con elevaciones entre 3550 a 4350 m s. n. m.

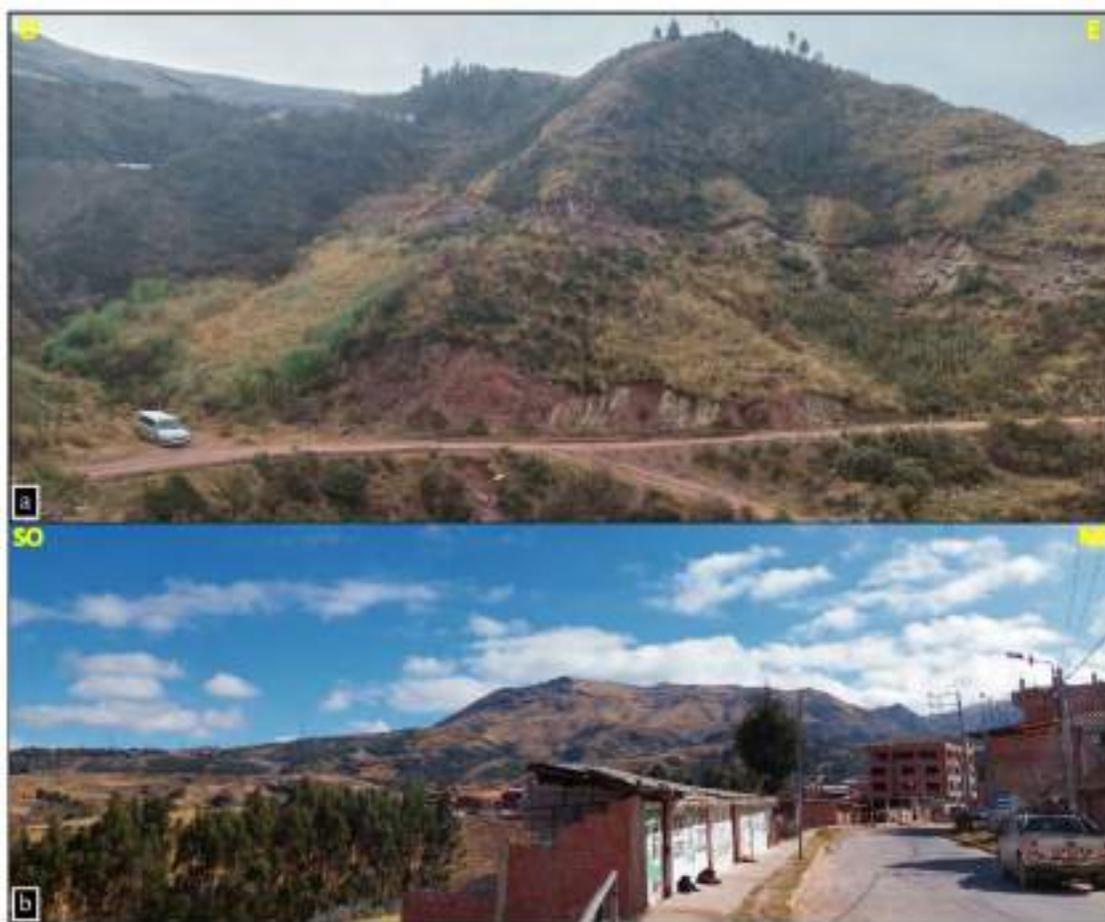


Figura 2. 5: Montaña en roca sedimentaria. (2.5a) ubicado en parte central del área de estudio en el poblado de Jaquira y (2.5b) ubicado al norte del área de estudio y al sureste del cerro Senja.



Figura 2. 7: Montaña en roca sedimentaria. (2.7a) Ubicado al noroeste del área de estudio y al sureste del cerro Cuchicancha y (2.7b) Ubicado al noroeste del área de estudio y al noroeste del poblado Kello Kaka.

Montaña de roca sedimentaria fuertemente empinada (Mo-S-Fe).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al sur del área de estudio, aunque en pequeños sectores al norte (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 50% – 75% (Figura 2. 8), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Maras, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y Puquín con elevaciones entre 3400 a 4200 m s. n. m.

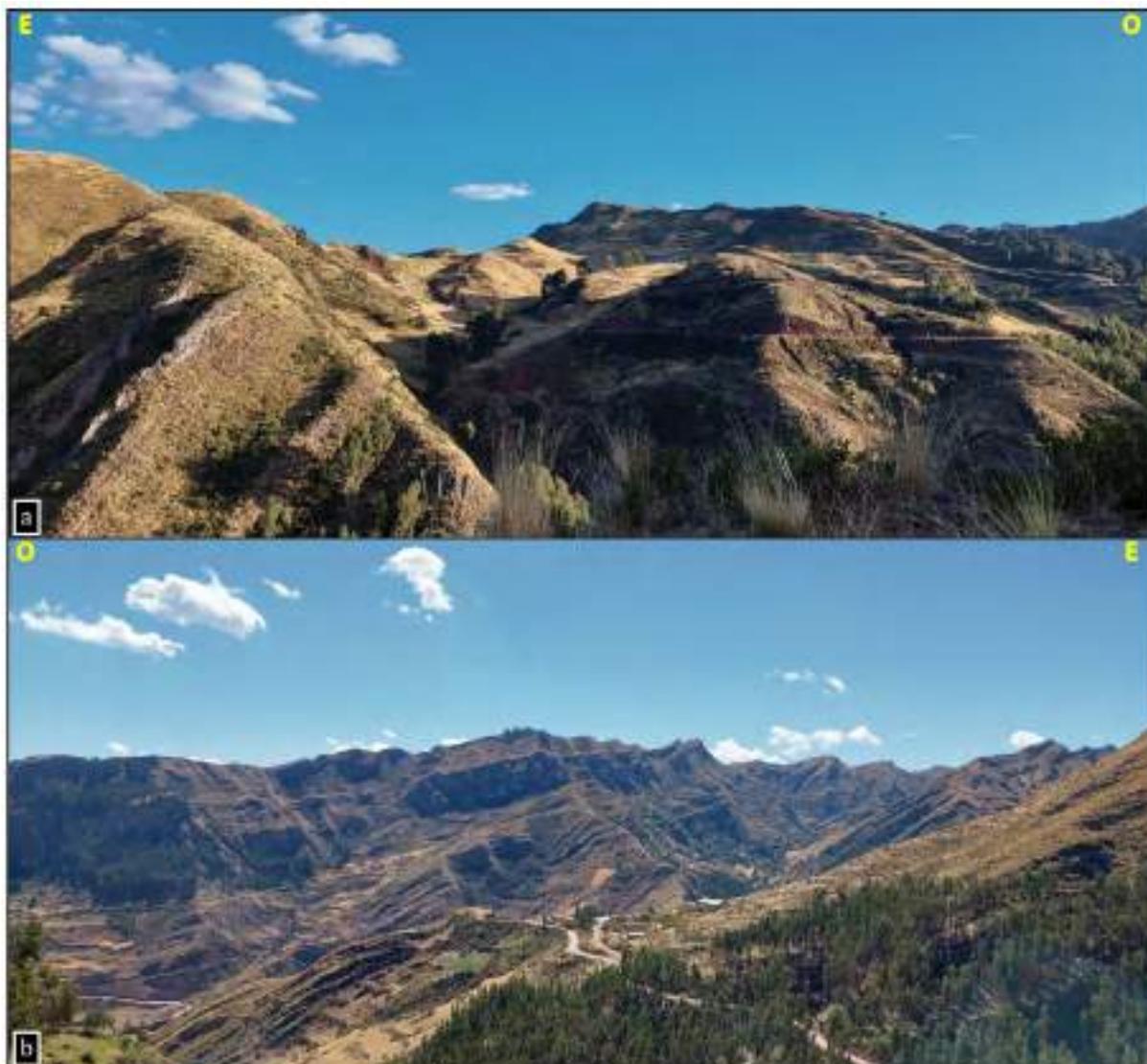


Figura 2. 8: Montaña en roca sedimentaria. (2.8a) Ubicado en la parte central del área de estudio y al sur del poblado de Jaquira y (2.8b) Ubicado al suroeste del área de estudio y al suroeste del cerro Pumahuasin.

Montaña de roca volcánica moderadamente inclinada (Mo-V- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al suroeste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 9), afloran rocas volcánicas del Grupo Tacaza con elevaciones entre 3650 a 3750 m s. n. m.



Figura 2. 9: Montaña en roca volcánica. (2.9a) ubicado al noroeste del poblado de Huayllay y (2.9b) ubicado al suroeste del poblado Huayllay.

Montaña de roca volcánica moderadamente empinada (Mo-V- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza al suroeste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25% (Figura 2. 10), afloran rocas volcánicas del Grupo Tacaza con elevaciones entre 3650 a 3750 m s. n. m.



Figura 2. 10: Montaña en roca volcánica. (2.10a) ubicado al noreste del poblado de Huayllay y (2.10b) ubicado al este del poblado de Huayllay.

2.1.2.2 COLINA

Colina de roca intrusiva moderadamente empinada (Co-I- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza al noreste dentro del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve 8% – 25% (Figura 2. 11), aflora la diorita y tonalita con elevaciones entre 3500 a 3750 m s. n. m.



Figura 2. 11: Colina en roca intrusiva, tomada al noroeste de Cusco.

Colina de roca sedimentaria moderadamente inclinada (Co-S- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al noreste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 12), afloran rocas sedimentarias de la Formación San Sebastián con elevaciones entre 3400 a 3650 m s. n. m.

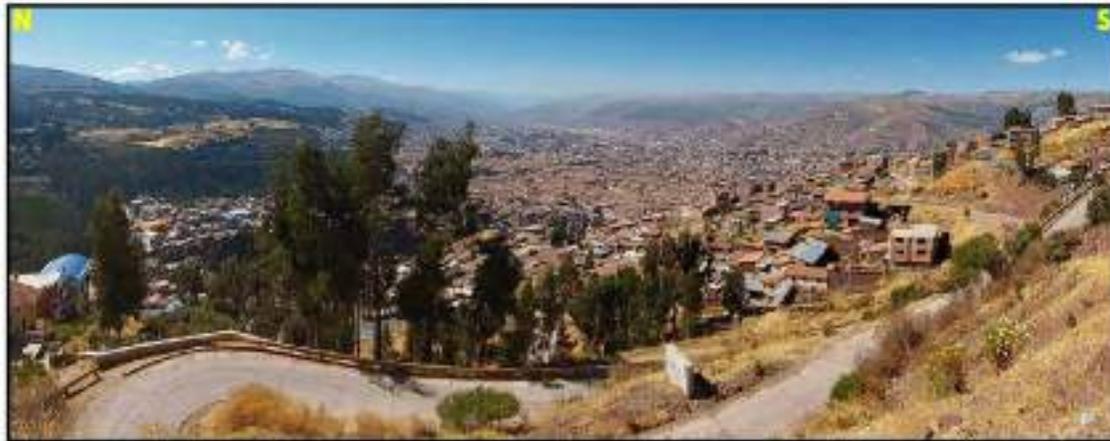


Figura 2. 12: Colina en roca sedimentaria, tomada al oeste de Cusco.

Colina de roca sedimentaria moderadamente empinada (Co-S- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al noroeste del área de estudio, aunque en pequeños sectores al noreste y centro (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25% (Figura 2. 13), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Maras, Chinchero, Chilca, San Sebastián y Puquín con elevaciones entre 3500 a 3800 m s. n. m.



Figura 2. 13: Colina en roca sedimentaria, tomada al noroeste del poblado Matero.

Colina de roca sedimentaria empinada (Co-S- E).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al noroeste del área de estudio, aunque en un pequeño sector al noreste (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 25% – 50% (Figura 2. 14), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Chinchero y Chilca con elevaciones entre 3500 a 3700 m s. n. m.



Figura 2. 14: Colina en roca sedimentaria, tomada al oeste del poblado de Poroy.

Colina de roca sedimentaria fuertemente empinada (Co-S- Fe).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al noreste del área de estudio, aunque en pequeños sectores al suroeste (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 50% – 75% (Figura 2. 15), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Quilque, Chilca y Puquín con elevaciones entre 3500 a 3700 m s. n. m.



Figura 2. 15: Colina en roca sedimentaria, tomada al noroeste del poblado de Puquín.

2.1.2.3 VERTIENTE

Vertiente de roca sedimentaria moderadamente empinada (Ve-S- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al suroeste del área de estudio, aunque en pequeños sectores al norte y sureste (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25% (Figura 2. 16), afloran rocas sedimentarias como las formaciones San Sebastián, Soncco, Quilque y Puquín con elevaciones entre 3500 a 3850 m s. n. m.



Figura 2. 16: Vertiente en roca sedimentaria, tomado al noroeste del poblado de Ccoyac.

Vertiente de roca volcánica moderadamente empinada (Ve-V- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza al suroeste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25% (Figura 2. 17), afloran rocas volcánicas del Grupo Tacaza con elevaciones entre 3750 a 3950 m s. n. m.



Figura 2. 17: Vertiente en roca volcánica. (2. 17 a) ubicado al noroeste del poblado de Ccoyac y (2.17 b) ubicado al suroeste del poblado de Ccorca.

2.1.2.4 PIEDEMONTE

Piedemonte de roca sedimentaria moderadamente inclinada (Pm-S- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al norte del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 18), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Puquín y Maras con elevaciones entre 3600 a 3700 m s. n. m.

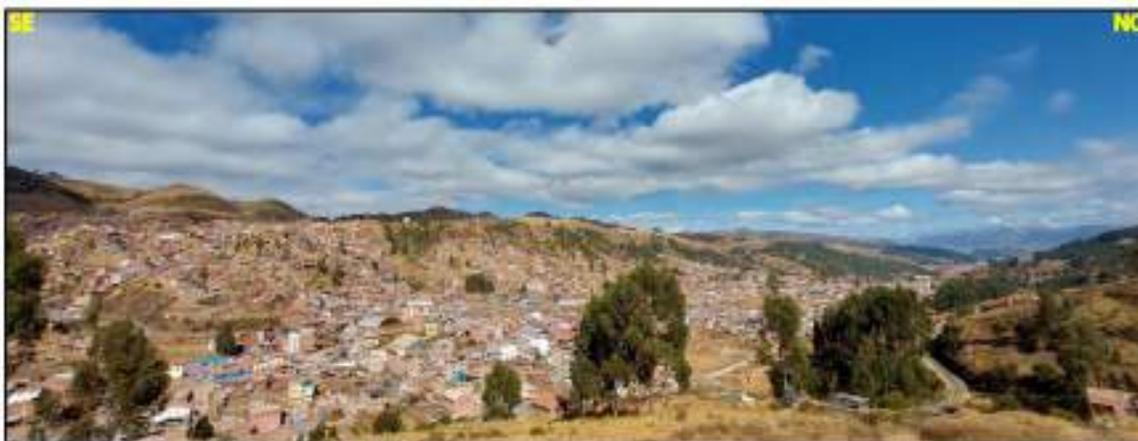


Figura 2. 18: Piedemonte en roca sedimentaria, tomado al sureste del cerro Senja.

Piedemonte de roca sedimentaria moderadamente empinada (Pm-S- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al noreste del área de estudio, aunque en pequeños sectores al noroeste (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25% (Figura 2. 19), afloran rocas sedimentarias como las formaciones San Sebastián y Quilque con elevaciones entre 3400 a 3650 m s. n. m.



Figura 2. 19: Piedemonte en roca sedimentaria, tomado al sureste del cerro Senja.

2.1.2.5 ALTIPLANICIE

Altiplanicie de roca intrusiva moderadamente empinada (Al-I- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza al norte dentro del área de estudio (Figura 2. 23) y limita en todas sus direcciones con la altiplanicie en roca sedimentaria (Formación Maras) moderadamente empinada. Tiene un relieve 8% – 25%, aflora la diorita y tonalita con elevaciones muy similares y menores a 50 metros.

Altiplanicie de roca sedimentaria moderadamente empinada (Al-S- Me).

Esta unidad geomorfológica se localiza mayormente al noreste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 8% – 25%, afloran rocas sedimentarias como las formaciones Ayabacas, Puquín y Maras con elevaciones entre 3550 a 3750 m s. n. m.

2.1.2.6 PENEPLANICIE

Peneplanicie de roca sedimentaria moderadamente inclinada (Pn-S- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al noroeste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 20), afloran rocas sedimentarias como las formaciones Puquín y San Sebastián con elevaciones entre 3500 a 3800 m s. n. m.



Figura 2. 20: Peneplanicie en roca sedimentaria, tomado al sureste del poblado Batampata.

2.1.2.7 TERRAZA

Terraza de depósito aluvial moderadamente inclinada (Tr-D- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al suroeste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 21), presentan depósitos sedimentarios aluviales con elevaciones entre 3400 a 4050 m s. n. m.



Figura 2. 21: Terraza en depósito aluvial, tomado al suroeste del poblado Huayllay.

Terraza de roca sedimentaria moderadamente inclinada (Tr-S- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al noreste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8%, afloran rocas sedimentarias de la Formación San Sebastián con elevaciones similares de 3400 m s. n. m.

Cauce de río en depósito fluvial moderadamente inclinada (Cr-D- Mi).

Esta unidad geomorfológica se localiza al noreste del área de estudio (Figura 2. 23). Tiene un relieve entre 0% – 8% (Figura 2. 22), presentan depósitos sedimentarios fluviales producto de la erosión de materiales antiguos con elevaciones entre 3400 a 3750 m s. n. m.

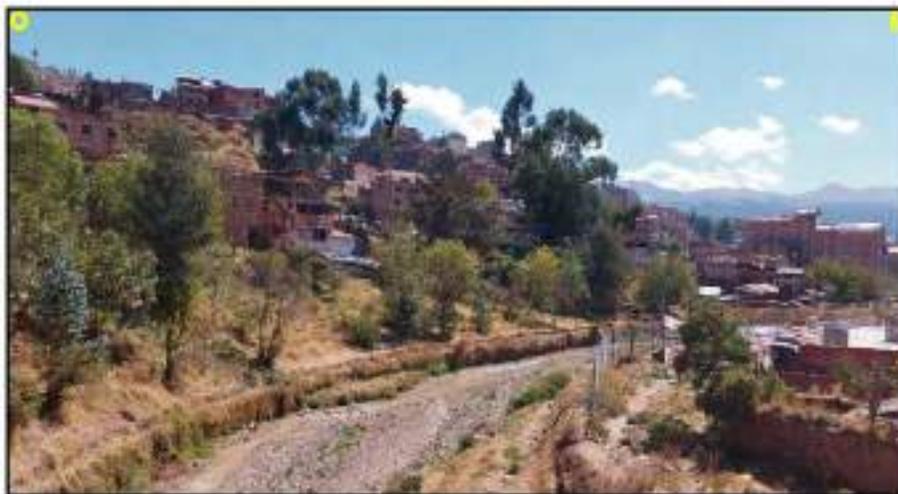


Figura 2. 22: Cauce de río en depósito fluvial, tomado al noroeste del poblado de Chocco.

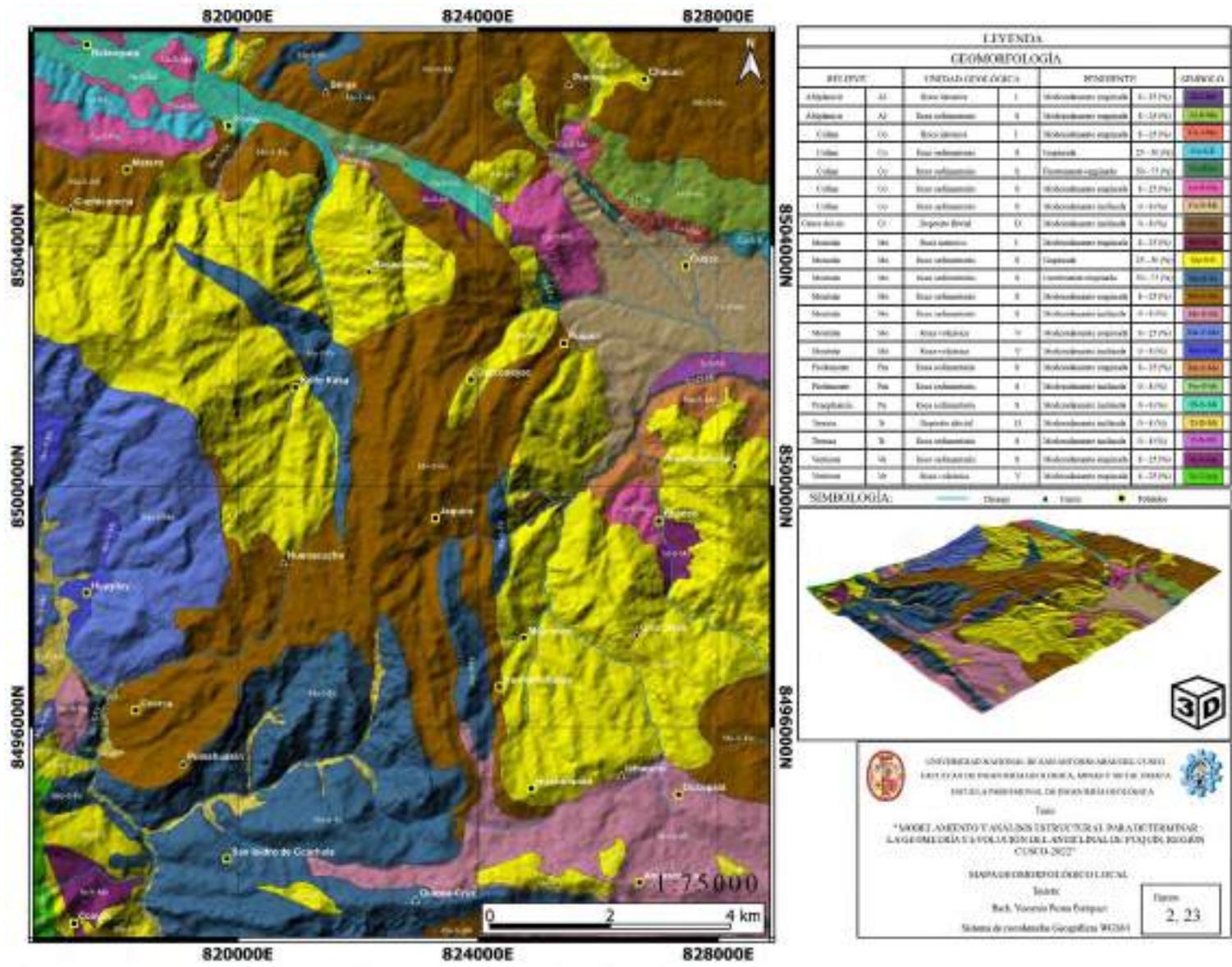


Figura 2. 23: Mapa geomorfológico local. Fuente: Elaboración propia.

2.2 ESTRATIGRAFÍA

2.2.1 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

La estratigrafía regional del área de estudio ha sido simplificada según eratemas geológicos. Las unidades litoestratigráficas son constituidas por rocas del Paleozoico hasta el Cuaternario del Cenozoico (Figura 2. 24). Se tomó como referencia los cuadrángulos del Cusco 28-s elaborado por Carlotto et al. (2011), Urubamba y Calca 27-r y 27-s por Carlotto et al. (1996) y Cotabambas 28-r por Marocco et al. (1999).

2.2.1.1 PALEOZOICO.

Las rocas del Paleozoico afloran en la zona noreste, siendo parte de la Cordillera Oriental, estas rocas están representadas por la Formación Ananea y el Grupo Copacabana.

La Formación Ananea, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en los poblados de Pisac, Pucamarca, al este del cerro Bandera Huatana, al este del cerro Quillinsamoqo y noroeste del cerro Machucondor Senga, la base de esta unidad no se observa en el cuadrángulo de Cusco, está fallada, aunque en el cuadrángulo vecino de Calca sobreyace en discordancia a la Formación Sandia del Ordovícico superior y a la Formación San Gabán del Ordovícico terminal-Silúrico inferior (Laubacher, 1978; Carlotto et al., 1996). El espesor aproximado es 1500 metros, está compuesto por pizarras y esquistos pizarrosos grises a negros, sin estratificación visible, salvo cuando están intercalados con bancos pequeños de cuarcitas de 5 a 20 cm de espesor. Estas rocas indican un medio marino silico-clástico somero distal. Las rocas se hallan fuertemente deformadas y con esquistosidades que indican al menos dos etapas de deformación; la esquistosidad S1 tiene dirección NO-SE y la esquistosidad S2 dirección NE-SO, muy similar a las que presentan las series mesocenozoicas. La edad se le atribuye por correlaciones y por estar bajo el Devónico terminal, la Formación Ananea sería del Siluro-Devónico medio superior (Carlotto et al., 1996).

En el Grupo Copacabana, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques pequeños al oeste y sur del cerro Bandera Huatana y suroeste del cerro Machucondor Senga, no se observan las relaciones de contacto con rocas más antiguas, pero si la discordancia erosional con la unidad suprayacente de la Formación Ene o la Formación Pisac del Grupo Mitu. El espesor que se le estima varía entre 300 a más de 700 metros y en la zona de escamas solo alcanza unos 100 m, está compuesto principalmente por calizas y lutitas marinas. Las calizas son de grano fino, oolíticas o nodulosas, de color gris blanquecino a negro. Estas rocas se caracterizan por presentar fósiles silicificados de fusulinas, braquiópodos, corales, etc. Las lutitas son negras, conteniendo restos de plantas. Sin embargo, hacia el techo, se puede presentar intercalaciones de lutitas rojas, areniscas blancas y capas de calizas. Las calizas se han depositado en una plataforma interna de rampa carbonatada, afectada por las transgresiones y regresiones durante el Pérmico inferior. En cambio, los depósitos detríticos parecen corresponder a medios litorales y lagoons. Su edad está comprendida entre el Wolfcampiano inferior (Sakmario) y el Leonardiano inferior (Artinskiano), es decir, Pérmico inferior a medio (Newell et al., 1953; Doubringer y Marocco, 1981).

2.2.1.2 MESOZOICO.

Las rocas del Mesozoico afloran en la zona norte y sur del mapa geológico regional, siendo parte de la Cordillera Oriental y el Altiplano, estas rocas están representadas por el Grupo Mitu y

formaciones Huambutio, Huancané, Paucarbamba, Maras, Arcurquina inferior, medio y superior, Ayabacas y Puquín.

El Grupo Mitu, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques al este del poblado de Pucamarca y Pisac, al este del cerro Bandera Huatana y suroeste del cerro Machucondor Senga; sobreyace en fuerte discordancia erosional al Grupo Copacabana, presenta un espesor aproximado de 500 a 900 metros, se diferencian dos unidades litoestratigráficas definidas en el Cuadrángulo de Calca, la Formación Pisac con un espesor que varía entre 200 y 400 metros y que descansa en discordancia erosional sobre el Grupo Copacabana por intermedio de un nivel volcánico; sobre el cual se encuentran secuencias grano estrato crecientes de brechas y conglomerados intercalados con areniscas y limolitas rojas. Los conglomerados contienen clastos de calizas con fusulinas, volcánicos y cuarcitas. Estas secuencias han sido interpretadas como originadas por conos aluviales, relacionadas con una tectónica sinsedimentaria intra-Mitu (Carlotto et al., 1988) y la Formación Pachatusán con un espesor que varía entre 300 y 500 metros y sobreyace concordantemente a la Formación Pisac e infrayace en discordancia a unidades mesozoicas del Jurásico y Cretácico; está compuesto por brechas, aglomerados y coladas volcánicas de basaltos, aunque también se presentan riolitas e ignimbritas. Estas rocas volcánicas se intercalan con rocas sedimentarias, caracterizándose por su color rojo violáceo («concho de vino») que permite reconocerlas rápidamente en el campo, se caracteriza además por la presencia de conglomerados de conos aluviales y areniscas fluviales que están intercalados con las rocas volcánicas (Carlotto et al., 1996). La edad del Grupo Mitu es confirmada por otra datación Triásico superior-Jurásico inferior y tal vez al Jurásico medio (Carlotto et al., 2011).

La Formación Huambutio, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques pequeños alargados en dirección NO-SE, al este del cerro Bandera Huatana, sobreyace en discordancia erosional al Grupo Mitu e infrayace en discordancia erosional a la Formación Huancané, presenta un espesor aproximado de 230 metros, está dividida en tres miembros; los conglomerados aluviales del Miembro Inferior están principalmente constituidos por clastos de rocas volcánicas, provenientes de la erosión del Grupo Mitu, en algunos niveles se han encontrado clastos de cuarcitas y pizarras paleozoicas, tiene un espesor que varía entre algunos metros y 100 metros. El Miembro Medio está representado por lutitas rojas y niveles delgados de calizas de medio lacustre o tal vez marino con deformación sinsedimentaria y presenta un espesor de 20 a 30 metros, en tanto que el Miembro Superior está compuesto por limolitas y areniscas fluviales rojas, presenta un espesor de 50 a 100 metros. La edad se le atribuye por correlación con otras unidades similares del sur del Perú y de Bolivia y es Kimmeridgiana-Berriasiana; es decir, del límite Jurásico-Cretácico (Carlotto et al., 1996).

La Formación Huancané, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques pequeños alargados en dirección NO-SE, en el poblado de Pucamarca, Pisac, al norte del poblado de Saylla, en el cerro Bandera Huatana y Machucondor Senga, reposa en discordancia erosional sobre la Formación Huambutio o directamente sobre el Grupo Mitu, presenta un espesor generalmente pequeño y varía entre 30 y 150 metros, sin embargo, en algunos lugares puede sobrepasar los 300 metros, está dividida en dos miembros; el Miembro Inferior está compuesto por conglomerados, areniscas conglomerádicas y areniscas cuarzosas de color blanco, donde la

base de los bancos presenta canales y la granulometría es decreciente, correspondiendo a secuencias de origen fluvial y el Miembro Superior está constituido localmente por un nivel calcáreo o por niveles finos de lutitas rojas o negras. La segunda unidad se compone principalmente de barras arenosas masivas con laminaciones oblicuas de origen eólico y fluvial. La edad se le atribuye por el contenido de fósiles en lutitas negras es del Cretácico y va desde el Berriasiano y Barremiano al Aptiano o Albiana (Carlotto et al., 1996).

La Formación Paucarbamba, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques pequeños alargados en dirección NO-SE, en el poblado de Pucamarca, Pisac, al norte del poblado de Saylla, en el cerro Bandera Huatana y Machucondor Senga, que reposa concordantemente sobre la Formación Huancané, presenta un espesor de 50 metros, pero puede variar lateralmente, alcanzando hasta los 100 metros, está conformada por una alternancia de areniscas calcáreas, margas, lutitas amarillas, rojizas y verdes, formando secuencias grano-estrato crecientes depositadas en una plataforma litoral (Carlotto et al., 1996). Los primeros depósitos de la Formación Paucarbamba reposan sobre la superficie de oxidación que afecta la última barra arenosa de la Formación Huancané (Carlotto et al., 1995b). Hacia el techo parece pasar progresivamente a lutitas y yesos de la Formación Maras. La edad que se le atribuye está comprendida entre el Aptiano superior y Albiano inferior por correlaciones regionales y por sobreyacer a la Formación Huancané (Carlotto et al., 2011).

La Formación Maras, se observa al noroeste y suroeste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques en el poblado de Moray, cerro Huanacaure, Pomanancay, norte del poblado de Anta, noreste del poblado Qoricocha, noroeste de Cusco, al este del poblado de Occopata, sur del poblado Chanca y en Manchaybamba, son todos los afloramientos estratificados o caóticos de yesos y lutitas rojas y más escasamente lutitas verdes y algunos niveles de calizas de espesores delgados (3 a 7 metros) o calizas más gruesas que en realidad corresponden a las calizas deslizadas de la Formación Ayabacas, que aparecen dentro del Grupo Yuncaypata, incluidos los yesos que han sufrido removilizaciones por efectos tectónicos y diapíricos, sobreyace a la Formación Paucarbamba e infrayace a las calizas Ayabacas, es difícil calcular el espesor total de esta unidad por la forma caótica de presentarse, pero se puede estimar entre 100 y 400 metros, aunque en algunos lugares pueden sobrepasar estos valores por repeticiones tectónicas o por diapirismo. La edad que se le atribuye es asumida según su posición estratigráfica y por correlaciones; ya que sobreyace a la Formación Paucarbamba de posible edad Aptiana superior-Albiana inferior e infrayace a las calizas Ayabacas del Albiano-Turoniano (Carlotto et al., 2011).

La Formación Arcurquina, se observa al suroeste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques alargados en dirección NO-SE, en el cerro Kenkonay, suprayace concordantemente a la Formación Murco en el cuadrángulo de Tambobamba, presenta un espesor aproximado de 1100 metros, se distinguen tres divisiones; la secuencia inferior destaca por sus estratos de caliza con espesores hasta de 2 m. La parte media es una intercalación de estratos delgados de caliza con niveles esporádicos de dolomita. En la parte superior, se observan estratos de caliza de espesores hasta de 3 m alternando con niveles de caliza submétricos. La Formación Arcurquina es de origen marino y fue depositada en ambiente marino abierto y relativamente somero en el cual había las condiciones favorables para el desarrollo de abundante vida bentónica y al mismo tiempo condiciones de intensa agitación y actividad que dieron lugar a la trituración y desmenuzamiento de detritus calcáreo formador de las calizas. La edad que se le atribuye es Albiano-Cenomaniano

y determinada por los fósiles; se correlaciona con las calizas de la Formación Ayabacas (Marocco et al., 1999).

La Formación Ayabacas o Calizas Yuncaypata (Kalafatovich, 1957), se observa distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques pequeños en el poblado Qoricocha, al norte de Cusco, en el poblado Chanca y en el cerro Pomanancay; sobreyace a la Formación Maras e infrayace a la Formación Puquín, aflora también de manera disarmónica o caótica, presenta un espesor de 300 metros, está compuesta por calizas que se hallan frecuentemente dolomitizadas; sin embargo, se ha podido reconocer facies margosas grises oscuras, facies mudstone bioturbadas o no, facies wackestone-packstone más o menos bioclásticas, y menos frecuentemente facies grainstone con oolitos de bioclastos o granos de cuarzo. Algunas facies aparecen con figuras de emersión (disolución), con aspecto de brechas y figuras de estructuras de tipo slump. El análisis de facies les ha permitido a Carlotto (1992) y Carlotto et al. (1992) determinar que las Calizas Ayabacas se han formado en una plataforma carbonatada poco profunda, los medios varían de infratidal a intertidal y hasta supratidal. La sedimentación ha sido controlada por las variaciones eustáticas del mar. La edad que se le atribuye por correlación con las calizas Arcurquina, la edad de la formación va desde el Albiano superior hasta el Turoniano (Carlotto et al., 2011).

La Formación Puquín, se observa distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques alargados en dirección NO-SE y N-S, en el poblado de Chinchero, Qoricocha, Puquín, Iskaymachay, Manchaybamba y en el cerro Quillinsamoqo; sobreyace a la Formación Ayabacas, pero en general, el contacto corresponde a un nivel de despegue, presenta un espesor aproximado de 380 metros, está dividida en tres miembros llamados M1, M2 y M3; el Miembro M1 (30 m) del sector de Puquín (Carlotto, 1992) está constituido por lutitas rojas, yesos laminados, nodulosos o en mallas y por brechas con elementos pelíticos, el Miembro M2 (180 m) las secuencias basales están compuestas por calizas, margas, lutitas negras ricas en materia orgánica y pirita y el Miembro M3 (>170 m) aflora en el anticlinal de Puquín, donde sobreyace al Miembro M2, sin embargo, en este mismo sector el techo se halla parcialmente erosionado. Este miembro es esencialmente arenoso y globalmente más detrítico. La edad que se le atribuye es Senoniano-Coniaciano al Maestrichtiano a partir de correlaciones regionales (Carlotto et al., 2011).

2.2.1.3 CENOZOICO.

Las rocas del Cenozoico afloran en la zona sur y norte en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), siendo parte del Altiplano y la Cordillera Oriental, estas rocas están representadas por las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco, Grupo Tacaza, Anta, Punacancha, Paccaritambo, Paruro, Chinchero, Rumicolca, San Sebastián y depósitos cuaternarios.

PALEÓGENO.

La Formación Quilque, se observa distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques pequeños alargados en dirección NO-SE, en el poblado Puquín, Huasampata, al sur de Saylla, al este de Manchaybamba y al este del cerro Bateyayoc, estas capas rojas reposan en discordancia erosional sobre la Formación Puquín, presenta un espesor aproximado de más de 150 metros, conjunto grano-estrato creciente de lutitas, areniscas de color rojo y conglomerados con costras de calcáreas y calizas. Los bancos areno-conglomerádicos son canalizados y presentan laminaciones oblicuas curvas. La evolución vertical indica que las facies pelíticas lacustres y de

llanura de inundación con paleosuelos, pasan gradualmente a las facies arenoconglomerádicas de un sistema fluvial débilmente entrelazado de procedencia suroeste. La edad que se le atribuye es Paleocena inferior por el contenido de fósiles (Carlotto et al., 2011).

La Formación Chilca se encuentra distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en los mismos lugares donde aflora la Formación Quilque, se encuentra en discordancia erosional sobre la Formación Quilque y bajo la Formación Kayra, presenta un espesor aproximado de más de 100 metros, constituido por lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas de medios lacustres o sabkha, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas de un sistema fluvial de canales entrelazados, indicando una progradación de procedencia NE y SO. La edad que se le atribuye es Paleoceno superior-Eoceno inferior según el contenido fósil, observaciones de campo (discordancias) y las correlaciones estratigráficas (Carlotto et al., 2011).

La Formación Kayra que pertenece al Grupo San Jerónimo, está distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques alargados en dirección NO-SE, al norte del poblado Chinchero, Anta, Puquín, Occopata, Yaurisque, en el cerro Huaynajorjor, Taurcapay, Bateyayoc, sobreyace a la Formación Chilca e infrayace a la Formación Soncco, el espesor de esta unidad varía entre 2000 a 3000 metros, esencialmente constituida por areniscas feldespáticas, intercaladas con niveles de lutitas rojas. Este conjunto se desarrolló en un medio fluvial entrelazado y llanura de inundación. La parte media-superior es más gruesa y está compuesta por areniscas y microconglomerados con clastos volcánicos y cuarcíticos de un medio fluvial altamente entrelazado. Hacia el sur las facies se hacen más gruesas y aparecen los conglomerados. La formación acaba con facies areno-pelíticas de llanura de inundación y canales divagantes. Las paleocorrientes indican que los aportes proceden del sur y suroeste. La edad que se le atribuye es Eocena inferior a partir de trazas de fisión FT en apatitos (Carlotto et al., 2011).

La Formación Soncco que pertenece al Grupo San Jerónimo, está distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en bloques alargados en dirección NO-SE, en el poblado Casacunca, Ccorca, Ranraccasa y en el cerro Huanacauri, sobreyace concordantemente o en discordancia progresiva a la Formación Kayra, presenta un espesor aproximado entre 1200 y 2300 metros, se divide en dos miembros, el Miembro I o inferior (200-300 m) está constituido por lutitas rojas de llanura de inundación, intercaladas con niveles de areniscas finas y el Miembro II o superior (1000-2000 m) está compuesto por areniscas con clastos blandos y conglomerados con clastos volcánicos de un sistema fluvial altamente entrelazado de procedencia S y SO. En efecto, al sur se puede apreciar conglomerados con clastos más grandes. La edad que se le atribuye es Eoceno superior-Oligoceno inferior a partir de dataciones radiométricas en tobas volcánicas (Carlotto et al., 2011).

El Grupo Tacaza, se observa al suroeste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflorando en bloques en el poblado Casacunca, Totorá, Cusipata y al este del cerro Kenkonay, presenta un espesor de más de 500 metros; se puede dividir litológicamente en ocho secuencias, de las cuales tres afloran en la zona de estudio. La secuencia inferior se encuentra constituida por areniscas de grano medio a fino, de color gris y flujos piroclásticos que presentan laminaciones paralelas finas. La secuencia intermedia, está compuesta por flujos piroclásticos de composición dacítica, esporádicamente depositadas en lagunas extensas cercanas unas a otras. Finalmente, la secuencia superior está compuesta por andesitas y hacia el tope ignimbritas de composición riodacítica a

dacítica, en bancos bien estratificados con arenas medias a finas, debido a una deposición en un ambiente lacustre (Benavente y Delgado 2011). La edad que se le atribuye va desde Eoceno a Plioceno (Marocco et al., 1999).

NEÓGENO.

La Formación Anta, se observa al sur en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en bloques al sur del poblado Manchaybamba y en el cerro Minasorjo, sobreyace en discordancia erosional a la Formación Chilca y en discordancia angular sobre la Formación Ferrobamba o sobre intrusivos, desde el punto de vista paleogeográfico es el equivalente proximal de la Formación Soncco (Carlotto, 1998), presenta un espesor aproximado entre 2000 a más de 3200 metros, está dividida en tres miembros; el Miembro I (1500- 2500 m) está compuesto esencialmente por conglomerados de conos aluviales con clastos volcánicos, de calizas y cuarcitas, intercalados con areniscas feldespáticas, limolitas rojas y además algunos niveles de brechas, aglomerados y coladas volcánicas, esta unidad es más gruesa y potente hacia el sur, el Miembro II (500-700 m) está constituido por intercalaciones de areniscas y lutitas fluviales con ocasionales bancos de conglomerados y clastos de piroclastos y un Miembro III, donde existe una secuencia de conglomerados con matriz tufácea que sobreyace en discordancia de erosión y muy débil discordancia angular al Miembro II. La edad que se le atribuye es Eoceno-Oligoceno inferior a partir de dataciones radiométricas (Carlotto et al., 2011).

La Formación Punacancha, se observa al sureste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora un bloque al este del poblado Iskaymachay y Huisllay, reposa en concordancia o en ligera discordancia angular sobre la Formación Soncco y recubierta en discordancia angular por la Formación Paruro, el espesor total varía entre 1265 y más de 5000 m, está dividido en cuatro miembros, el Miembro I (0-440 m) conformado por lutitas y limolitas rojas de llanura de inundación y microconglomerados fluviales, en la parte media de este conjunto se observa un nivel de toba volcánica de 1 a 3 m de espesor, el Miembro II (> 700 m) muestra una secuencia grano estrato creciente de areniscas y conglomerados fluviales con clastos que pueden pasar los 0.50 m, la composición de los clastos es mayormente volcánica, habiendo también de cuarcitas, calizas, areniscas y escasamente yesos, el Miembro III (> 500 m) sobreyace en discordancia progresiva al Miembro II; es una secuencia más bien grano decreciente igualmente compuesto por areniscas y conglomerados de medios fluviales, aquí predominan los clastos de cuarcitas, calizas y areniscas, sobre los volcánicos que son escasos, y el Miembro IV (> 300 m) sobreyace también en discordancia progresiva sobre el Miembro III a través de un conglomerado en la base de banco, el conjunto es una secuencia grano decreciente de areniscas y conglomerados de medios fluviales que termina con limolitas y lutitas lacustres y de llanura de inundación Carlotto et al. (2011). La edad que se le atribuye es Oligoceno superior y Mioceno inferior (Carlotto et al., 2011).

La Formación Paccaritambo, se observa al sureste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en bloques al este del poblado Manchaybamba, sobreyace en discordancia angular a la Formación Anta y al Grupo Yuncaypata, el espesor varía de 100 a más de 300 metros, está compuesta por areniscas de grano grueso que varían hasta fino con fragmentos de líticos, cuarzo y feldespatos, así como, algunas capas de lutitas de colores púrpuras y marrones, todas de origen fluvial. Estas capas están intercaladas con conglomerados de ríos proximales o conos aluviales, formando secuencias grano estrato creciente Los clastos varían de tamaño y pueden alcanzar 0.30

m siendo de intrusivos, volcánicas y calizas. Se han depositado en pequeñas cuencas transportadas, controladas por el sistema de falla Huanoquite-Accha. La edad que se le atribuye es Mioceno inferior a partir de dataciones radiométricas (Carlotto et al., 2011).

La Formación Paruro, se observa al sureste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en bloques en el poblado Yaurisque y Ranraccasa, sobreyace en discordancia angular a las formaciones Kayra, Soncco, Punacancha y al Grupo Yuncaypata, presenta un espesor aproximadamente de 1700 metros, está dividido en dos miembros, el Miembro I (365-700 m) está compuesto por lutitas y limolitas lacustres, areniscas fluviales y algunos conglomerados fluviales, formando secuencias grano-estrato decrecientes que indican la apertura de la cuenca y con zonas de aporte principalmente desde el sur y el Miembro II (800- 1000 m) está en discordancia progresiva sobre el Miembro I, y está formado casi exclusivamente por conglomerados de conos aluviales que constituyen una secuencia grano-estrato creciente (Jaimes et al., 1996) que indica la progradación desde el sur asociado al sistema de fallas Yaurisque-Papres. La edad que se le atribuye es Mioceno superior (Carlotto et al., 2011).

La Formación Chinchero, se observa al noroeste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en bloques al este de Cusco, en el poblado de Anta, en los cerros Senja, Huanacaure y Huayllapunto, sobreyace a las formaciones Maras y Ayabacas, el espesor máximo es de 200 metros, esta formación a veces se confunde con la parte caótica y deformada de la Formación Maras. Está constituida de brechas que tienen una matriz arcillo-arenosa, en general, los diferentes elementos clásticos que componen la Formación Chinchero provienen de la erosión de las formaciones Maras, Ayabacas y Puquín; es decir, calizas, yesos y lutitas de diferentes colores. Los depósitos corresponden a conos aluviales torrenciales, está compuesto por secuencias grano decrecientes y estratos decrecientes (Cabrera, 1988). Esta unidad evoluciona de secuencias de conos torrenciales interstratificadas con brechas en la parte intermedia, a medios fluvio-torrenciales con elementos ligeramente redondeados en la parte superior. La edad que se le atribuye es Plioceno por sobreyacer a la Formación Paruro (Carlotto et al., 1996).

La Formación Rumicolca, se observa al noreste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en el poblado Qoricocha, Pisac, al este de Anta y al noroeste de Saylla, es un conjunto de cuerpos volcánicos de dimensiones pequeñas que afloran a lo largo del límite Altiplano-Cordillera Oriental, las lavas de la Formación Rumicolca son generalmente de color oscuro, de negro a gris. En el cuadrángulo de Cusco, la composición mineralógica es constante de un edificio a otro, se trata de andesitas, dacitas y traquitas ricas en potasio, así como shoshonitas. La edad que se le atribuye es Pliocuatnaria a partir de dataciones radiométricas (Carlotto et al., 1996).

CUATERNARIO.

La Formación San Sebastián, se observa al norte y noroeste en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en bloques en Cusco, en el norte del poblado Poroy y norte del poblado Anta; sobreyace al basamento Cretácico y Terciario, así como a la Formación Chinchero, presenta un espesor aproximadamente de 100 metros, presenta dos secuencias, la primera grano decreciente, está constituida por secuencias de areniscas fluviales de canales entrelazados deltaicos, y lutitas lacustres o palustres. Niveles diatomíticos y calcáreos caracterizan la parte superior y la segunda, grano creciente, está compuesta por conglomerados y areniscas de conos-terrazas fluvio-

torrenciales, que indican el cierre de la cuenca. Este cierre está expuesto por la presencia de estructuras compresivas sinsedimentarias (Carlotto et al., 1996). La edad que se le atribuye es de Pleistoceno a partir de dataciones (Kalafatovich, 1955; Ramírez, 1958; De Muizon, en Cabrera, 1988).

Los depósitos glaciares, distribuido en el mapa geológico regional (Figura 2. 25), aflora en bloques pequeños que se componen de gravas y bloques de diferentes tamaños con matriz variable, con limos arenosos y arcillas.

Los depósitos fluviales están constituidos por bancos de gravas y arenas, formando una o varias terrazas.

Los depósitos aluviales están conformados por bloques y gravas polimícticas, cuarcitas, areniscas, rocas volcánicas, etc., envueltos por una matriz areno-arcillosa.

Los depósitos coluviales que corresponde a los depósitos de pendiente donde se incluyen los deslizamientos, están conformados por masas inestables de gravas (guijarros, cantos y bloques) angulosas transportadas por gravedad y agua bajo la forma de derrubios.

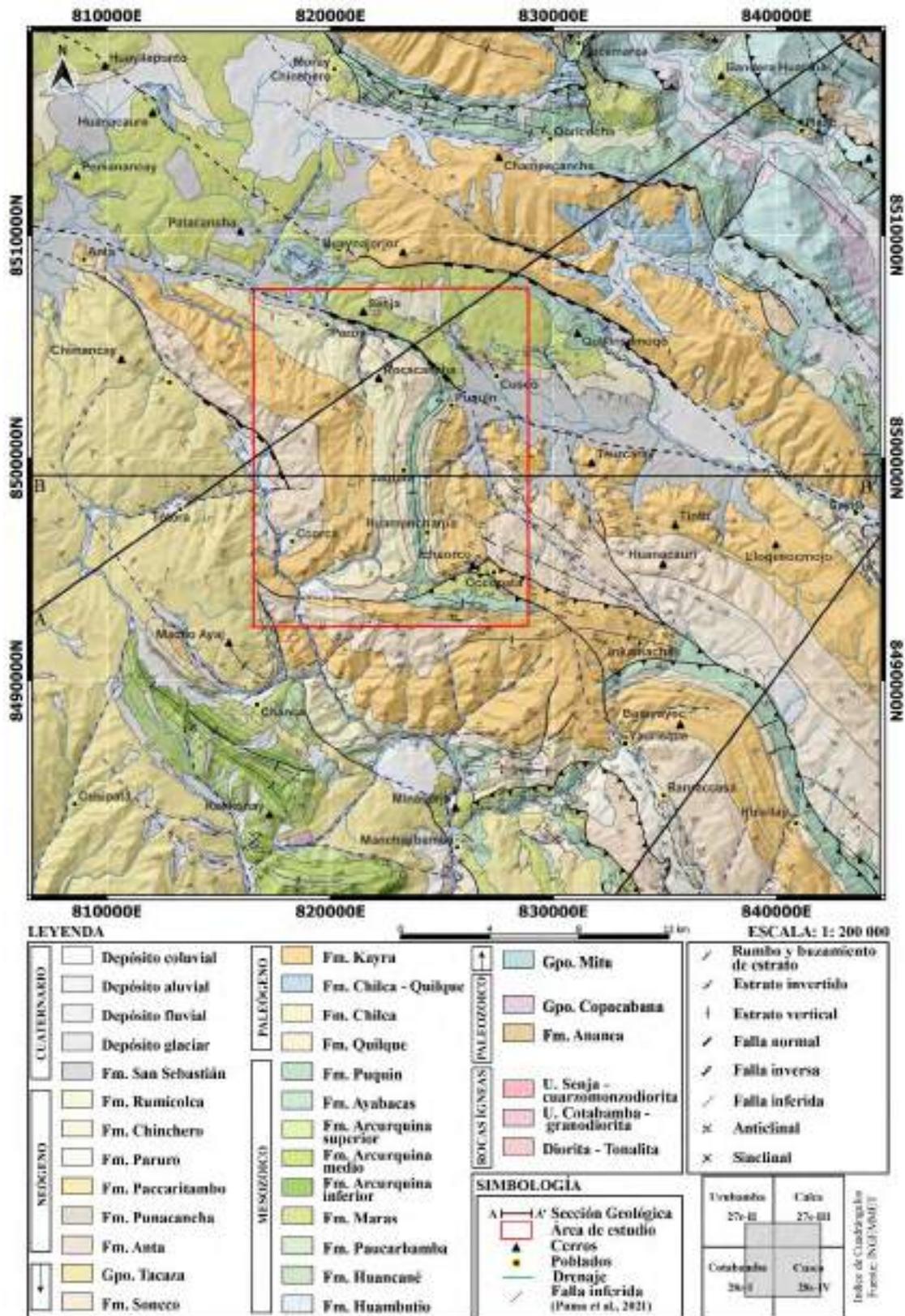


Figura 2. 25: Mapa geológico regional. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011); Carlotto et al. (1996) y Marocco et al. (1999).

2.2.2 ESTRATIGRAFÍA LOCAL

La estratigrafía en el anticlinal de Puquín comprende unidades cretácicas como las formaciones Maras y Puquín, unidades paleógenas como las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza (Figura 2. 44), según la información y comprobación en campo se hará la siguiente descripción de las unidades aflorantes y también se mostrarán las columnas estratigráficas realizadas en campo en dirección E-O (Figura 2. 26).

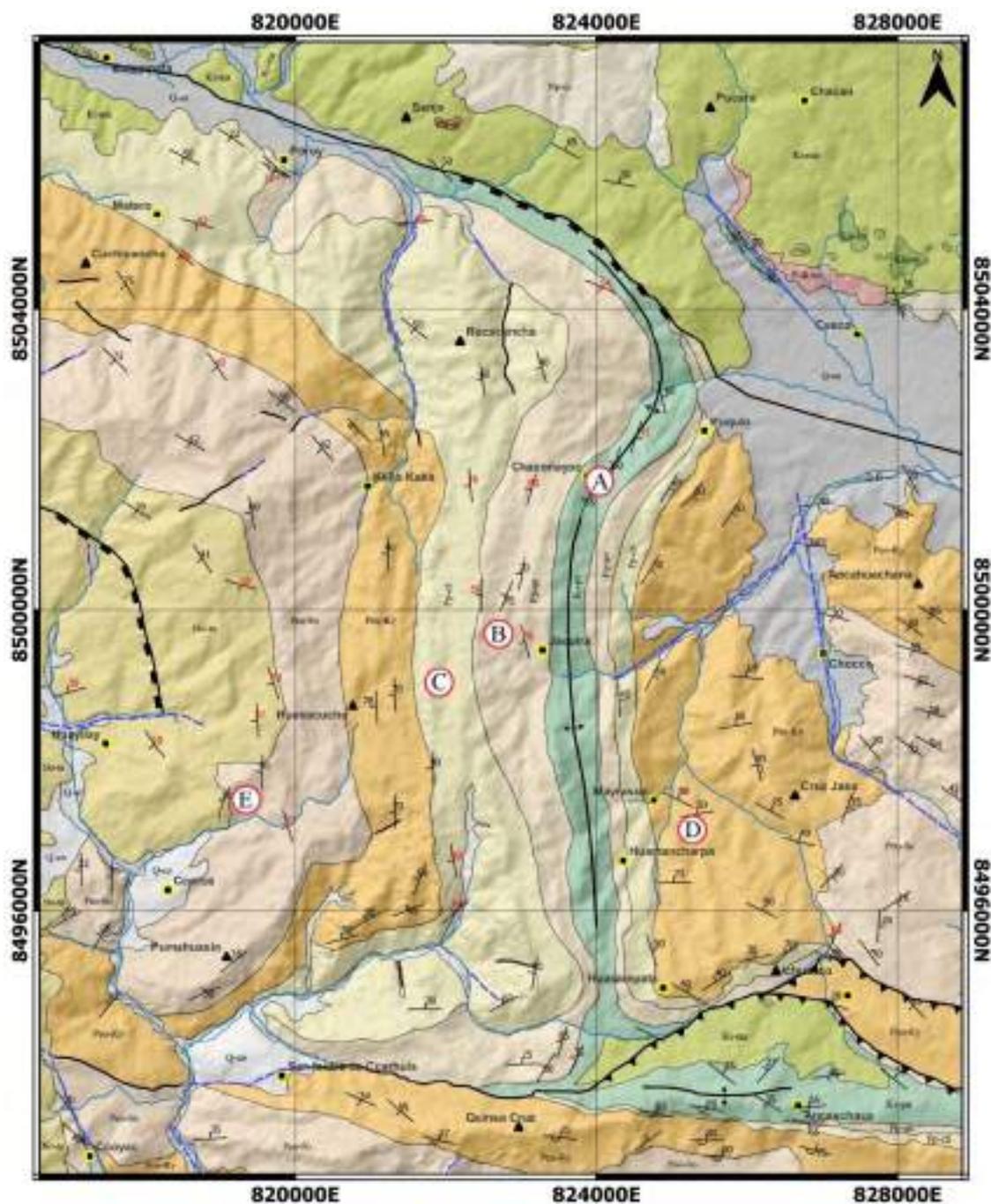


Figura 2. 26: Ubicación del levantamiento de las columnas estratigráficas A, B, C, D y E. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).

2.2.2.1 Formación Maras (Ki-ma).

La Formación Maras, que cronológicamente pertenece al Albiano Medio (Carlotto et al., 1996); en el área de estudio está ampliamente distribuido tanto en la parte norte, entre el poblado Batampata y los cerros Senja y Pucará, como en la parte sur (Figura 2. 44) y la litología que presenta son calizas, margas, yesos y lutitas rojas (Figura 2. 27).

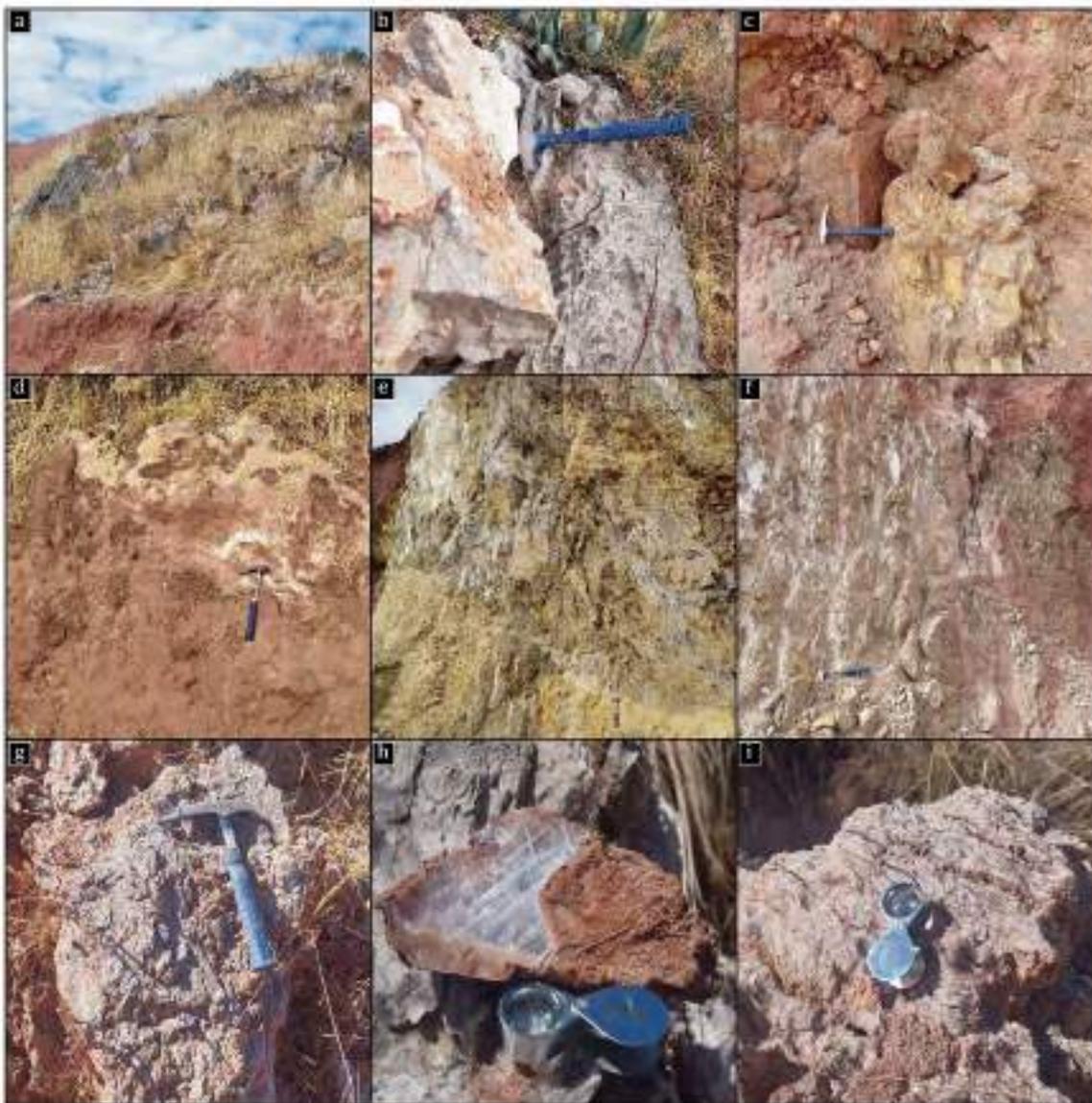


Figura 2. 27: Formación Maras. (a) Afloramiento de lutitas rojas en la base y calizas en la parte superior, (b) bloque de calizas con textura kárstica, (c) capa de margas en contacto con lutitas rojas, (d) lutitas rojas alteradas, (e) margas alteradas, (f) capa de yesos; todas estas mencionadas aflorando al suroeste de Batampata. (g) bloque de yeso, (h) cristales de yeso con macla en punta de flecha o en rosa del desierto y (i) bloque de yeso con deformación y alteración; aflorando en la zona sureste del área de estudio o al norte del poblado de Ancaschaca. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.2 Formación Ayabacas (Kis-ay).

La Formación Ayabacas, que cronológicamente pertenece al Albiano superior-Turoniano (Cabrera y Petersen, 1936); en el área de estudio aflora al noreste y sureste (Figura 2. 44) en bloques

dispersos y pequeños; la litología que presenta según (Carlotto et al., 2011) son calizas que se hallan frecuentemente dolomitizadas; facies margosas grises oscuras, facies mudstone bioturbadas o no, facies wackestone-packstone más o menos bioclásticas y menos frecuentemente facies grainstone con oolitos de bioclastos o granos de cuarzo. Algunas facies aparecen con figuras de emersión (disolución), con aspecto de brechas y figuras de estructuras de tipo slump.

2.2.2.3 Formación Puquín (Ks-pu).

La Formación Puquín, que cronológicamente pertenece al Coniaciano-Maestrichtiano (Carlotto, 1992); en el área de estudio aflora y es parte del núcleo del anticlinal de Puquín entre el poblado de Chaconayoc (Figura 2. 44), así también aflora en la zona sureste como parte del flanco y la litología que presenta son calizas, margas, lutitas rojas, verdes y negras ricas en materia orgánica (Figura 2. 28 y 2. 29) en la mayoría alteradas, areniscas feldespáticas finas a medias en las que presenta venillas, costras y nódulos de calcita, óxidos de hierro y marcas de clastos blandos; presenta también estructuras sedimentarias ondulantes (sismitas).

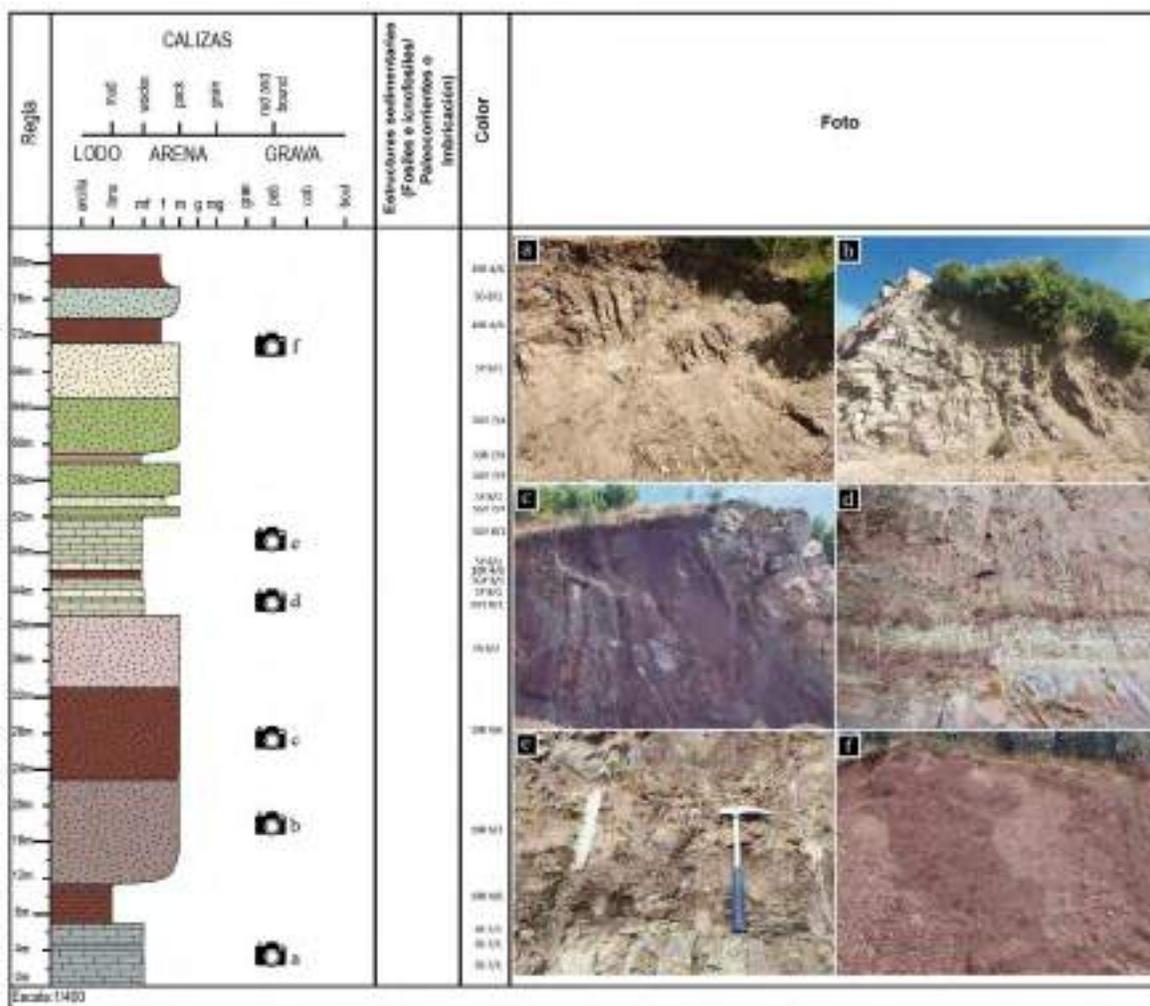


Figura 2. 28: Columna estratigráfica de la Formación Puquín (A) (Figura 2. 26), levantada en el Poblado Chaconayoc. (a) Afloramiento de calizas y margas, (b) afloramiento de areniscas de grano medio, (c) afloramiento de areniscas de grano medio intercalado con fino con cizallamiento y presencia de fallas, (d) afloramiento de calizas y margas, (e) afloramiento de calizas alteradas y (f) afloramiento de areniscas de grano fino a medio con cizallamiento. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. 29: Afloramiento de calizas, margas y lutitas de la Formación Puquín; vista tomada al noreste del poblado de Puquín.

2.2.2.4 Formación Quilque (Pp-qu).

La Formación Quilque, que cronológicamente pertenece al Paleoceno inferior (Gregory, 1916; Carlotto, 1992); en el área de estudio aflora y es parte de ambos flancos del anticlinal de Puquín, así también aflora en la zona sureste en el cerro de Ichu Orco y suroeste en pequeños bloques (Figura 2. 44), la litología que presenta son areniscas finas, medias y gruesas algunas intercaladas con materiales más finos como lutita (Figura 2. 30), se observan clastos blandos de 10 cm de diámetro mayor (Figura 2. 32 e y 2. 32 f), vetillas, costras y nódulos de calcita, clastos líticos de 4 mm de diámetro mayor, en el tope son más deleznable y presentan estructuras sedimentarias como laminación cruzada lenticular ver Figura (2. 31 a), tool marks Figura (2. 31 b), rizaduras de corriente Figura (2. 31 c) y (2. 32 b), laminación paralela Figura (2. 31 d), grietas de desecación, flute mark Figura (2. 32 a), la presencia de nódulos o concreciones como se observa en la Figura (2. 32 c) y también sísmas como se observa en la Figura (2. 32 d).

2.2.2.5 Formación Chilca (Pp-ch).

La Formación Chilca, que cronológicamente pertenece al Paleoceno superior (Audebaud, 1973; Carlotto, 1992); en el área de estudio aflora y es parte de ambos flancos del anticlinal de Puquín, así también aflora en la zona sureste y suroeste en pequeños bloques (Figura 2. 44), la litología que presenta son areniscas feldespáticas y cálcicas finas y medias algunas intercaladas con materiales más finos como lutita (Figura 2. 33 y 2. 34), se observan clastos blandos, vetillas, costras y nódulos de calcita, presentan estructuras sedimentarias como laminación paralela ver Figura (2. 35 d) y (2. 35 e), laminación cruzada planar de bajo ángulo Figura (2. 35 a), laminación cruzada lenticular Figura (2. 35 b), rizaduras de corriente como se observa en la Figura (2. 35 c), grietas de desecación ver Figura (2. 35 g) y (2. 35 h), flute mark ver Figura (2. 35 f) e icnofósiles Figura (2. 35 i).

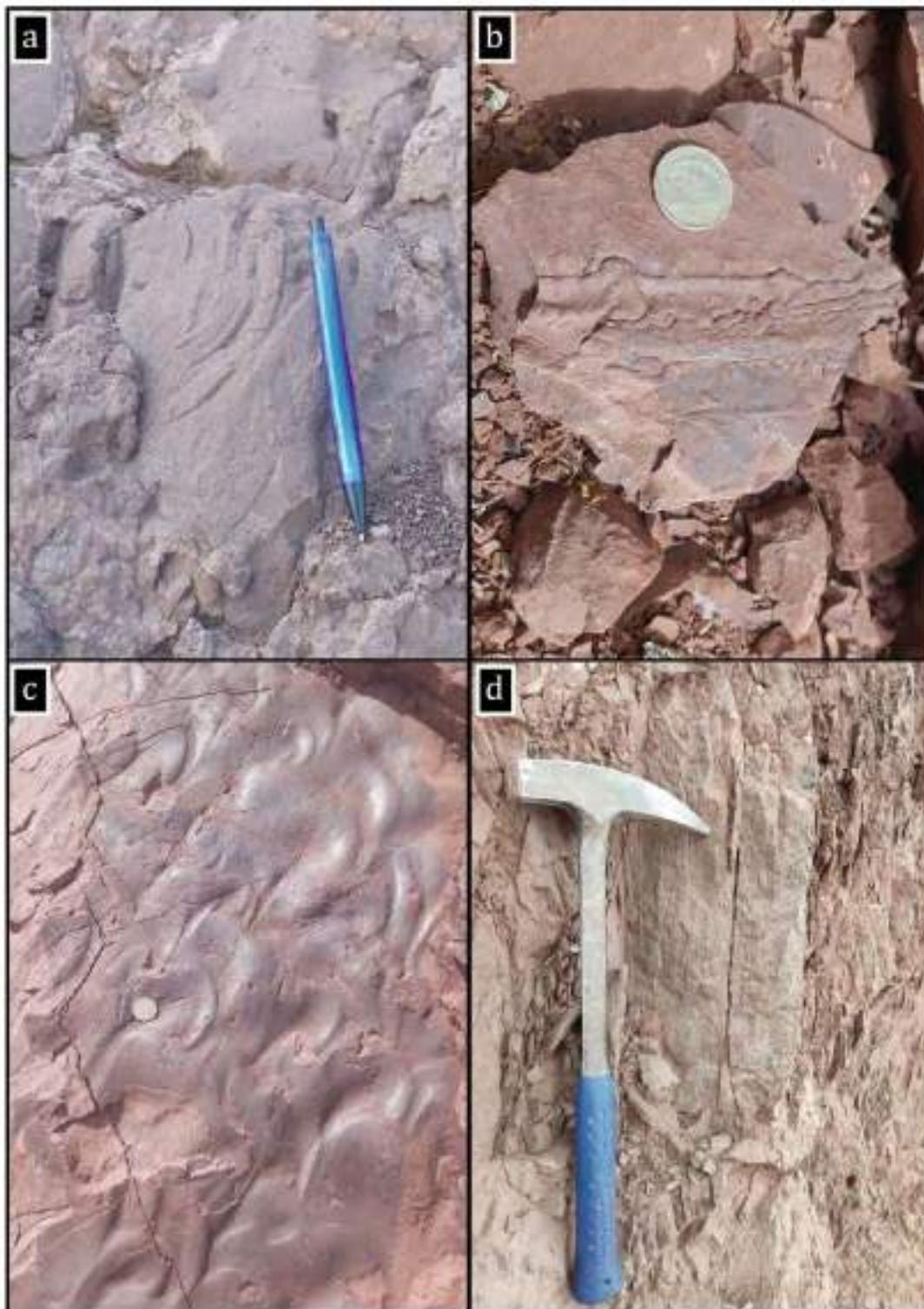


Figura 2. 31: Estructuras sedimentarias de la Formación Quilque. (a) Laminación cruzada lenticular en el poblado Jaquira, (b) tool marks al sureste del poblado de Poroy, (c) rizaduras de corriente y (d) laminación paralela en el poblado Jaquira. Fuente: Elaboración propia.

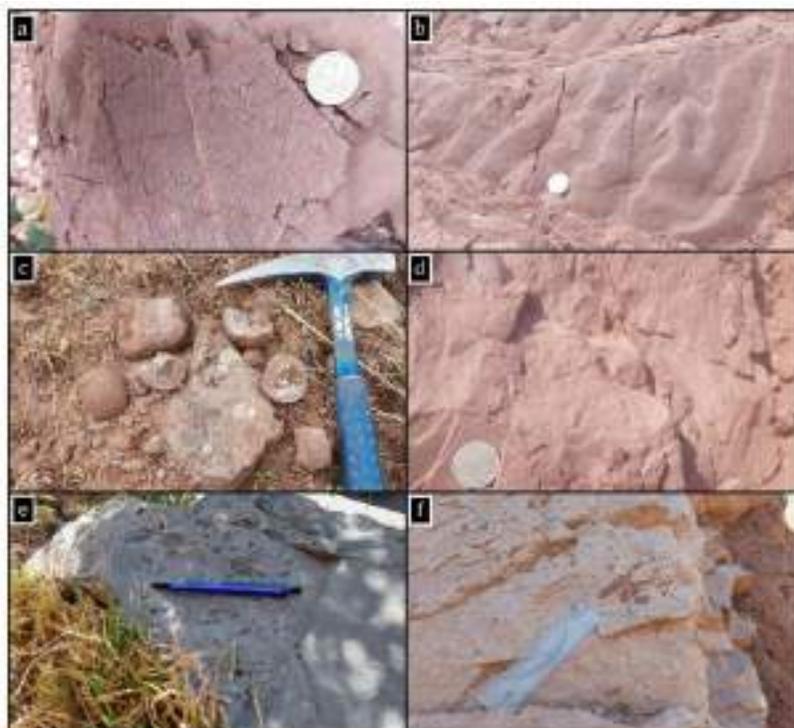


Figura 2. 32: Estructuras sedimentarias de la Formación Quilque. (a) Flute mark al sureste del poblado de Poroy, (b) rizaduras de corriente en el poblado Jaquira, (c) nódulos o concreciones en el poblado de Huasampata, (d) sísmitas en el poblado Jaquira, (e) y (f) clastos blandos al sureste del poblado de Poroy. Fuente: Elaboración propia.

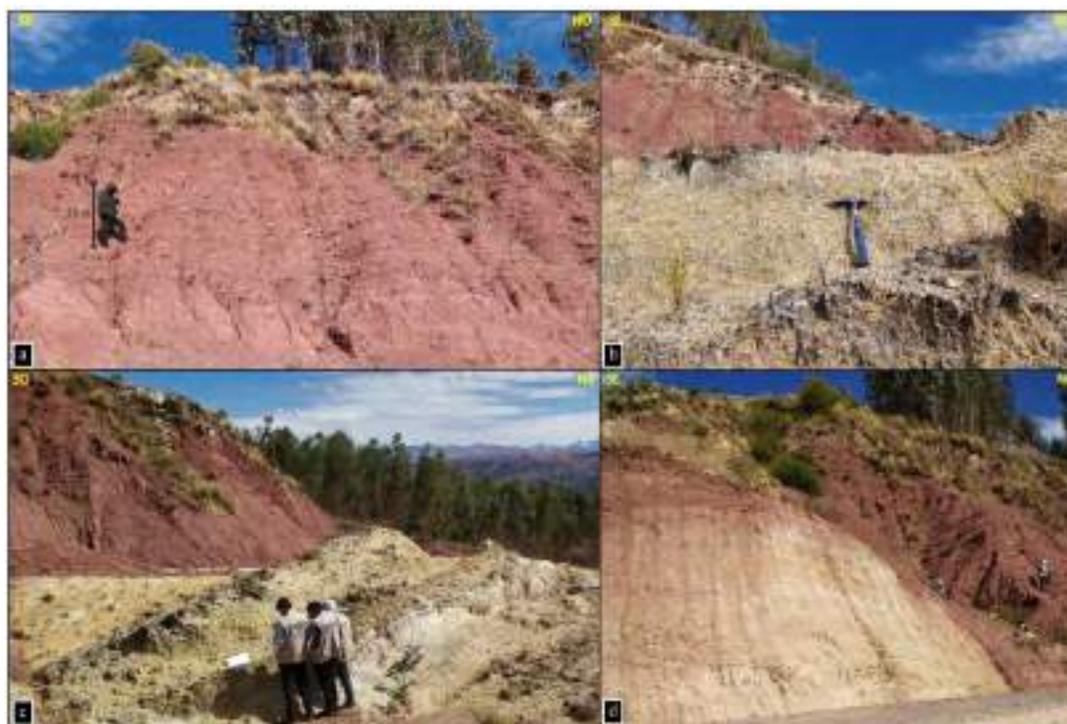


Figura 2. 33: Afloramiento de la Formación Chilca; tomada al sureste del poblado de Poroy. (a) Afloramiento de areniscas de grano fino a medio, (b) margas alteradas, (c) afloramiento de margas y areniscas medias y (d) afloramiento de areniscas de grano medio en la parte superior y margas en la inferior. Fuente: Elaboración propia.

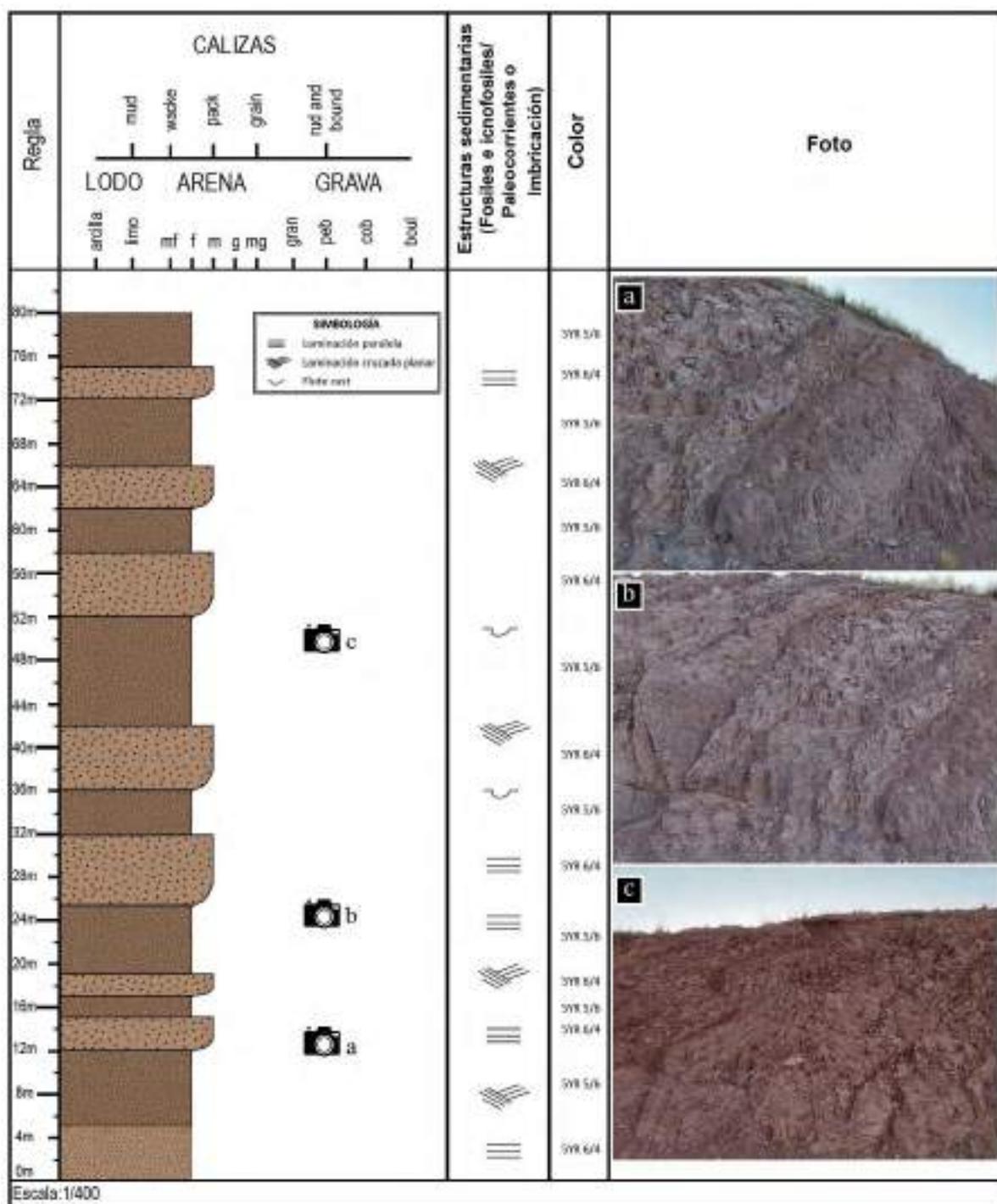


Figura 2. 34: Columna estratigráfica de la Formación Chilca (C) (Figura 2. 26), levantada al noreste del cerro Huenacucha. (a) Afloramiento de areniscas de grano medio y grueso con laminación cruzada y paralela, (b) areniscas de grano medio con laminación paralela y (c) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación cruzada y estructuras sedimentarias como flute marks en el tope. Fuente: Elaboración propia.

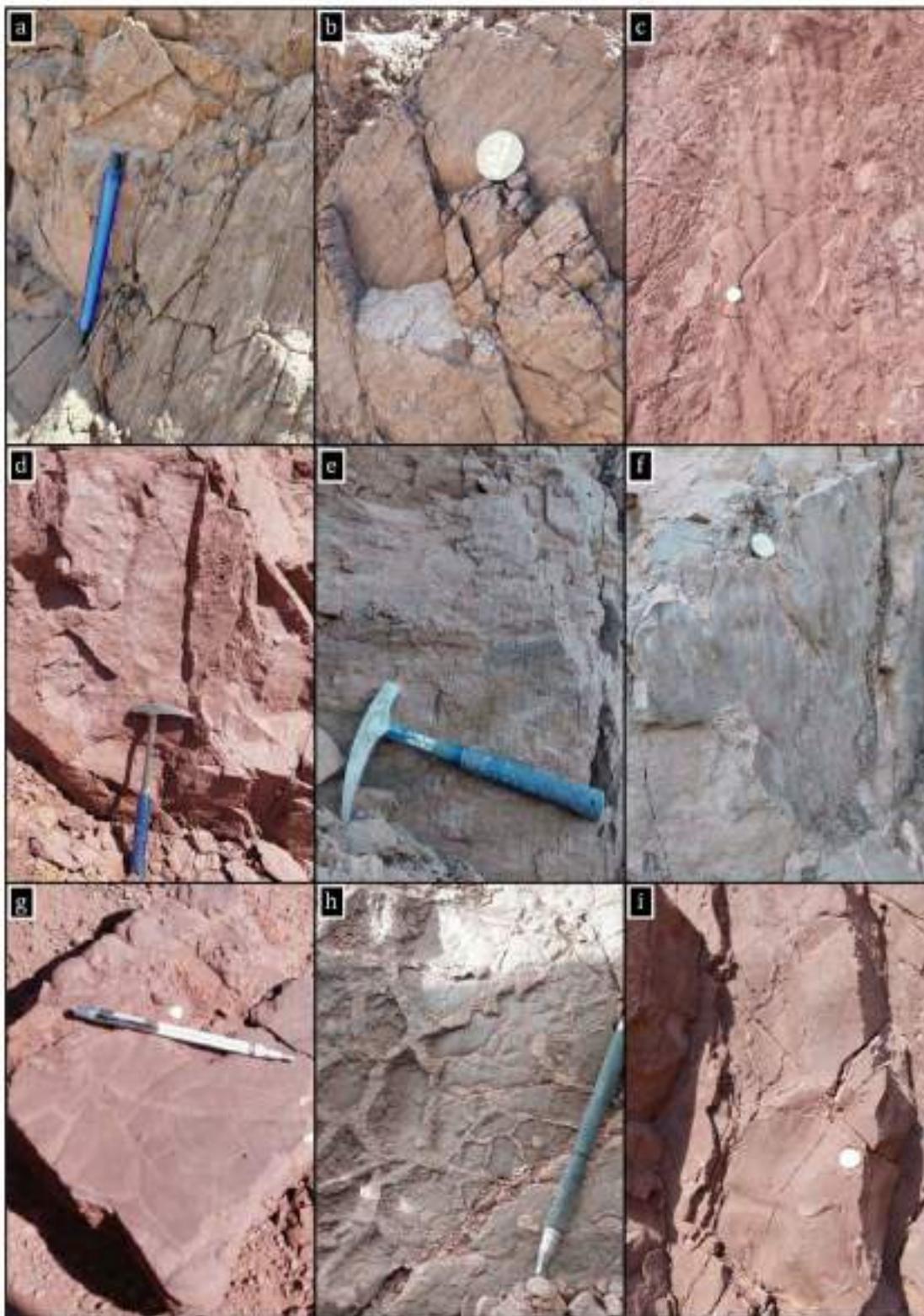


Figura 2. 35: Estructuras sedimentarias de la Formación Chilca. (a) Laminación cruzada planar de bajo ángulo al este del poblado Matero, (b) laminación cruzada lenticular al este del poblado Matero, (c) rizaduras de corriente al oeste del poblado de Jaquira, (d) y (e) laminación paralela al este del poblado Matero, (f) flute mark al oeste del poblado de Jaquira, (g) y (h) grietas de desecación al norte del poblado Kello Kaka e (i) icnofósiles al oeste del poblado de Jaquira. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.6 Formación Kayra (Peo-Ky).

La Formación Kayra, que cronológicamente pertenece al Eoceno inferior (Córdova, 1986; Carlotto, 1998); en el área de estudio aflora y es parte de ambos flancos del anticlinal de Puquín, así también aflora en la zona sur en el cerro Quinsa Cruz al este del poblado Ccoyac en bloques (Figura 2. 44), la litología que presenta son areniscas feldespáticas finas a medias intercaladas con niveles de lutitas rojas, microconglomerados con clastos volcánicos y cuarcíticos (Figura 2. 36); se observan clastos blandos, vetillas, costras y nódulos de calcita, presentan estructuras sedimentarias como laminación y estratificación cruzada Figura (2. 37 b), laminación paralela como se observa en la Figura (2. 37 a), flute mark, rizaduras de corriente como se observa en la Figura (2. 37 c); las areniscas presentan una textura particular debido al proceso de diagénesis diferencial (Figura 2. 38).

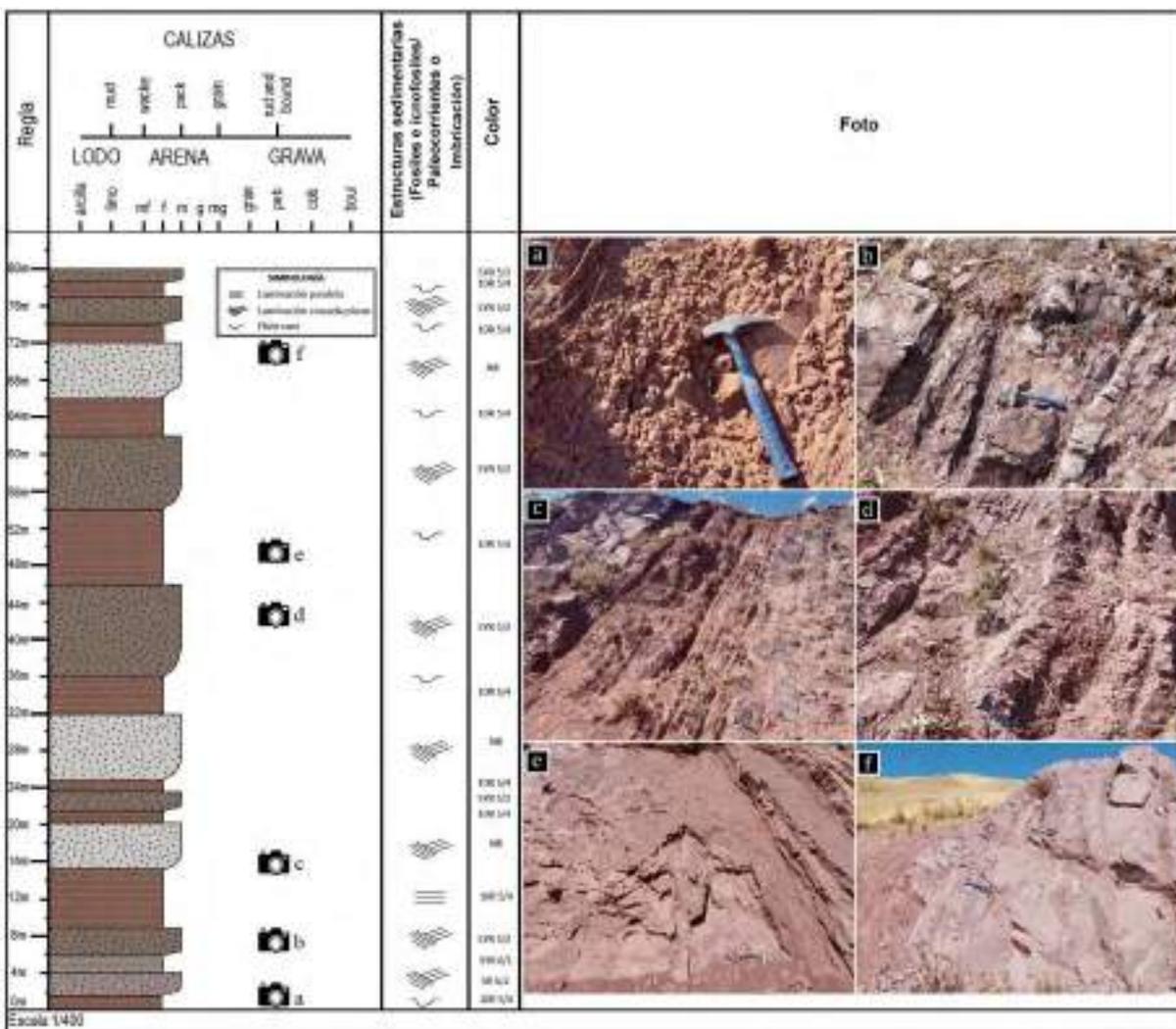


Figura 2. 36: Columna estratigráfica de la Formación Kayra (D) (Figura 2. 26), levantada al este del cerro Cruz Jasa. (a) Afloramiento de areniscas de grano fino con estructuras sedimentarias flute mark, (b) areniscas de grano medio con laminación cruzada, (c) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación cruzada, (d) afloramiento de areniscas de grano medio, (e) afloramiento de areniscas de grano fino con estructuras sedimentarias flute mark y (f) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación cruzada. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. 37: Estructuras sedimentarias de la Formación Kayra. (a) laminación paralela en el cerro Quinsa Cruz, (b) estratificación cruzada al norte del poblado Kello Kaka y (c) rizaduras de corriente al oeste del poblado de Jaquira. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. 38: Afloramiento de areniscas, presenta una textura particular debido al proceso de diagénesis diferencial. Vista tomada al oeste del cerro Rocacancha.

2.2.2.7 Formación Soncco (Peo-so).

La Formación Soncco, que cronológicamente pertenece al Eoceno superior-Oligoceno inferior (Córdova, 1986; Carlotto, 1998); en el área de estudio aflora y es parte de ambos flancos del anticlinal de Puquín (Figura 2. 44), así también aflora en la zona suroeste en bloques más grandes, la litología que presenta son areniscas feldespáticas finas, medias y gruesas con mineralización de Cu (malaquita y pirita) intercaladas con niveles de lutitas rojas, microconglomerados con clastos volcánicos de diámetro mayor a 10 cm (Figura 2. 39 y 2. 40); se observan clastos blandos, vetillas de calcita, costras de óxidos de hierro, estructuras sedimentarias como laminación cruzada, paralela y flute mark en las areniscas.

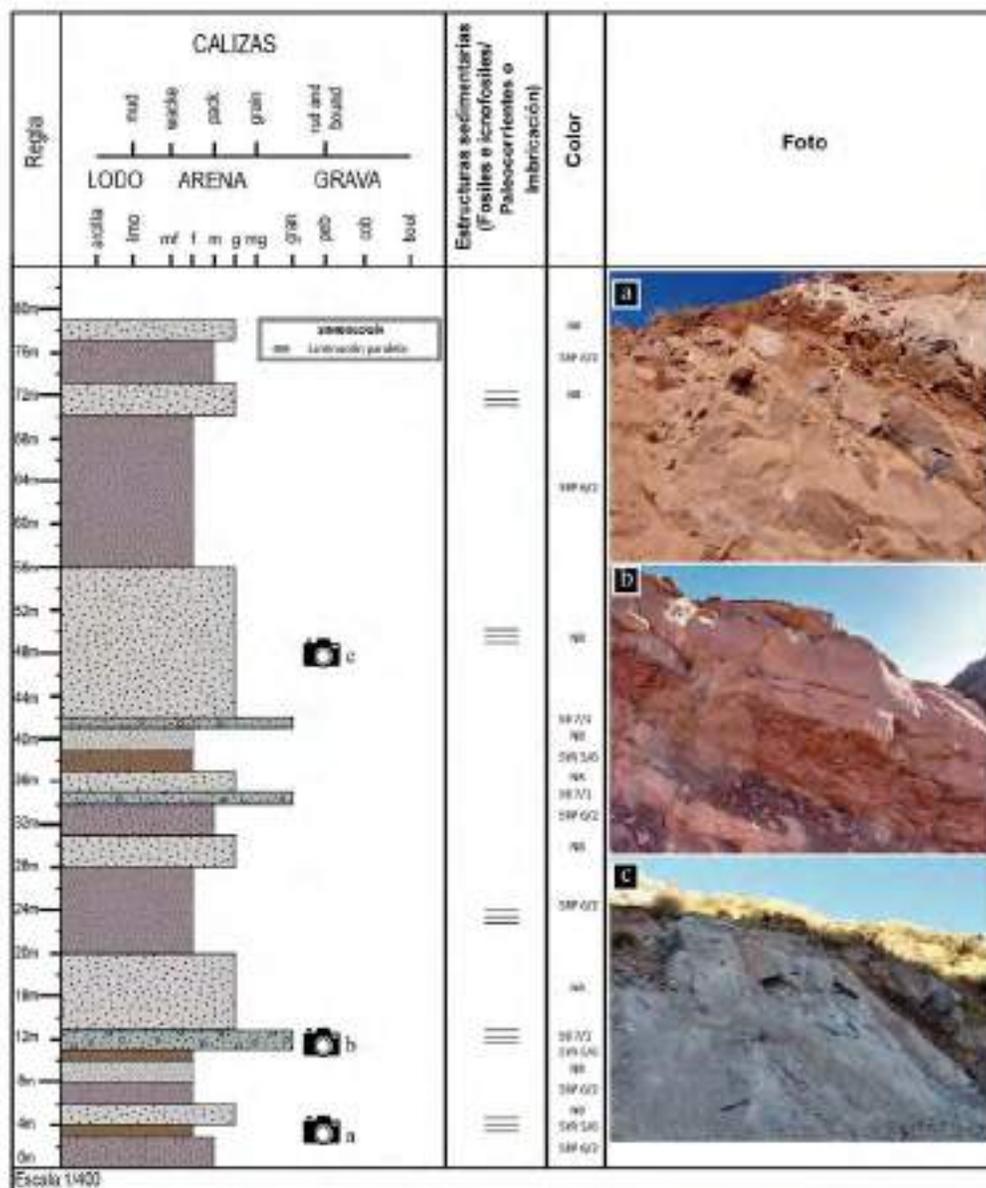


Figura 2. 39: Columna estratigráfica de la Formación Soncco (E) (Figura 2. 26), levantada al noreste del poblado de Ccorca. (a) Afloramiento de areniscas de grano medio con laminación paralela, (b) areniscas de grano grueso con clastos volcánicos y laminación paralela y (c) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación paralela. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. 40: Afloramientos de la Formación Soncco, vista tomada al sureste del cerro Cuchicancha.

2.2.2.8 Grupo Tacaza (No-ta).

El Grupo Tacaza que cronológicamente pertenece al Oligoceno superior (Newell, 1949); aflora al oeste y suroeste del área de estudio en el poblado Huayllay (Figura 2. 44), la litología que presenta son brechas, lahares, volcanoclásticos con clastos de andesitas, tobas líticas brechadas y alteradas como se observa en la Figura 2. 41 y presenta estructuras de tipo láminas o capas.

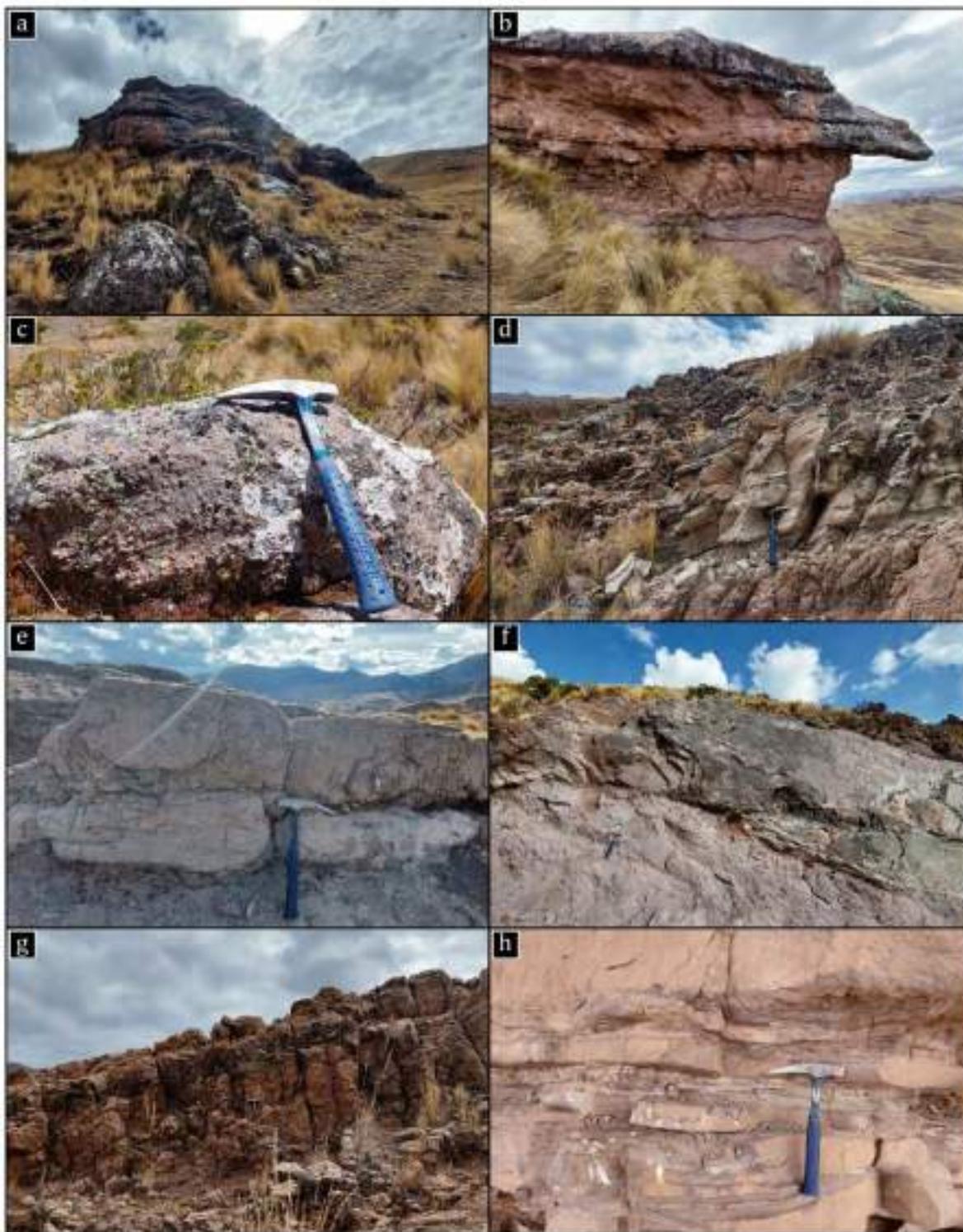


Figura 2. 41: Grupo Tacaza: (a) afloramiento de volcanoclasticos visto en dirección O-E, (b) afloramiento de volcanoclasticos visto en dirección N-S, (c) bloque de brecha, (d) afloramiento de tobas líticas y lahares al noroeste del poblado de Huayllay, (e) y (f) afloramiento de volcanoclasticos al este del poblado de Huayllay, (g) afloramiento de lahares y tobas líticas brechadas tomado al noroeste del poblado de Huayllay y (h) afloramiento de volcanoclasticos mostrando estratificación en las capas tomada al noreste del poblado de Huayllay. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.9 Formación Chinchero (Np-cc).

La Formación Chinchero, que cronológicamente pertenece al Plioceno (Cabrera, 1988, Córdova et al., 1994); en el área de estudio, aflora al norte en el cerro Senja y un pequeño bloque al noreste (Figura 2. 44), la litología que presenta son brechas que tienen una matriz arcillo-arenosa, margas y lutitas de color violeta como se observa en la Figura 2. 42. En general, sus elementos clásticos se componen de la erosión de las rocas cretácicas (formaciones Maras, Ayabacas y Puquín). Los depósitos corresponden a conos aluviales torrenciales (Cabrera et al., 1998).



Figura 2. 42: Formación Chinchero. (a) afloramiento de brechas, margas y lutitas al noreste en el cerro Senja, (b) afloramiento de brechas, (c) erosión diferencial por efecto del agua, y (d) brechas. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.10 Formación San Sebastián (Q-sa).

La Formación San Sebastián, que cronológicamente pertenece al Pleistoceno (Gregory, 1916); en el área de estudio aflora al noroeste en Cusco y noreste en Poroy (Figura 2. 44), la litología que presenta son secuencias fluviales de alta energía, como canales de arena grano decreciente, hasta niveles de llanura de inundación, que comprende lutitas y arcillas.

2.2.2.11 Depósitos Cuaternarios (Q-al) (Q-fl) y (Q-co).

Los depósitos cuaternarios de tipo aluvial, en el área de estudio se ubican suroeste, al pie de las montañas de roca volcánica moderadamente empinada e inclinada, se trata de bloques y gravas polimicticas, envueltos por una matriz areno-arcillosa (Carlotto et al., 2011).

Los depósitos cuaternarios de tipo fluvial, en el área de estudio se ubican noreste, formando parte del río Huancaro y Huatanay, se trata de bancos de gravas y arenas, formando una o varias terrazas.

Los depósitos cuaternarios de tipo coluvial, en el área de estudio se ubican suroeste, al pie de las montañas de roca volcánica moderadamente empinada e inclinada; se trata de bloques y gravas angulosas a subangulosas, poco sorteados de origen sedimentario y volcánico.

2.2.2.12 Rocas Ígneas

Unidad Senja – cuarzomonzodiorita (PN-se).

La unidad Senja cronológicamente se estima de una edad Cenozoica (Carlotto et al., 2011); aflora al este del cerro Senja (Figura 2. 44), la litología que presenta son rocas intrusivas básicas como gabros, dioritas, monzodioritas y monzonitas como se observa en la Figura 2. 43, que son parte del borde norte del Batolito Andahuaylas-Yauri. Al realizar la descripción macroscópica y microscópica de la muestra de roca extraída de la unidad Senja, se tiene una Cuarzodiorita (Anexo 1).



Figura 2. 43: Unidad Senja-cuarzomonzodiorita. a) Afloramiento de intrusivos, (b) bloque de material volcánico, (c) afloramiento de intrusivos con patinas de epidota y (d) bloques rodados de materiales volcánicos al este del cerro Senja. Fuente: Elaboración propia.

Diorita – Tonalita (P-di,to).

La Diorita-Tonalita o Stock de Saqsaywaman donde resalta la apófisis de El Rodadero (UTM: 177100E-8504800N) por su importancia geológica y arqueológica; cronológicamente se estima de una edad Cenozoica (Carlotto et al., 2011); aflora al noreste del área de estudio, la litología que presenta es una roca maciza densa de grano fino y textura granular, distinguiéndose cristales de coloración oscura de augita y pequeños agregados de epidota. Los cuerpos de este sector pueden clasificarse como pórfidos dioríticos con augita. Generalmente, se encuentran bastante alterados, y la augita, la plagioclasa y la ortosa (escasa) están respectivamente reemplazadas por clorita, tremolita, epidota, prenitita, calcita y sericita. Los minerales accesorios están representados por titanita, apatita e ilmenite.

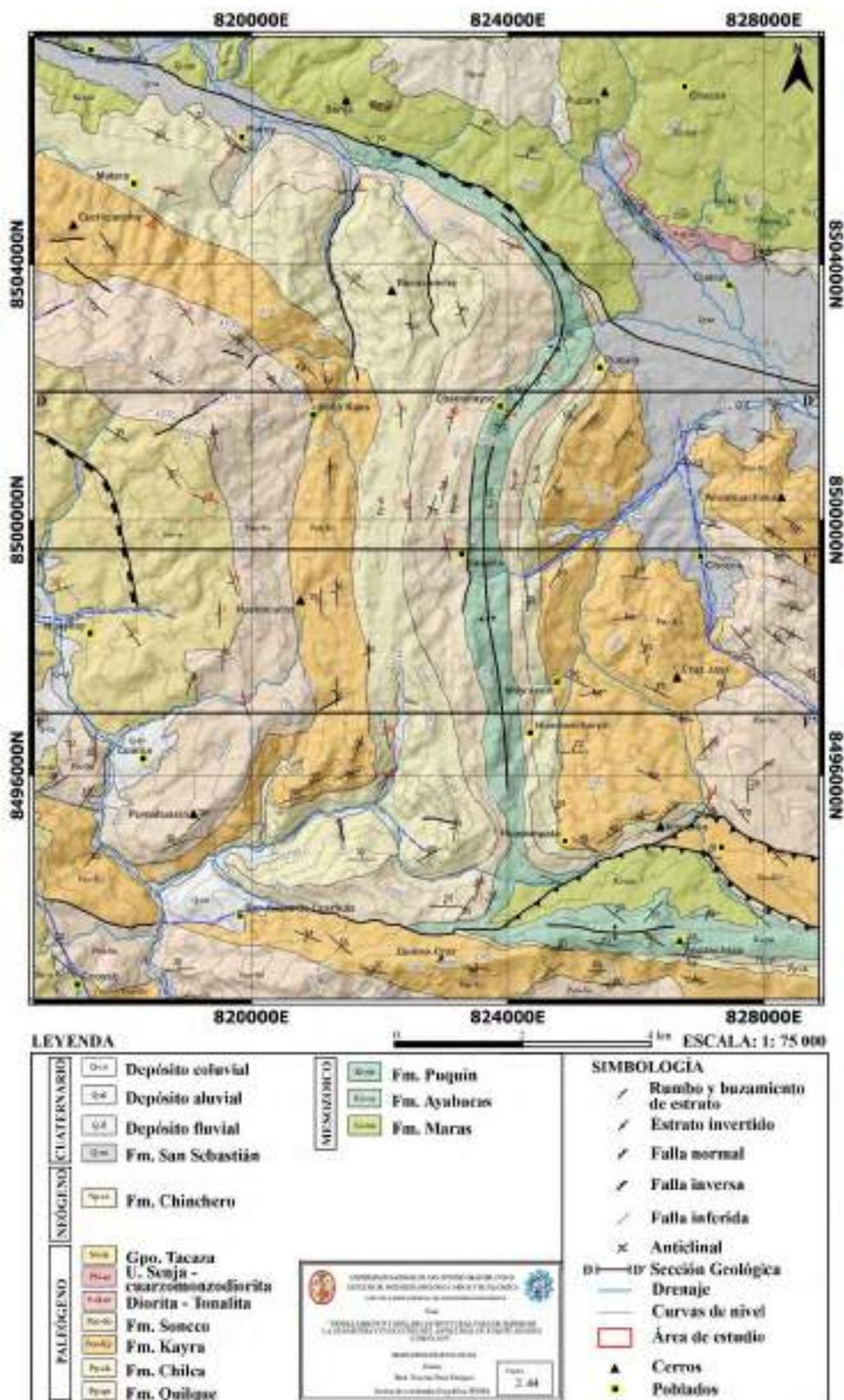


Figura 2. 44: Mapa geológico del área de estudio con datos de estratificación de campo propios en rojo. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).

2.3 MARCO TECTÓNICO

El área de estudio forma parte del Altiplano (Figura 2. 1), esta zona limitada por dominios estructurales, con orientaciones paralelas a la cadena andina de dirección NO-SE y con características estructurales propias.

En el Altiplano, la serie estratigráfica del Cretácico inferior a medio (Figura 2. 45) que es transgresivo, consiste en las formaciones Angostura (conglomerados y afloramientos de areniscas en algunas zonas), Murco (principalmente pelitas rojas) y Arcurquina (calizas marinas, estratificadas regularmente, estrato-crecientes, de color gris a negro, ricas en materia orgánica). En la región del Cusco, la Formación Murco se correlaciona con la Formación Maras (Carlotto et al., 1996), formada por pelitas rojas y masas evaporítico (Callot, 2008).

Según Carlotto et al. (2011) en la serie estratigráfica del Cretácico superior (Figura 2. 45) en la región de Cusco se observa las evidencias lejanas de los eventos tectónicos ocurridos en la zona costera y que marcaron un cambio paleogeográfico regional, ya que se pasó de una sedimentación carbonatada en la cuenca occidental a una sedimentación detrítica fina y evaporítica, es decir de la Formación Ayabacas al Miembro M1 de la Formación Puquín; debido al inicio del levantamiento de la zona costera que comenzó a separar la cuenca occidental del mar abierto. Este cambio paleogeográfico marca el inicio del periodo de deformaciones conocido como evento peruano (Jaillard y Sempere, 1989; Jaillard, 1993; 1994; Carlotto, 1998).

Según Carlotto et al. (2011) en el límite Cretácico-Paleoceno (Figura 2. 45) a nivel de la región de Cusco y también de los vecinos de Calca y Urubamba, una importante erosión ocurrió hacia el límite Maestrichtiano-Paleoceno, lo que produjo la discordancia entre las formaciones Quilque (Paleoceno) y Puquín (Cretácico superior). En ese entonces, y más probablemente en el Paleoceno inferior, se instaló en el Altiplano el forebulge de la cuenca de antepaís que se desarrollaba en la protocordillera Occidental. El evento tectónico de 58.2 Ma que produjo pliegues en el límite sur del cuadrángulo de Calca, parece haber contribuido a la migración del forebulge hacia el este, por lo que el sistema fluvial de la Formación Chilca proviene del noreste.

En el Eoceno inferior (Figura 2. 45) en la región de Cusco, movimientos dextrales a lo largo de las fallas NNO-SSE, Cusco y Vilcanota, Cusibamba-Acomayo, Pomacanchi, y sinestrales sobre fallas E-O (cuadrángulo de Urubamba), son responsables de la depresión romboédrica de la cuenca continental Kayra. Estos movimientos son interpretados como consecuencia de un evento tectónico transtensivo entre 52 y 43 Ma (Carlotto, 1998). En este periodo se emplaza gran parte del Batolito Andahuaylas-Yauri, que se traduce en el cuadrángulo de Cusco por los macizos gabrodioríticos de Acomayo-Colcha y los cuerpos de Accha, Quepuro, etc. Estos cuerpos producen skarn de granate y magnetita en las calizas Ferrobamba y Ayabacas.

En el Eoceno medio-Oligoceno inferior (Figura 2. 45) con evento tectónico mayor, Inca (43-30 Ma). La cuenca Anta es interpretada como una cuenca piggy-back formada dentro del sistema C-L-M y al sur de esta estructura, que corresponde al límite entre la Cordillera Occidental y el Altiplano. Al norte de la estructura, es decir, sobre el antiguo alto Cusco-Puno, se depositaban las areniscas de la Formación Soncco. Tanto la cuenca Soncco como Anta fueron deformadas por una tectónica sinsedimentaria que comenzó alrededor de los 43 Ma y corresponden a la evolución del

borde o terminación noroeste de la gran cuenca de antepaís andino. Esta tectónica se traduce por cabalgamientos, el relleno sedimentario y las discordancias progresivas entre las formaciones Kayra y Soncco. Los cabalgamientos han hecho aflorar los gabros del macizo de Acomayo-Colcha. La máxima actividad volcánica asociada a la etapa compresiva se observa en las partes medias de las formaciones Anta y Soncco (~ 38 y 37 Ma). La parte superior del relleno sedimentario traduce una disminución de la actividad tectónica contemporánea y la aparición de un vulcanismo alcalino (30 y 29 Ma).

En el Oligoceno superior-Mioceno inferior (Figura 2. 45) se dio la tectónica quechua. El periodo Neógeno está caracterizado por una actividad tectónica y sedimentaria importante con el relleno de cuencas sinorogénicas intramontañosas. En el Neógeno ocurrió una inversión tectónica que dio paso a movimientos sinestrales a lo largo de los principales sistemas de fallas NO-SO y E-O, ya estructurados previamente en el Eoceno y que tuvieron juegos dextrales y de compresión pura. En el cuadrángulo de Cusco, alrededor de los 30-29 Ma, movimientos de rumbo sinistral a lo largo del sistema de fallas Anyarate-San Juan de Quihuare son responsables de la depresión romboédrica de la cuenca Punacancha cuya sedimentación fluvial (Miembro I) se da en régimen transtensional. Tradicionalmente, se considera a la tectónica quechua 0 como responsable de este evento tectónico (Sebrier et al., 1988, Soler, 1991, Carlotto, 1998). Por otra parte, las erupciones volcánicas alcalinas ocurrieron durante el periodo de transición (29-28 Ma) entre la sedimentación final de las formaciones Anta (fonolitas) y Soncco (traquitas) y la base de la Formación Punacancha, así como la sienita de Araipallpa, asignadas a este periodo. Entre 22-20 Ma y 12 Ma (Mioceno inferior), gran parte del relleno sedimentario fluvial de la cuenca Punacancha (Miembros II, III y IV) que alcanza varios miles de metros, las deformaciones sinsedimentarias y el cabalgamiento del sistema de fallas Anyarate-San Juan de Quihuare ocurrieron y esto es atribuido tradicionalmente al evento quechua 1 (Sebrier et al., 1988; Soler, 1991; Carlotto, 1998). Igualmente, este evento tectónico tiene que ver con la creación de las cuencas compresivas o transpresivas de Paccaritambo, que evoluciona entre ~22 y ~13 Ma al límite sur del Altiplano, cerca de la Cordillera Occidental.

Según Carlotto et al. (2011) en el Mioceno superior (Figura 2. 45) se dio la tectónica quechua. La cuenca Paruro se formó y evolucionó durante el Mioceno superior. Así, alrededor de los 12 Ma, una compresión regional E-O dio lugar a movimientos de rumbo sinistral a lo largo del sistema de fallas Yaurisque-Papres y Paruro que provocan la individualización romboédrica de una cuenca del tipo pull apart. El relleno corresponde a una sedimentación lacustre y fluvial, acompañado de actividad volcánica del Miembro I de la Formación Paruro. Este evento está relacionado con la tectónica quechua 2 (~12 Ma). Un segundo periodo está marcado por una compresión regional NE-SO que se traduce por el movimiento inverso de las fallas Yaurisque-Papres y Paruro, por una sedimentación gruesa de conos aluviales que progradan al norte sobre los depósitos fluviales, así como el desarrollo de discordancias progresivas en el Miembro II. Todo eso es clásicamente atribuido al evento tectónico quechua 3.

En el Pliocuatnario (Figura 2. 45) dentro de la depresión de Cusco, se emplazó los depósitos aluviales y fluvio torrenciales de la Formación Chinchero de edad Plioceno superior. Estas series están afectadas por deformaciones compresivas E-O (Cabrera, 1988). La Formación San Sebastián

del Pleistoceno inferior se deposita en las depresiones formadas en el Plioceno y ya rellenas en los bordes por la Formación Chinchero. Después del evento compresivo, la evolución tectónica es dominada en el Pleistoceno basal o límite Plioceno-Pleistoceno, por un régimen de extensión casi E-O que está relacionado con el funcionamiento inicial de la cuenca Cusco y Ccatca (parte inferior de la Formación San Sebastián) y además asociado a parte del vulcanismo shoshonítico (Cabrera, 1988). En el Pleistoceno inferior el funcionamiento de las cuencas San Sebastián y Ccatca fue interrumpido por deformaciones compresivas sinsedimentarias y post sedimentarias (fallas inversas y flexuras) que indican dos direcciones de acortamiento, N-S y E-O. Después de este periodo de compresión y hasta la época actual, la región de Cusco está dominada por una extensión de dirección N-S. Este último evento tectónico es contemporáneo a una nueva actividad volcánica shoshonítica, a los depósitos de terrazas fluvio-lacustres y fluviales de la cuenca Cusco, a los conos aluviales y a las morrenas. Así, un conjunto de fallas cuaternarias activas se debe a esta extensión de dirección N-S, como las fallas Tambomachay, Pachatusán, Urcos, Pomacanchi, etc. La variación de esfuerzos estaría ligada a la interacción de fuerzas debido a la convergencia y las fuerzas asociadas a la alta topografía.

En la región de Cusco, existen varias fallas activas que han sido estudiadas en detalle por Sebrier et al. (1982) y principalmente por Cabrera (1988). Estas fallas han controlado la evolución tectónica y sedimentaria Pliocuaternaria de la región y particularmente de las cuencas Cusco y Ccatca. Las fallas activas se hallan en la zona intermedia Altiplano-Cordillera Oriental y en el límite Altiplano-Cordillera Occidental.

Las fallas activas de la región han sido divididas en dos sectores:

El sistema de fallas Cusco y el sistema de fallas Vilcanota (Cabrera, 1988).

1. Dentro del sistema Cusco se han reconocido las fallas de Tambomachay, Tamboray, Qoricocha, Pachatusán y Zurite.
2. En el sistema Vilcanota están las fallas de Pomacanchis, Pampamarca y Langui. En el cuadrángulo vecino de Ocongate (28-t) el sistema de fallas activas se encuentra en la zona de Ausangate y Ccatca Ocongate que pasa al cuadrángulo de Cusco.

En el cuadrángulo de Cusco las fallas activas de Cusco son Tambomachay, Pachatusán y Cusco, mientras que las fallas del Vilcanota son Urcos y Pomacanchis.

El Altiplano se caracteriza por presentar varios microbloques separados por fallas que han controlado la sedimentación y tectónica, principalmente durante el Terciario. Desde el punto de vista paleogeográfico, el Mesozoico constituye un alto estructural donde la sedimentación es poco espesa por comparación a la cuenca occidental. Sin embargo, durante el Terciario se depositaron más de 10 000 m de capas rojas. Aquí se presentan vastos afloramientos de las formaciones Muñani y Soncco y de las formaciones Punacancha y Paruro que se hallan fuertemente deformadas con pliegues NO-SE, que son de propagación de fallas y convergencia al NE. Estos pliegues muestran dos sistemas de esquistosidad de fractura, una S1 paralelo a los pliegues de primera generación y S2 a los de segunda generación (Carlotto et al., 2003a).

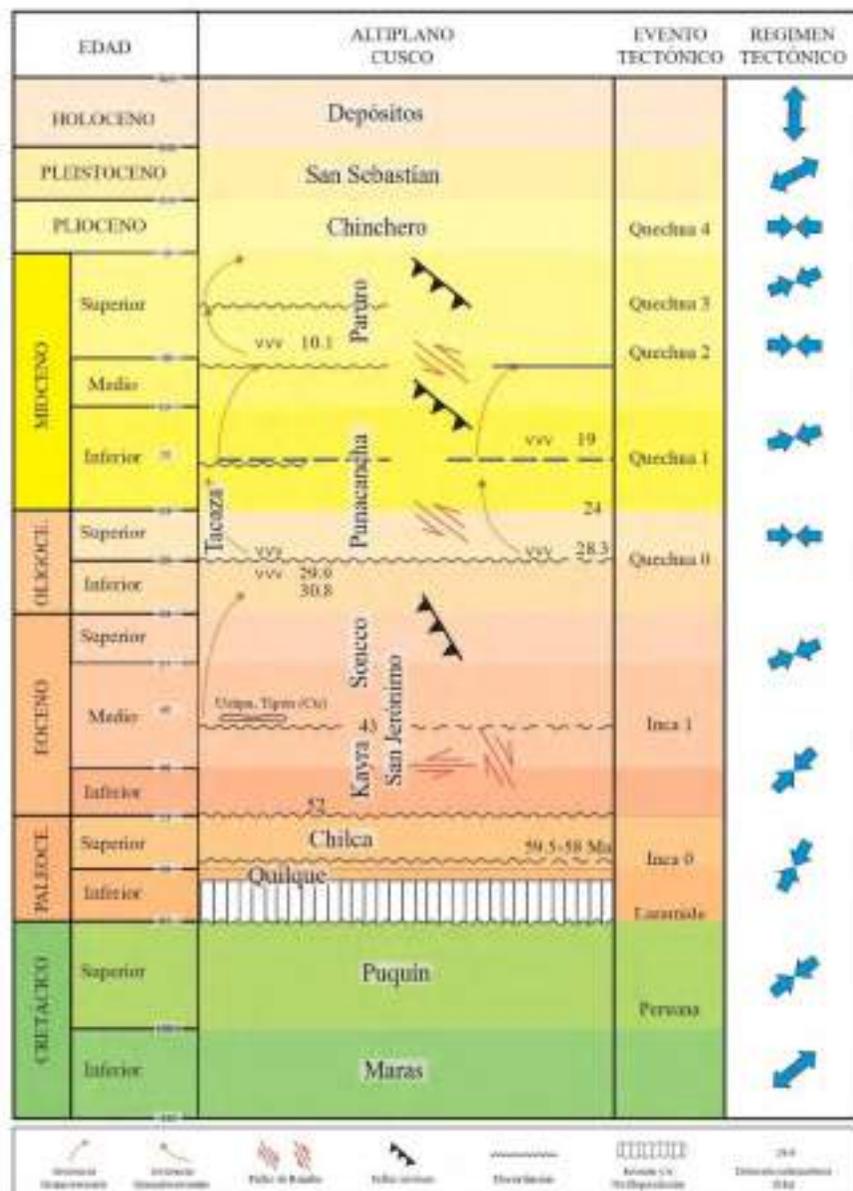


Figura 2. 45: Tabla de correlación de las edades de las unidades estratigráficas del Altiplano para el cuadrángulo de Cusco y su régimen tectónico. Fuente: Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005).

Las capas rojas del Grupo San Jerónimo descansan en discordancia erosional (concordancia estructural) sobre las formaciones Quilque-Chilca del Paleoceno, todas bien deformadas, a diferencia del Bloque Anta, donde los depósitos eocenos de la Formación Anta se hallan en fuerte discordancia angular sobre el Paleoceno o el Mesozoico. Los pliegues en las capas rojas muestran en general dos esquistosidades. Una esquistosidad S1 de dirección NO-SE a ONO-ESE que es paralela a los pliegues y fallas de primera generación, y la otra S2, NE-SO a N-S, que recorta a S1 y es paralela a pliegues de una segunda generación (Carlotto, 2006b).

El trabajo realizado por Puma et al. (2021), en el cual se identifica lineamientos y estructuras geológicas usando software libre en el departamento de Cusco, hace uso del área del anticlinal de

Puquín y según la técnica propuesta por Tzvetkov (2018) como es el Sombreamiento Combinado 1 (0° , 30° , 60° , 90° , 120° y 150°) y Combinado 2 (180° , 210° , 240° , 270° , 300° y 330°), se logró determinar 736 lineamientos estructurales y 4 tendencias (Figura 2. 46 y 2. 47). Estas tendencias son las siguientes: Tendencia 1 (T1) es 113° , Tendencia 2 (T2) es 153° , Tendencia 3 (T3) es 035° y Tendencia 4 (T4) es 010° ; siendo así la tendencia principal T1 de dirección NO-SE. Del combinado 2 (C2) se logró determinar 749 lineamientos estructurales y 4 tendencias. Estas tendencias son las siguientes: Tendencia 1 (T1) es 000° , Tendencia 2 (T2) es 147° , Tendencia 3 (T3) es 113° y Tendencia 4 (T4) es 035° ; siendo así la tendencia principal T1 de dirección N-S.

Además, la obtención de los lineamientos estructurales por la técnica de sombras combinadas C1 y C2 son muy similares en tendencias, pero no en la cantidad de datos por tendencia, T1 (113°) de C1 es equivalente a T3 (113°) de C2, T2 (153°) de C1 es equivalente a T2 (147°) de C2, T3 (035°) de C1 es equivalente a T4 (035°) de C2 y T4 (010°) de C1 es equivalente a T1 (001°). Además, T1 (113°) de C1 y T3 (113°) de C2 es equivalente a la falla regional Cusco (112°); T2 (153°) de C1 y T2 (147°) de C2 es equivalente a las fallas regionales Casacunca, San Juan de Quihuare y Paruro (150°), lo que resalta de una manera confiable las estructuras regionales y se determinan otras estructuras que posiblemente son secundarias en nuestra zona de estudio.

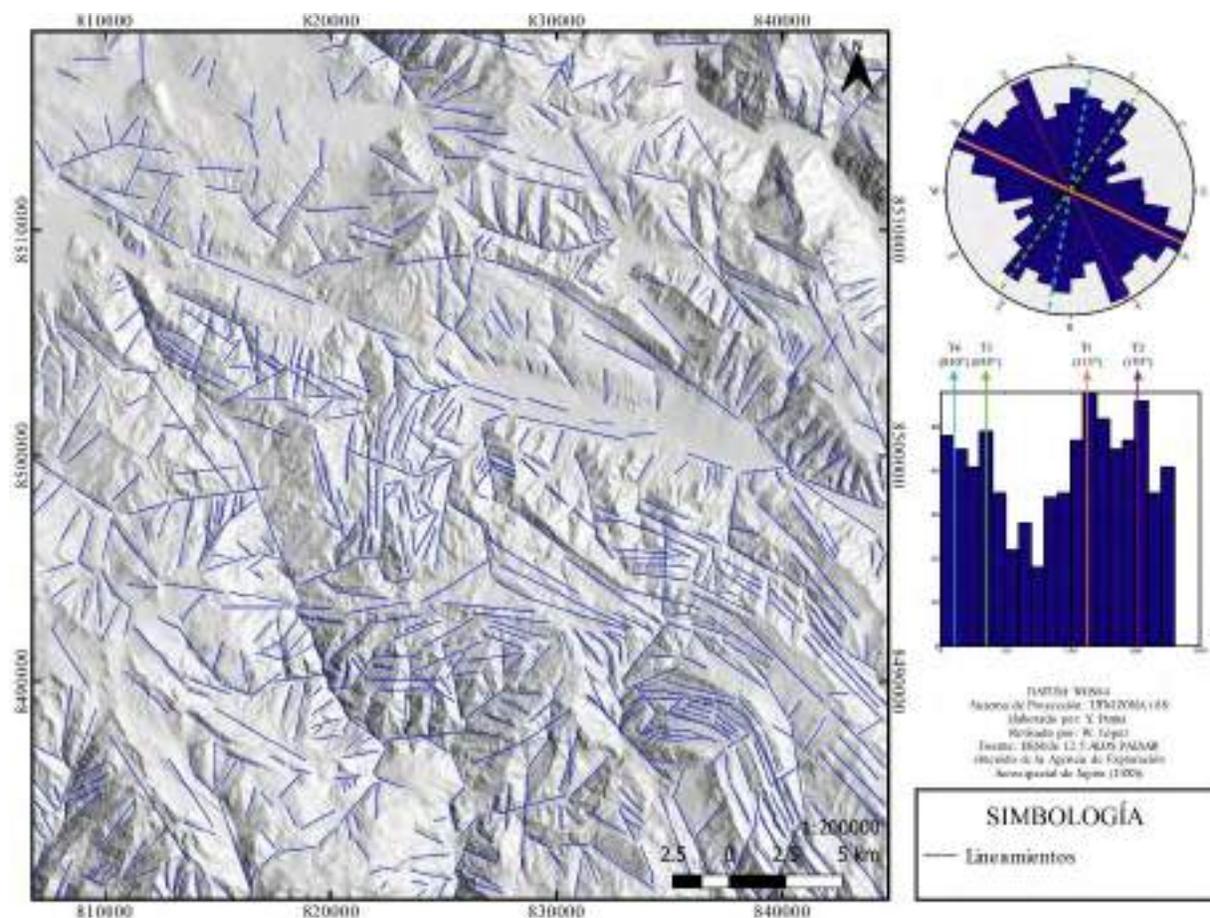


Figura 2. 46: Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras “Combinado 1” (0° , 30° , 60° , 90° , 120° y 150°). Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 113° , T2: 153° , T3: 035° , T4: 010° . Fuente: Puma et al. (2021).

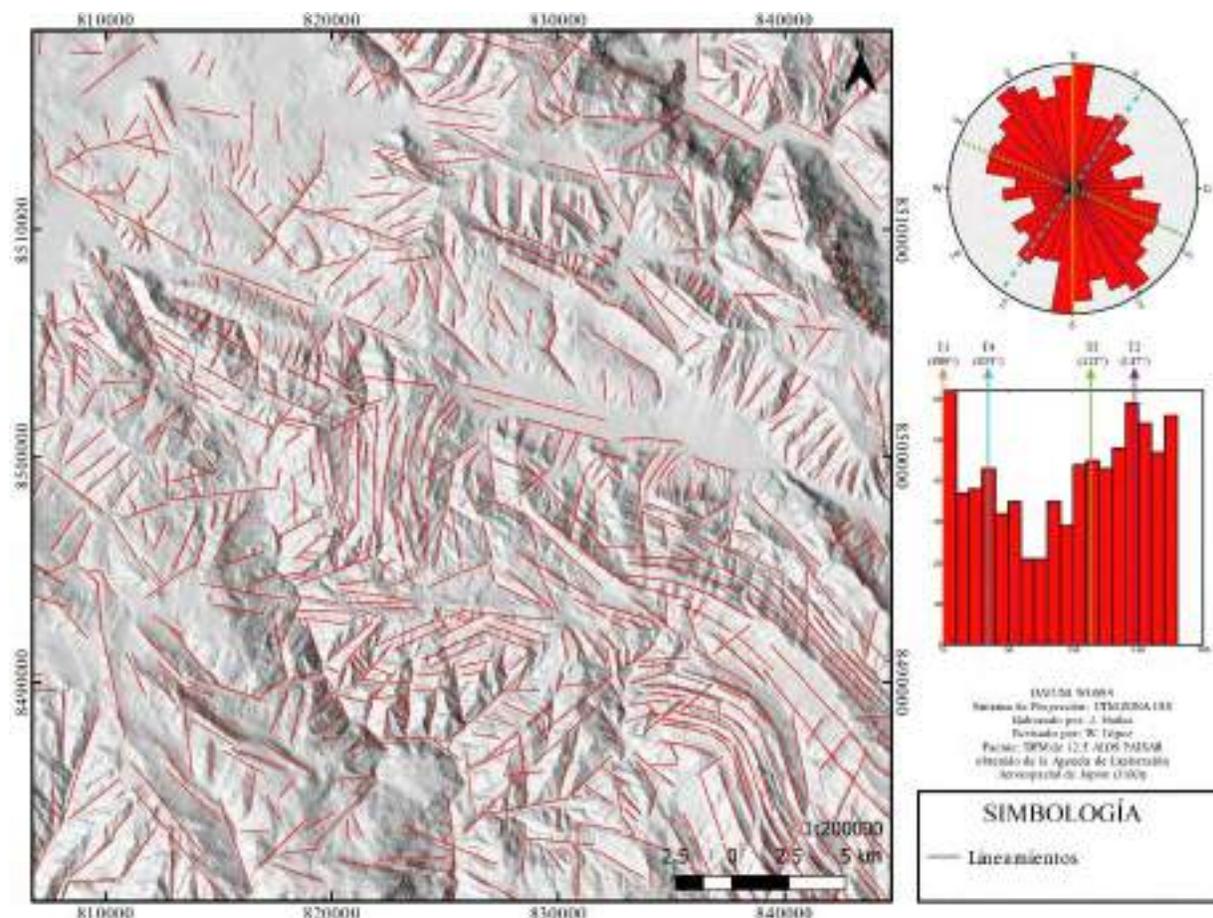


Figura 2. 47: Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras “Combinado 2” (180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°). Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 000°, T2: 147°, T3: 113°, T4: 035°. Fuente: Puma et al. (2021).

Técnica de Mapa de Imagen en Relieve Rojo (RRIM), en la zona de estudio, el INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), ha cartografiado 42 fallas y usando esta metodología se reconocieron 97 posibles fallas, siendo en total 139 estructuras geológicas, se determinaron 4 tendencias (Figura 2. 48); Tendencia 1 (T1) es 148°, Tendencia 2 (T2) es 122°, Tendencia 3 (T3) es 094° y Tendencia 4 (T4) es 055°. El realce de estructuras geológicas por el método RRIM resalta tanto en cantidad y tendencia las fallas regionales que incluyen el área del anticlinal de Puquín, T1 (148°) es equivalente a las fallas regionales Casacunca, San Juan de Quihuare y Paruro (150°); T2 (122°) es equivalente a las fallas regionales Tambomachay y Qoricocha (122°). Además, se reconocieron dos posibles tendencias de fallas T3 (094°) y T4 (055°).

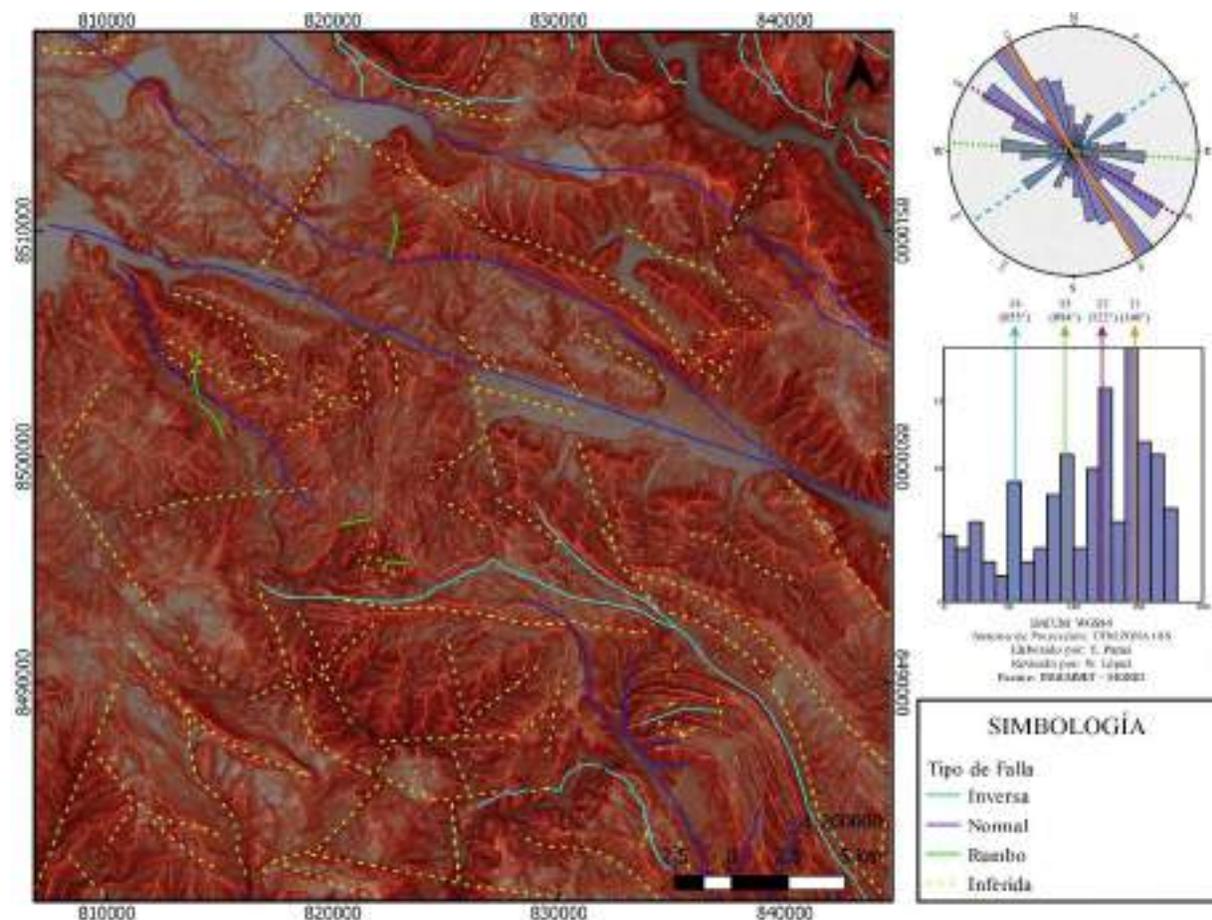


Figura 2. 48: Fallas inferidas determinadas a partir de un Mapa de Imagen en Relieve Rojo. Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 148°, T2: 122°, T3: 094°, T4: 055°. Fuente: Puma et al. (2021).

2.3.1 SECCIONES REGIONALES

Sección X-X'

Las estructuras en superficie tienen una dirección ONO-ESE a NO-SE y una vergencia NE (Figura 2. 49). Se interpreta la falla Huanquite Accha como un cabalgamiento desarrollando pliegues de amortiguamiento en las capas rojas eocenas. El anticlinal de Poroy, considerado como un pliegue de amortiguamiento, así como el sinclinal de Sencca, están en relación con la falla de Tambomachay.

El anticlinal de Piuray y el sinclinal de Antaquilca implican la existencia, en profundidad, de un prisma intercutánneo (Chávez et al., 1996). La conexión del nivel de despegue inferior al nivel superior provoca un retrocabalgamiento, que es la causa de la formación del anticlinal de Piuray durante el Eoceno y separando las sub-cuencas de Sencca y Antaquilca. Esta última muestra en su borde sur, discordancias progresivas. La falla Taucca estaría también en relación con este prisma intercutánneo. En la restitución al estado no deformado de la sección X-X', se considera que el Grupo San Jerónimo está conformado por sedimentos sinorogénicos y presenta discordancias progresivas. La longitud final (L_f) es de 46 km para una longitud inicial (L_i) de 71 km, lo que da un acortamiento R de 25 km y una tasa de 35 % (Figura 2. 49) (Carlotto et al., 2011).

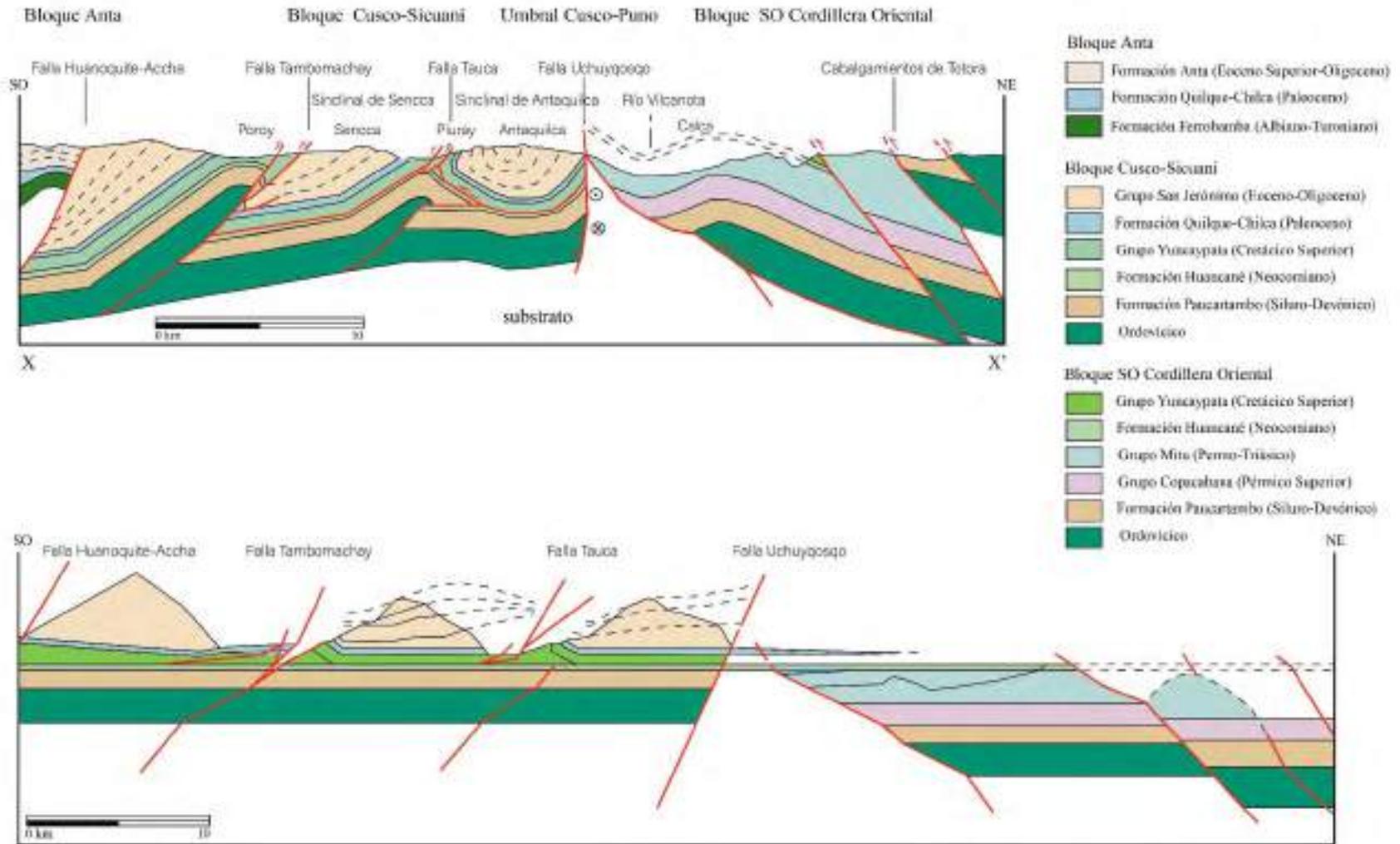


Figura 2. 49: Sección estructural X-X' Totorá-Calca-Poroy y restitución al estado no deformado. Fuente: Carlotto (1998, 2006b)

SECCION AA'

En el tramo A1 se interpreta la falla Casacunca como un cabalgamiento con reactivación normal a partir del Pleistoceno, desarrollando que las capas rojas eocenas tengan este aspecto dúctil, como se observa en la sección (Figura 2. 50), Así también en este tramo se cuenta con una falla de tipo inversa en dirección NE-SO que no llega a observarse en superficie, pero corta las capas de las formaciones Kayra y Soncco que éstas a su vez están en discordancia notoria con el volcánico del Grupo Tacaza.

En el tramo A2 se interpreta la falla Cusco y Tambomachay como fallas de cabalgamiento con reactivación normal a partir del Pleistoceno, la litología que se encuentra entre la falla Casacunca y la falla Cusco son capas cretácicas y paleógenas como las formaciones Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; entre la falla Cusco y la falla Tambomachay la litología son capas mesozoicas que van desde el Triásico hasta el Cretácico inferior, teniendo así capas del Grupo Mitu, formaciones Huambutio, Huancané y Paucarbamba y lo que se observa en superficie de manera caótica la Formación Maras, en este tramo también se puede observar en el límite con la falla Tambomachay la presencia de una capa Cretácica superior de poco espesor como la Formación Puquín (Figura 2. 50).

El tramo A3 se desarrolla en dos partes, se interpreta dos fallas de cabalgamiento con reactivación normal a partir del Pleistoceno, la primera parte limitada por la falla de Tambomachay y la falla de cabalgamiento con reactivación normal que se encuentra en la misma dirección y sentido que la anterior, presenta litologías del Paleoceno como las formaciones Quilque-Chilca y la capa Eocena como la Formación Kayra del Grupo San Jerónimo desarrollando según la variación de ángulo de buzamiento de las capas un sinclinal; la segunda parte limitada entre la falla cabalgamiento con reactivación normal antes mencionada y falla Qoricocha presenta litologías mesozoicas y cenozoicas como las formaciones Maras, Puquín, Quilque-Chilca, Kayra y depósitos cuaternarios aluviales.

El tramo A4 se desarrolla en 4 partes, se interpreta el anticlinal de Vilcanota y las fallas de cabalgamiento de dirección SO-NE (Figura 2. 50), la primera parte limitada entre la falla de Qoricocha y la primera falla de cabalgamiento presenta litologías que van desde el Paleozoico hasta el Mesozoico, teniendo así capas de la Formación Ananea, Grupo Copacabana, Grupo Mitu, formaciones Huambutio, Huancané, Paucarbamba, Maras, Puquín y depósitos cuaternarios aluviales; desarrollando la estructura geológica como es el anticlinal de Vilcanota, observándose que la charnela presentaría una falla de tipo inversa que definiría una vergencia de dirección SO, así también en la sección geológica se puede observar que las capas de la Formación Huambutio y Grupo Mitu se encuentran en discordancia notoria. La segunda parte limitada entre la primera falla de cabalgamiento y la segunda falla de cabalgamiento de dirección SO-NE, presenta litologías del Paleozoico como la Formación Ananea y Grupo Copacabana y Triásico-Jurásico como el Grupo Mitu desarrollando plegamientos debido a la variación de ángulo de buzamiento. La tercera parte limitada entre la segunda falla de cabalgamiento y la tercera falla de cabalgamiento de dirección SO-NE, presenta litologías antiguas del Paleozoico como capas de la Formación Ananea y Grupo Copacabana desarrollando estructura de plegamiento entre estas. En la última parte del tramo A4, se observa que aflora la Formación Ananea que es la capa más antigua en el área de trabajo regional.

SECCION BB'

En el tramo B1 se interpreta la falla Casacunca como un cabalgamiento con reactivación normal a partir del Pleistoceno, desarrollando que las capas rojas eocenas tengan este aspecto dúctil como se observa en la sección (Figura 2. 50), Así también en este tramo se cuenta con una falla de tipo inversa en dirección NE-SO que no llega a observarse en superficie, pero corta las capas de las formaciones Kayra y Soncco del Grupo San Jerónimo, éstas a su vez están en discordancia notoria con el volcánico del Grupo Tacaza, en la sección también se observa materiales de depósitos cuaternarios aluviales y coluviales en la parte más baja del tramo B1, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo, muestra una tendencia NE-SO.

En el tramo B2 se interpreta el anticlinal de Puquín y una falla de tipo inversa en dirección NO-SE, la litología entre la falla de Casacunca y la falla de tipo inversa es de edad Cretácica a Paleógena como las capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco (Figura 2. 50), Así también en la sección se observa que el núcleo del anticlinal, viene a ser una capa Cretácica (Formación Puquín), la variación de espesor de las capas en cada flanco del anticlinal es notorio y la vergencia es de dirección oeste; esta estructura forma parte del área de estudio local, del mismo modo se observa que en el límite con la falla inversa presenta litologías cuaternarias como las capas de la Formación San Sebastián, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo deja interpretar el pliegue con datos de los flancos y mostrando el eje de pliegue.

En el tramo B3 se interpreta dos partes, la falla de Tancarpatá de tipo inversa y la falla Cusco de cabalgamiento con reactivación normal a partir del Pleistoceno, la primera parte presenta litologías de capas eocenas como las formaciones Kayra y Soncco; Pleistocena como la Formación San Sebastián, en la sección se puede observar una falla de retrocorrimiento que se da a partir de la falla de Tancarpatá, produciendo un plegamiento en la capa de la Formación Kayra; en la segunda parte entre la falla de Tancarpatá y la falla de Cusco tenemos litologías cretácicas y paleógenas como las formaciones Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco (Figura 2. 50), la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo deja interpretar una tendencia NE.

En el tramo B4 se interpreta que entre la falla Cusco y el límite de la sección presenta litologías mesozoicas y cenozoicas, como capas del Grupo Mitu, formaciones Huancané, Puquín, Quilque, Chilca y Kayra (Figura 2. 50), produciendo cierto plegamiento en dirección E y se presencia discordancias en las capas, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo deja interpretar una tendencia NE.

SECCION CC'

Entre el sector que inicia la sección y la falla de tipo inversa Miska-Araipallpa en dirección NO-SE (Figura 2. 50), se observa que la litología es Cretácica y Neógena, como la Formación Maras (Albiano medio) con olistolitos de calizas de la Formación Ayabacas, en la parte superior y en discordancia, se halla la Formación Puquín, esta a su vez sobreyacida por los conglomerados de la Formación Paccaritambo (Mioceno inferior) (Carlotto et al., 2011).

En el tramo C1 se interpreta la falla Yaurisque-Papres como una falla de tipo inversa en dirección NO-SE, Así también en este tramo se cuenta con afloramiento de la Formación Soncco de edad

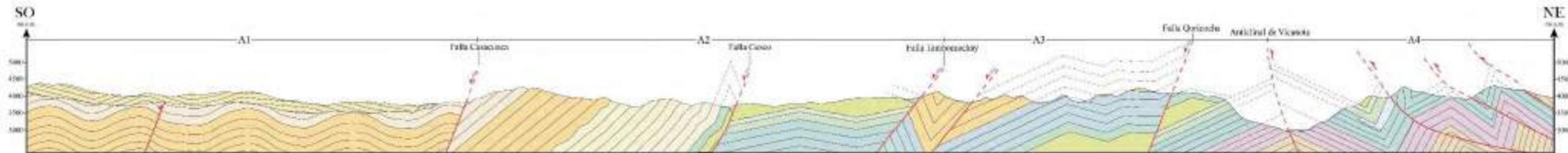
Eoceno del Grupo San Jerónimo que es un flanco invertido del sinclinal oculto de Paruro (Carlotto et al., 2011), la falla Yaurisque-Papres controla también al norte los afloramientos de la Formación Paruro y ha tenido que ver con la evolución de la cuenca durante el Mioceno superior, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo muestra una tendencia NE.

En el tramo C2 se interpreta la falla Paruro como una falla de tipo inversa en dirección NO-SE, Así también en este tramo se cuenta con un afloramiento Mioceno como la Formación Paruro, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo muestra una tendencia NE.

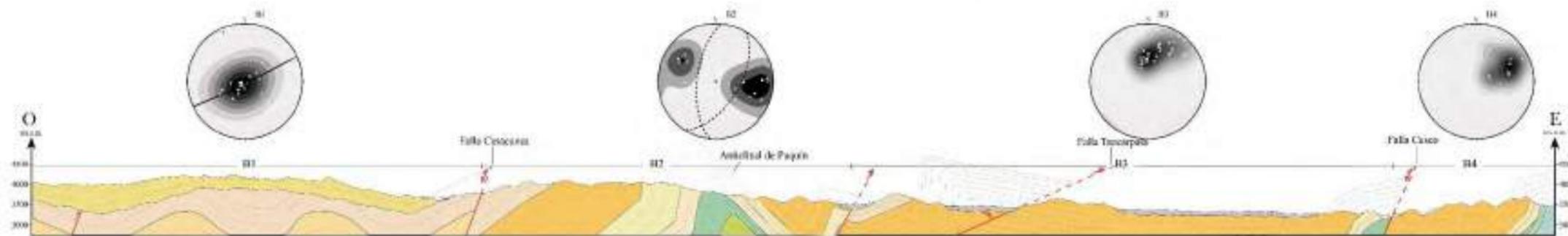
En el tramo C3 (Figura 2. 50) interpretamos la falla Anyarate-San Juan de Quihuare como una falla de tipo inversa en dirección NO-SE y parte del sinclinal Paruro que sería el flanco noreste del sinclinal de Paruro y está conformado por la Formación Puquín (Cretácico superior), las formaciones Quilque y Chilca (Paleoceno) y las capas rojas del Grupo San Jerónimo (Eoceno inferior-Oligoceno inferior). La Formación Paruro sobreyace en discordancia angular al Grupo San Jerónimo, el sinclinal de Paruro cabalga a través de la falla Anyarate-San Juan de Quihuare sobre el sinclinal San Juan de Quihuare (Carlotto et al., 2011) este sinclinal en la zona por la extensión no se observa de forma clara y estaría pasando al anticlinal de Saylla-Lucre, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo, muestra una tendencia SO, estas se observan de color rojo, ya que se refieren a datos estratigráficos invertidos.

En el tramo C4 y C5 (Figura 2. 50) se interpreta el anticlinal de Saylla-Lucre, la litología entre la falla Anyarate-San Juan de Quihuare y el límite NE de la sección es de edad Mesozoica y Cenozoica como las capas de las formaciones Huancané, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y Punacancha, las estructuras de este bloque han sido interpretadas como pliegues de amortiguamiento que han jugado desde el Eoceno medio (~43 Ma) y los cabalgamientos se interpretan como estructuras de inversión, es decir, antiguas fallas normales que controlaron la sedimentación de la Formación Kayra en el Eoceno inferior (Carlotto, 2006b). La proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo C4 muestra una tendencia de dirección NE esta es parte del flanco del anticlinal de Saylla-Lucre, la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de cada capa aflorante en el tramo C5 muestra la dirección de ambos flancos del anticlinal.

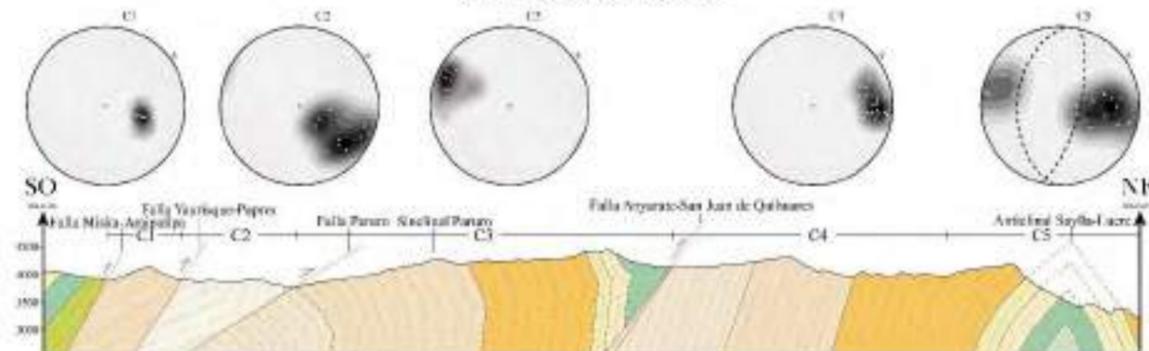
SECCION AA'



SECCION BB'



SECCION CC'



LEYENDA

CUATERNARIO	Depósito coluvial	Depósito aluvial	Depósito fluvial	Fm. San Sebastián
NEÓGENO	Fm. Paruro	Fm. Paucaritambo		
PALEOGENO	Gpo. Tacaza	Fm. Soncco	Fm. Kayra	Fm. Chilca
			Fm. Quilque	
MESOZOICO	Fm. Paquin	Fm. Maras	Fm. Paucarbamba	Fm. Huancané
			Fm. Huambutío	Gpo. Mitu
PALEOZOICO	Gpo. Copacabana	Fm. Ananea		

SIMBOLOGÍA

- Falla normal
- Falla inversa
- Falla inversa con reactivación normal

Escala gráfica horizontal: 0 1 2 km

Figura 2. 50: Secciones geológicas regionales A-A' en dirección SO-NE, B-B' en dirección O-E y C-C' en dirección SO-NE. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).

CAPÍTULO III: MODELAMIENTO GEOLÓGICO

3.1 CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

La metodología que se utilizó en el cartografiado geológico y estructural del área de estudio consta tanto de información bibliográfica procesada en gabinete como información de campo.

Como información bibliográfica tenemos el realce estructuras geológicas por la técnica de mapa de imagen de relieve rojo (RRIM), se usa un DEM como mapa base para los mapas derivados que se realizan con el fin de identificar posibles fallas. El RRIM es una multiplicación de tres capas de elementos de relieve, pendiente topográfica, apertura positiva y apertura negativa. La apertura positiva y negativa fue definida por Yokoyama (2002). La apertura negativa representa la concavidad de la superficie como valles y la apertura positiva representa la convexidad de la superficie como crestas, se muestra el procedimiento de producción de RRIM y sus elementos de relieve (Figura 3. 1).

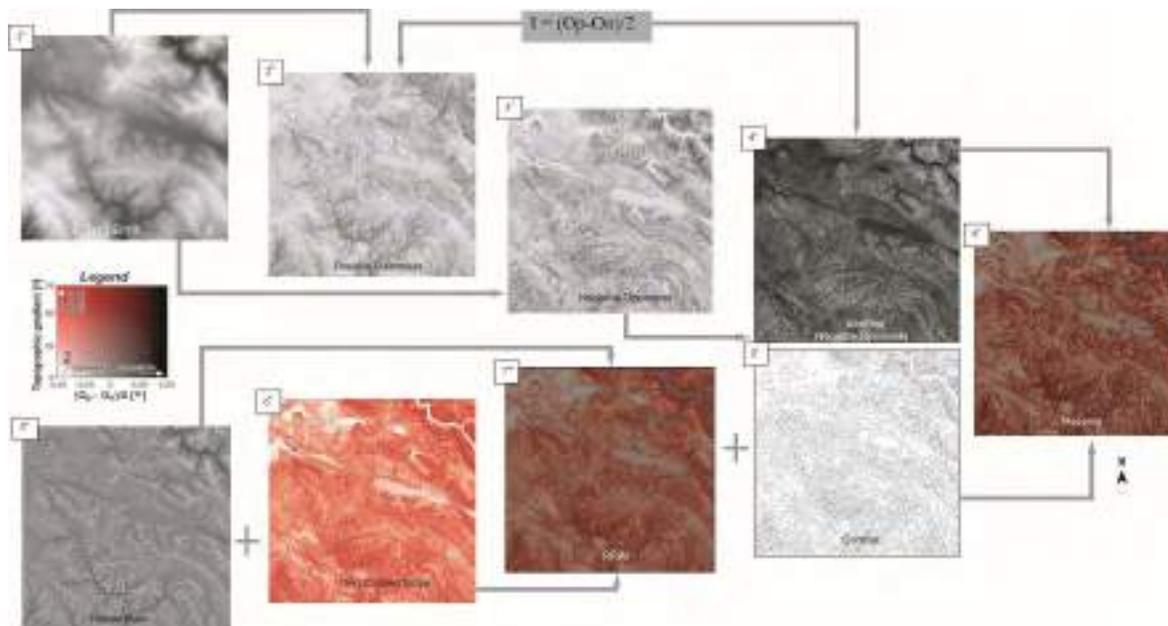


Figura 3. 1: Pasos de producción de Red Relief Image Map (RRIM) propuestos por Chiba et al. (2008). Fuente: Puma et al. (2021)

El realce de estructuras geológicas por el método RRIM (Figura 2. 48) resalta tanto en cantidad y tendencia las fallas regionales, T1 (148°) es equivalente a las fallas regionales Casacunca, San Juan de Quihuares y Paruro (150°); T2 (122°) es equivalente a las fallas regionales Tambomachay y Qoricocha (122°). Además, se reconocen dos posibles tendencias de fallas T3 (094°) y T4 (055°). La dirección preferente que se observa en esta técnica es de dirección NO-SE.

3.1.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES (COMBINACIONES RGB).

Las combinaciones de bandas son utilizadas en teledetección debido a que al asignar un juego de bandas a los canales RGB (rojo, verde y azul) estos realzan características, según al uso que se le quiera dar se observa la respuesta espectral, mostrándolos en distintas coloraciones de acuerdo a

su composición. Esta técnica la usaremos para el mapeo preliminar de la geología y la presencia de estructuras en el área de estudio. El procedimiento es detallado en la Figura 3. 2.

3.1.1.1 RGB para LANDSAT 8 OLI.

Se ha empleado las siguientes combinaciones en RGB:

- Mwaniki et al. (2015) plantea la combinación RGB 4/3-6/2-7/4 usado en el mapeo de las formaciones geológicas.
- Takorabt et al. (2018) establece la combinación RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4, usado en el mapeo de las estructuras geológicas.

En la Figura 3. 3 observamos que las formaciones geológicas presentan diferentes coloraciones por las que se realiza la delimitación de cada una de ellas, esto en base a la combinación de las bandas de LANSAT 8 OLI. Para la combinación RGB 4/3-6/2-7/4 propuesta por Mwaniki et al. (2015), estos presentan coloraciones (Figura 3. 3 d).

En el RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4 propuesto por (Takorabt et al., 2018; Figura 3. 3 g), las estructuras geológicas se mapean de color verde claro, resaltando así dichas estructuras alineadas que serían las fallas geológicas en diferentes direcciones y longitudes.

3.1.1.2 RGB para ASTER LIT.

Se ha empleado las siguientes combinaciones en RGB:

- Mamani (2017) plantea la combinación RGB 9-4-3 usado en el mapeo de las formaciones geológicas.
- Mamani (2017) establece la combinación RGB 3-2-1, usado en el mapeo de las estructuras geológicas.

En la Figura 3. 3 observamos que las formaciones geológicas presentan diferentes coloraciones por las que se realiza la delimitación de cada una de ellas, esto en base a la combinación de las bandas de ASTER. Para la combinación RGB 9-4-3 propuesta por (Mamani, 2017; Figura 3. 3 e), estos presentan coloraciones que van desde anaranjado, amarillo, azul y verde claro.

En el RGB 3-2-1 propuesto por (Mamani, 2017; Figura 3. 3 h), las estructuras geológicas se mapean de color rojo claro, resaltando así dichas estructuras alineadas que serían las fallas geológicas en diferentes direcciones y longitudes además las zonas que presentan tonalidades rojas oscuras, litológicamente estarían delimitando los depósitos cuaternarios en el área de estudio.

3.1.1.3 RGB para SENTINEL 2A.

Se ha empleado las siguientes combinaciones en RGB:

- El Atillah et al. (2019) plantea la combinación RGB 11/12-11/2-11/8 usado en el mapeo de las formaciones geológicas.
- El Atillah et al. (2019) establece la combinación RGB 4/3-4/2-11/12, usado en el mapeo de las estructuras geológicas.

En la Figura 3. 3 observamos que las formaciones geológicas presentan diferentes coloraciones por las que se realiza la delimitación de cada una de ellas, esto en base a la combinación de las bandas de SENTINEL 2A. Para la combinación RGB 11/12-11/2-11/8 propuesta por (El Atillah

et al., 2019; Figura 3. 3 f), estos presentan coloraciones claras que van desde violeta, amarillo y anaranjado.

En el RGB 3-2-1 propuesto por (El Atillah et al., 2019; Figura 3. 3 i), las estructuras geológicas se mapean de color rojo claro, resaltando así dichas estructuras alineadas que serían las fallas geológicas en diferentes direcciones y longitudes.

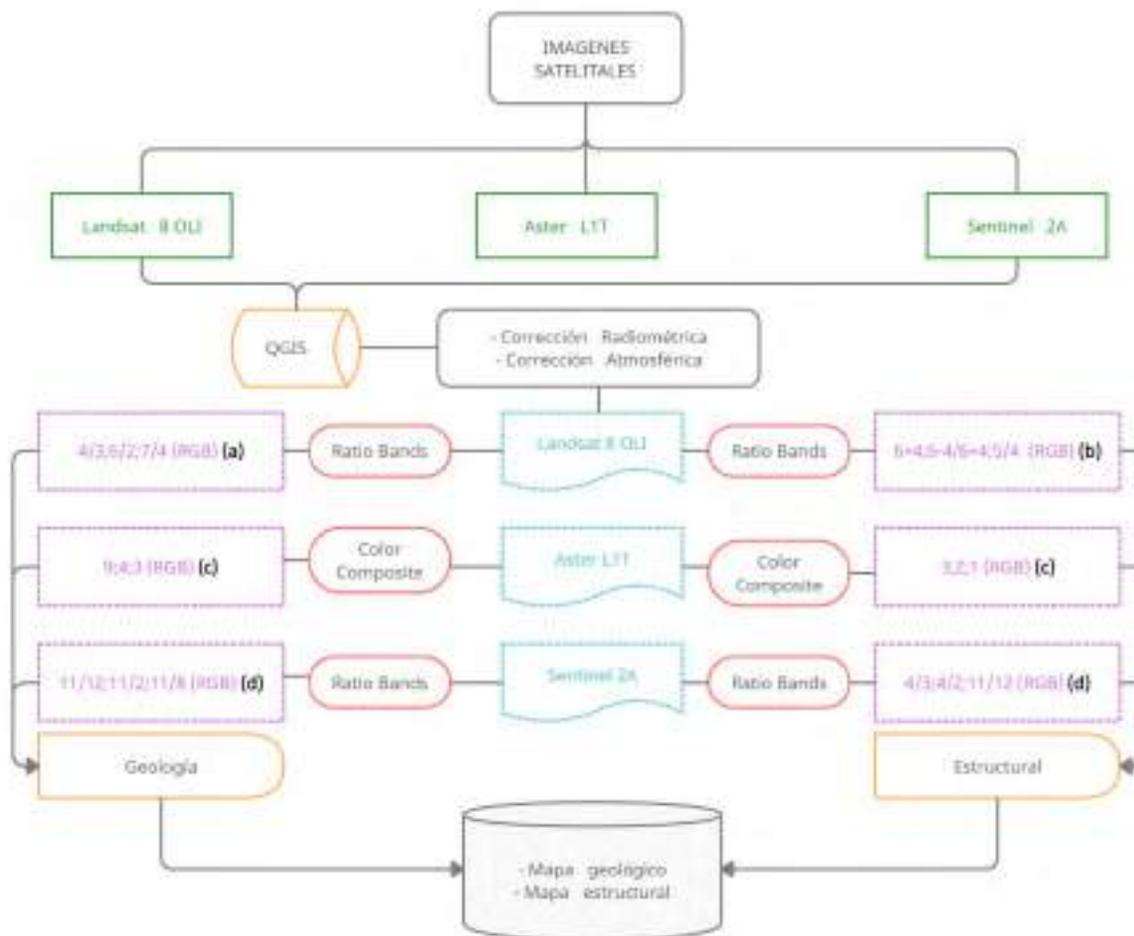


Figura 3. 2: Flujograma del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

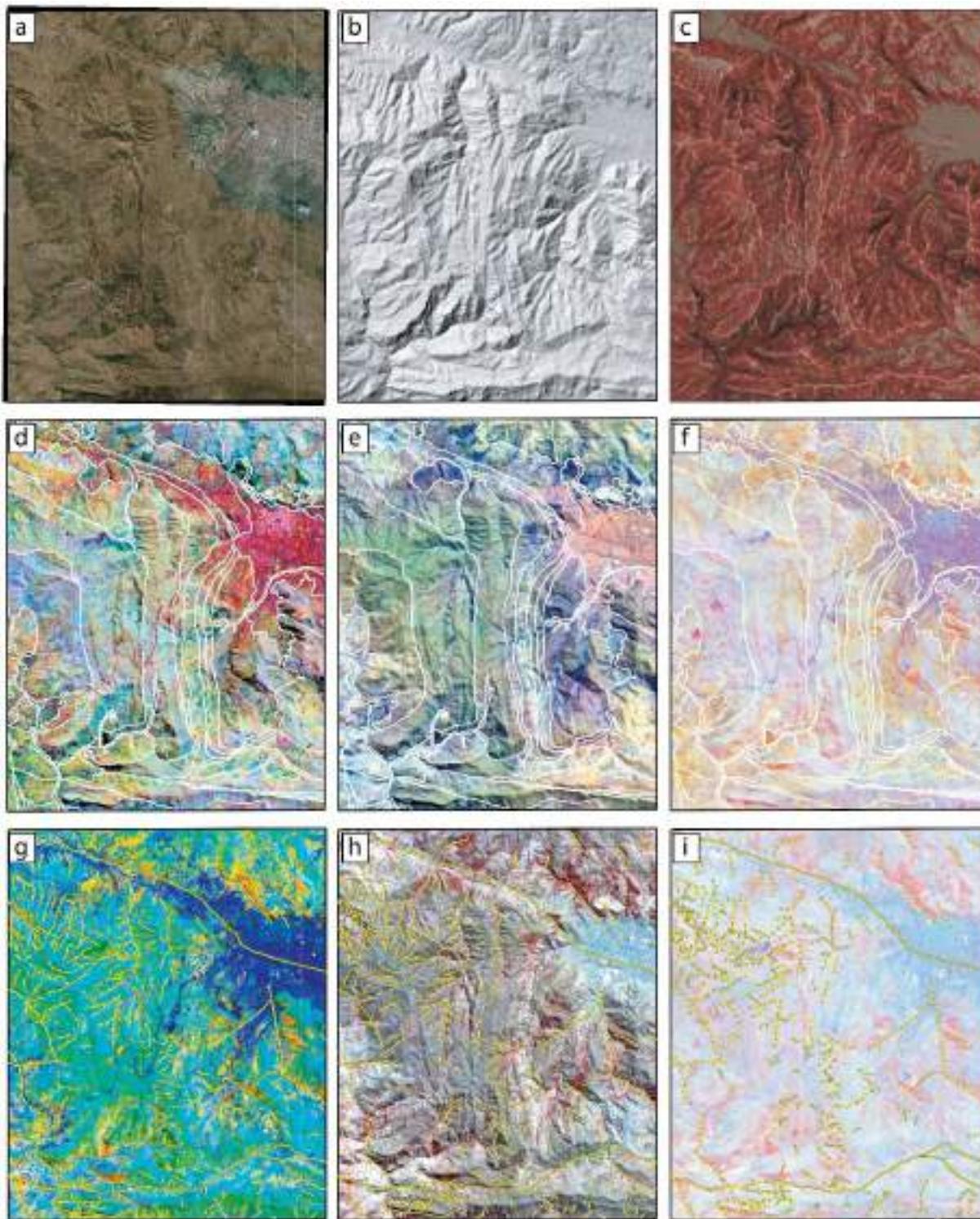


Figura 3. 3: (a) Imagen satelital del anticlinal de Puquín, (b) modelo de elevación del anticlinal de Puquín, (c) RRIM del área de estudio, (d) Landsat 8 OLI la combinación RGB 4/3-6/2-7/4 delimitando las unidades geológicas, (e) Aster la combinación RGB 9-4-3 delimitando las unidades geológicas, (f) Sentinel 2A la combinación RGB 11/12-11/2-11/8 delimitando las unidades geológicas, (g) Landsat 8 OLI la combinación RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4 delimitando las estructuras geológicas, (h) Aster la combinación RGB 3-2-1 delimitando las estructuras geológicas y (i) Sentinel 2A la combinación RGB 4/3-4/2-11/12 delimitando las estructuras geológicas. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO EN CAMPO.

La cartografía geológica del área de estudio se ha realizado en la segunda campaña de campo con un total de 12 días; ha sido dividida en dos partes (zona sur y zona norte), se presenta un mapa de la cartografía geológica completa del área de estudio con los puntos de control de campo (Figura 3. 4).

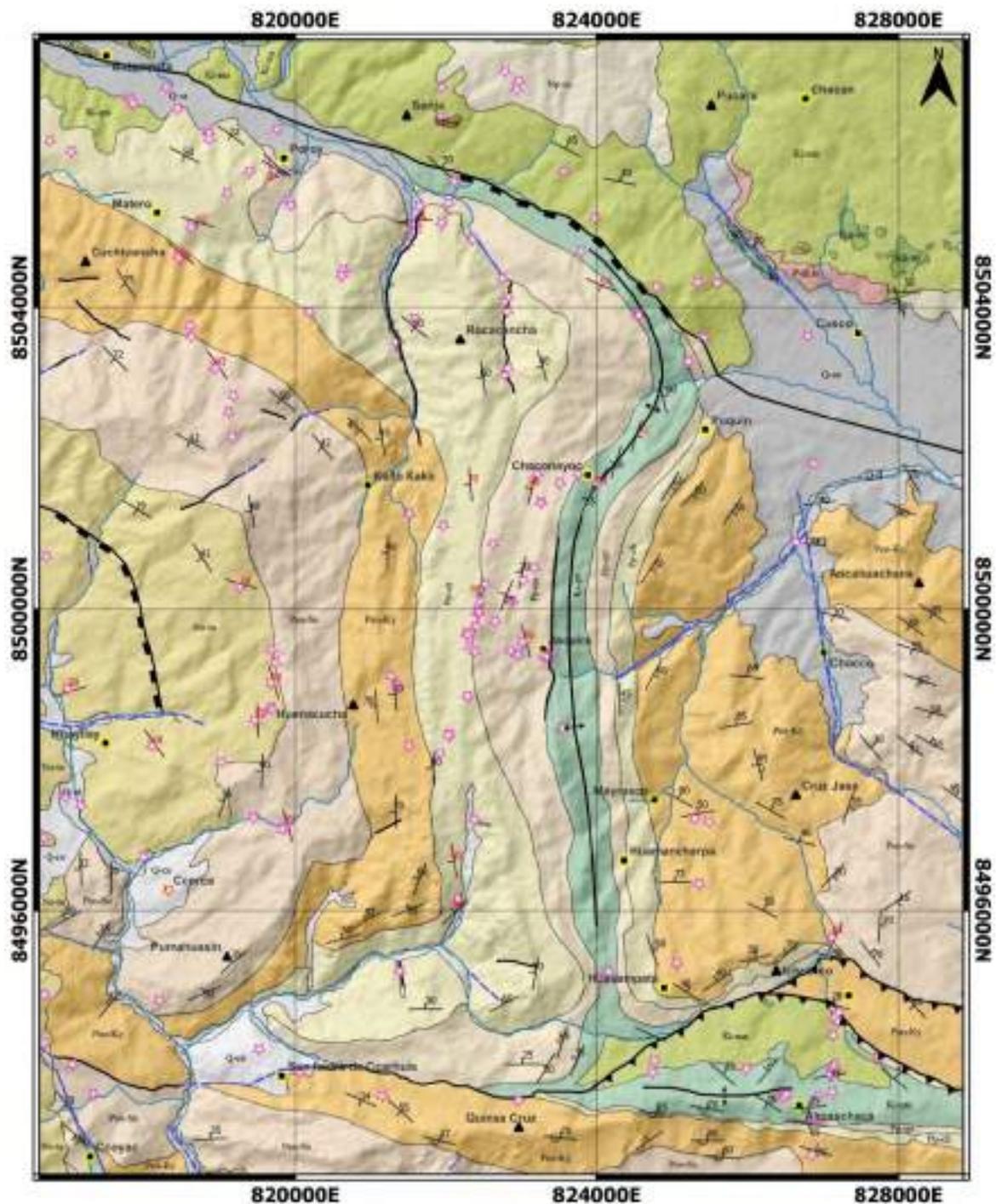


Figura 3. 4: Mapa geológico con los puntos cartográficos (estrellas de color fucsia), en los cuales se tomó datos estructurales y litológicos. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).

3.1.2.1 ZONA NORTE

Limita al norte por las poblaciones Batampata-Chacan y al sur por el cerro Ancahuachana y el oeste del poblado de Kello Kaka.

Está caracterizada en afloramiento por rocas cuya edad va del Cretácico medio al Cuaternario (Figura 3. 5). Se distingue la parte norte del anticlinal de Puquín y cuyo eje se traza en dirección N-S con datos de buzamiento normal, algunos afectados por las fallas presentes en el área de estudio. Al norte se observa la falla Cusco de cinemática normal trazado en dirección NO-SE, al límite suroeste se observa la falla de Casacunca de cinemática normal en dirección NO-SE; también se observan fallas en dirección N-S, NE-SO, E-O y NO-SE; por último, algunas fallas inferidas de color azul en líneas entrecortadas.

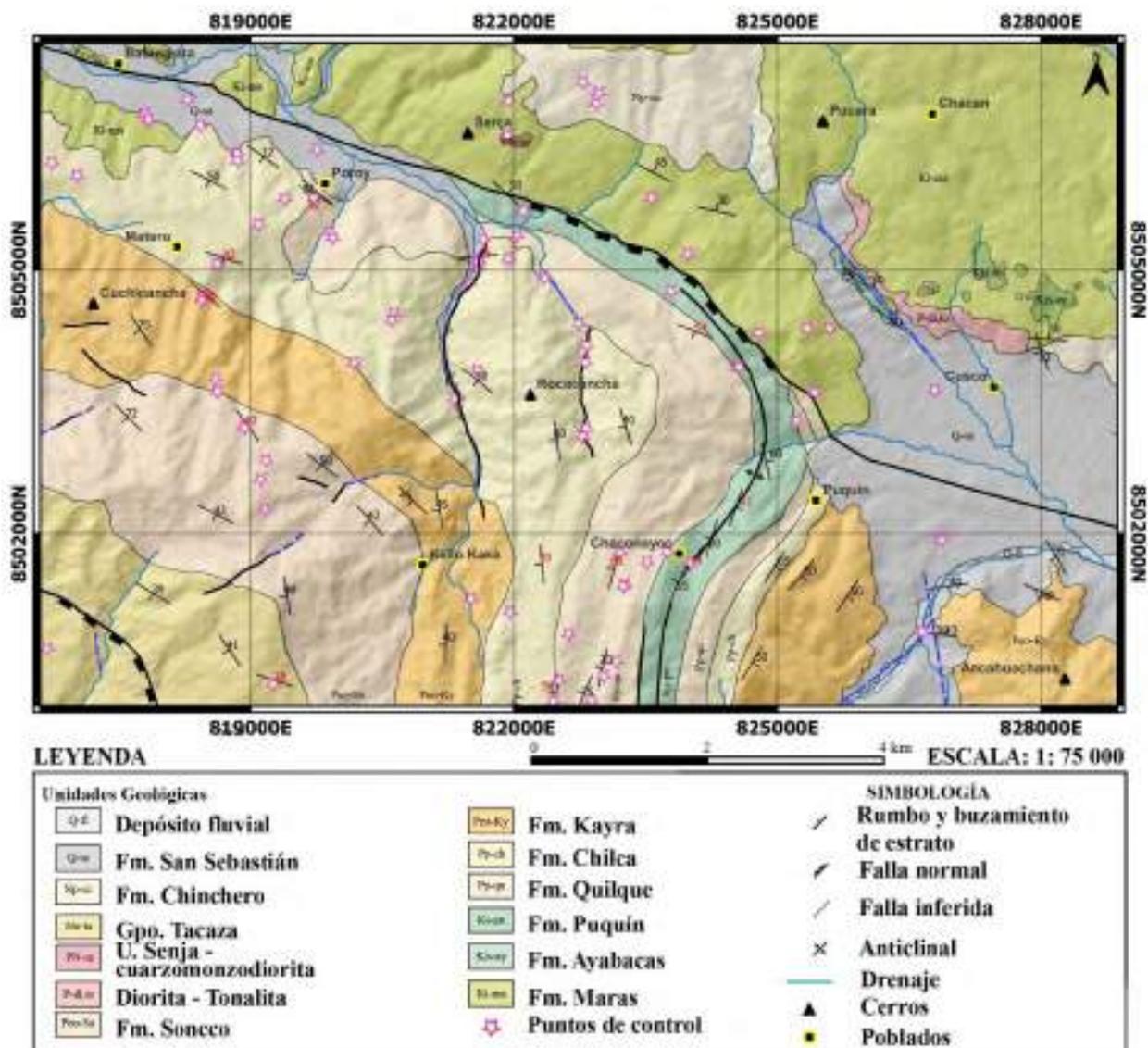


Figura 3. 5: Cartografía geológica zona norte. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).

Los contactos reconocidos en las campañas de campo para la zona norte son inferidos y netos, es así que el contacto entre las formaciones Maras y Chilca al sur del poblado de Batampata (Figura 3. 6) es un contacto inferido que se presenta entre líneas entrecortadas de color amarillo, al suroeste del cerro Cuchicancha se reconoce el contacto inferido entre la Formación Kayra y Soncco (Figura 3. 7), al sureste del poblado de Poroy se reconoce la Formación Chilca y hacia el cerro Senja se delimita la Formación Maras en contacto con la Formación Chinchero y la Unidad Senja, hacia el oeste se delimita también la Formación San Sebastián (Figura 3. 8 y 3. 9), la vista tomada desde el cerro Senja (Figura 3. 10) delimita de una manera general los contactos inferidos de las formaciones aflorantes al norte del área de estudio en el cual también se observa la falla Cusco de cinemática normal, desde el poblado Matero se observa también los contactos entre las formaciones Quilque, Chilca, Kayra y Soncco (Figura 3. 11 y 3. 12), finalmente en esta zona norte el contacto neto que se presenta en línea continua de color rojo se da entre la Formación Maras y Puquín al noroeste del poblado Puquín (Figura 3. 13).



Figura 3. 6: Vista panorámica en dirección SE-NO, al sur del poblado de Batampata, donde se encuentra el contacto inferido entre las formaciones Maras como un bloque caótico y Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste.



Figura 3. 7: vista panorámica en dirección SE-NO, al suroeste del cerro Cuchicancha, donde se encuentra el contacto entre las formaciones Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 45° al suroeste y Soncco con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 42° al suroeste.



Figura 3. 8: Vista panorámica en dirección O-E, al sureste del poblado de Poroy, donde se encuentra la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste, hacia el fondo en el cerro de Senja el afloramiento caótico de la Formación Maras en contacto con la Formación Chinchero y la Unidad Senja.



Figura 3. 9: Vista panorámica en dirección O-E, al sureste del poblado de Poroy, donde se encuentra la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste, hacia el oeste se observa la Formación San Sebastián, en contacto con la Formación Maras en el cerro de Senja.

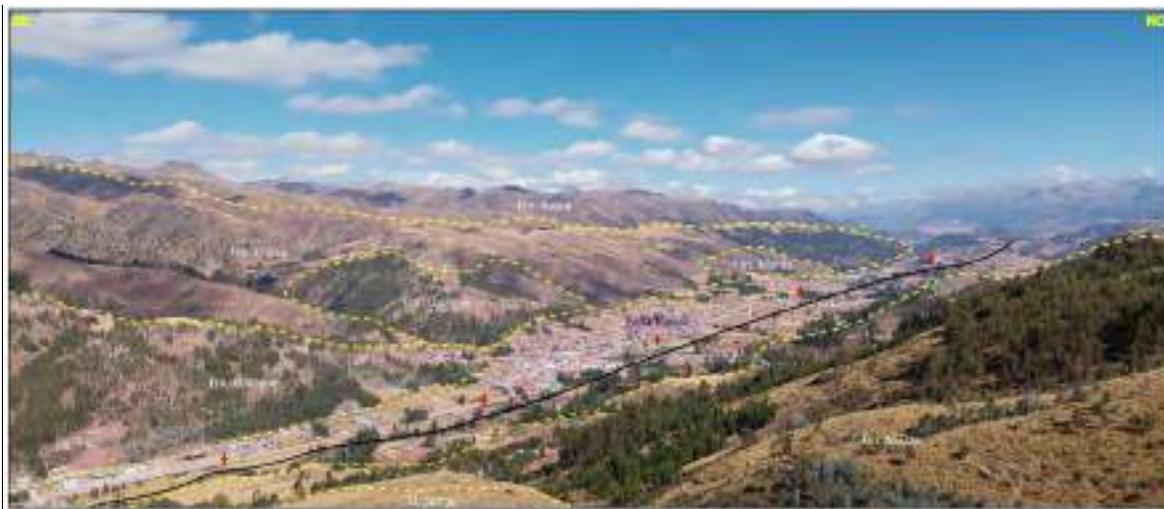


Figura 3. 10: Vista panorámica en dirección SE-NO, tomada desde el cerro Senja, en el cual aflora la Unidad Senja en contacto con el bloque caótico de la Formación Maras; la Formación Maras en contacto con la Formación San Sebastián, por donde pasa la falla Cusco de cinemática normal; la Formación San Sebastián está en contacto con las formaciones Quilque con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 32° a 52° al suroeste, Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste y Maras; en la parte alta se observa el contacto entre las formaciones Chilca y Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 40° al suroeste.



Figura 3. 11: Vista panorámica en dirección NO-SE, tomada desde el Poblado Matero, en el cual aflora la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 42° al suroeste en contacto con la Formación Quilque con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 32° al suroeste.



Figura 3. 12: Vista panorámica en dirección NE-SO, tomada desde el noroeste del poblado Matero, en el cual aflora la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 42° al suroeste, en contacto con la Formación Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 75° al suroeste y en contacto con la Formación Soncco con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 72° al suroeste.



Figura 3. 13: Vista panorámica en dirección O-E, tomada desde el noroeste del poblado Puquín, en el cual aflora la Formación Puquín con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 40° al suroeste en contacto con la Formación Maras.

3.1.2.2 ZONA SUR

Limita al norte por las poblaciones Huayllay-Chocco y al sur por las poblaciones Ancaschaca y Ccoyac.

Está caracterizada en afloramiento por rocas cuya edad va del Cretácico medio al Cuaternario (Figura 3. 14). Se distingue la parte sur del anticlinal de Puquín y cuyo eje se traza en dirección N-S con datos de buzamiento normal; se presenta también un anticlinal al sureste pequeño con eje en dirección O-E, con datos de buzamiento normal e invertido frecuentemente afectados por fallas presentes en el área de estudio. Al límite noroeste se observa la falla de Casacunca de cinemática normal en dirección NO-SE; al sur se observan fallas con cinemática inversa; también se observan fallas pequeñas en dirección N-S, E-O y NO-SE; por último, algunas fallas inferidas de color azul líneas entrecortadas.

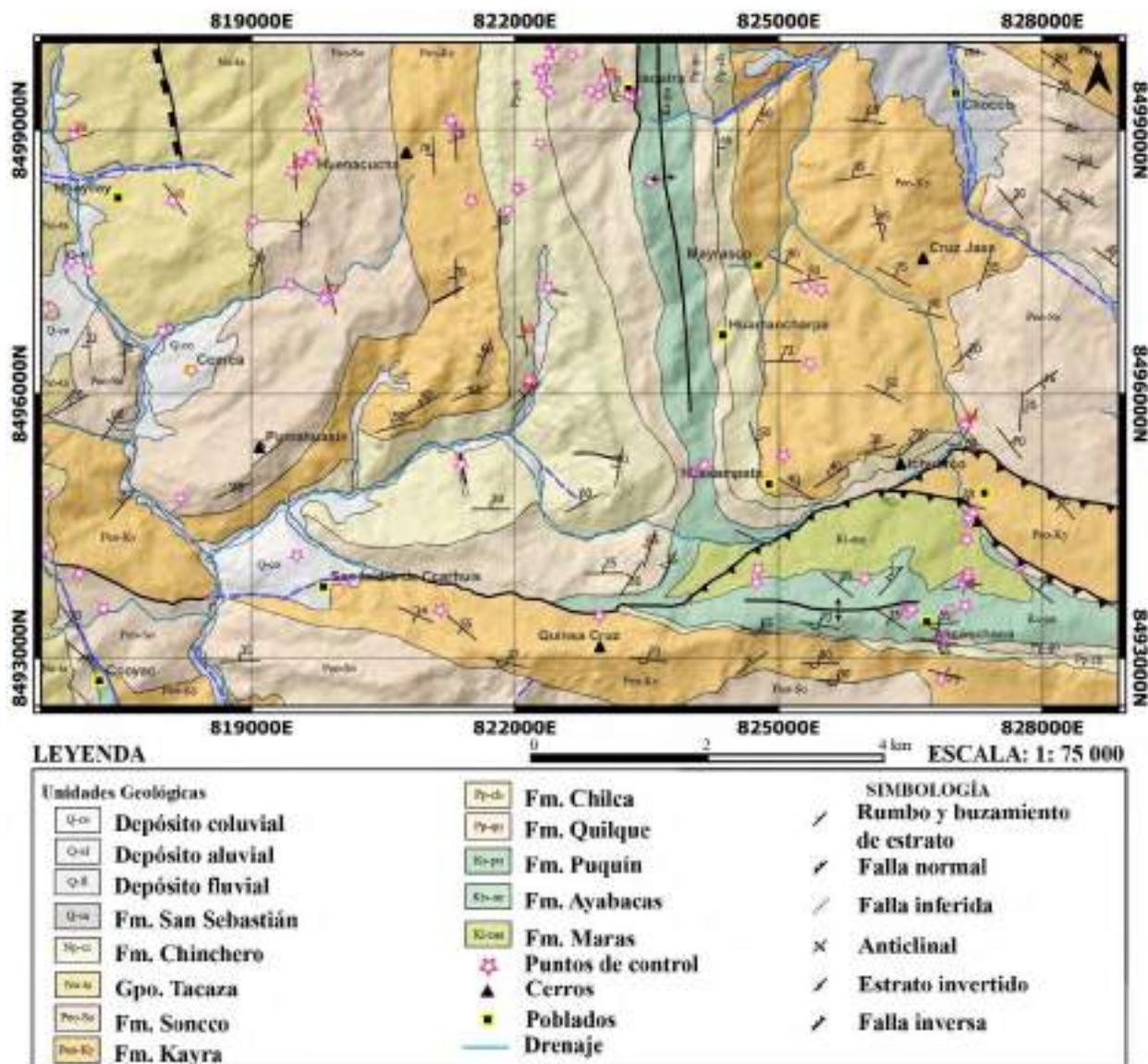


Figura 3. 14: Cartografía geológica zona sur. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).

Los contactos reconocidos en la campaña de campo para la zona sur son inferidos y netos, es así que los contactos entre las formaciones Puquín, Quilque, Chilca y Kayra en el poblado de Jaquira (Figura 3. 15 y 3. 16) son contactos inferidos que se presenta entre líneas entrecortadas de color amarillo, también se observa una falla de cinemática normal que va en dirección N-S, al sureste del poblado de Jaquira se observa el contacto neto que se presenta en línea continua de color rojo, entre las formaciones Puquín y Quilque (Figura 3. 17), al sureste del poblado de Mayrasco se reconoce el contacto inferido entre las formaciones Kayra y Soncco (Figura 3. 18), al oeste del poblado de Ancaschaca se delimita los contactos entre las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca en el que también se presencia una falla (Figura 3. 19), al E del poblado San Isidro de Ccarhuis se delimita los contactos inferidos entre las formaciones Quilque, Chilca y Kayra como también la presencia de una falla de contacto entre las formaciones Quilque y Kayra (Figura 3. 20), al noroeste del Poblado de Ccorca se delimita los contactos inferidos entre las formaciones

Kayra, Soncco, Grupo Tacaza y depósitos cuaternarios aluviales (Figura 3. 21), finalmente en esta zona sur el contacto neto que se presenta en línea continua de color rojo e inferido en línea continua de color amarillo entre la Formación Soncco y el Grupo Tacaza al este y norte del poblado Huayllay (Figura 3. 22 y 3. 23).



Figura 3. 15: Vista panorámica en dirección O-E, tomada desde el poblado Jaquira, en el cual afloran unidades como la Formación Puquín siendo parte del núcleo del anticlinal de Puquín, Quilque aflorando en ambos flancos este y oeste; y Chilca del mismo modo aflorando en ambos flancos, también se observa una falla de cinemática normal que es paralela al eje del anticlinal de Puquín con un núcleo amplio el cual se encuentra bastante deformado.



Figura 3. 16: Vista panorámica en dirección S-N, tomada desde el poblado Jaquira, se observa la Formación Chilca con capas en dirección N-S con buzamiento de 80° al oeste en contacto con la Formación Kayra con capas en dirección N-S con buzamiento de 70° al oeste.



Figura 3. 17: Contacto concordante entre las formaciones Puquín y Quilque, vista tomada en dirección SO-NE al sureste del poblado de Jaquira.



Figura 3. 18: Contacto concordante entre las formaciones Kayra y Soncco, vista tomada en dirección SE-NO al sureste del poblado de Mayrasco.



Figura 3. 19: Vista panorámica en dirección O-E, tomada desde el oeste del poblado Ancaschaca, en el cual afloran las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca; entre las formaciones Maras y Puquín se tiene la falla que corta dichas unidades al este se observa como falla de contacto y al oeste corta la unidad Puquín.

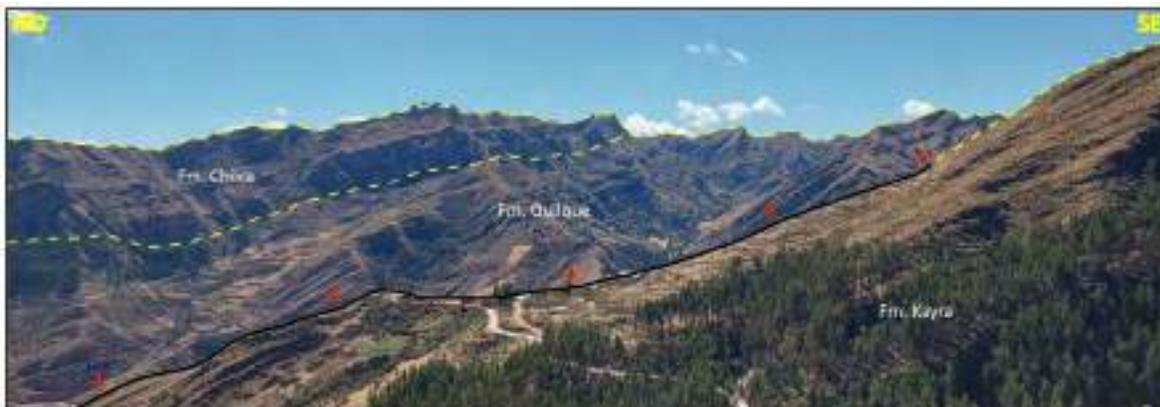


Figura 3. 20: Vista panorámica en dirección NO-SE, tomada desde el este del poblado San Isidro de Ccarhuis, en el cual afloran las formaciones Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 55° al suroeste, Quilque con capas en dirección O-E con buzamiento de 25° al norte y Chilca con capas en dirección O-E con buzamiento de 30° al norte; entre las formaciones Quilque y Kayra se observa una falla de contacto que va en dirección O-E.

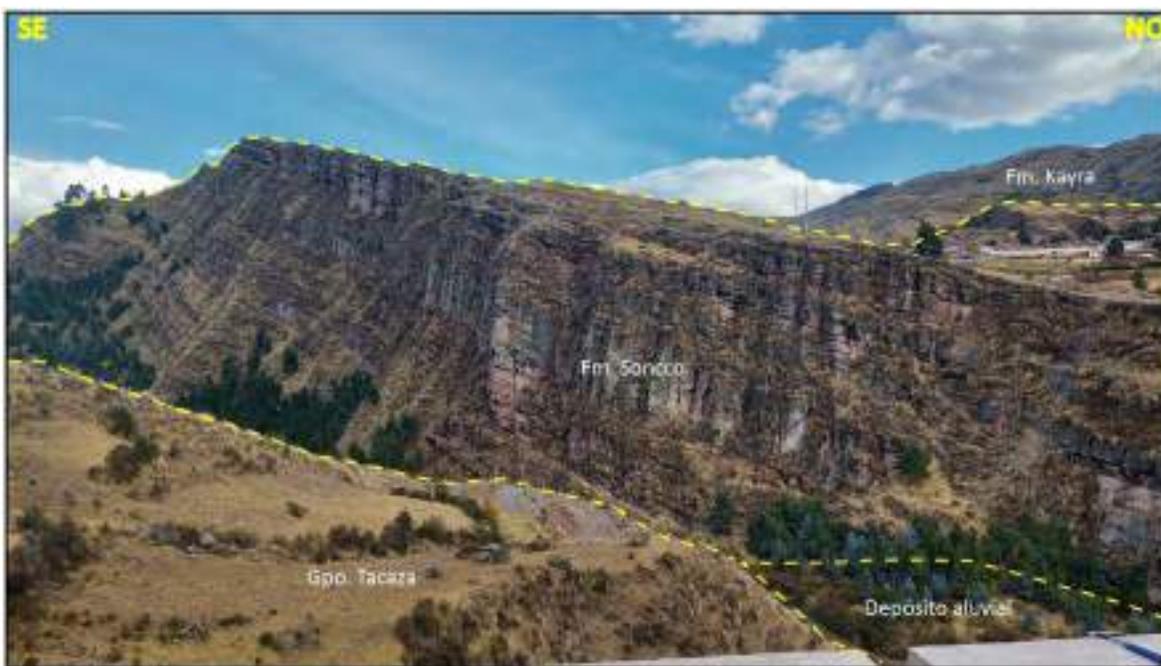


Figura 3. 21: Vista panorámica en dirección SE-NO, tomada desde el noroeste del poblado de Ccorca, se observa los contactos de las formaciones Kayra, Soncco, el Grupo Tacaza y depósitos aluviales.



Figura 3. 22: Contacto entre la Formación Soncco y el Grupo Tacaza, vista tomada en dirección E-O al este del poblado de Huayllay.

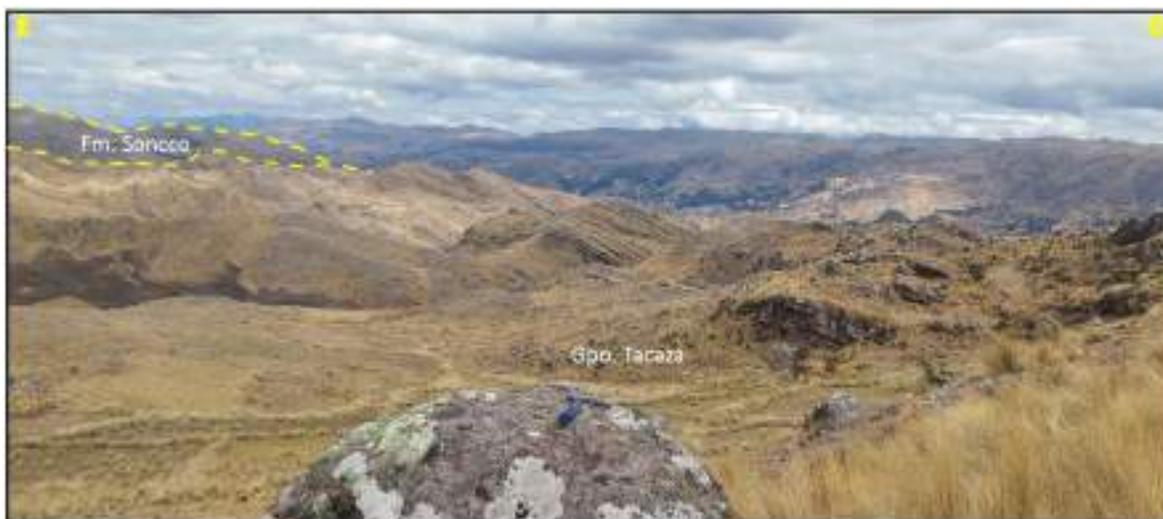


Figura 3. 23: Vista panorámica en dirección E-O, tomada desde el norte del poblado de Huayllay, se observa la Formación Soncco con capas en dirección N-S con buzamiento de 40° al oeste, en contacto con el Grupo Tacaza con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 18° al suroeste.

3.1.3 SECCIONES TRANSVERSALES.

Antes de realizar el bloque diagrama 2.5D geológico, sobre el mapa geológico elaborado se trazó tres secciones geológicas de dirección O-E y cortando de manera perpendicular al anticlinal de Puquín (Figura 2. 44). El perfil topográfico se obtuvo a partir de un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m ALOS PALSAR obtenido de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), el cual se descargó de manera gratuita del sitio web de la NASA; basándonos en los datos de buzamiento medidos se llevó a cabo una reconstrucción de la geometría superficial de las estructuras aplicando el método kink de las bisectrices, el cual permite conservar constante el espesor de las unidades, obteniendo así una primera aproximación de la sección para su posterior interpretación en profundidad; posteriormente y según la reconstrucción realizada por la metodología de kink se construye un modelo directo usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012) del anticlinal de Puquín, este programa permite reconstruir las estructuras como pliegues de propagación de falla por la metodología trishear y sirve para calcular el acortamiento en cada etapa de deformación.

3.1.3.1 SECCIONES TRANSVERSALES - MÉTODO KINK.

Según el mapa geológico local realizado con la ayuda del cartografiado geológico (Figura 2. 44) se realizó secciones geológicas transversales en dirección O-E; siendo estas secciones denominadas D-D' (Norte), E-E' (Centro) y F-F' (Sur) a partir de los cuales haremos la siguiente descripción.

Se interpreta el anticlinal de Puquín, la litología que presenta aflorando es de edad Cretácica, Paleógena hasta Cuaternaria como las capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco, Grupo Tacaza y Formación San Sebastián (Figura 3. 24), Así también en las secciones observamos que el núcleo del anticlinal viene a ser una capa Cretácica como la Formación Puquín, la variación de espesor de las capas en cada flanco del anticlinal es notorio y la vergencia es de dirección oeste; en la sección D-D' (Figura 3. 24) la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de las capas aflorantes en el tramo deja representar los flancos del pliegue y la intersección de estos planos deja visualizar el eje de pliegue siendo este un dato estructural lineal que estaría representado por un punto, teniendo una inmersión hacia el suroeste con 12.6° considerado como bajo, pero los datos de los elementos del pliegue lo podremos observar en el capítulo de análisis estructural (Figura 4. 94); en la sección E-E' (Figura 3. 24) se representa el anticlinal de Puquín, pero también dos fallas geológicas, una al oeste como es la falla Casacunca de cinemática normal y otra falla Tancarpata al este con cinemática inversa, de la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de las capas aflorantes en el tramo deja representar los flancos del pliegue y la intersección de estos planos deja representar el eje de pliegue; con esto se determina la inmersión con dirección suroeste de 30.4° considerado como baja inmersión y finalmente en la sección F-F' (Figura 3. 24) se representa la proyección estereográfica de los datos estratigráficos de las capas aflorantes en el tramo observándose los flancos del anticlinal de Puquín y la dirección de inmersión noroeste de 34.5° considerado como mediana inmersión.

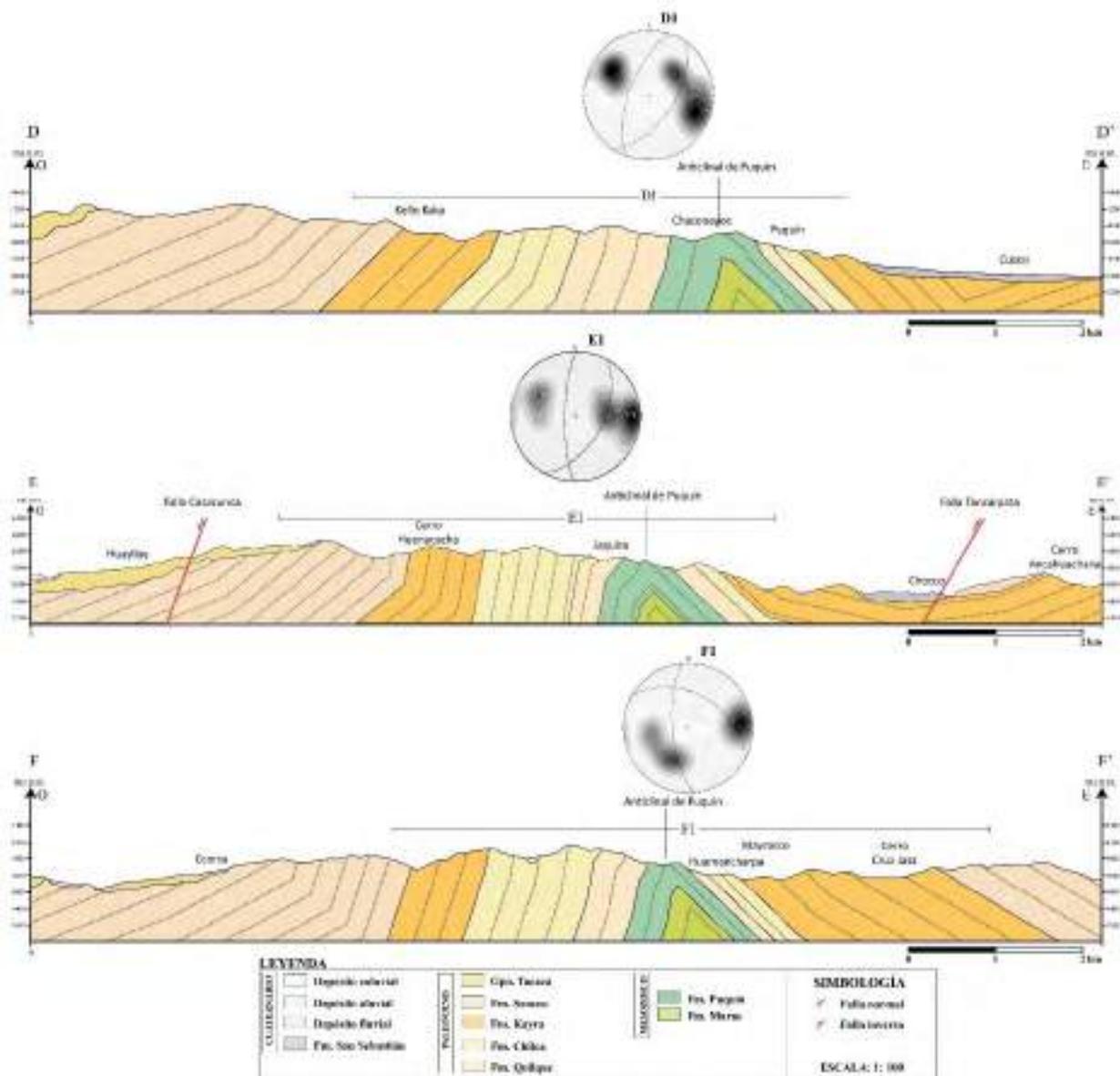


Figura 3. 24: Secciones geológicas locales D-D' al norte, E-E' al centro y F-F' al sur del área de estudio en dirección O-E y construidas con la metodología de kink. Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.2 SECCIONES TRANSVERSALES - MÉTODO TRISHEAR.

Según la reconstrucción realizada por la metodología de kink, se realiza secciones geológicas transversales en dirección O-E; siendo estas secciones denominadas D-D' (Norte), E-E' (Centro) y F-F' (Sur), las mismas presentadas en la (Figura 3. 24) pero con la metodología trishear que forma pliegues de propagación de falla en donde a partir de la terminación de la falla emana una zona de cizalla dúctil de forma triangular (en dos dimensiones) que se abre desde el punto de terminación de la falla; realizadas con el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012) y permitiendo reconstruir el anticlinal de Puquín como una estructura de pliegue por propagación de falla a partir de los cuales haremos la siguiente descripción.

En las secciones se representa el modelo del anticlinal de Puquín como una estructura de pliegue por propagación de falla, la falla está representada en las secciones de color rojo, pero en la superficie no llega a observarse según los modelos (Figura 3. 25); la sección norte D-D' se efectúa con una rampa de 45° determinada por geometría y explicado con más detalle en el capítulo análisis estructural y subcapítulo de evolución del anticlinal (Figura 4. 95); la sección centro E-E' se realiza con una rampa de 49° (Figura 4. 96) siendo la mayor inclinación de rampa en estos modelos y finalmente la sección sur F-F' que se realiza con una rampa de 44° (Figura 4. 97).

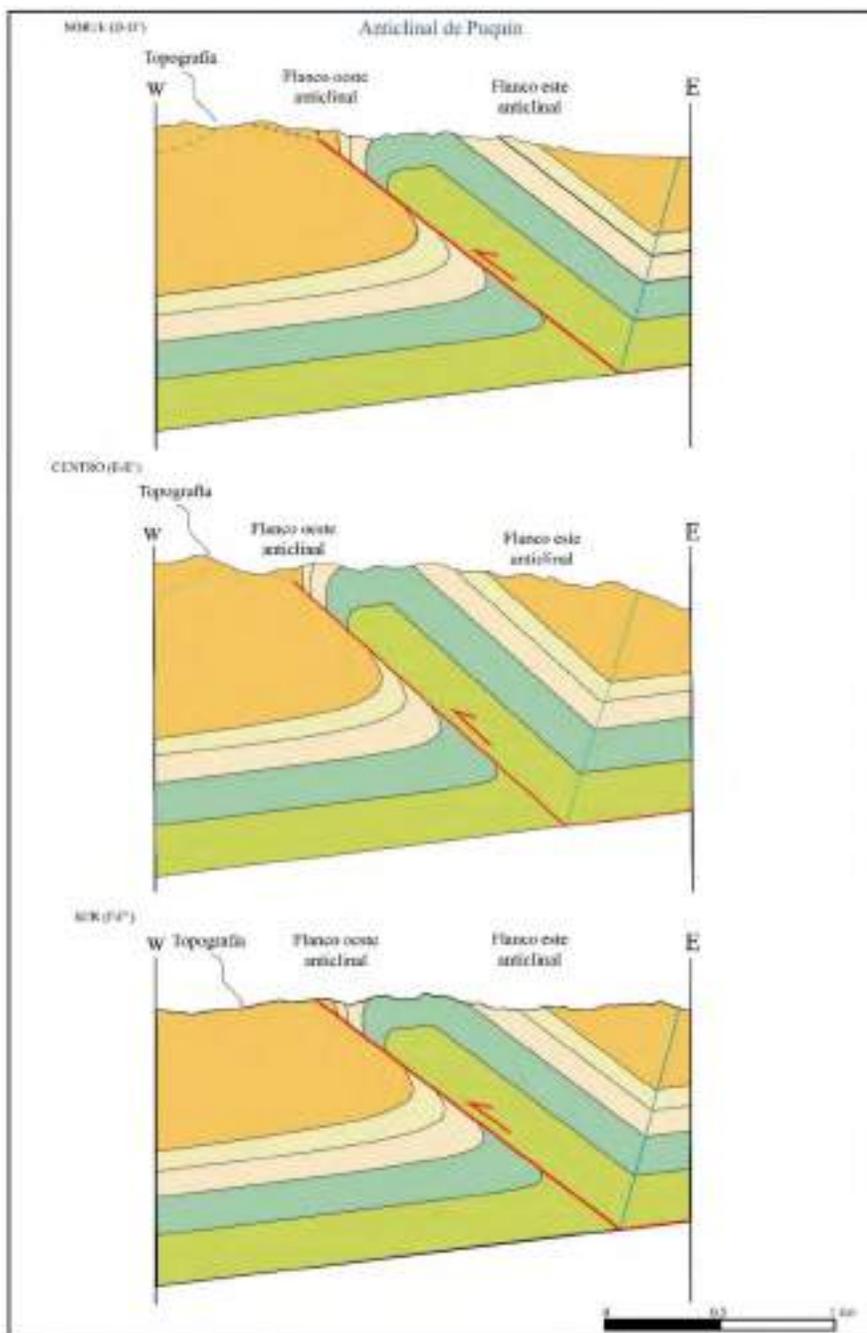


Figura 3. 25: Secciones geológicas locales D-D' al norte, E-E' al centro y F-F' al sur del área de estudio en dirección O-E y construidas con la metodología trishear. Fuente: Elaboración propia.

3.2 MODELO EN 2.5D

Para obtener la superficie en el bloque diagrama 2.5D geológico se descargó un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m ALOS PALSAR, el cual se proyectó en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator WGS-84 UTM Zona 18S; superponiéndolo con una imagen satelital (Figura 3. 26) en el software libre QGIS 3.4.12 y mostrándolo en una vista con dirección norte.

A partir de las secciones transversales realizadas aplicando el método kink de las bisectrices, el cual permite una primera aproximación de la sección y a base de la reconstrucción de un modelo directo usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012) por la metodología trishear pudiendo obtener la geología a profundidad se realizó el bloque diagrama 2.5D geológico (Figura 3. 26) en el cual se observa el ordenamiento de las capas aflorantes a profundidad y mostrando un modelo de pliegue por propagación de falla; dejando observar en superficie estructuras geológicas como el eje del anticlinal de Puquín y la falla Cusco.

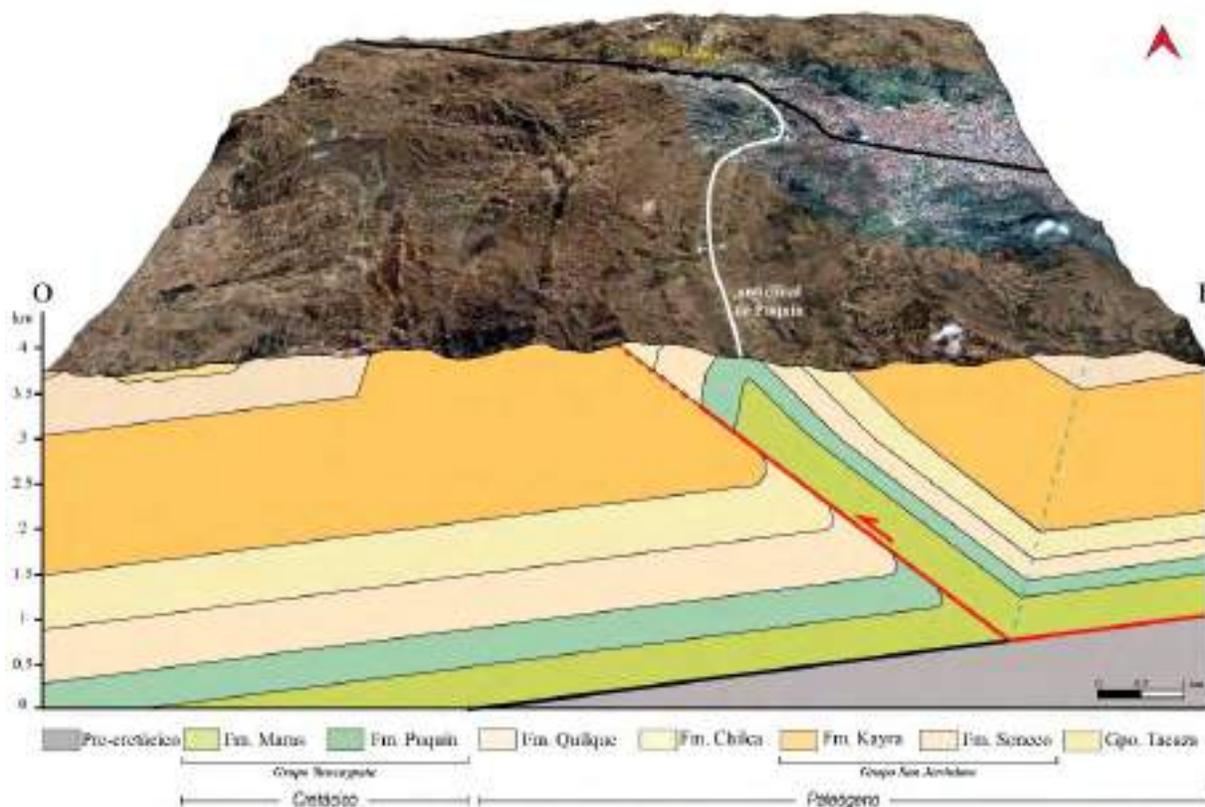


Figura 3. 26: Bloque diagrama 2.5D geológico del área de estudio construida a base de las secciones geológicas O-E con la metodología de kink y la metodología trishear. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1 FOTOINTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

A partir del procesamiento de las imágenes satelitales Lansat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A se observa la respuesta espectral y se realzan características estructurales de acuerdo a las combinaciones según Takorabt et al. (2018) con la combinación RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4 en imagen Lansat 8 OLI, Mamani (2017) con la combinación RGB 3-2-1 en imagen Aster L1T y El Atillah et al. (2019) con la combinación RGB 4/3-4/2-11/12 con imagen Sentinel 2A.

Es así que al realizar el tratamiento de las direcciones de azimut de los 256 datos de estructuras determinadas (Figura 4. 1); en el software Stereonet (Allmendinger et al., 2015) que muestra proyecciones estereográficas de datos de orientación cuando la relación espacial de las observaciones individuales entre sí es no importante o también para hacer cálculos complejos como rotaciones, calcular líneas de intersección, etc.; en este caso, el tratamiento de las direcciones de azimut se realizó para mostrar las tendencias principales y secundarias de las estructuras geológicas dentro del área de estudio determinada por el procesamiento de las imágenes satelitales, teniendo como resultado el diagrama de roseta (Figura 4. 1) cuatro tendencias T1, T2, T3 y T4, dividiéndose por la frecuencia de direcciones similares, T1 (055°) de color rojo de línea continua con dirección NE-SO, T2 (170°) de color verde de línea discontinua con dirección NNO-SSE, T3 (080°) de color amarillo de línea discontinua con una dirección ESE-ONO y T4 (025°) de color morado de línea discontinua con una dirección NE-SO, las mismas tendencias del diagrama de roseta se quizó mostrar en un histograma (Figura 4. 1) realizado en el software OpenStereo 0.1.2 devel (Grohmann et al., 2010) que es un software de multiplataforma de código libre para el análisis de geología estructural usando stereonet.

El diagrama de roseta y el histograma muestra que se agrupan en 4 familias azimutales T1, T2, T3 y T4, orientadas NE-SO, NNO-SSE, ENE-OSO y NE-SO respectivamente. Este resultado es confirmado por el ajuste gaussiano polimodal del total de estructuras fotointerpretadas mediante el software Daisy3 (Figura 4. 2) que muestra su agrupación en 6 familias azimutales, el principal T1 está orientado N50.54° (sd=8.99°) siendo sd la desviación estándar, el segundo T2 está orientado N171.22° (sd=10.65°), el tercero T3 orientado N80.16° (sd=11.14°) y el cuarto T4 orientado N24.80°(sd=5.32°), también están presente dos conjuntos con frecuencias azimutales mucho menores orientados T5 (139.50°) (sd=8.76°) y T6 (115.88°) (sd=5.02°); finalmente mencionar que la tendencia T3 se caracteriza por la mayor dispersión (sd=11.14°) con respecto a las otras tendencias.

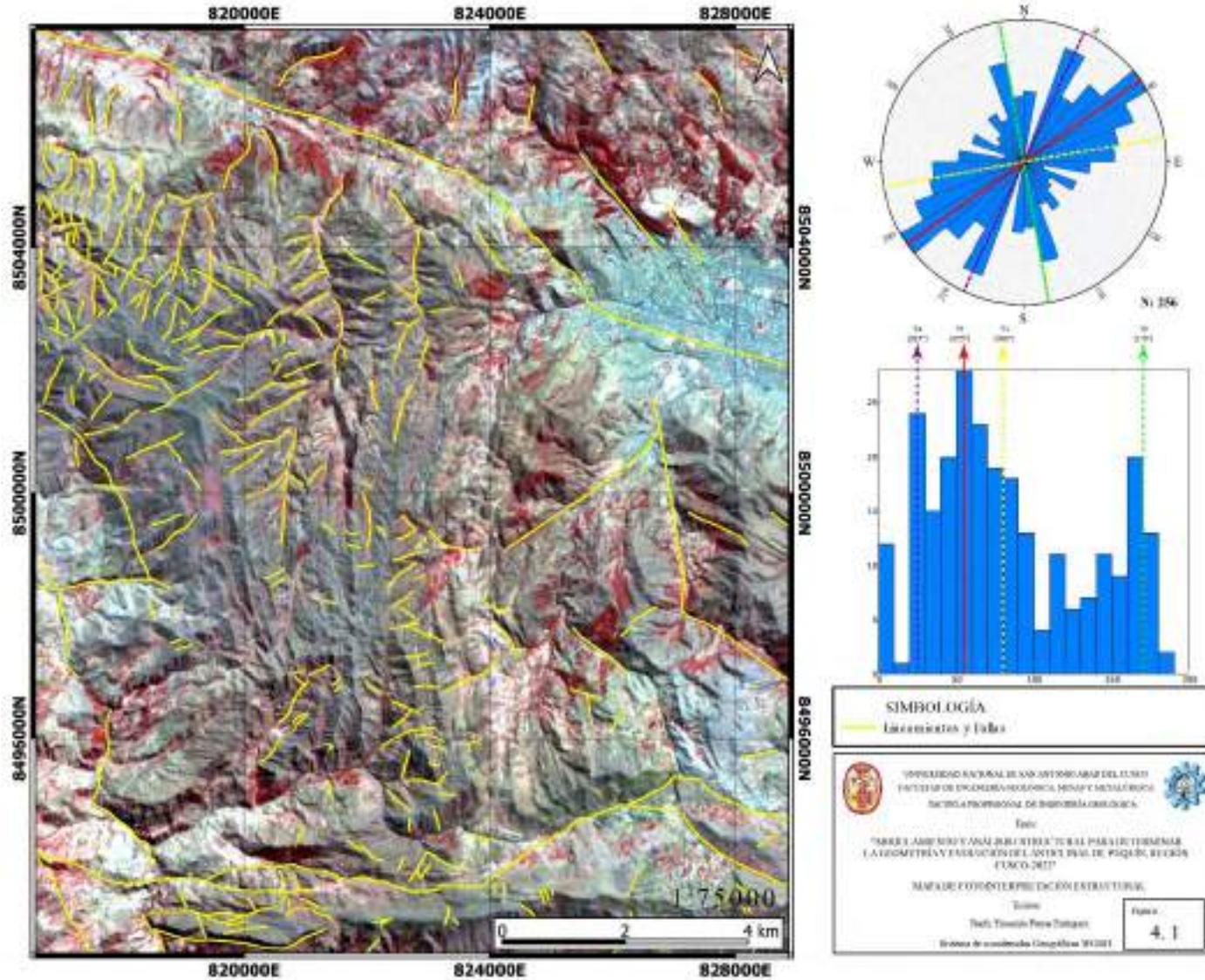
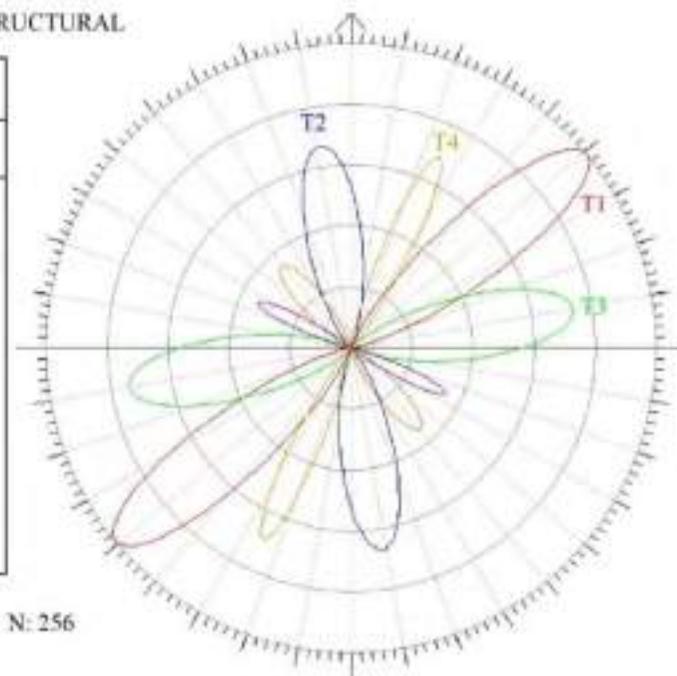


Figura 4. 1: Mapa de fotointerpretación estructural mostrado en una imagen Aster L1T. El diagrama de roseta (arriba a la derecha) de la frecuencia azimutal de las estructuras geológicas realizadas con el procesamiento de imágenes satelitales muestra las cuatro tendencias estructurales del área de estudio, debajo de la roseta se ve un histograma, del mismo modo refleja las tendencias. Fuente: Elaboración propia.

TENDENCIAS DE FOTOINTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

GAUSSIAN PARAMETERS			
#	%	Azimuth	sd
1	55,55	50,54°	8,99°
2	43,95	171,22°	10,65°
3	50,78	80,16°	11,14°
4	22,59	24,80°	5,32°
5	18,94	139,50°	8,76°
6	10,59	115,88°	5,02°

N: Número de datos



N: 256

Figura 4. 2: Resultados del ajuste gaussiano polimodal del total de estructuras fotointerpretadas mediante el software Daisy3. Fuente: Elaboración propia.

4.2 ESTACIONES ESTRUCTURALES

Para la recolección de datos estructurales como estratificaciones, vetillas, foliaciones, fracturas y fallas que se encuentran impresas en rocas mesozoicas y cenozoicas del anticlinal de Puquín, se ha realizado 23 estaciones estructurales (Figura 4.3), en la tercera campaña de campo de un total de 15 días.

Para cada estación estructural se ha considerado mostrar el afloramiento del cual se han obtenido los datos, delimitar las estructuras geológicas y esquematizar o representar las estructuras de imágenes de estaciones que se consideran claves para la interpretación, pero del mismo modo según el procesamiento se mostrará en el subcapítulo de Análisis estructural de las estaciones estructurales.

4.2.1 ESTACIÓN 1- E1

Ubicado al sureste del poblado de Mayrasco (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Kayra como areniscas finas, medias a gruesas feldespáticas, intercaladas con niveles de lutitas rojas, se recolectaron 56 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de calcita de 4 mm hasta 5 cm, fracturas (Figura 4. 4) y fallas con cinemática en donde se tomaron 13 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; en general tanto fallas con y sin cinemática determinadas por presentar espejos de falla, fibras de recristalización de calcita, estrías y movimientos de capas (desnivel de capa guía).

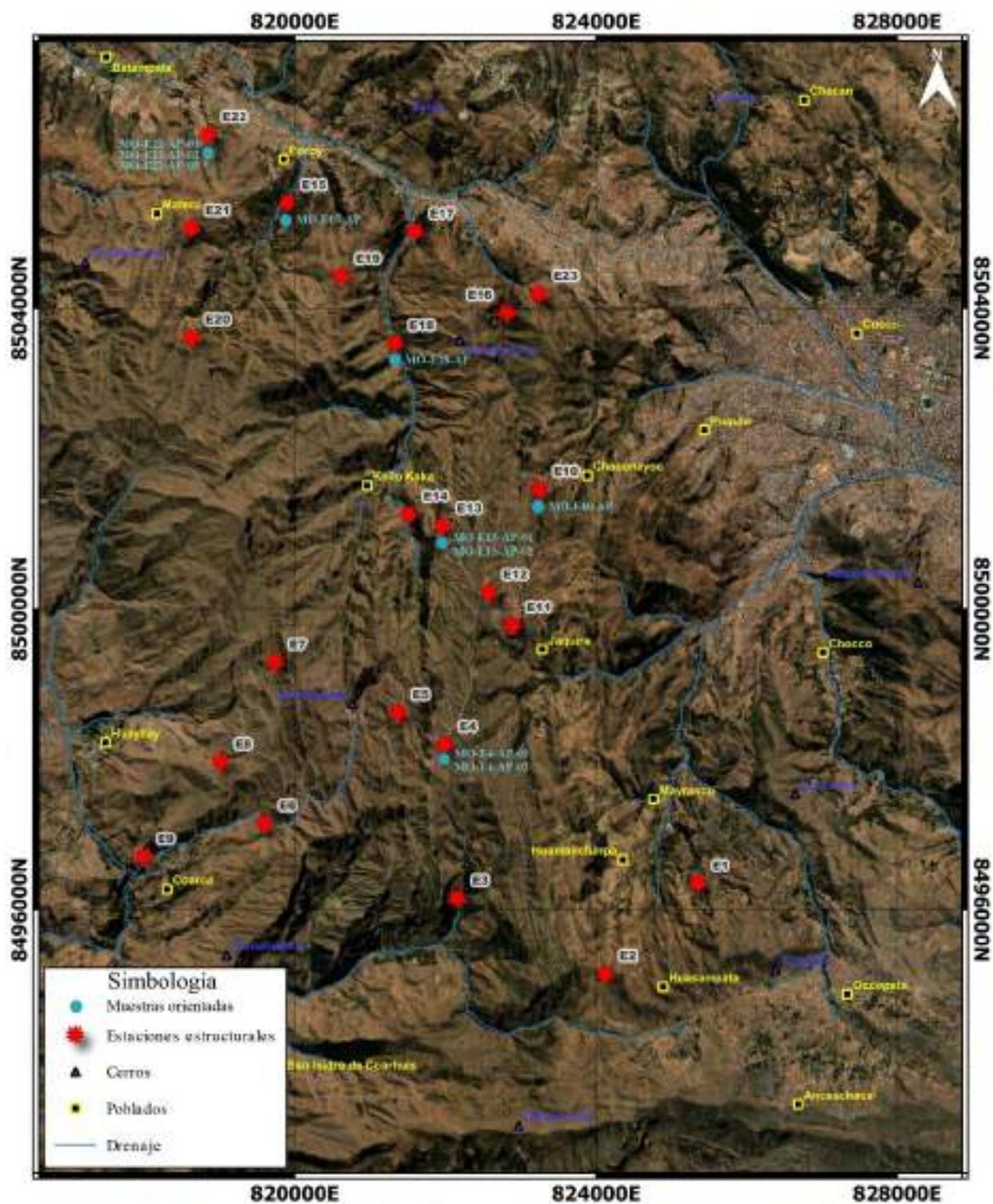


Figura 4. 3: Mapa de ubicación de las estaciones estructurales y muestras orientadas. Fuente: Elaboración propia.

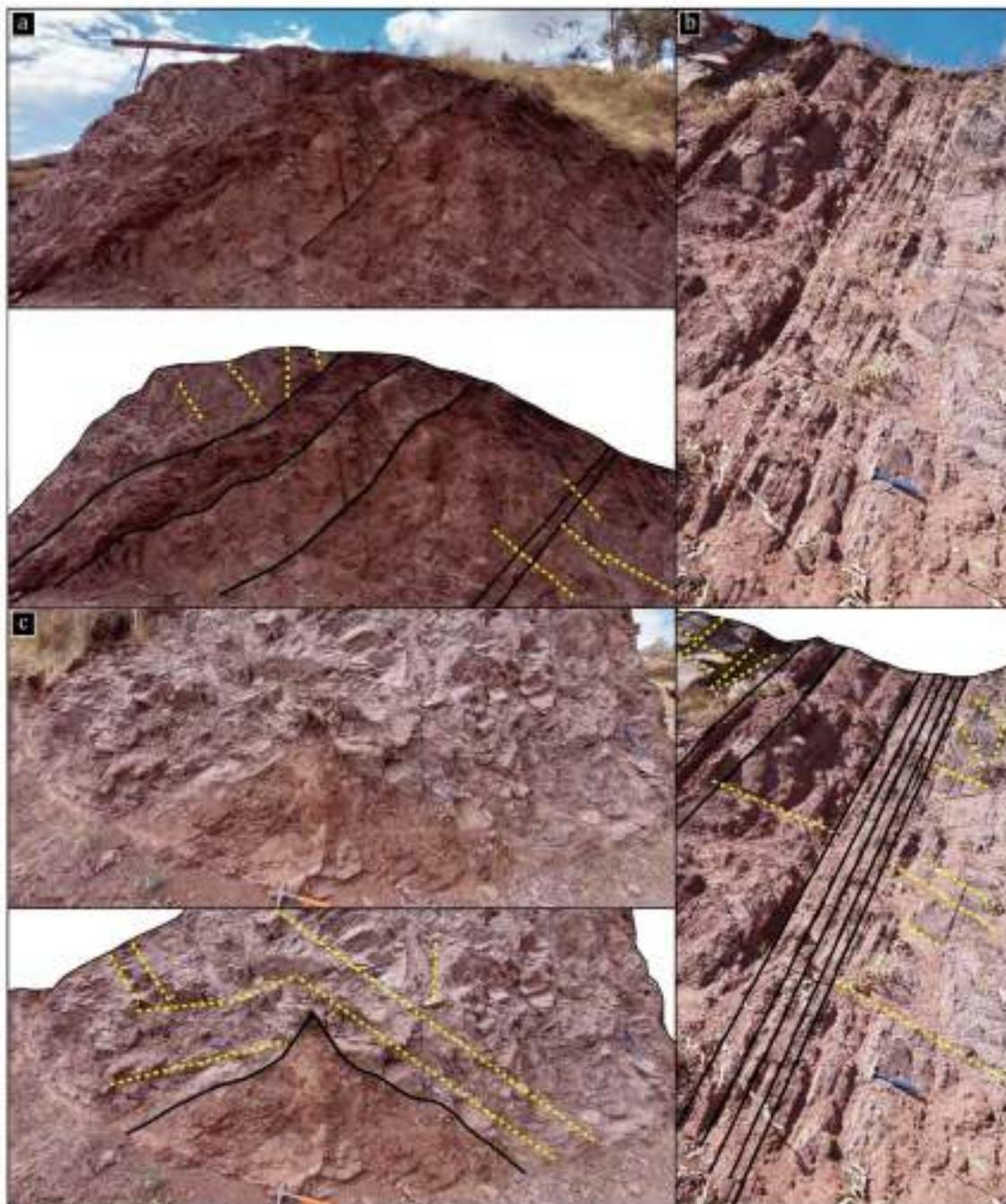


Figura 4. 4: Estación estructural E1. (a) y (b) muestran la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fracturas (color amarillo con línea discontinua) y (c) Intrusión de un material más fino sobre areniscas de grano medio a grueso. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 ESTACIÓN 2- E2

Ubicado al oeste del poblado de Huasampata (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Puquín (Figura 4. 5) como lutitas rojas, verdes y moradas ricas en materia orgánica, yesos, margas y areniscas feldespáticas de color rojo, se recolectaron 29 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática

relativa y sin cinemática; determinados por presentar movimientos de capas (desnivel de capa guía).

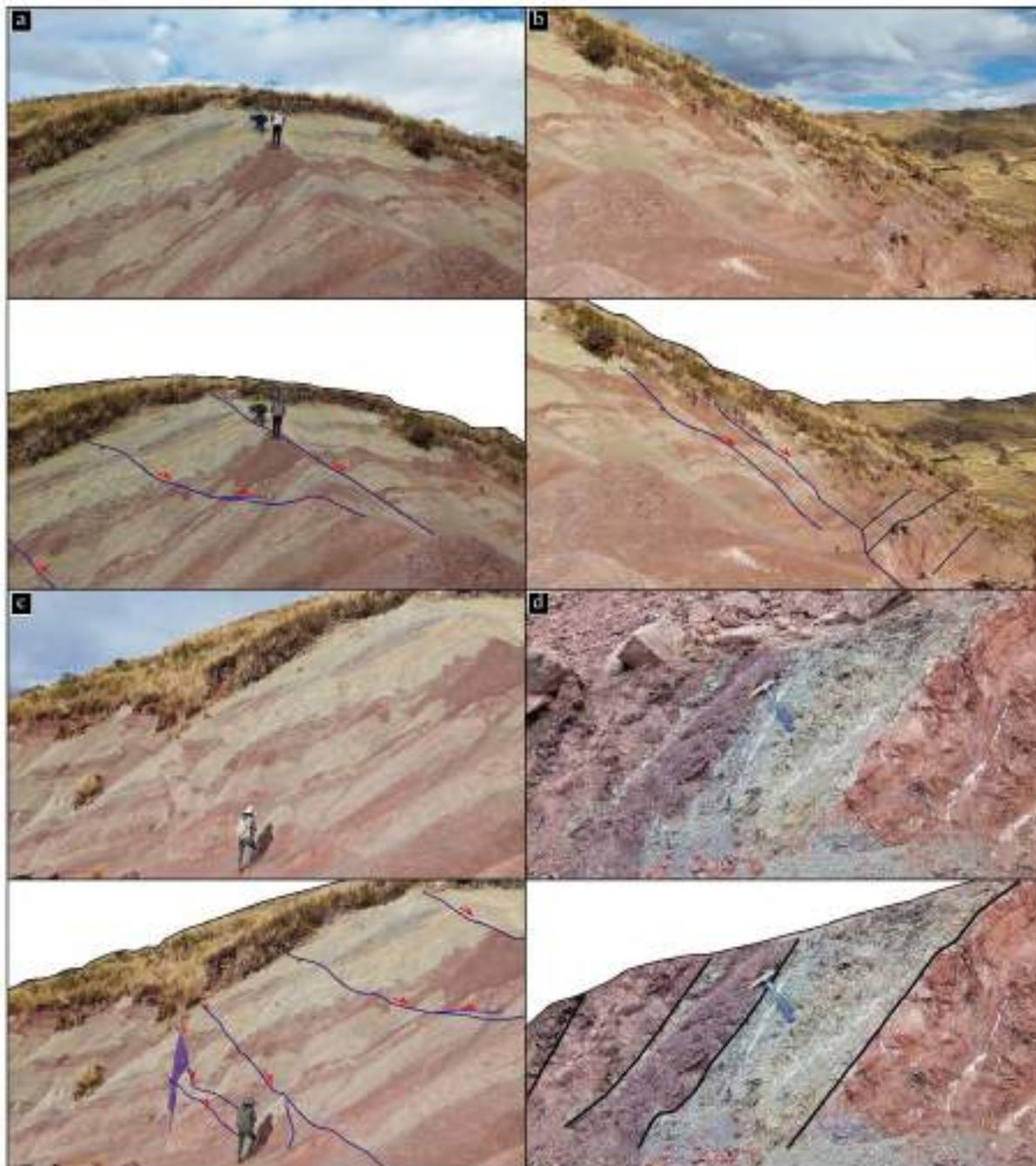


Figura 4. 5: Estación estructural E2. (a), (b), (c) y (d) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fallas (color azul con línea continua y flechas de color rojo que indican el movimiento). Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 ESTACIÓN 3- E3

Ubicado al suroeste del poblado de Huamancharpa (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 49 datos (Anexo 2) en esta

estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de calcita de 1 mm, fracturas (Figura 4. 6) y fallas con cinemática en donde se tomaron 07 datos lineales de estría (pitch), determinados por presentar fibras de recristalización de calcita y estrías.



Figura 4. 6: Estación estructural E3. (a), (b), (c) y (d) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fracturas (color amarillo con línea discontinua). Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 ESTACIÓN 4- E4

Ubicado al suroeste del poblado de Jaquira (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 84 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de calcita, foliaciones (S_1) fracturas (Figura 4. 7 y 4. 8), fallas con cinemática en donde se tomaron 25 datos lineales de estría (pitch) y fallas con cinemática relativa; en general las fallas son determinados por presentar fibras de recristalización de calcita, estrías y movimientos de capas (desnivel de capa guía). En la Figura 4. 7 se observa la deformación antes del plegamiento del anticlinal de Puquín, por ello se realiza un pequeño diagrama conceptual del pliegue, haciendo la reconstrucción con las estructuras que se conservan en dicha zona.

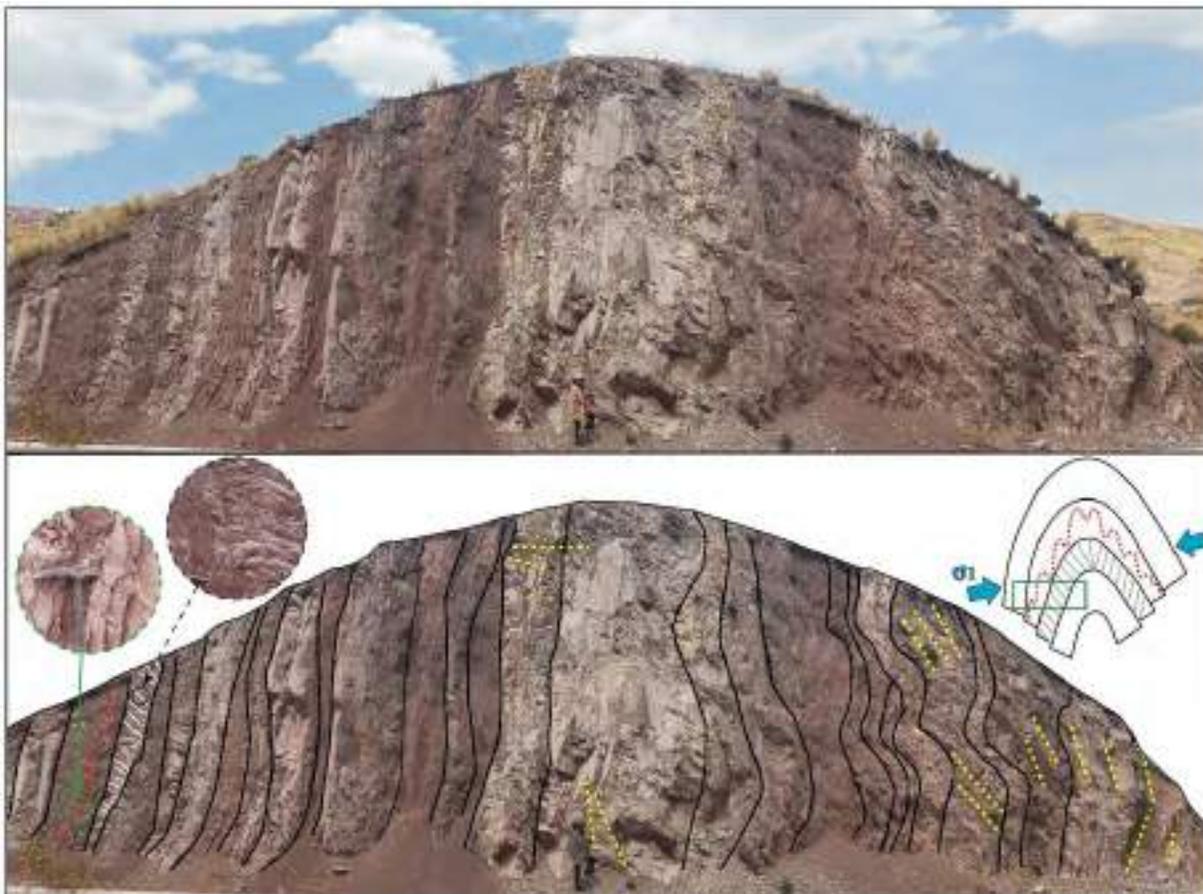


Figura 4. 7: Estación estructural E4. Esta es una estación en donde se observa la deformación antes del plegamiento y se realiza un pequeño diagrama conceptual del pliegue y la zona que se estaría observando (rectángulo verde) según las estructuras geológicas encontradas como son foliaciones, estratificación casi paralela y las estructuras tipo Z en este flanco. La delimitación de la estratificación (color negro), la foliación (color blanco), estructuras tipo Z (color rojo) y las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

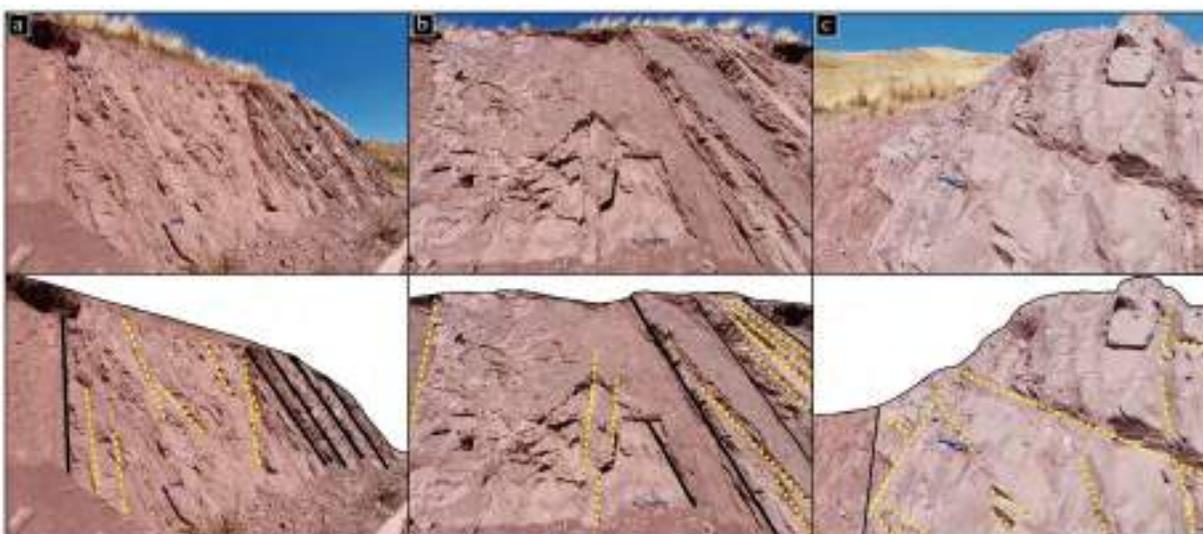


Figura 4. 8: Estación estructural E4. (a), (b) y (c) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fracturas (color amarillo con línea discontinua). Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 ESTACIÓN 5- E5

Ubicado al suroeste del poblado de Jaquira (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Kayra como areniscas finas, medias a gruesas feldespáticas, intercaladas con niveles de lutitas rojas, se recolectaron 56 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de calcita de 5 cm, fracturas, fallas con cinemática (Figura 4. 9) en donde se tomaron 10 datos lineales de estría (pitch) y fallas con cinemática relativa; en general determinados por presentar fibras de recristalización de calcita, riedel, estrías, escalones cristalizados y movimientos de capas (desnivel de capa guía).

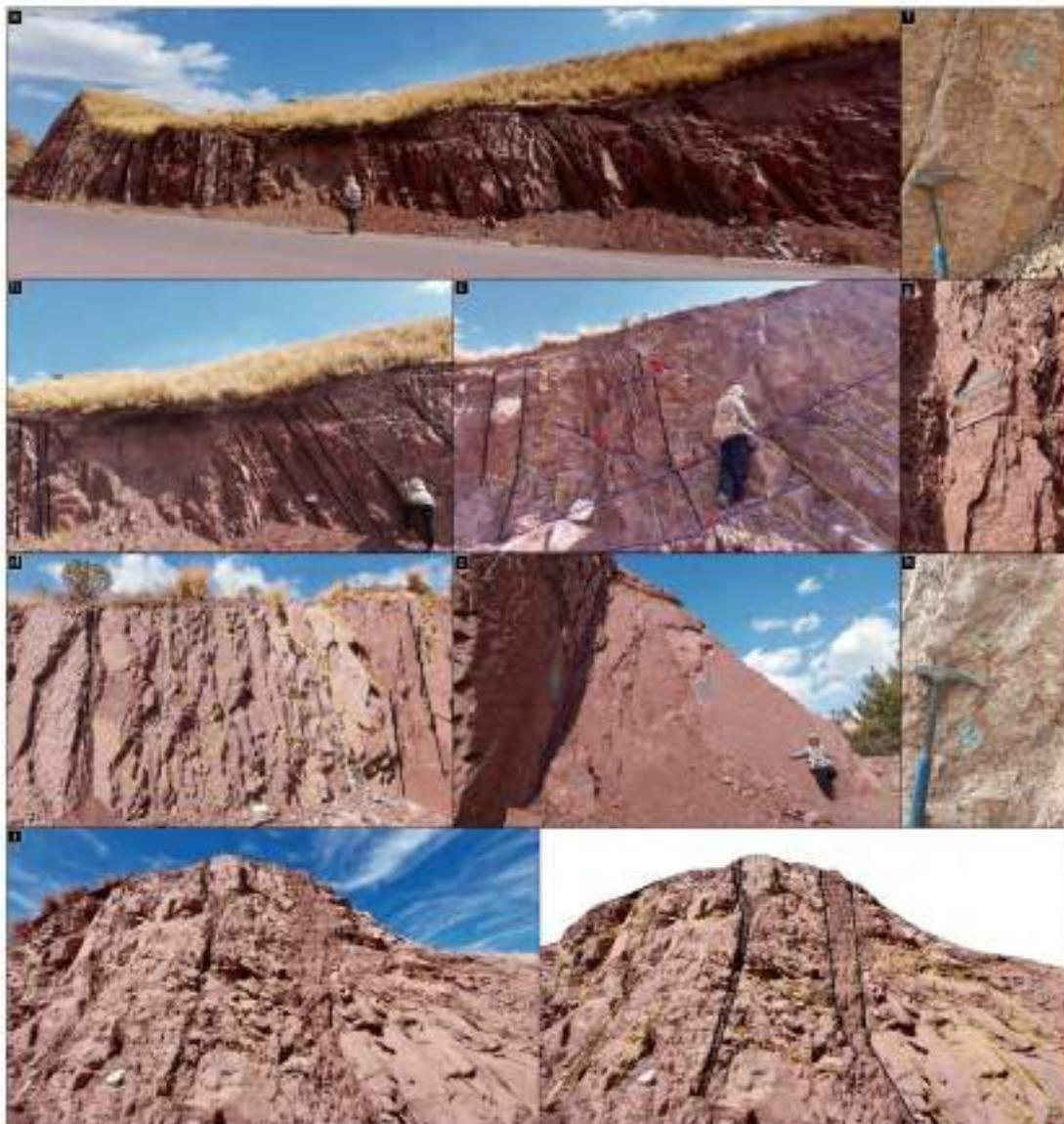


Figura 4. 9: Estación estructural E5. (a) y (b) muestra la delimitación de la estratificación, (c) delimita la estratificación (color negro), las fracturas (color amarillo) y las fallas (color azul) acompañadas con flechas (color rojo) que indican el movimiento, (d) delimita las fracturas en una dirección (color amarillo) y la estratificación (color negro), (e) con flechas de color celeste muestra el movimiento de las fallas, (f) y (h) algunos indicadores cinemáticos que presentan las fallas: estas fibras de recristalización nos indican el movimiento hacia abajo, (g) algunos indicadores cinemáticos que presentan las fallas: estas estructuras tipo riedel e (i) muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas en diferentes direcciones (color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

4.2.6 ESTACIÓN 6- E6

Ubicado al noreste del poblado de Ccorca (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Soncco como lutitas rojas, areniscas finas (con mineralización de Cu), areniscas con clastos blandos y conglomerados con clastos volcánicos, se recolectaron 32 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de calcita, fracturas (Figura 4. 10) y fallas con cinemática en donde se tomaron 04 datos lineales de estría (pitch); determinados por presentar estrías y espejos de falla.

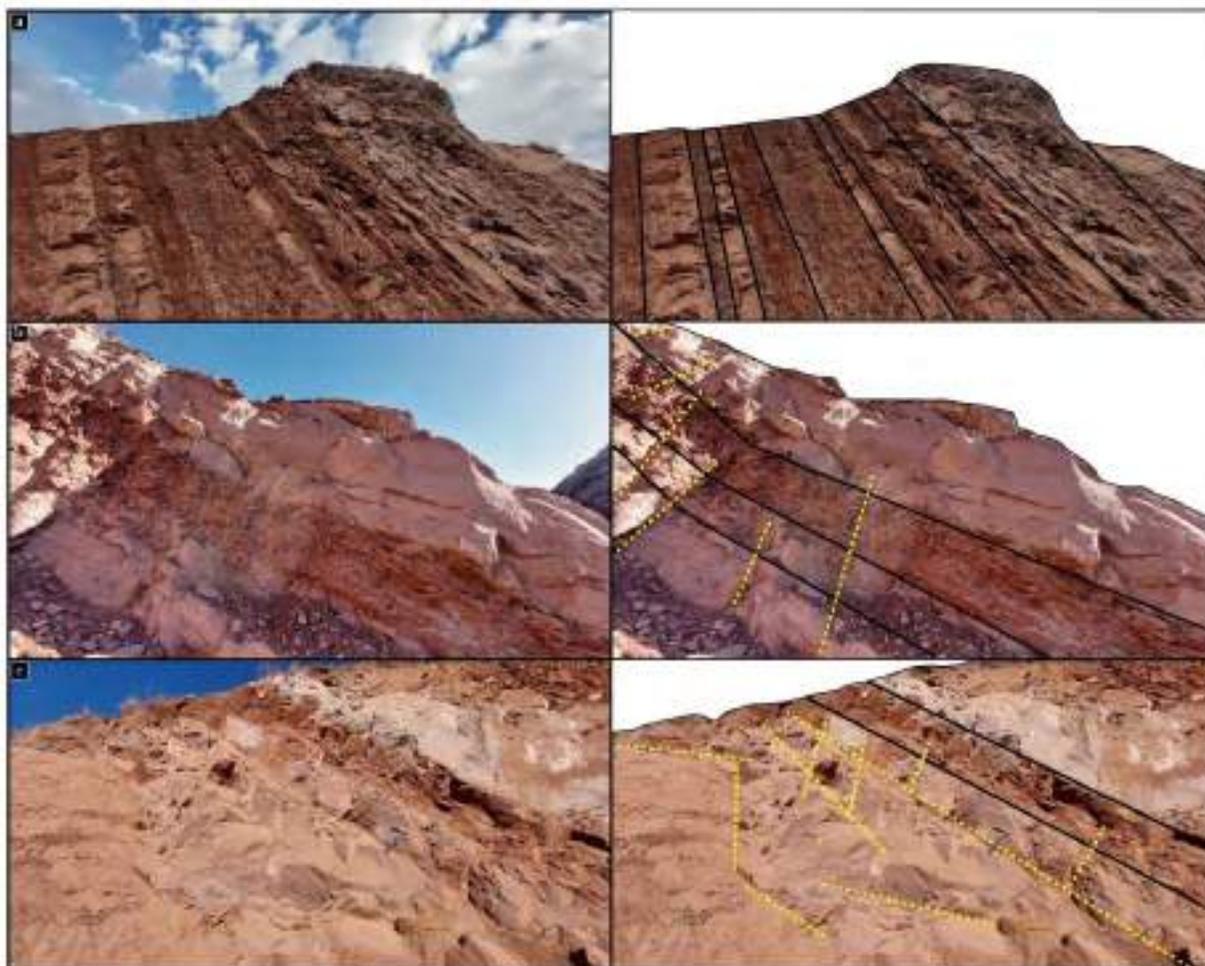


Figura 4. 10: Estación estructural E6. (a) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua), (b) y (c) muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

4.2.7 ESTACIÓN 7- E7

Ubicado al noroeste del cerro de Huenacocha (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Soncco como lutitas rojas, areniscas finas (con mineralización de Cu), areniscas con clastos blandos y conglomerados con clastos volcánicos, se recolectaron 42 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de calcita de 2 mm, fracturas (Figura 4. 11) y fallas con cinemática en donde se tomaron 13 datos lineales de estría (pitch); determinados por presentar estrías, fibras de recristalización y costras de calcita.

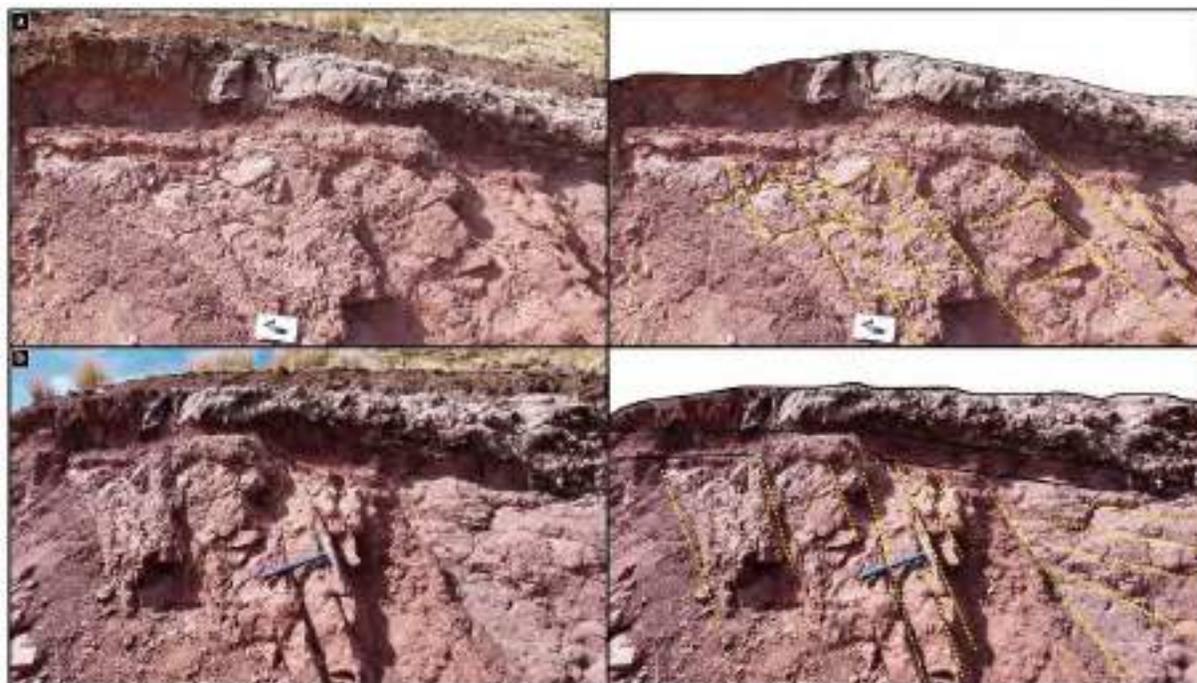


Figura 4. 11: Estación estructural E7. (a) muestra la delimitación de las fracturas (color amarillo), (b) muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

4.2.8 ESTACIÓN 8- E8

Ubicado al sureste del poblado de Huayllay (Figura 4. 3), donde afloran rocas volcanosedimentarias del Grupo Tacaza como brechas, lahares, volcanoclásticos con componentes de calizas subangulosas y clastos de andesitas, tobas líticas brechadas y alteradas, se recolectaron 11 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas (Figura 4. 12) y falla sin cinemática; determinado por presentar costras de calcita, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).

4.2.9 ESTACIÓN 9- E9

Ubicado al noroeste del poblado de Ccorca (Figura 4. 3), donde afloran rocas volcanosedimentarias del Grupo Tacaza como brechas, lahares, volcanoclásticos con componentes de calizas subangulosas y clastos de andesitas, tobas líticas brechadas y alteradas, se recolectaron 28 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de 2 mm hasta 4 mm, fracturas algunas con recristalización de calcita (Figura 4. 13 y 4. 14) y fallas con cinemática en donde se tomaron 04 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; en general determinados por presentar fibras de recristalización de calcita y movimiento de capa (desnivel de capa guía).



Figura 4. 12: Estación estructural E8. (a) muestra la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), (b) en la imagen izquierda muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas (color amarillo) al lado derecho. Fuente: Elaboración propia.

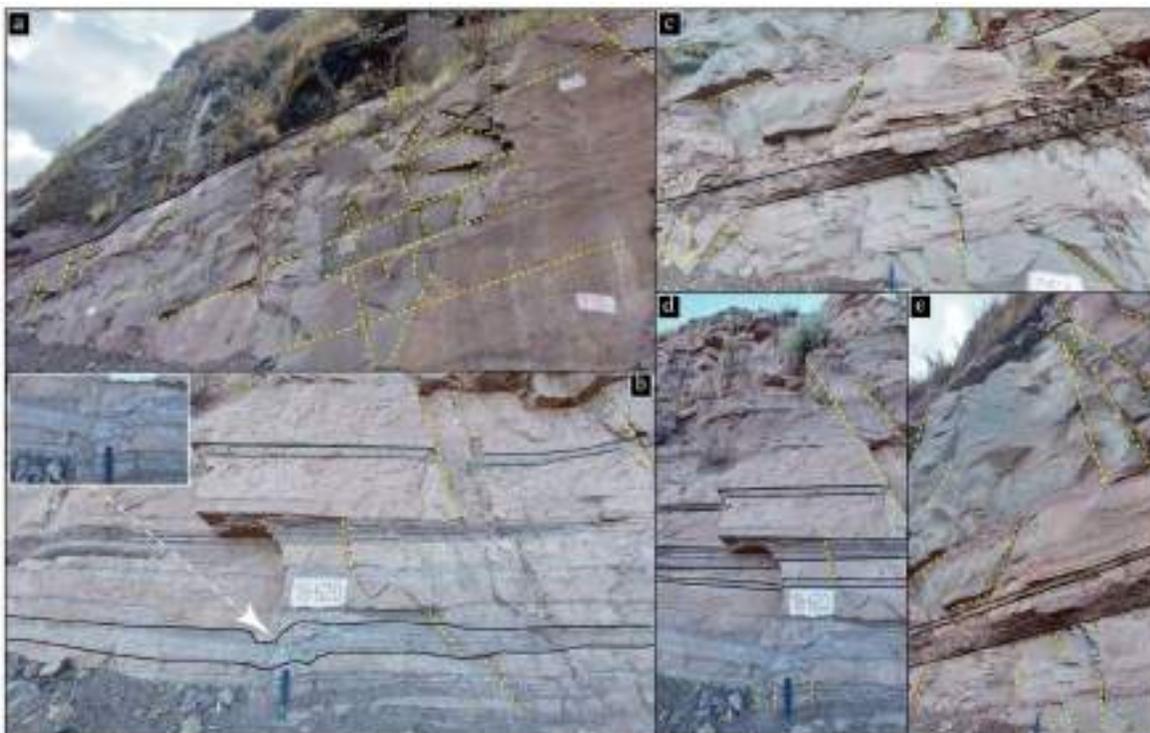


Figura 4. 13: Estación estructural E9. (a), (b), (c), (d) y (e) muestra la delimitación de las fracturas en varias direcciones (color amarillo) y estratificación (color negro), en la imagen b se observa algunos paleocanales. Fuente: Elaboración propia.

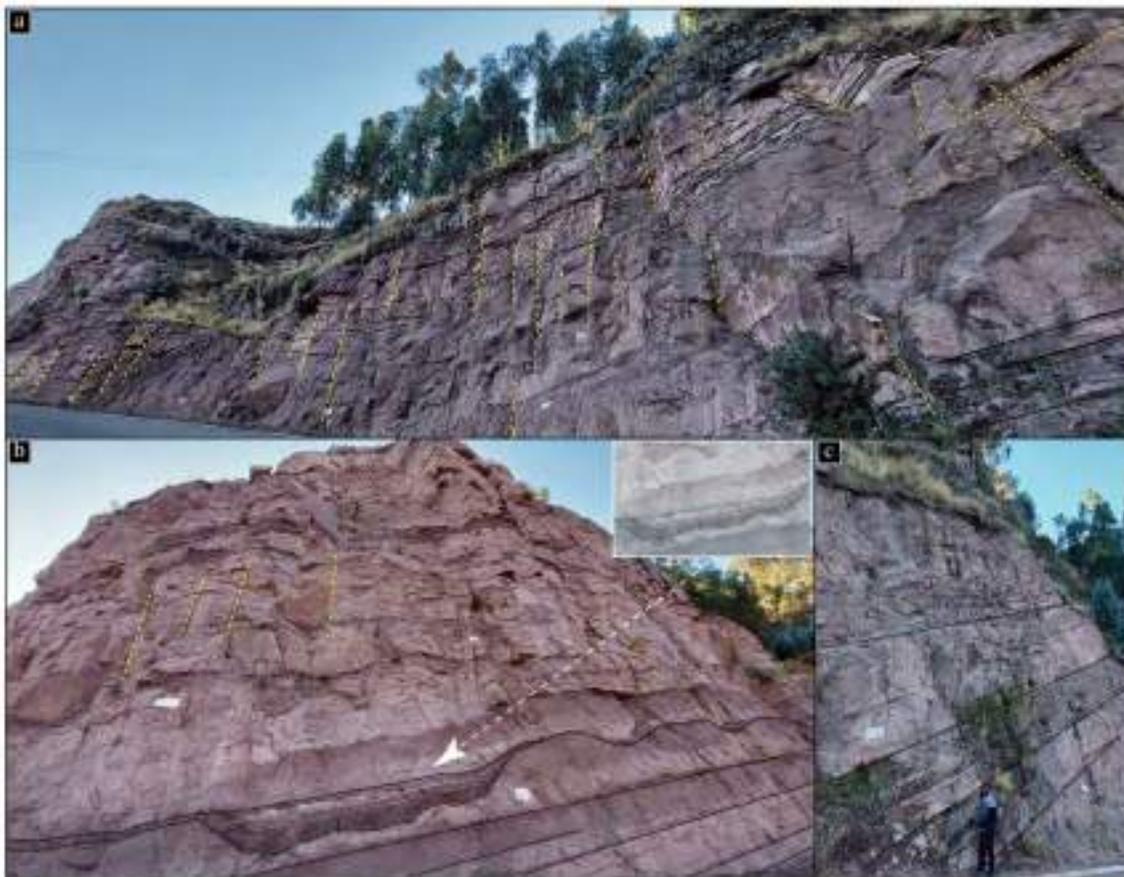


Figura 4. 14: Estación estructural E9. (a), (b), y (c) muestra la delimitación de las fracturas en varias direcciones (color amarillo) y estratificación (color negro), en la imagen (b) se observa algunos paleocanales con materiales más finos. Fuente: Elaboración propia.

4.2.10 ESTACIÓN 10- E10

Ubicado al oeste del poblado de Chaconayoc (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Quilque (Figura 4. 17) como lutitas, areniscas de color rojo y conglomerados con costras calcáreas y calizas en contacto con la Formación Puquín (Figura 4. 15 y 4. 16) como lutitas rojas, verdes ricas en materia orgánica, yesos, calizas, margas y areniscas feldespáticas de color rojo, se recolectaron 28 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de 1 cm hasta 2 cm, vetillas extensionales, algunas fracturas con recristalización de calcita (Figura 4. 17) y fallas con cinemática en donde se tomaron 06 datos lineales de estría (pitch) y fallas con cinemática relativa; en general las fallas son determinados por presentar fibras de recristalización de calcita y movimiento de capa (desnivel de capa guía).

En la Figura (4. 15 a) se muestra dos fallas normales con reactivación inversa y una falla inversa hacia la parte izquierda, en la Figura (4. 15 b) siguiendo las capas guía se determinan hacia la izquierda un conjunto de fallas normales paralelas y hacia el lado derecho una falla normal con reactivación inversa paralela al conjunto de fallas anterior, opuesta a esta inclinación se observa una falla normal; que estaría dejando interpretar un ambiente tectónico extensivo al cual llamaremos graben, en la Figura (4. 15 c) al lado izquierdo muestran fallas normales con similar inclinación y hacia la derecha fallas normales con reactivación inversa y más inclinadas, en la

Figura (4. 15 d) a la derecha muestran fallas normales paralelas con similar inclinación y a la izquierda falla normal con reactivación inversa más inclinada y en la Figura (4. 15 e) es una imagen casi ideal de un horst que muestra fallas que fueron normales, pero por reactivación pasan a ser inversas.



Figura 4. 15: Estación estructural E10. Fuente: Elaboración propia.

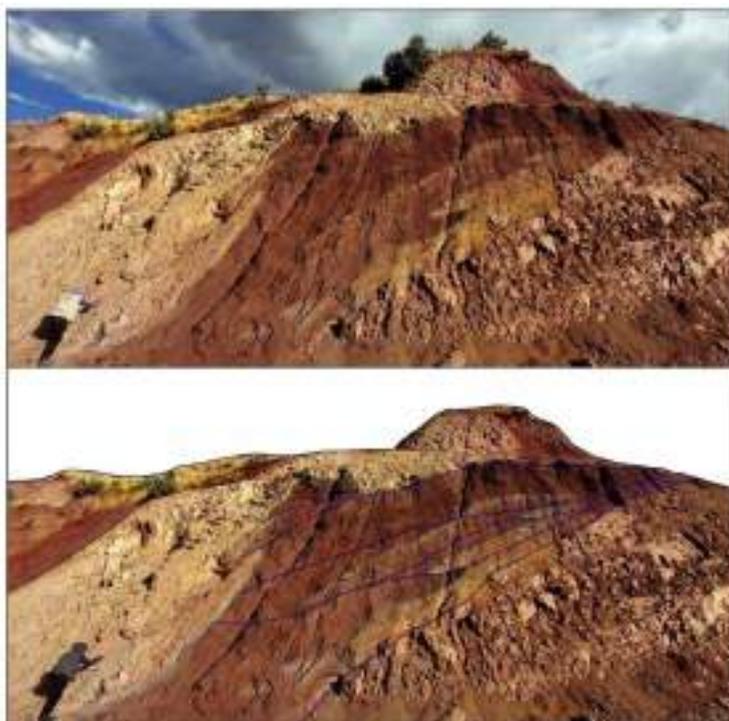


Figura 4. 16: Estación estructural E10. Muestra un conjunto de fallas normales que se reactivaron a inversas en litologías de la Formación Puquín. Fuente: Elaboración propia.

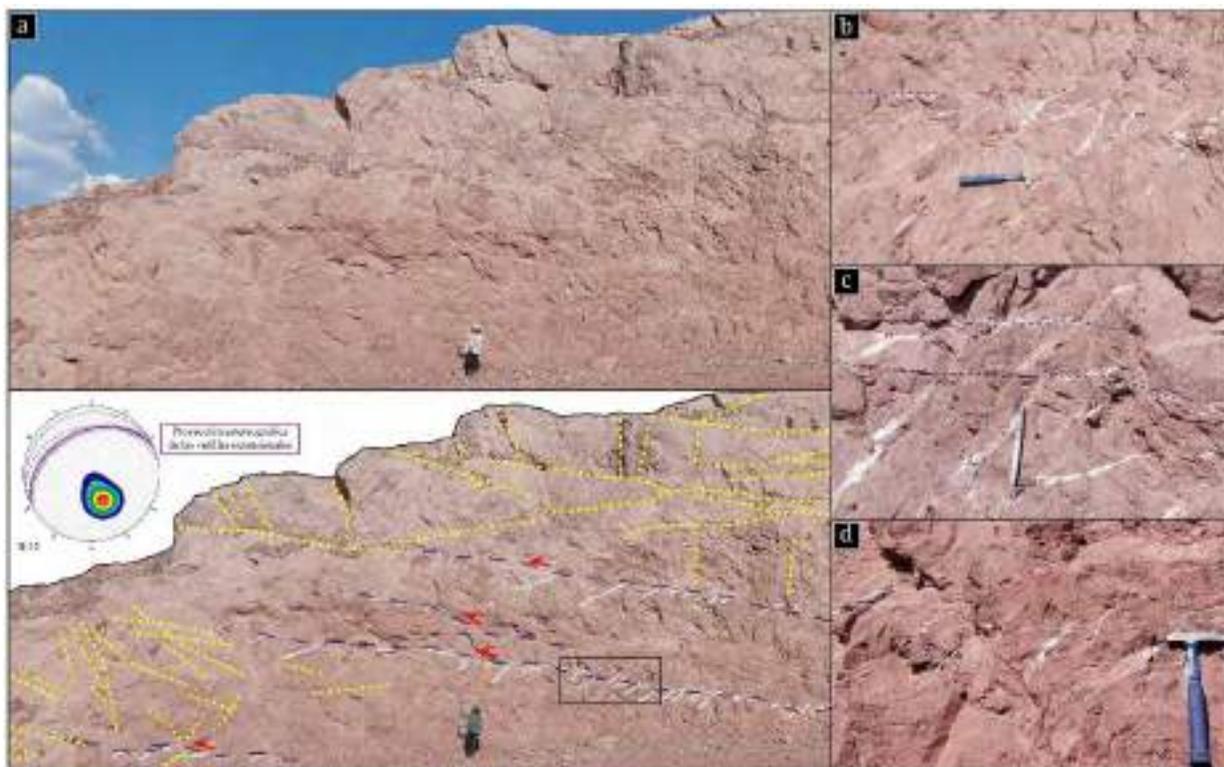


Figura 4. 17: Estación estructural E10. (a) muestra cuatro niveles de fallas inversas (color azul discontinuo) que están acompañadas en todo el trayecto por vetillas extensionales (color blanco), en la proyección estereográfica que se presenta se plotean los 12 planos de las vetillas extensionales teniendo una dirección NE-SO, (b) (c) y (d) muestra la ampliación de la imagen del rectángulo negro en la imagen (a) en la cual se puede diferenciar a mayor detalle las vetillas extensionales. Fuente: Elaboración propia.

4.2.11 ESTACIÓN 11- E11

Ubicado al noroeste del poblado de Jaquira (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Quilque (Figura 4. 18, 4. 19 y 4. 20) como lutitas, areniscas de color rojo y conglomerados con costras calcáreas y calizas, se recolectaron 73 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de 2 mm hasta 5 mm, vetillas extensionales y conjugadas, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 38 datos lineales de estría (pitch) y fallas con cinemática relativa; en general las fallas son determinados por presentar fibras de recristalización de calcita y movimiento de capa (desnivel de capa guía).

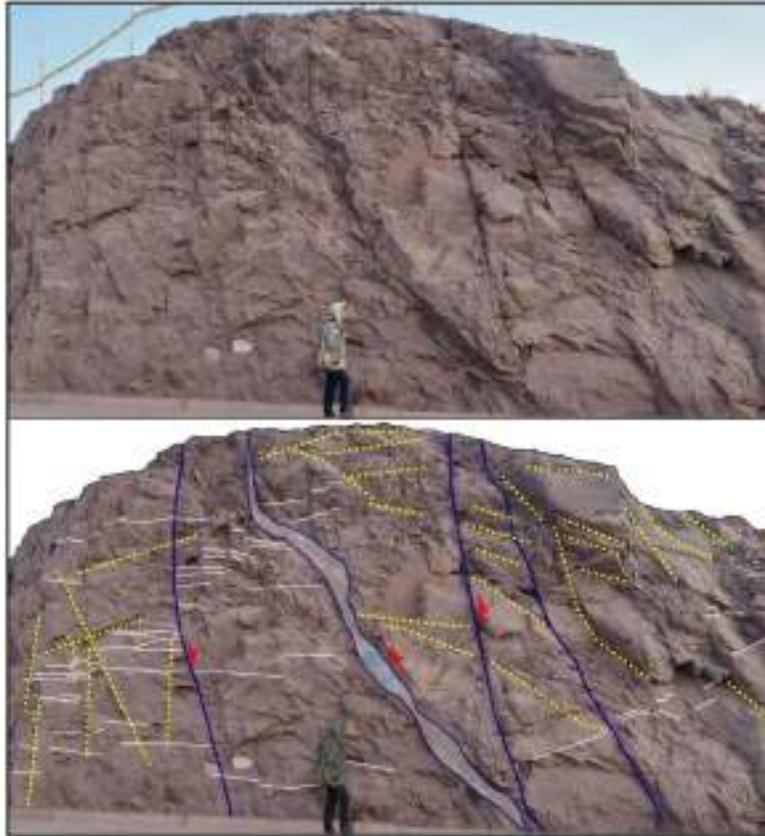


Figura 4. 18: Estación estructural E11. A la izquierda se observa una falla normal y a la parte derecha un conjunto de fallas inversas y una de ellas con un núcleo de falla mayor respecto a las otras del conjunto, también se delimitan las fracturas (color amarillo) y las vetillas extensionales (color blanco) que también indican relación de corte. Fuente: Elaboración propia.

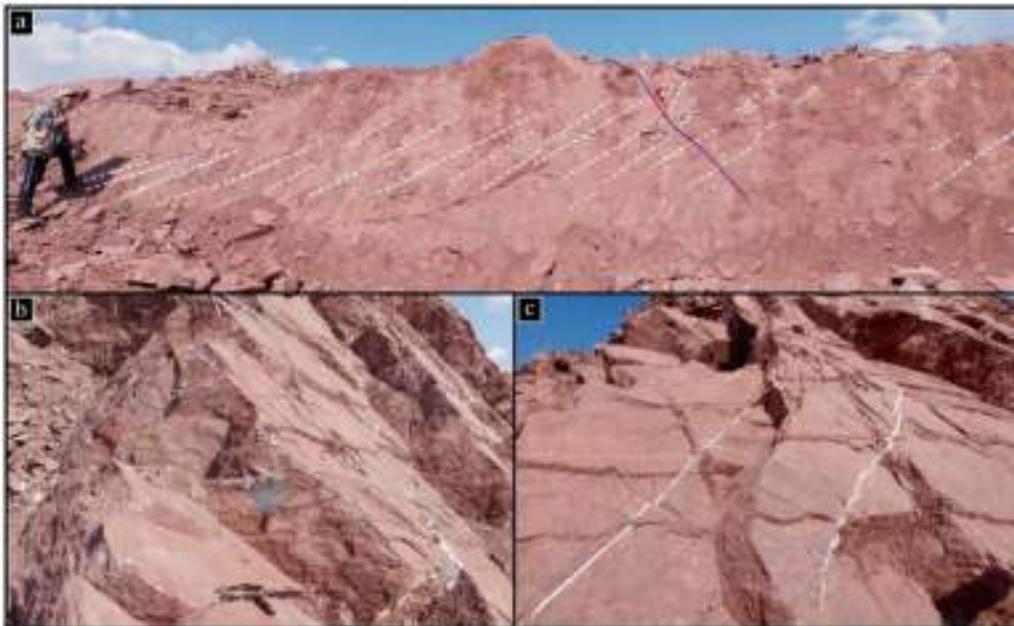


Figura 4. 19: Estación estructural E11. (a) Muestra la delimitación de las vetillas conjugadas (color blanco) con inclinación similar, (b) indicador cinemático: fibras de crecimiento indicando el movimiento de la falla y (c) vetillas conjugadas. Fuente: Elaboración propia.

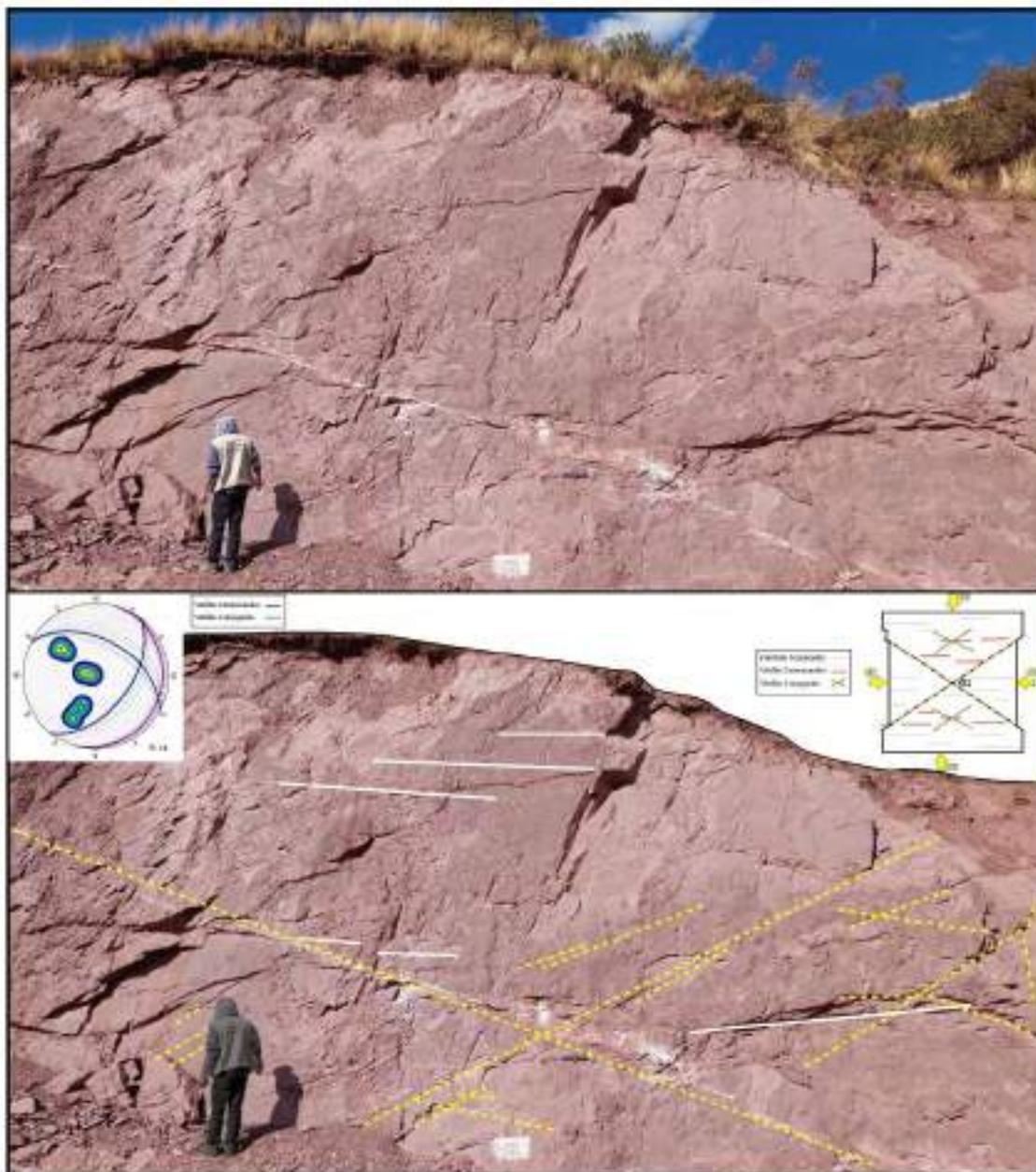


Figura 4. 20: Estación estructural E11. Muestra la delimitación de las vetillas conjugadas (color amarillo) con las vetillas extensionales (color blanco) a la parte izquierda tenemos la proyección estereográfica de estas estructuras y a la derecha un modelo esquemático de las vetillas conjugadas y vetillas extensionales con la dirección de paleoesfuerzos. Fuente: Elaboración propia.

4.2.12 ESTACIÓN 12- E12

Ubicado al noroeste del poblado de Jaquira (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Quilque (Figura 4. 21 y 4. 22) como lutitas, areniscas de color rojo y conglomerados con costras calcáreas y calizas, se recolectaron 73 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de 2 mm hasta 3 mm, vetillas extensionales, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 18 datos lineales de estría (pitch); determinados por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización de calcita y movimiento de capa (desnivel de capa guía).



Figura 4. 21: Estación estructural E12. (a) Muestra las fallas normales (color azul), teniendo en cuenta que la estratificación se encuentra paralela al corte de carretera y (b) delimitan las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

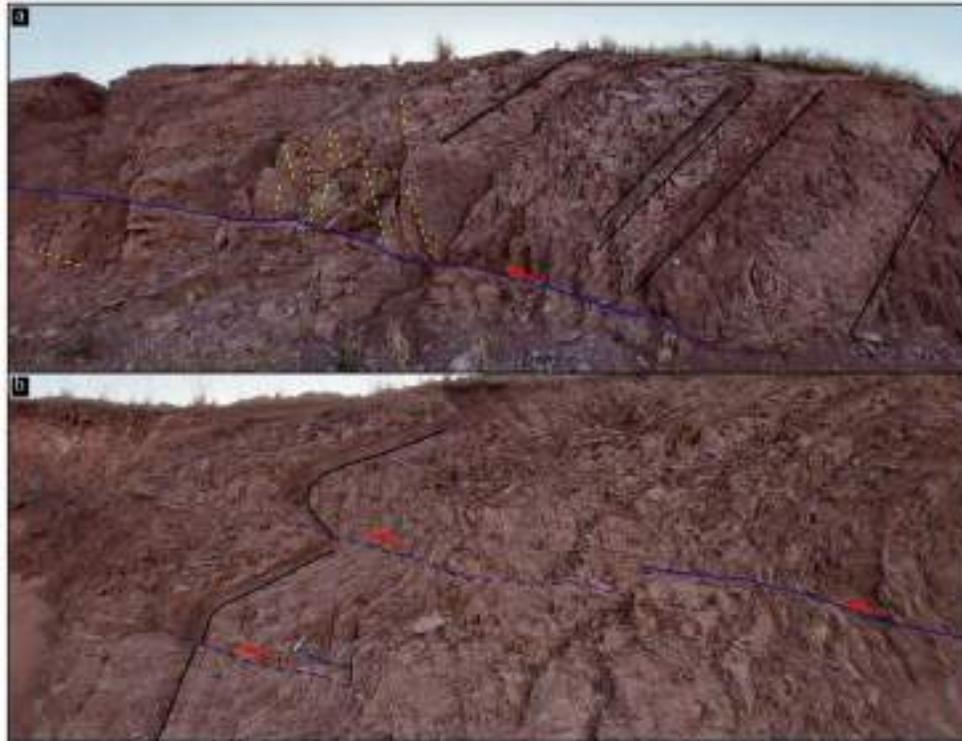


Figura 4. 22: Estación estructural E12. (a) Muestra la estratificación (color negro), falla inversa (color azul) y las fracturas (color amarillo) y (b) delimitan algunas fallas de similar inclinación (color azul) con movimiento inverso. Fuente: Elaboración propia.

4.2.13 ESTACIÓN 13- E13

Ubicado al sureste del poblado de Kello Kaka (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 23) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 12 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetilla de 1 mm, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 05 datos lineales de estría (pitch); determinados por presentar espejos de falla, estrías y fibras de recristalización de calcita.



Figura 4. 23: Estación estructural E13. (a) Espejo de falla con estrías que muestran la cinemática de la falla y (b) Muestran las fracturas (color amarillo) en diferente dirección. Fuente: Elaboración propia.

4.2.14 ESTACIÓN 14- E14

Ubicado al sureste del poblado de Kello Kaka (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Kayra (Figura 4. 24) como areniscas finas, medias a gruesas feldespáticas,

intercaladas con niveles de lutitas rojas, se recolectaron 28 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetilla de 1 mm hasta 4 mm, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 06 datos lineales de estría (pitch) y fallas con cinemática relativa; determinados por presentar espejos de falla, estrías y fibras de recristalización de calcita.



Figura 4. 24: Estación estructural E14. Toma de datos de fracturas y estratificación. Fuente: Elaboración propia.

4.2.15 ESTACIÓN 15- E15

Ubicado al sureste del poblado de Poroy (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Quilque (Figura 4. 25) como lutitas, areniscas de color rojo y conglomerados con costras calcáreas y calizas, se recolectaron 97 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 46 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; todas las fallas determinadas por presentar espejos de falla, estrías, riedel, fibras de recristalización de calcita y una de las fallas con un núcleo más visible en el que se observa la harina de falla.

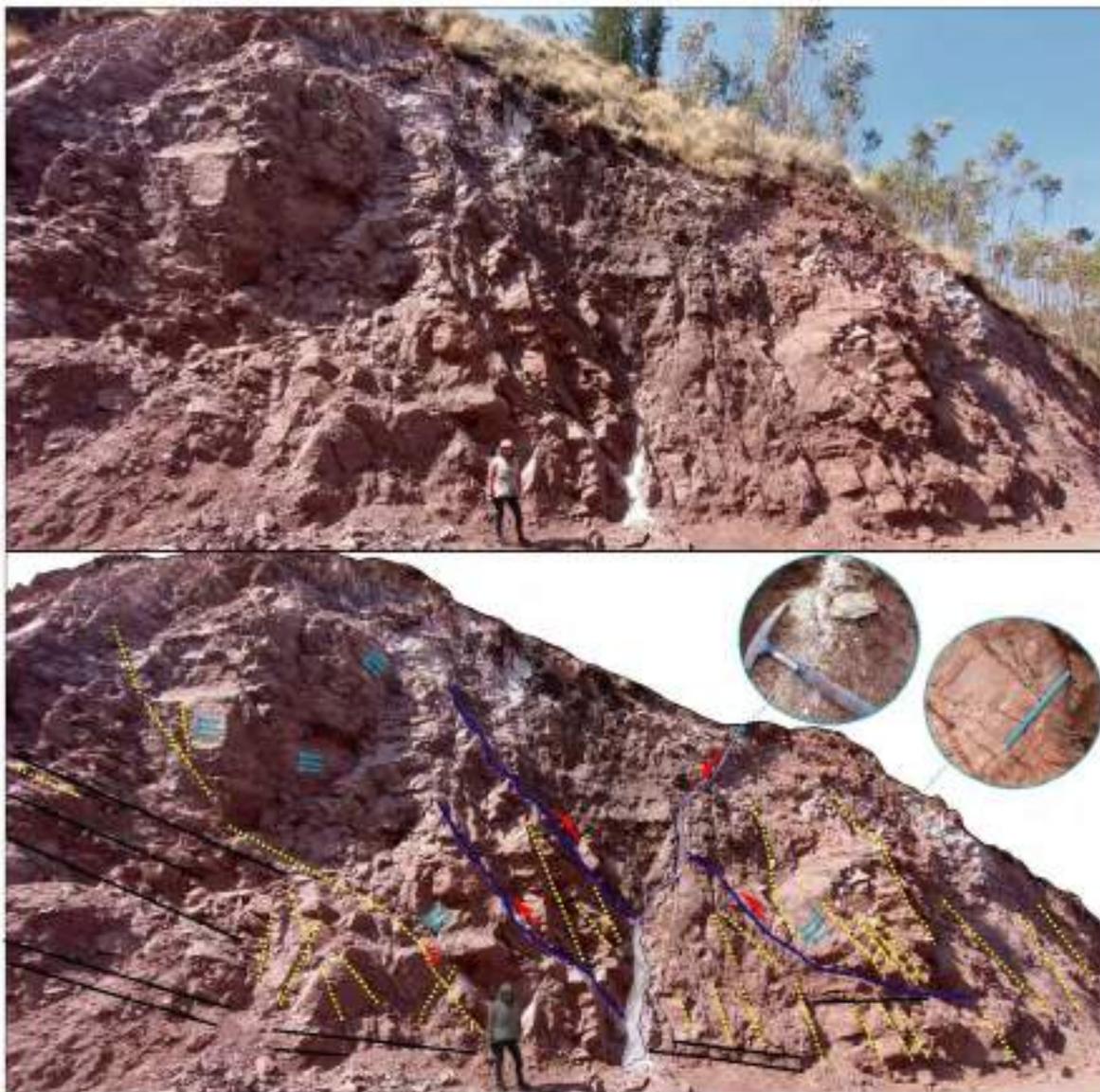


Figura 4. 25: Estación estructural E15. Se delimita las fallas (color azul), fracturas (color amarillo), estratificación (color negro) y las estrías de falla (color celeste) que indican la cinemática, a la derecha se observa dos imágenes ampliadas, una dejando ver la harina de falla y la otra un indicador cinemático tipo riedel. Fuente: Elaboración propia.

4.2.16 ESTACIÓN 16- E16

Ubicado al noreste del cerro de Rocacancha (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 26) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 134 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de 1 mm hasta 4 mm, vetillas extensionales, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 42 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; todas las fallas determinadas por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización.



Figura 4. 26: Estación estructural E16. (a) Se observa todo el espejo de falla con estrías y ampliaciones de imagen con indicadores cinemáticos de la falla y (b) se delimita la estratificación (color negro) y fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia.

4.2.17 ESTACIÓN 17- E17

Ubicado al sureste del cerro de Senja (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 27) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 40 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 13 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; todas las fallas determinadas por presentar espejos de falla, estrías, riedel, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).



Figura 4. 27: Estación estructural E17. Se observa todo el espejo de falla con estrías y ampliaciones de imagen con indicadores cinemáticos de la falla. Fuente: Elaboración propia.

4.2.18 ESTACIÓN 18- E18

Ubicado al oeste del cerro de Rocacancha (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 28) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 58 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas de 1 mm hasta 2 mm, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 15 datos lineales de estría (pitch) y fallas sin cinemática; todas las fallas determinadas por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).



Figura 4. 28: Estación estructural E18. (a) Se observa todo el espejo de falla con estrías (color celeste) y estratificación (color negro) y (b) se observan algunas fallas normales (color azul), fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro). Fuente: Elaboración propia.

4.2.19 ESTACIÓN 19- E19

Ubicado al sureste del poblado de Poroy (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 29) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 38 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 03 datos lineales de estría (pitch); determinados por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).



Figura 4. 29: Estación estructural E19. Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), también las estructuras tipo Z (indicando el movimiento con la flecha de color rojo). Fuente: Elaboración propia.

4.2.20 ESTACIÓN 20- E20

Ubicado al sureste del cerro de Cuchicancha (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Kayra (Figura 4. 30) como areniscas finas, medias a gruesas feldespáticas, intercaladas con niveles de lutitas rojas, se recolectaron 60 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 17 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; determinados por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).



Figura 4. 30: Estación estructural E20. Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro). Fuente: Elaboración propia.

4.2.21 ESTACIÓN 21- E21

Ubicado al este del poblado de Matero (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 31) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 121 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 28 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; determinados por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).

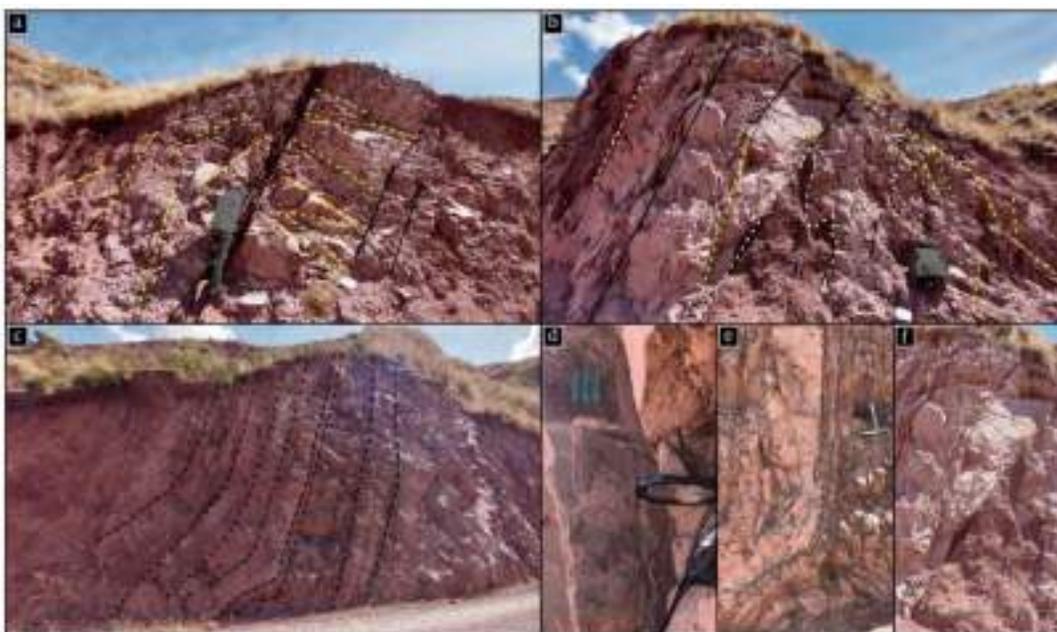


Figura 4. 31: Estación estructural E21. (a) Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), (b) aparte de la delimitación de tanto la estratificación y las fracturas, con color blanco se delimita la intrusión de un material más fino (f) que va desde una arenisca muy fina a fina de color rojizo en una arenisca feldespática de grano medio, (c) en la delimitación de la estratificación de color negro se puede observar una variación de la inclinación haciendo una curva (e) y variando las capas aflorantes y (d) Espejo de falla con estrías indicando movimiento. Fuente: Elaboración propia.

4.2.22 ESTACIÓN 22- E22

Ubicado al oeste del poblado de Poroy (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Chilca (Figura 4. 32) como lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas, se recolectaron 34 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), vetillas extensionales de 2 cm hasta 5 cm, fracturas y fallas con cinemática en donde se tomaron 15 datos lineales de estría (pitch), fallas con cinemática relativa y fallas sin cinemática; determinados por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).

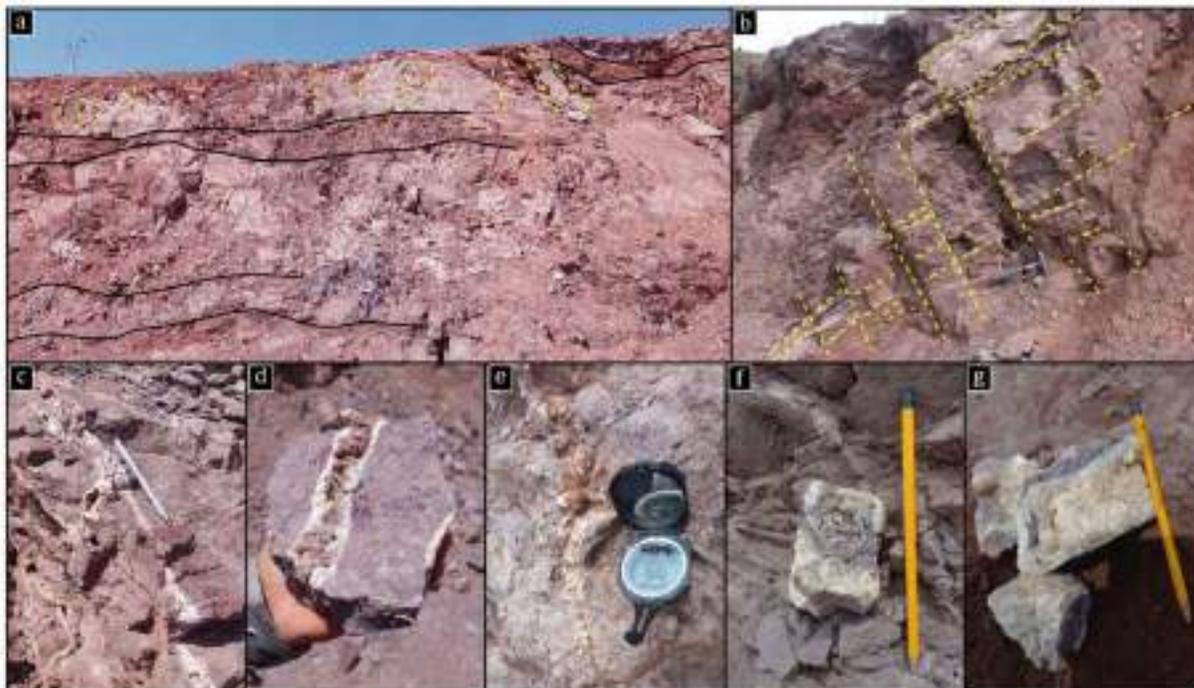


Figura 4. 32: Estación estructural E22. (a) y (b) Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), (c), (d), (e), (f) y (g) vetillas extensionales de calcita. Fuente: Elaboración propia.

4.2.23 ESTACIÓN 23- E23

Ubicado al noreste del cerro de Rocacancha (Figura 4. 3), donde afloran rocas sedimentarias de la Formación Quilque (Figura 4. 33 y 4. 34) como lutitas, areniscas de color rojo y conglomerados con costras calcáreas y calizas, se recolectaron 11 datos (Anexo 2) en esta estación, entre los cuales datos planares de estratificación (S_0), fracturas y fallas con cinemática en donde se tomó 01 dato lineal de estría (pitch) y fallas sin cinemática; determinados por presentar espejos de falla, estrías, fibras de recristalización y movimiento de capa (desnivel de capa guía).

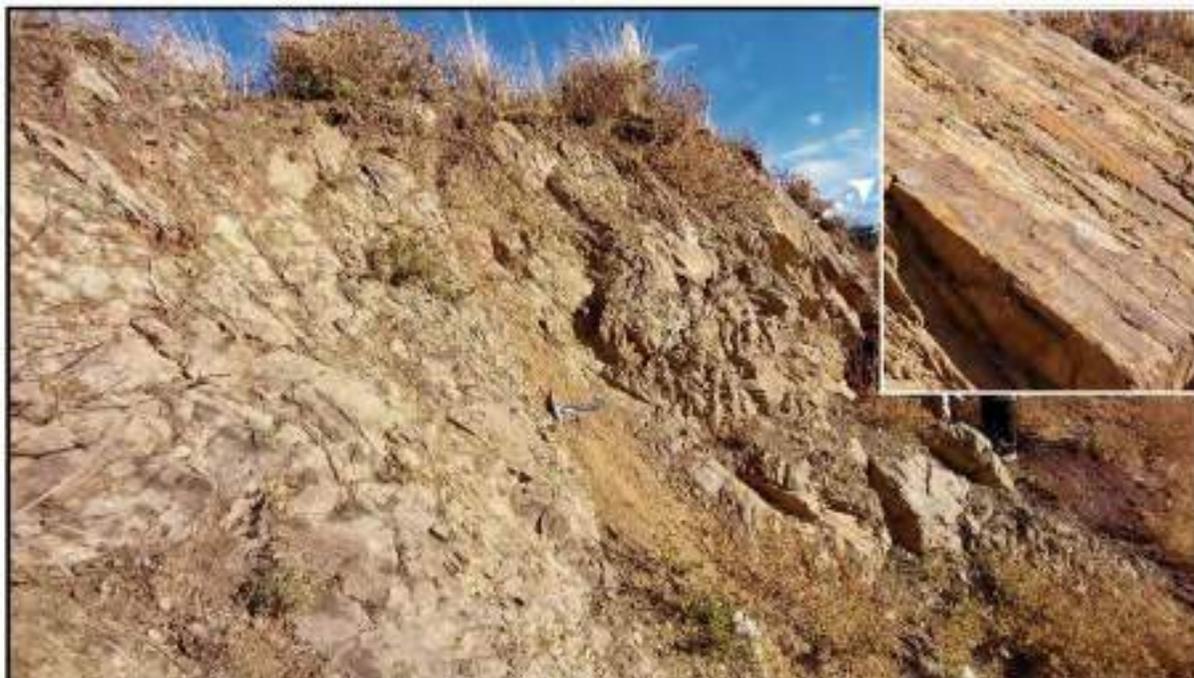


Figura 4. 33: Estación estructural E23. Fracturas con costra de calcita alterada. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. 34: Estación estructural E23. (a) y (b) Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro). Fuente: Elaboración propia.

4.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS ESTACIONES ESTRUCTURALES

Como ya se ha mencionado, la zona estudiada se enmarca en un área constituida mayoritariamente por rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias tanto del Mesozoico como del Cenozoico. Dentro de esta área es preciso señalar la presencia de estructuras como es el anticlinal de Puquín y la falla de Cusco. El objetivo del presente subcapítulo es describir, caracterizar y analizar el área de estudio y particularmente las estructuras asociadas al anticlinal de Puquín.

4.3.1 ANÁLISIS DE ESTRATIFICACIONES

Análisis de datos de estratificación de las estaciones estructurales.

La recolección de datos de estratificaciones se llevó a cabo en 23 estaciones estructurales (Anexo 2), zonas con buenas condiciones estructurales para la toma de información, evitando datos que puedan ser muy locales y por ende en el procesamiento de información vengan a ser datos aleatorios. Durante las visitas a campo se tomaron 227 (Figura 4. 35) datos de estratificaciones. A partir de las estaciones de control se efectuó una serie de medidas y en la mayoría de los casos la cantidad de datos varía según la estación.

La toma de datos de campo se realizó con la brújula Brunton, utilizando el método de la mano derecha, donde la medición del azimut (0-360°) y buzamiento (0-90°) de los planos de estratificaciones y al cual se le aplica la corrección de la declinación magnética que en Cusco es de 6.2°. Según el análisis de datos de estratificación, para determinar algunas características y presentar los resultados, se dividió el área en dos zonas, zona norte y zona sur, a partir de las 23 estaciones; 09 estaciones se encuentran en la zona norte (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) del área de estudio, las 14 estaciones restantes se ubican en el lado sur (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) del área de estudio (Figura 4. 3).

En lo que corresponde a las formaciones geológicas sobre los que se han tomado las medidas de estratificaciones, estas son rocas mesozoicas y cenozoicas tanto sedimentarias como volcánicas, así tenemos las formaciones sedimentarias Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el volcánico del Grupo Tacaza.

Para mostrar datos de orientación de estratificaciones haremos uso del Software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

ZONA NORTE

El análisis de poblaciones de estratificación se realiza con la aplicación de técnicas estadísticas a partir del tratamiento de los datos de orientación. En la zona norte se realiza el procesamiento de las 09 estaciones (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) realizadas en el del área de estudio con ayuda del software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Con un total de 80 datos de estratificación en esta zona norte del anticlinal de Puquín, se hace el gráfico de proyección estereográfica (Figura 4. 36) observando un conjunto de datos con orientación aproximadamente NO-SE, pero también se cuenta con algunos datos puntuales variables.

Como parte de la interpretación, estos datos forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 122/45 en el que posiblemente hay una rotación de estratificación debido a una estructura importante como la falla regional de Cusco. Al observar la proyección

estereográfica se cuenta con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos posteriores que originan deformación local y rotación de la estratificación.

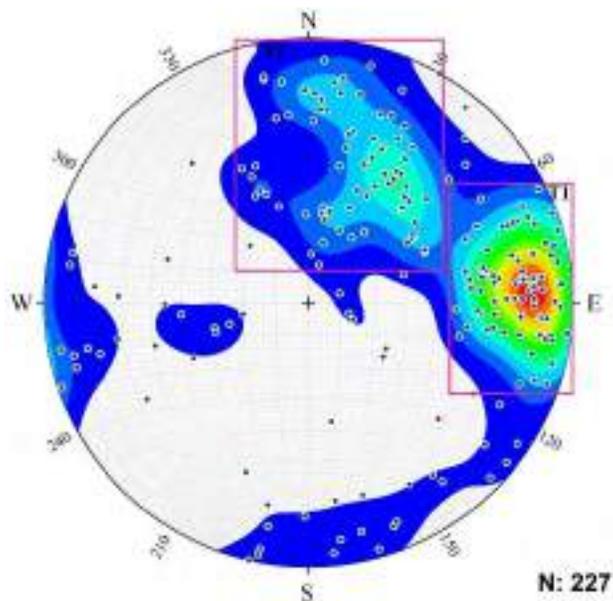


Figura 4.35: Proyección estereográfica de todos los datos de estratificación, se puede apreciar dos tendencias definidas T1 y T2. Fuente: Elaboración propia.

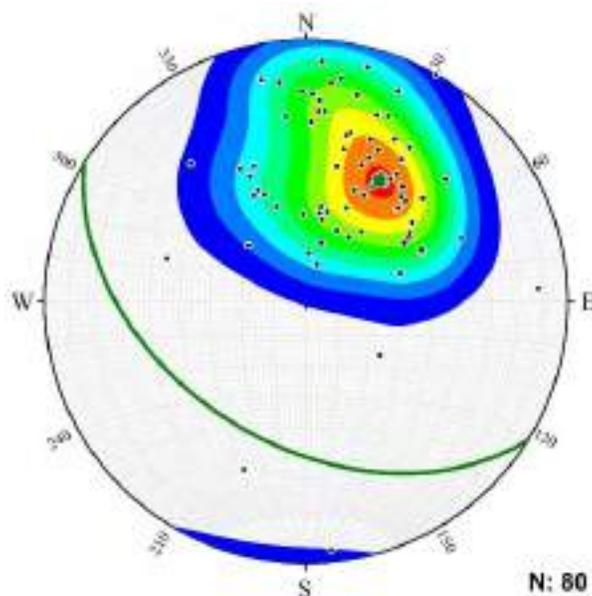


Figura 4.36: Proyección estereográfica de la zona norte. Fuente: Elaboración propia.

ZONA SUR

En la zona sur se lleva a cabo el procesamiento de las 14 estaciones restantes (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) realizadas en el área de estudio, de igual forma que el tratamiento poblacional de la otra zona norte, se trabaja con ayuda del software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Con un total de 147 datos de estratificación en esta zona sur del anticlinal de Puquín, se hace el gráfico de proyección estereográfica (Figura 4. 37 (a)) distinguiendo 3 familias de estratificaciones que muestran orientaciones constantes. La familia más sobresaliente T1 con orientación aproximadamente NNO-SSE (plano de color verde) con buzamiento al oeste; la segunda familia T2 (datos del cuadro de color morado con línea discontinua) (Figura 4. 37 (b)) con orientación aproximadamente NNO-SSE (plano de color verde discontinuo) con buzamiento al este y la tercera familia T3 (datos del cuadro de color rojo) con orientación aproximadamente O-E, pero también se cuenta con algunos datos puntuales variables.

Como parte de la interpretación, los datos de la primera familia principal forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 177/72; los datos de la segunda familia corresponden a la estación estructural E2, la cual pertenece al flanco este (Figura 4. 37 (c)) con un promedio de planos de estratificación de 348/70, hay que resaltar que en este flanco se está determinando tan solo con los datos de una estación (E2) el cual no es representativo de todo el flanco; los datos de la tercera familia corresponden a la estación estructural E8 con ángulos de buzamiento muy altos que son datos tomados del Grupo Tacaza que se encuentra al oeste dentro del área de estudio, pero también la E9 (cuadro color anaranjado) forma parte de este Grupo Tacaza con ángulos de buzamientos bajos; ambos pertenecen a rocas volcano-sedimentarias emplazadas en un evento posterior a la formación del anticlinal de Puquín; al observar la proyección estereográfica se cuenta también con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos posteriores que originan deformación local y rotación de la estratificación.

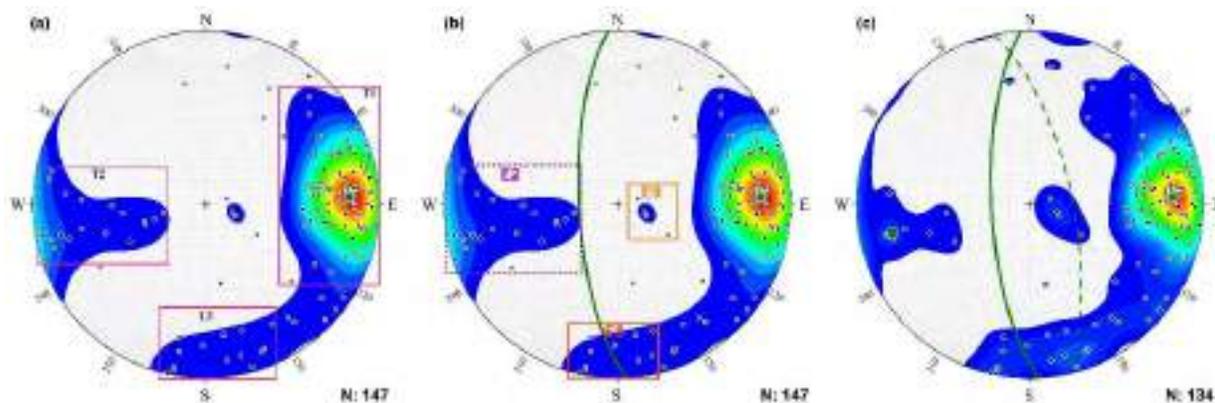


Figura 4. 37: Proyección estereográfica de la zona sur. (a) Datos de la zona sur con tres familias de estratificaciones T1, T2 y T3, (b) familia principal mostrando el flanco oeste, E2 datos que pertenecen al flanco este, E8 y E9 datos del Grupo Tacaza y (c) flanco este (línea verde discontinua) y flanco oeste (línea verde continua), esta proyección varía a la anterior debido a que se sacaron algunos datos aleatorios para mostrar una proyección estereográfica representativa del anticlinal de Puquín. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de datos de estratificación según las secciones D-D', E-E' y F-F'.

El análisis de estratificación según las secciones (Figura 3. 24), se realiza a partir de los datos de estratificaciones tomados para generar estas secciones D-D', E-E' y F-F'.

En la sección D-D' la proyección estereográfica (Figura 4. 38) se realizó con un total de 12 datos de estratificación; con estos datos se puede diferenciar dos familias. La primera familia con una orientación NE-SO y con buzamiento al oeste; la segunda familia con una orientación NE-SO y con buzamiento al este.

Como parte del procesamiento, los datos de la primera familia principal forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 200/65 y los datos de la segunda familia corresponden al flanco este con un promedio de planos de estratificación de 034/58.

En la sección E-E' la proyección estereográfica (Figura 4. 38) se realizó con un total de 12 datos de estratificación; con estos datos se puede diferenciar dos familias. La primera familia con una orientación NNO-SSE y con buzamiento al oeste; la segunda familia con una orientación NE-SO y con buzamiento al este.

Como parte del procesamiento, los datos de la primera familia principal forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 181/77 y los datos de la segunda familia corresponden al flanco este con un promedio de planos de estratificación de 029/55.

En la sección F-F' la proyección estereográfica (Figura 4. 38) se realizó con un total de 10 datos de estratificación; con estos datos se puede diferenciar dos familias. La primera familia con una orientación NNO-SSE y con buzamiento al oeste; la segunda familia con una orientación NO-SE y con buzamiento al este.

Como parte del procesamiento, los datos de la primera familia principal forman parte del flanco oeste con un promedio de planos de estratificación de 175/70 y los datos de la segunda familia corresponden al flanco este con un promedio de planos de estratificación de 299/46.

A partir de las representaciones estereográficas de los flancos promedio se determinaron los valores de los diferentes elementos de pliegue como: Eje de pliegue, plano axial, ángulo interflanco y vergencia (Figura 4. 38).

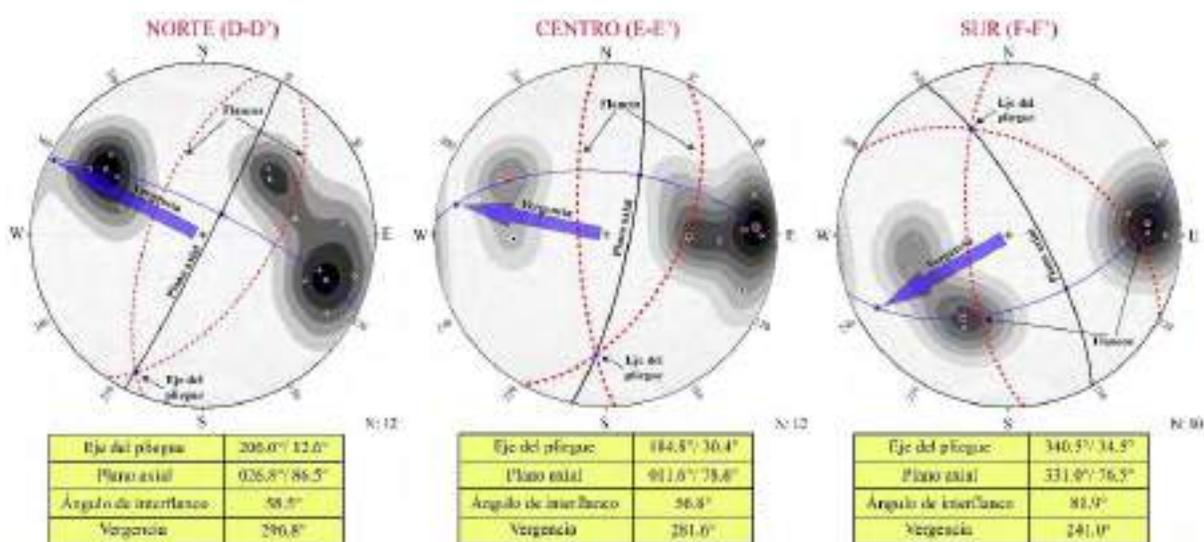


Figura 4. 38: Representación estereográfica de datos de estratificación de las secciones D-D', E-E' y F-F'. Fuente: Elaboración propia.

Análisis de datos de estratificación de pliegues Post Oligoceno Inferior.

Al oeste del área de estudio existen evidencias de plegamiento suaves en rocas volcanosedimentarias del Grupo Tacaza. El Grupo Tacaza pertenece al Oligoceno superior y es posterior a la formación del anticlinal de Puquín. Es por eso que los datos de campo tomados en la estación

estructural E9 tienen diferente orientación. Según el mapa geológico regional (Figura 2. 25) en el Grupo Tacaza muestra variaciones de orientación de buzamientos bajos, presentando un sistema de pliegues con anticlinales y sinclinales.

Para llevar a cabo el análisis estructural del plegamiento se reúne los datos de campo de la estación estructural E9 y datos obtenidos por INGEMMET.

Con un total de 38 datos de estratificación de la zona oeste del anticlinal de Puquín, se hace la representación estereográfica (Figura 4. 39) determinando la geometría y orientación del paleoesfuerzo. Estos pliegues presentan las siguientes características, son simétricos, suaves, rectos con orientaciones NO-SE (325°); también se determinó la dirección de esfuerzo principal (sigma 1) que tiene una orientación de 055/04.

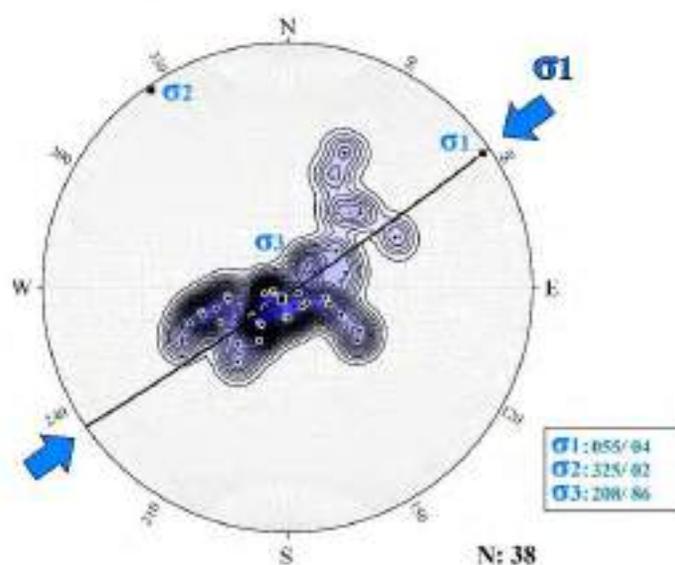


Figura 4. 39: Representación estereográfica de datos de estratificación de la estación estructural E9 y datos obtenidos de INGEMMET. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 ANÁLISIS DE VETILLAS

Se recolectaron 71 datos de vetillas (vetillas conjugadas, extensionales y aleatorias) en las 23 estaciones estructurales que se ubican dentro del área de estudio, de estas se procesaron 43 datos que aportan en la interpretación geológica tanto de la formación del anticlinal de Puquín como en la determinación del modelo geométrico; las otras restantes se dejaron de procesar, ya que eran datos aleatorios y paralelos a la estratificación y no brindaban mucha información a la interpretación.

Los 43 datos estructurales pertenecen a rocas cenozoicas sedimentarias de las formaciones Quilque y Chilca; son las estaciones que describiremos de manera detallada como E10, E11, E12, E16 y E22 (Anexo 2), para representar estereográficamente los datos de orientación de vetillas haremos uso del Software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

ESTACIÓN 10- E10

Con un total de 12 datos de vetillas extensionales que son muy comunes en zonas de cizalla y en esta estación estructural (Figura 4. 15), se encuentran rellenas de calcita y se forman a $\sim 45^\circ$ de la dirección de cizalla y una vez cristalizadas pueden ser plegadas y rotadas, como lo que ocurre en esta estación, con lo cual adquieren una geometría sigmoidal; se hace la representación estereográfica de los datos (Figura 4. 40). A partir de estos datos se obtiene el valor promedio que es 245/36 (plano de color morado) y su orientación es NE-SO con buzamiento al noroeste.

Como parte de la interpretación se determinó las direcciones de los paleoesfuerzos sigma 1 y sigma 3. El valor del sigma 3 se determinó a partir del promedio de los polos de las vetillas extensionales, ya que estas vetillas se van a abrir perpendicular a su plano promedio, como en las fracturas de extensión (Modo I) (Figura 1. 15), el valor del sigma 3 es 155/54 y del sigma 1 solo se determinó su orientación que es paralelo al rumbo del plano promedio, esta orientación es 245° . Esta representación estereográfica se ve asociada a un evento posterior a la formación del anticlinal de Puquín, pero antes de la extensión que inicia en el Pleistoceno (Figura 4. 103), esto se debe a la geometría que presentan estas vetillas extensionales que son tipo sigmoidales y esa característica es típico de una deformación progresiva.

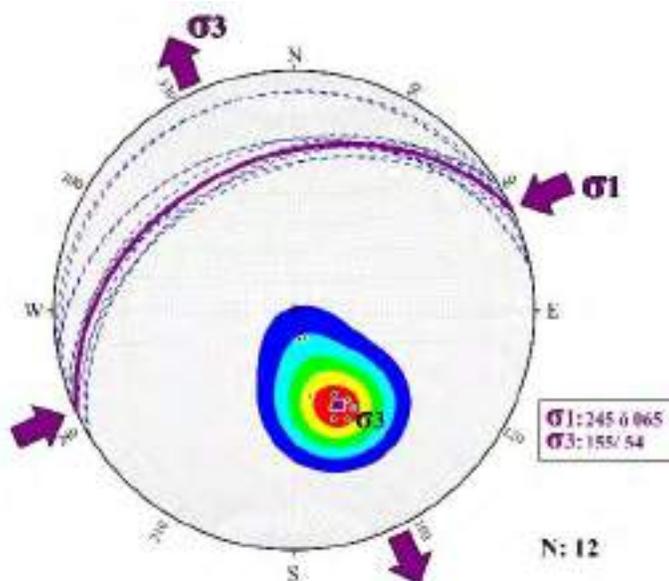


Figura 4. 40: Vetillas extensionales con una orientación de NE-SO. Fuente: Elaboración propia.

ESTACIÓN 11- E11

Con un total de 14 datos de vetillas conjugadas y extensionales que son muy comunes en zonas de cizalla y en esta estación estructural, se encuentran rellenas de calcita y se hace la representación estereográfica de los datos (Figura 4. 41). A partir de estos datos se obtiene los valores promedio tanto de los planos conjugados (298/48 y 038/51) de color azul como el plano extensional que es 015.6/09 de color morado con buzamiento al sureste.

Como parte de la interpretación se le asocia a modelos de fracturas asociadas a plegamientos, debido a que las vetillas antes de ser rellenas de calcita son simplemente fracturas; Por esta razón,

la clasificación de las vetillas conjugadas y extensionales previamente descritos se realizó únicamente teniendo en cuenta su orientación respecto al plegamiento (Twiss y Moores 2007), considerando tres ejes ortogonales entre sí: el eje a perpendicular al rumbo de la capa plegada, el eje b paralelo al rumbo (y paralelo al eje del pliegue) y el eje c perpendicular al plano de estratificación (Figura 4. 53). De las vetillas de la estación estructural se interpreta mostrando la orientación promedio de cada juego de vetillas identificado. De acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar juegos conjugados tipo m' (NE-SO), tipo m (NO-SE) y un juego extensional que es horizontal o paralelo al paleoesfuerzo principal. Estas estructuras geométricamente se encuentran en los flancos del modelo de pliegue y en el área de estudio forma parte del flanco oeste (Figura 4. 41).

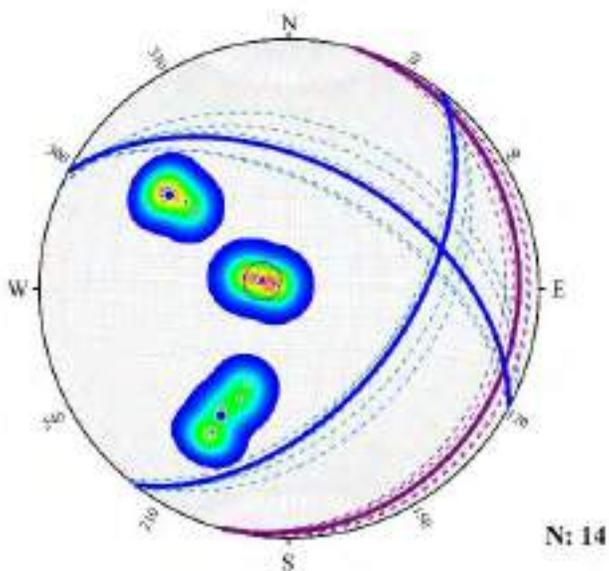


Figura 4. 41: Vetillas conjugadas (color azul) y extensionales (color morado). Estereograma mostrando la orientación promedio de cada juego de vetillas identificado. De acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar juegos conjugado tipo m' (NE-SO) y uno tipo m (NO-SE) y un juego extensional al límite de la proyección estereográfica que es horizontal o paralelo al paleoesfuerzo principal. Fuente: Elaboración propia.

ESTACIÓN 12- E12

Con un total de 08 datos de vetillas extensionales que son muy comunes en zonas de cizalla y en esta estación estructural, se encuentran rellenas de calcita y se hace la representación estereográfica de los datos (Figura 4. 42). A partir de estos datos se obtiene el valor promedio que es 282.5/20.1 (plano de color azul) y su orientación es NO-SE con buzamiento al noreste.

Como parte de la interpretación también se las asocia a modelos de fracturas asociadas a plegamientos. Por esta razón, la clasificación de las vetillas extensionales previamente descritos se realizó únicamente teniendo en cuenta su orientación respecto al plegamiento (Twiss y Moores 2007). De acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar un juego tipo m (NO-SE) que geométricamente se encuentra en el flanco oeste del anticlinal de Puquín (Figura 4. 42).

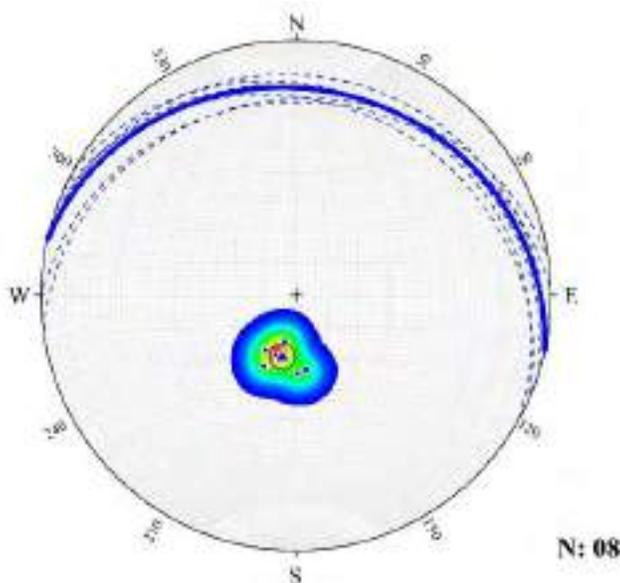


Figura 4. 42: Vetillas extensionales (color azul). Estereograma mostrando la orientación promedio del juego m de vetillas extensionales identificado geométricamente con orientación NO-SE. Fuente: Elaboración propia.

ESTACIÓN 16- E16

Con un total de 05 datos de vetillas extensionales que son muy comunes en zonas de cizalla y en esta estación estructural, se encuentran rellenas de calcita y se hace la representación estereográfica de los datos (Figura 4. 43). A partir de estos datos se obtiene el valor promedio que es 072.3/76.8 (plano de color azul) y su orientación es NE-SO con buzamiento al sureste.

Como parte de la interpretación también se las asocia a modelos de fracturas asociadas a plegamientos. Por esta razón, la clasificación de las vetillas extensionales previamente descritos se realizó únicamente teniendo en cuenta su orientación respecto al plegamiento (Twiss et al., 2007). De acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar un juego tipo m' (NE-SO) que geométricamente se encuentra en el flanco oeste del anticlinal de Puquín (Figura 4. 43).

ESTACIÓN 22- E22

Con un total de 04 datos de vetillas extensionales que son muy comunes en zonas de cizalla y en esta estación estructural, se encuentran rellenas de calcita y se forman a $\sim 45^\circ$ de la dirección de cizalla y una vez cristalizadas pueden ser plegadas y rotadas, como lo que ocurre en esta estación (Figura 4. 3); se hace la representación estereográfica de los datos (Figura 4. 44). A partir de estos datos se obtiene el valor promedio que es 329.8/79.7 (plano de color azul) y su orientación es NO-SE con buzamiento al noreste.

Como parte de la interpretación se determinó las direcciones de los paleoesfuerzos σ_1 y σ_3 . El valor del σ_3 se determinó a partir del promedio de los polos de las vetillas extensionales, ya que estas vetillas se van a abrir perpendicular a su plano promedio, como en las fracturas de extensión (Modo I) (Figura 1. 15), el valor del σ_3 es 240/10 y de la σ_1 solo se determinó su orientación que es paralelo al rumbo del plano promedio, esta orientación es 330° . Esta representación estereográfica se ve asociada a un régimen tectónico extensivo reciente, el cual es un evento posterior a la formación del anticlinal de Puquín (Figura 4. 103).

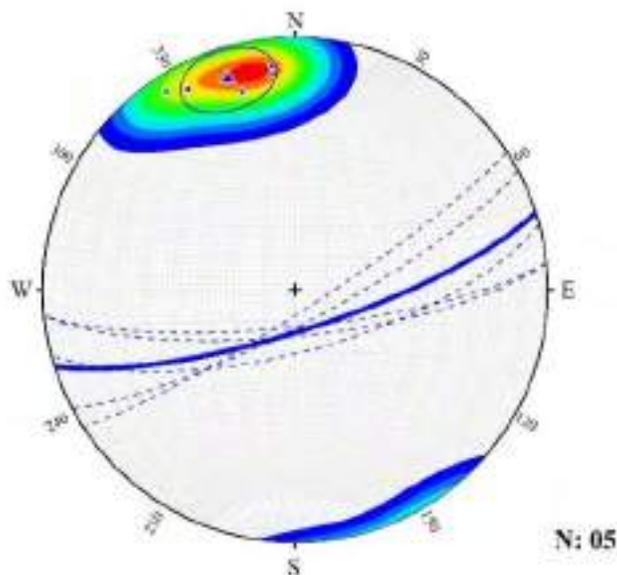


Figura 4. 43: Vetillas extensionales (color azul). Estereograma mostrando la orientación promedio del juego m' de vetillas extensionales identificado geoméricamente con orientación NO-SE. Fuente: Elaboración propia.

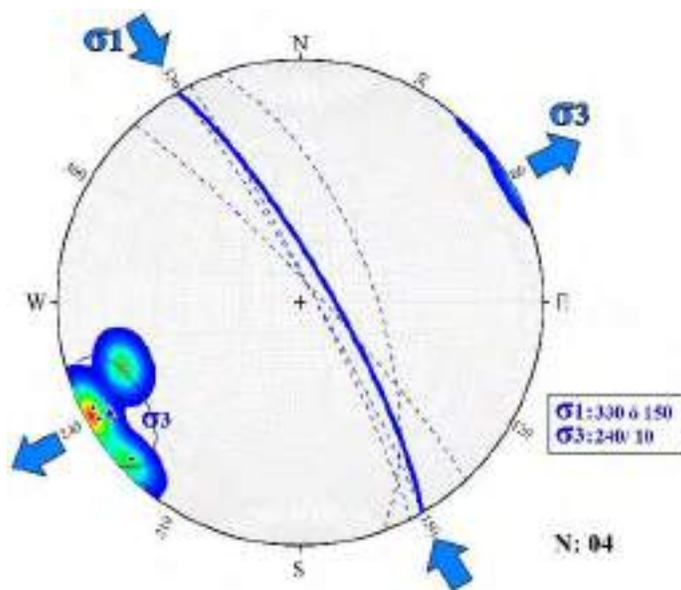


Figura 4. 44: Vetillas extensionales con una orientación de NO-SE. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 ANÁLISIS DE FOLIACIONES

La recolección de datos de foliaciones se llevó a cabo en la estación estructural E4 (Anexo 2), para mostrar datos de orientación de foliaciones haremos uso del Software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012). En la estación estructural 4 (E4) se tomaron 04 datos de foliaciones (clivaje), que pertenecen a la Formación Chilca y al flanco oeste del anticlinal de Puquín y su litología son lutitas rojas con láminas de yeso, margas y areniscas calcáreas, que pasan gradualmente a areniscas rojas feldespáticas. A partir de los datos de la foliación se determinó el valor promedio que es 248/35 (Figura 4. 45). Estas foliaciones se encuentran dentro de la

estratificación. A partir de 20 datos de estratificación se determinó el valor promedio que es 174/76 (Figura 4. 45).

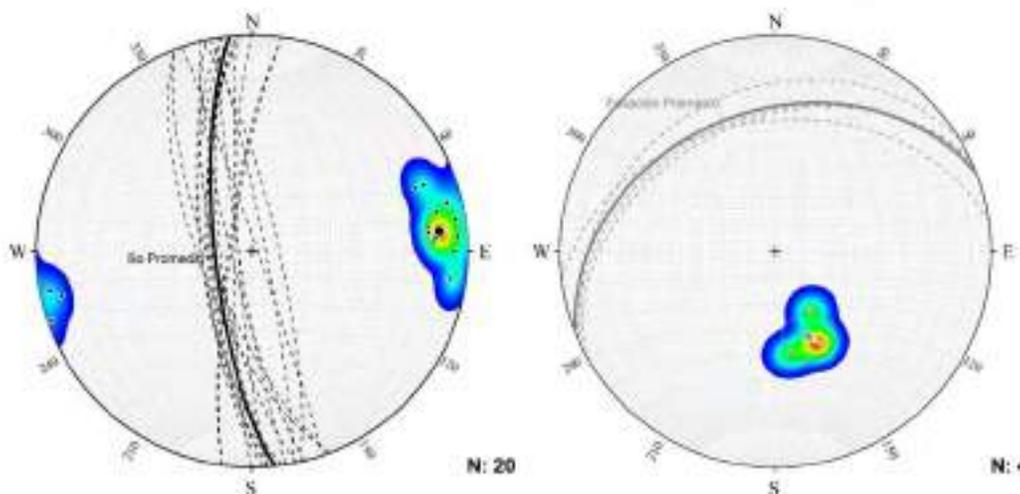


Figura 4. 45: Representación estereográfica de la estratificación (izquierda) y Foliación (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Estas foliaciones se han interpretado como previo al plegamiento cuando los estratos estaban horizontales, pero el pliegue Puquín ha sido rotado en sentido horario de una posición NO-SE a N-S como se presenta actualmente. Para determinar el paleoesfuerzo principal (σ_1) de las foliaciones debemos generar dos rotaciones, una respecto a la posición del pliegue y otra respecto al buzamiento de la estratificación.

La primera rotación es de $\sim 30^\circ$ en sentido antihorario para restaurar la posición pliegue y se les aplicó a los datos promedio de la foliación y la estratificación (Figura 4. 45); a partir de un eje vertical con un azimut de 174. Los datos promedios de la foliación y estratificación obtenidos de la rotación son 218/35 y 144/76 respectivamente (Figura 4. 46).

La segunda rotación fue de 76° en sentido horario para restaurar la posición de la estratificación a la horizontal y se les aplicó a los datos promedios de la foliación y la estratificación rotados previamente; a partir de un eje horizontal con un azimut de 144° . Los datos promedios de la foliación y estratificación obtenidos de esta última rotación son 288/70 y 188/00 respectivamente (Figura 4. 46).

Una vez que se realiza las rotaciones para colocar en su verdadera posición a las foliaciones, a partir de ese dato promedio que es 288/70 se determinó la dirección del esfuerzo principal (σ_1), el cual es el vector perpendicular al plano de foliación promedio, que es su polo y es 198/20 (Figura 4. 47); según la interpretación de dirección de paleoesfuerzos, ese dato coincide con eventos previo al plegamiento del anticlinal de Puquín (Figura 4. 103).

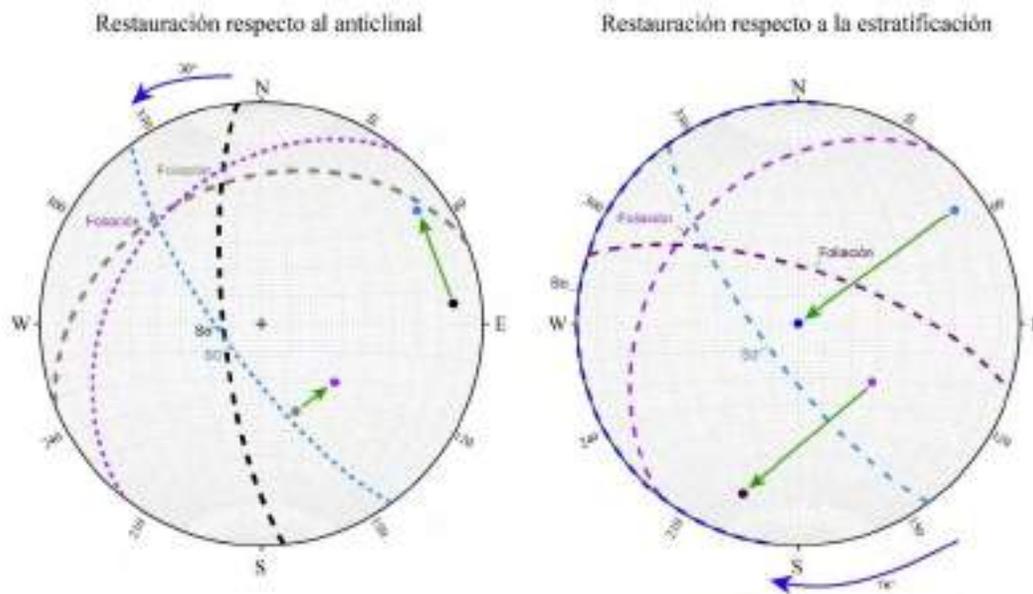


Figura 4. 46: Restauración de la estratificación (S_0) y foliación. Primera restauración (izquierda) y segunda restauración (derecha). Fuente: Elaboración propia.

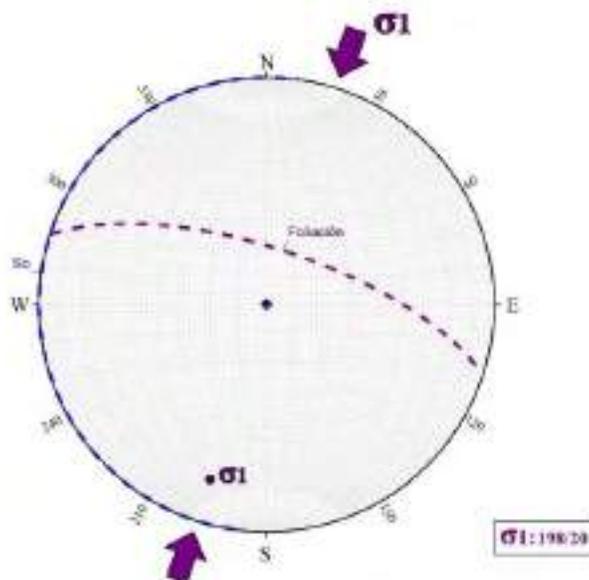


Figura 4. 47: Representación estereográfica que muestra la dirección del paleoesfuerzo principal (sigma 1). Fuente: Elaboración propia.

4.3.4 ANÁLISIS DE FRACTURAS

La recolección de datos de fracturas se llevó a cabo en las 23 estaciones estructurales (Anexo 2), zonas con buenas condiciones estructurales para la toma de información, evitando datos que puedan ser muy locales y por ende en el procesamiento de la información vengan a ser datos aleatorios. Durante las visitas a campo se tomaron 480 datos de fracturas, a partir de las estaciones de control se efectuó una serie de medidas y en la mayoría de los casos la cantidad de datos varía según la estación.

La toma de datos de campo se realizó con la brújula Brunton, utilizando el método de la mano derecha, donde la medición del azimut (0-360°) y buzamiento (0-90°) de los planos de estratificaciones y al cual se le aplica la corrección de la declinación magnética que en Cusco es de 6.2°. Según el análisis de datos de fracturas, para determinar algunas características y presentar los resultados, se dividió el área en dos zonas, zona norte y zona sur, a partir de las 23 estaciones, 09 estaciones se encuentran en la zona norte (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) del área de estudio, las 14 estaciones restantes se ubican en el lado sur (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) del área de estudio (Figura 4. 3).

Las fracturas a menudo se desarrollan en las rocas en asociación con el plegamiento, por esta razón la clasificación de los diferentes juegos que serán descritos se realiza únicamente teniendo en cuenta su orientación respecto al plegamiento (Twiss y Moores 2007).

ZONA NORTE

El análisis de poblaciones de fracturas se realiza con la aplicación de técnicas estadísticas a partir del tratamiento de los datos de orientación. En la zona norte se realiza el procesamiento de las 09 estaciones (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) realizadas en el área de estudio con ayuda del software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Con un total de 264 datos de fracturas en esta zona norte del anticlinal de Puquín, se hace el gráfico de proyección estereográfica (Figura 4. 48) observando dos conjuntos de datos; el primero con orientación NE-SO y el segundo con orientación NO-SE, pero también se cuenta con algunos datos puntuales variables.

Como parte de la interpretación, las fracturas oblicuas denominadas tipo m de color azul son particularmente comunes en los flancos del pliegue, con un promedio de planos de fracturas de 292/49 y las fracturas oblicuas denominadas tipo n' de color mostaza tienden a asociarse con los lados convexos del pliegue o como se conoce la charnela donde la curvatura es más fuerte y presentan un promedio de planos de fracturas de 199/88 (Figura 4. 53). Al observar la proyección estereográfica se cuenta con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos que no están en relación con la geometría y formación del anticlinal de Puquín (Figura 4. 48).

ZONA SUR

El análisis de poblaciones de fracturas se realiza con la aplicación de técnicas estadísticas a partir del tratamiento de los datos de orientación. En la zona sur se realiza el procesamiento de las 14 estaciones restantes (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) realizadas en el área de estudio con ayuda del software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Con un total de 216 datos de fracturas en esta zona sur del anticlinal de Puquín, se hace el gráfico de proyección estereográfica (Figura 4. 49) observando tres conjuntos de datos; el primero con orientación NNE-SSO, el segundo con orientación E-O y el tercero con orientación NE-SO, pero también se cuenta con algunos datos puntuales variables.

Como parte de la interpretación las fracturas inclinadas denominadas tipo bb' de color verde oscuro y verde claro son paralelas al eje de pliegue b y hacen un ángulo alto con la estratificación, tienden

a asociarse con los lados convexos del pliegue o como se conoce la charnela donde la curvatura es más fuerte con los promedios de planos de fracturas de 185/80 y 017/55 respectivamente y las fracturas denominadas tipo ac de color rojo bisecan el ángulo agudo a dos conjuntos de fracturas, que son fracturas oblicuas y se disponen perpendiculares al eje del pliegue y a la estratificación, corresponden a fracturas de extensión formadas paralelas a la dirección del máximo esfuerzo compresivo σ_1 y presentan un promedio de planos de fracturas de 104/85 (Figura 4. 53). Al observar la proyección estereográfica se cuenta con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos que no están en relación con la geometría y formación del anticlinal de Puquín (Figura 4. 49).

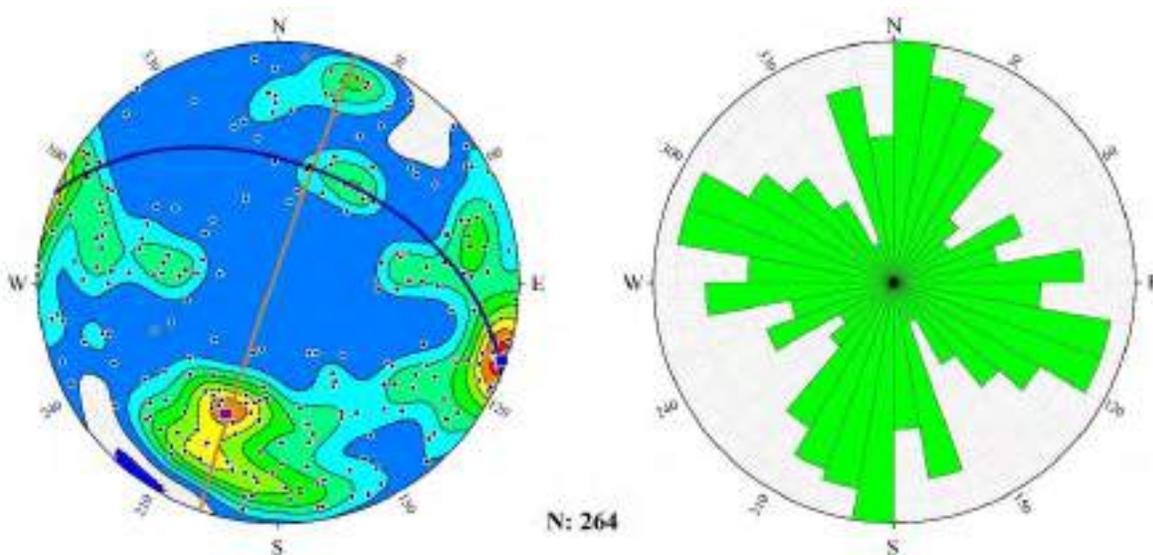


Figura 4. 48: Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fracturas de la zona norte, determinando dos conjuntos de fracturas oblicuas de tipo m (color azul) y n' (color mostaza). Fuente: Elaboración propia.

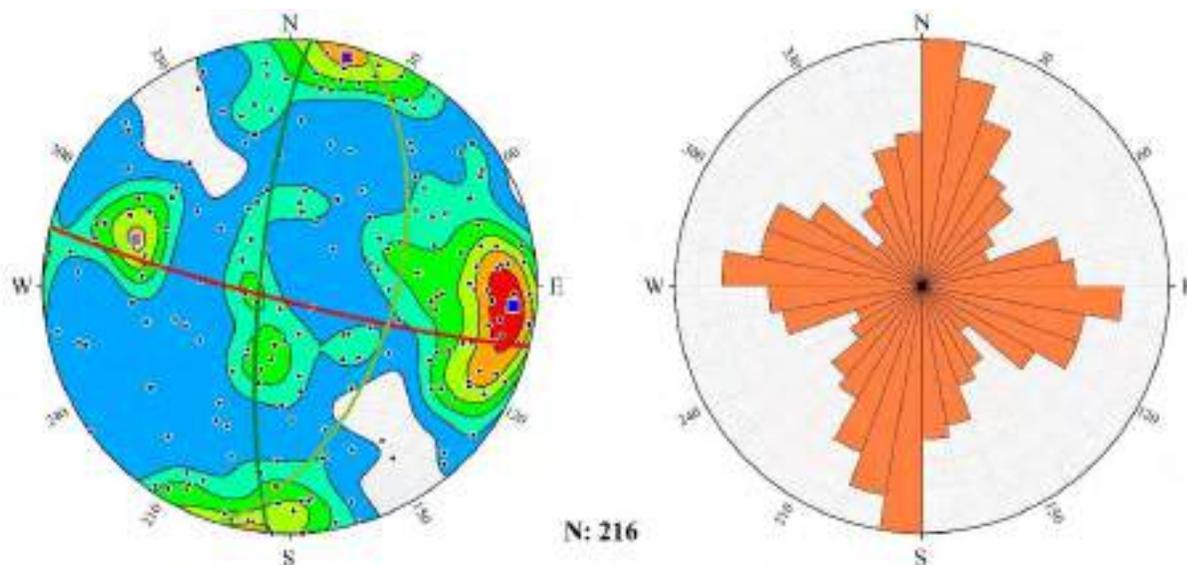


Figura 4. 49: Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fracturas de la zona sur, determinando dos conjuntos de fracturas inclinadas de tipo bb' (color verde claro y oscuro) y ac (color rojo). Fuente: Elaboración propia.

4.3.5 ANÁLISIS DE FALLAS

Para el análisis de fallas se procesaron en diferentes softwares usando diferentes metodologías los datos recolectados de las 23 estaciones estructurales (Anexo 2). Durante las visitas a campo se tomaron en total 769 datos de fallas; para determinar algunas características y presentar los resultados se dividió el análisis de fallas en dos, el primer análisis de fallas sin cinemática (sin dato de pitch) que se procesó en estaciones de la zona norte y zona sur; el segundo análisis de fallas con cinemática (con dato de pitch) en el que se procesa en poblaciones de grupos de fallas con similares características (Figura 4. 50).

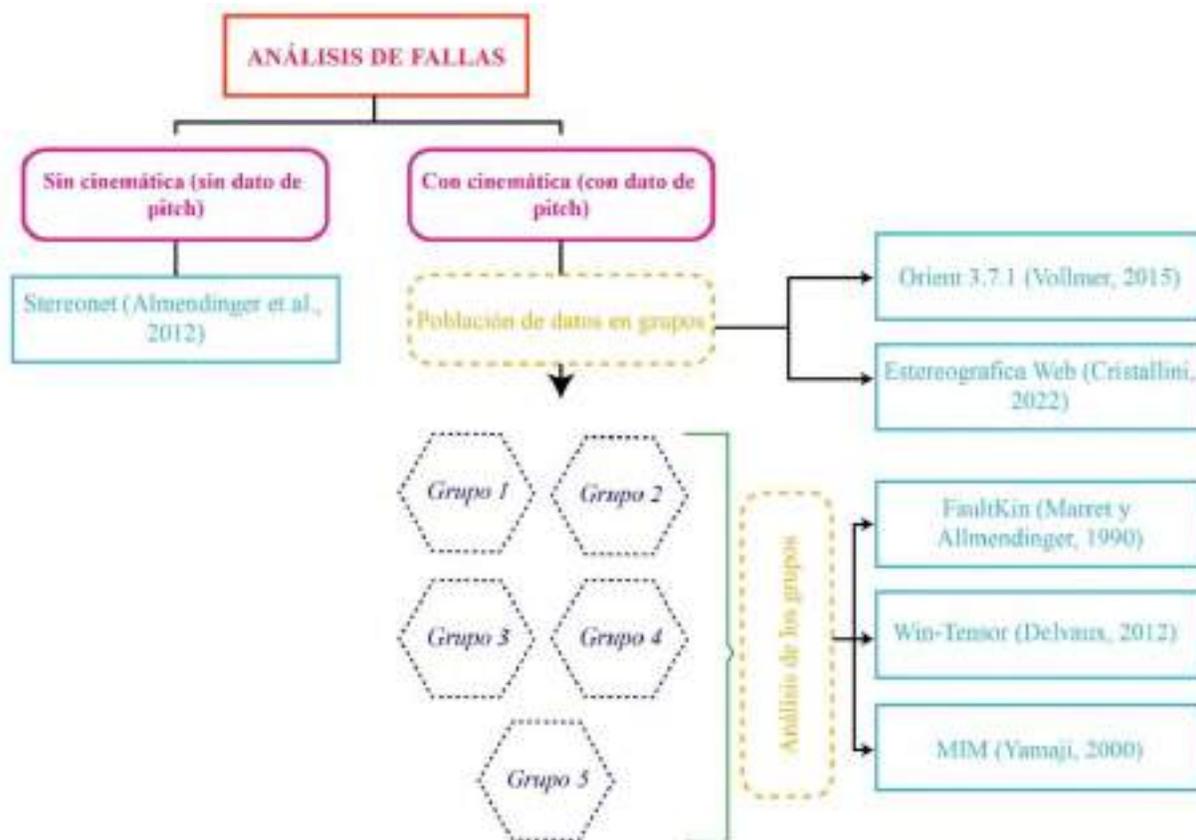


Figura 4. 50: Flujograma de procesamiento de datos utilizando los softwares para el análisis de fallas. Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE FALLAS SIN CINEMÁTICA.

La recolección de datos de fallas sin cinemática (sin dato de pitch) se llevó a cabo en algunas de las 23 estaciones estructurales (Anexo 2). Durante las visitas a campo se tomaron 460 datos de fallas sin cinemática.

En el análisis de datos de fallas sin cinemática, para determinar algunas características y presentar los resultados se dividió el área en dos zonas; zona norte y zona sur, como en el análisis de estratificaciones y fracturas, de las 23 estaciones, 09 estaciones se encuentran en la zona norte (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) del área de estudio, las 14 estaciones restantes se ubican en la zona sur (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) del área

de estudio (Figura 4. 3). Para mostrar datos de orientación de fallas sin cinemática haremos uso del Software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Las fallas sin cinemática y con grado confiabilidad de falla S (supuesto), se interpreta siguiendo la clasificación de los diferentes juegos de fracturas y por ende únicamente teniendo en cuenta su orientación respecto al plegamiento (Twiss y Moores 2007), considerando tres ejes ortogonales entre sí: el eje a perpendicular al rumbo de la capa plegada, el eje b paralelo al rumbo (paralelo al eje del pliegue) y el eje c perpendicular al plano de estratificación como en la descripción de fracturas (Figura 4. 53).

ZONA NORTE

El análisis de poblaciones de fallas sin cinemática se realiza con la aplicación de técnicas estadísticas a partir del tratamiento de los datos de orientación. En la zona norte se realiza el procesamiento de las 09 estaciones (E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) realizadas en el del área de estudio con ayuda del software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Con un total de 278 datos de fallas sin cinemática en esta zona norte del anticlinal de Puquín, se hace el gráfico de proyección estereográfica y diagrama de roseta (Figura 4. 51) observando dos conjuntos de datos, el primero con orientación NNE-SSO y el segundo con orientación NE-SO, pero también se cuenta con algunos datos puntuales variables.

Como parte de la interpretación, las fallas sin cinemática asociadas a fracturas inclinadas denominadas tipo bb' de color verde oscuro y verde claro son paralelas al eje de pliegue b y hacen un ángulo alto con la estratificación, tienden a asociarse con los lados convexos del pliegue o como se conoce la charnela donde la curvatura es más fuerte con los promedios de planos de fallas sin cinemática de 189/74 y 018/65 respectivamente (Figura 4. 53). Al observar la proyección estereográfica se cuenta con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos que no están en relación con la formación del anticlinal de Puquín (Figura 4. 51).

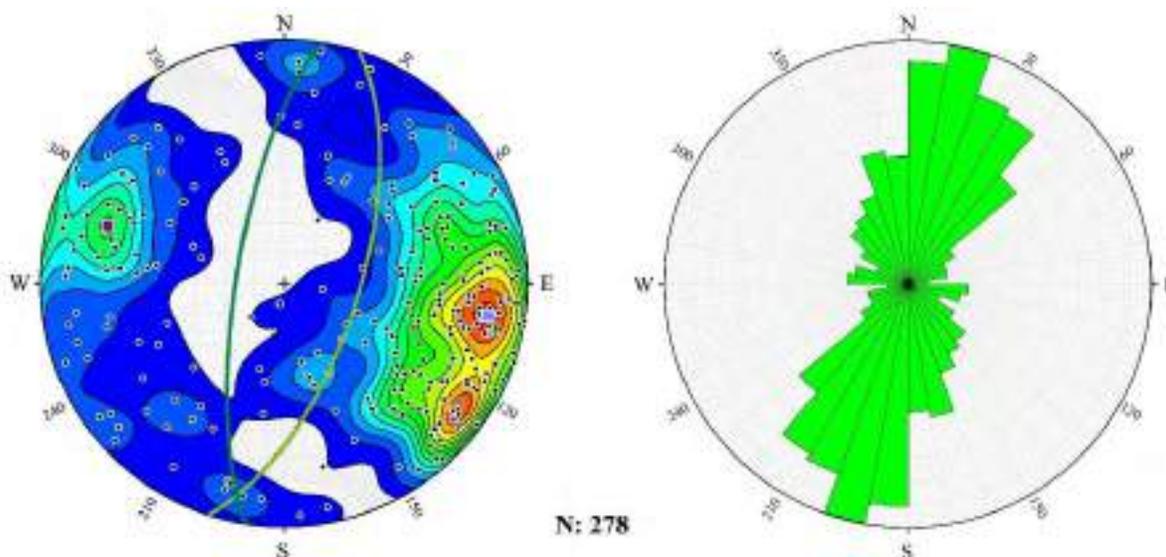


Figura 4. 51: Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fallas sin cinemática, determinando los conjuntos de fallas sin cinemática asociadas a fracturas inclinadas de tipo bb' (color verde claro y oscuro). Fuente: Elaboración propia.

ZONA SUR

El análisis de poblaciones de fallas sin cinemática se realiza con la aplicación de técnicas estadísticas a partir del tratamiento de los datos de orientación. En la zona sur se realiza el procesamiento de las 14 estaciones restantes (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13 y E14) realizadas en el del área de estudio con ayuda del software libre Stereonet (Allmendinger et al., 2012).

Con un total de 182 datos de fracturas en esta zona sur del anticlinal de Puquín, se hace el gráfico de proyección estereográfica (Figura 4. 52) observando tres conjuntos de datos; el primero con orientación NNE-SSO, el segundo con orientación NE-SO y el tercero con orientación NO-SE, pero también se cuenta con algunos datos puntuales variables.

Como parte de la interpretación, las fallas sin cinemática relacionadas a fracturas oblicuas denominadas tipo m de color azul y tipo m' de color celeste, son particularmente comunes en los flancos del pliegue y suelen formar entre ambos juegos un ángulo de aproximadamente 60° , cuya bisectriz corresponde a la dirección del máximo esfuerzo compresivo, con promedios de planos de fallas sin cinemática de 277/77 y 082/84 respectivamente y las fallas sin cinemática relacionadas a fracturas denominadas tipo bb' de color verde oscuro que es paralela al eje de pliegue b y hacen un ángulo alto con la estratificación, tienden a asociarse con los lados convexos del pliegue o como se conoce la charnela donde la curvatura es más fuerte presenta un promedio de planos de fallas sin cinemática de 184/75 (Figura 4. 53). Al observar la proyección estereográfica se cuenta con algunos datos puntuales variables (datos aleatorios), esto debido a eventos que no están en relación con la formación del anticlinal de Puquín (Figura 4. 52).

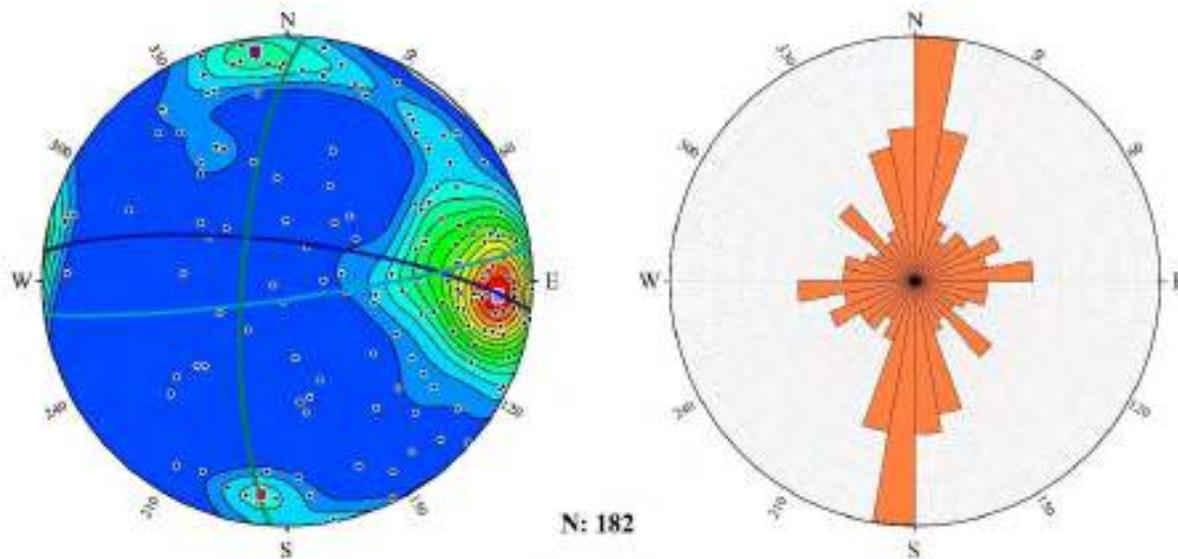


Figura 4. 52: Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fallas sin cinemática, determinando los conjuntos de fallas sin cinemática asociado a fracturas oblicuas denominadas tipo m de color azul y tipo m' de color celeste, así como fallas sin cinemática asociada a fracturas inclinadas de tipo bb' de color verde oscuro. Fuente: Elaboración propia.

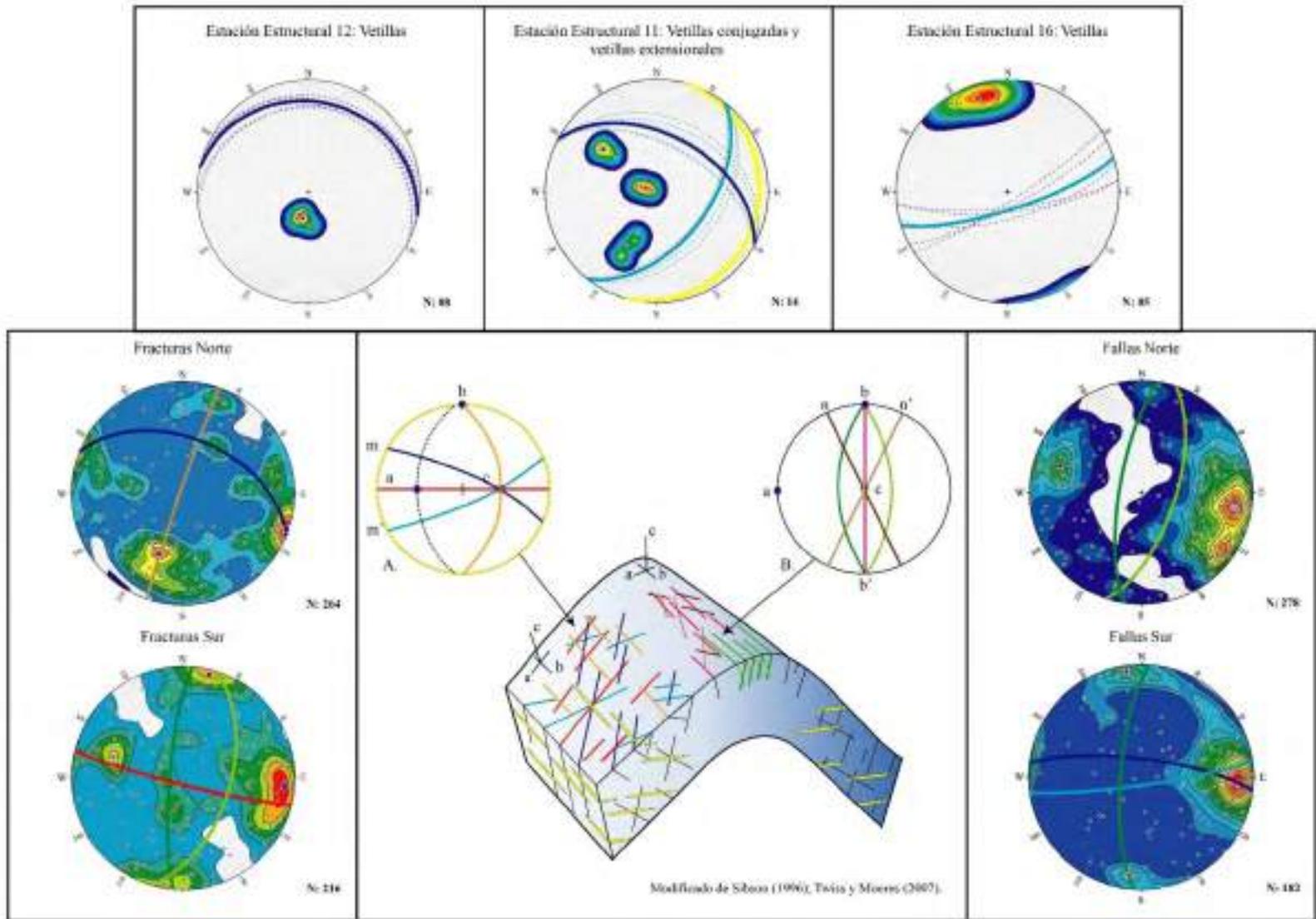


Figura 4. 53: Venillas, fracturas y fallas asociadas a pliegues. Fuente: Modificado de Sibson (1996); Twiss y Moores (2007).

ANÁLISIS DE FALLAS CON CINEMÁTICA.

La recolección de datos de fallas con cinemática se llevó a cabo en las 23 estaciones estructurales (Anexo 3). Durante las visitas a campo se tomaron 309 datos de fallas con cinemática (Figura 4. 54). En las estaciones estructurales se contempla las coordenadas (Este, Norte), el número de estación estructural, la unidad geológica, el tipo de estructura (falla), el dato del strike (azimut) y Dip (buzamiento), pitch, la confiabilidad (C: Certeza, P: Probable, S: Supuesto y X: No se sabe), Intensidad de la estría (0: Sin estrías, 1: Débil marcado, 2: Bien marcado, 3: Profundo y 4: Corrugado), Cinemática, Trend, plunge, rake; Según el carácter del círculo de Morh (Reactivada, Estable y Neoformada), R' y el régimen dominante de acuerdo a la clasificación de Anderson, (1951) para fallas la dirección de los ejes de deformación, obtenidos del estudio de cada estación.

Se realiza el análisis total de fallas presentando en un estereograma los planos de falla con sus vectores cinemáticos (rake); los datos se proyectan en Schmidt Net (hemisferio inferior) mediante el software Faultkin; también se proyectan todas las fallas con cinemática en la clasificación de Angelier (1994) que clasifica a las fallas en cuatro grupos: fallas de desgarre, fallas de deslizamiento oblicuo (dextrales o sinestrales), fallas de deslizamiento oblicuo (normales o inversas), fallas normales o inversas; el Diagrama ternario de Frohlich que nos indica el régimen tectónico local por estructura en el que SS = Movimiento de rumbo; NF=Extensión; TF=Compresión; NS = Transtensión; TS=Transpresión; UF=Indefinido. Cada régimen tectónico tiene una representación de color, donde el verde corresponde a un régimen puramente de rumbo, el azul para el régimen compresivo, rojo para el régimen extensional y colores combinados a regímenes tectónicos mixtos como transpresión o transtensión (Velandia, 2017) y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr mediante el software Win-Tensor 5.9.2 (Figura 4. 54).

La información de campo posee una variación en la distribución espacial del campo de esfuerzos, y teniendo una deformación heterogénea cualquier interpretación que se realice carecerá de sentido geológico, esto por superposición de más de un estado de esfuerzo, teniendo variaciones de la superficie de falla y rotaciones; para estos datos primero se realiza la separación de poblaciones en grupos que contengan similares características como la dirección y compatibilidad geométrica; tanto en el software Orient 3.7.1 (Vollmer, 2015) con la función Clúster Análisis, como en la Estereografica web (Cristallini, 2022) usando k-means que permite separar planos de una población en grupos. Para ello debe elegir la cantidad de grupos en que quiere separar sus datos y qué propiedad desea cambiar para formalizar la separación. Los 309 datos de fallas con cinemática se separan en cinco poblaciones de grupos, el primer grupo con 65, el segundo con 64, el tercero con 66, el cuarto con 69 y por último el quinto con 45 datos de fallas.

Teniendo las cinco poblaciones de grupos; cada grupo ahora tendrá una deformación homogénea en el cual es posible utilizar el método de los diedros o pelota de playa (diagrama solución) realizado en el software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Coloreadas) y campos de acortamiento (Color blanco).

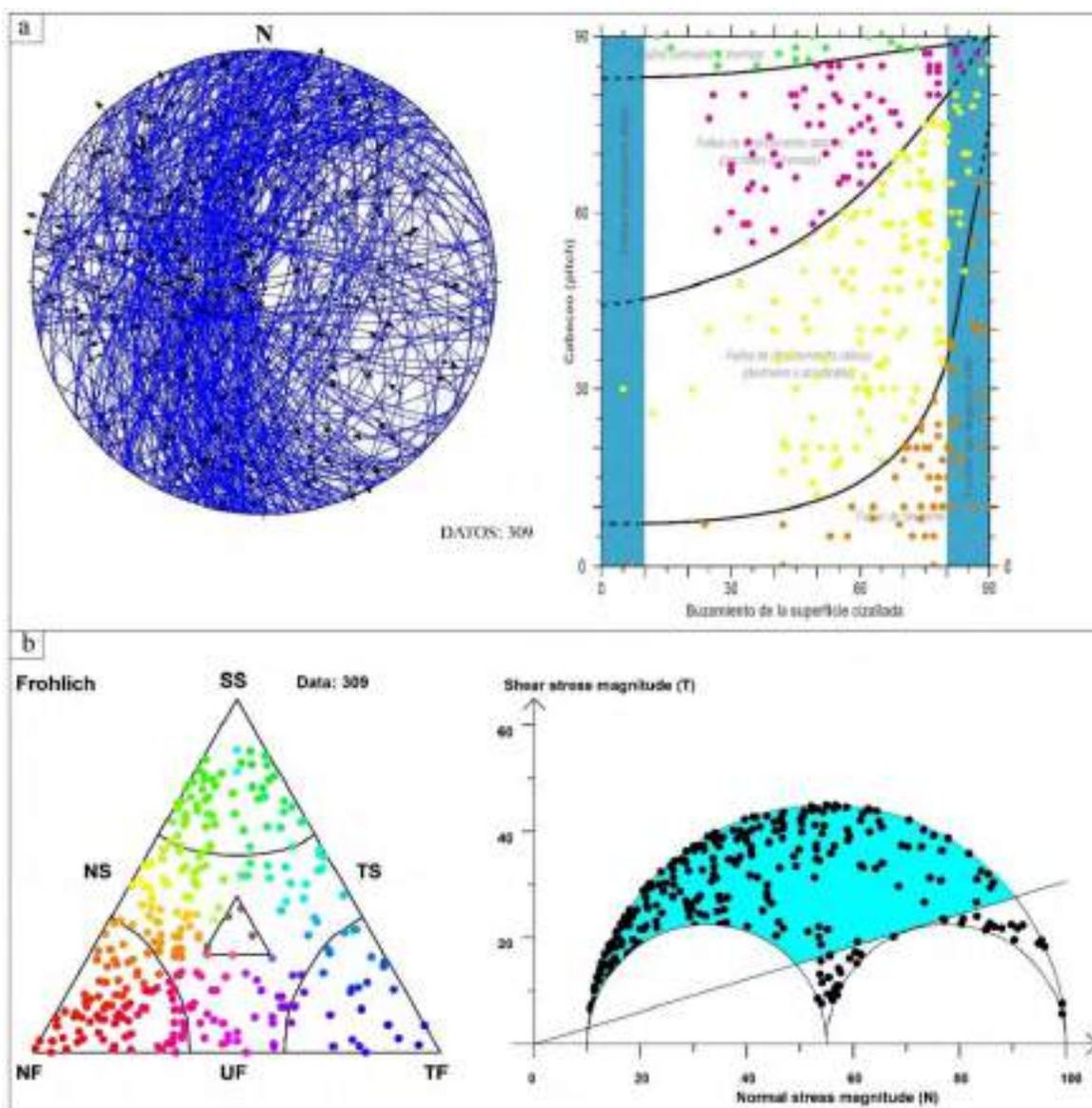


Figura 4. 54: Análisis total de fallas. (a) Estereograma de planos de falla con sus vectores cinemáticos (rake) (izquierda); los datos se proyectan en Schmidt Net (hemisferio inferior) mediante el software Faultkin y hacia la derecha la clasificación de Angelier (1994), clasifica a las fallas en cuatro grupos: fallas de desgarre, fallas de deslizamiento oblicuo (dextrales o sinestras), fallas de deslizamiento oblicuo (normales o inversas), fallas normales o inversas, (b) triángulo de Frohlich que nos indica el régimen tectónico local por estructura y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr (derecha) mediante el software Win-Tensor 5.9.2. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al carácter de neoformadas, reactivadas y estables de las fallas asignadas a este campo de paleoesfuerzos, el círculo de Mohr muestra como existen los tres tipos. Hay un número importante de fallas situadas sobre la envolvente externa, lo que estaría indicando un carácter reactivado o neoformado si se proyecta al borde del círculo de Morh, pero algunas fallas se encuentran proyectadas, de forma más o menos aleatoria, debajo de la envolvente; indicando fallas estables (Figura 4. 54).

A continuación, se describe y analiza las cinco poblaciones de grupos de fallas con cinemática.

GRUPO 1: NO-SE Transpresión

Con un total de 65 datos de fallas con cinemática (Tabla 4. 1), en este grupo se realiza el procesamiento de los datos por estaciones estructurales con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color celeste) y campos de acortamiento (Color blanco), los datos que pertenecen a este grupo son de las estaciones (E1, E4, E5, E6, E7, E11, E12, E13, E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21 y E22) realizadas en el área de estudio, casi todas las estaciones con orientación de esfuerzo principal (σ_1) NO-SE, pero algunas varían (E5, E6, E7, E11, E12 y E13) debido a ubicación de la estación y porque se cuenta con algunos datos puntuales variables (Figura 4. 55).

Los indicadores cinemáticos, especialmente las estrías de falla, se consideraron para diferentes estaciones de la zona, aunque también se cuenta con fibras de recristalización de calcita, movimiento de capas; tener la estría ayuda a obtener el pitch de la estructura que sirve para procesar en los diferentes softwares para el análisis de tensores de tensión.

En la Figura 4. 55 la orientación NO-SE del esfuerzo principal (σ_1) indica un régimen transpresivo y las proyecciones estereográficas donde σ_1 es casi E-O, representan un régimen transtensivo el cual probablemente sea un campo de tensión más reciente.

La representación de todos los planos de falla del Grupo 1 (Figura 4. 55) con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color celeste) y campos de acortamiento (Color blanco), muestra la dirección del esfuerzo principal (σ_1) NO-SE; la representación del tensor de tensión facilitada por el Win-Tensor programa (Delvaux, 2012) con ejes de tensiones principales σ_1 (círculo), σ_2 (triángulo) y σ_3 (cuadrado); muestra los resultados de los esfuerzos por dos métodos, uno de ellos R. Dihedron (Diedros rectos) en el cual el esfuerzo de compresión principal (σ_1) es 118/14, con un R' (índice de esfuerzo) de 2.0 que me indica un régimen de esfuerzo transpresivo (Tabla 4. 2) y el segundo PBT axes que es un análisis cinemático que produce ejes de deformación en lugar de ejes de esfuerzo (Turner, 1953; Sperner et al., 1993), contracción teórica (P), neutral (B) y el eje de extensión (T); en el cual el esfuerzo de compresión principal (σ_1) es 131/18, con un R' (índice de esfuerzo) de 2.0 que me indica un régimen de esfuerzo transpresivo. Podemos ver que en ambos métodos el régimen de esfuerzo es el mismo, pero los valores de los esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) tiene variaciones no significativas.

Respecto al tipo de régimen de esfuerzo se puede expresar numéricamente usando un índice R' , que va de 0.00 a 3.00 y definido de la siguiente manera (Tabla 4. 2):

- $R' = R$ cuando σ_1 es vertical (régimen de extensión)
- $R' = 2 - R$ cuando σ_2 es vertical (régimen de rumbo)
- $R' = 2 + R$ cuando σ_3 es vertical (régimen de compresión)

El índice R' define completamente el régimen de estrés y es conveniente para calcular el régimen medio regional de tensiones a partir de una serie de tensores de tensiones individuales en un área determinada (Guiraud et al., 1989).

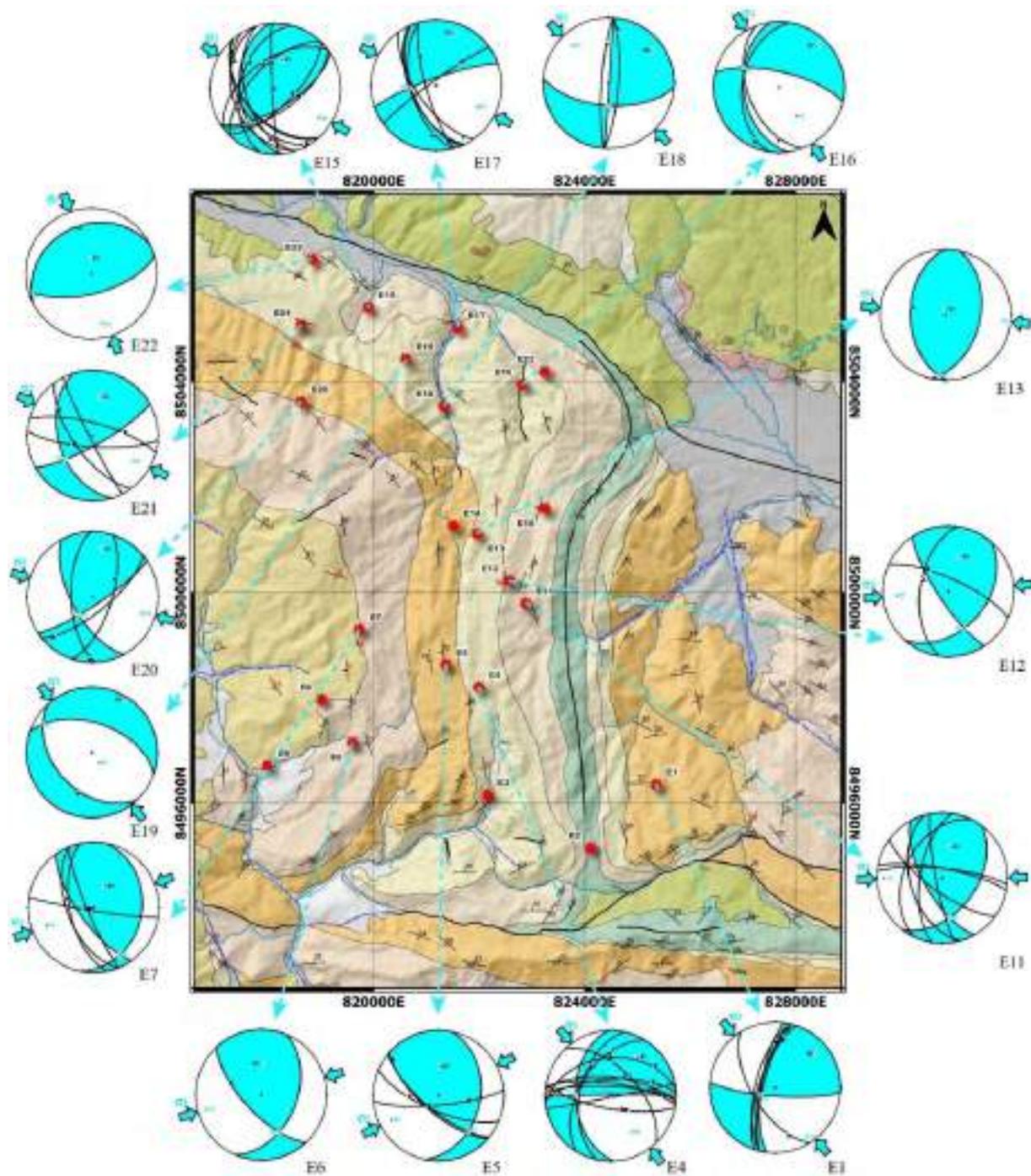


Figura 4. 55: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 1, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación a la que corresponde. Fuente: Elaboración propia.

ID	Coordenadas		Estación estructural	Unidad Geologica	Datos estructurales										Círculo de Mohr	R'	Regimen
	Este	Norte			Estructura	Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Movimiento	Trend	Plunge	Rake			
1	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	148	61	32	P	1	NxSx	165	28	-32	Reactivada	1	NS
2	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	194	65	30	S	1	IxSx	0	27	30	Reactivada	2	TS
3	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	194	72	5	S	1	IxSx	12	5	5	Reactivada	1.5	SS
4	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	194	75	20	S	1	IxSx	9	19	20	Reactivada	1.5	SS
5	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	199	70	25	S	1	IxSx	10	23	25	Reactivada	1.5	SS
6	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	267	69	39	S	1	NxDx	71	36	-141	Estable	1	NS
7	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	79	88	90	S	1	IxDx	169	88	90	Estable	1	UF
8	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	100	74	70	S	1	IxDx	137	65	110	Estable	2.5	TF
9	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	100	74	65	S	1	IxDx	131	61	115	Estable	1	UF
10	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	273	78	38	S	1	NxDx	84	37	-142	Estable	1	NS
11	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	264	41	35	S	1	NxDx	56	22	-145	Estable	1	NS
12	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	276	67	77	S	1	NxDx	37	64	-103	Estable	0.5	NF
13	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	278	74	24	S	1	NxDx	91	23	-156	Estable	1.5	SS
14	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	212	50	45	S	1	IxSx	359	33	45	Reactivada	2.5	TF
15	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	192	51	60	S	1	IxSx	325	42	60	Reactivada	2.5	TF
16	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	316	56	60	S	1	NxSx	0	46	-60	Reactivada	0.5	NF
17	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	113	71	54	S	1	IxSx	269	50	54	Reactivada	2	TS
18	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	85	78	48	S	1	IxDx	98	47	132	Estable	2	TS
19	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	137	68	50	P	1	IxSx	293	45	50	Reactivada	2	TS
20	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	158	57	66	P	1	IxSx	287	50	66	Reactivada	2.5	TF
21	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	126	73	30	S	1	IxSx	296	29	30	Reactivada	1.5	SS
22	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	169	82	80	S	1	IxSx	311	77	80	Neoformada	1	UF
23	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	164	49	58	C	1	IxSx	298	40	58	Neoformada	2.5	TF
24	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	164	49	25	C	1	SxIx	327	19	25	Neoformada	2	TS
25	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	294	74	59	C	1	NxSx	319	55	-59	Reactivada	1	NS
26	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	138	50	12	S	1	IxSx	310	9	12	Reactivada	2	TS
27	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	224	60	68	S	1	IxSx	353	53	68	Reactivada	2.5	TF
28	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	177	86	55	S	1	IxSx	351	55	55	Neoformada		XF
29	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	161	34	42	S	1	IxSx	304	22	42	Neoformada	2.5	TF
30	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	45	68	77	S	1	IxDx	103	65	103	Reactivada	2.5	TF
31	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	140	49	14	S	1	NxSx	149	11	-14	Reactivada	1	NS
32	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	234	53	85	S	1	IxSx	332	53	85	Reactivada	2.5	TF
33	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	148	42	7	S	1	NxSx	153	5	-7	Reactivada	1	NS
34	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	163	52	35	S	1	NxSx	186	27	-35	Reactivada	1	NS
35	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	54	62	70	S	1	IxDx	106	56	110	Reactivada	2.5	TF

36	819899	8505407	E15	Fm. Quilque	Falla	194	45	66	C	1	IxSx	316	40	66	Neoformada	2.5	TF
37	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	189	43	20	S	1	NxSx	204	13	-20	Neoformada	1	NS
38	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	159	50	32	S	1	NxSx	181	24	-32	Reactivada	1	NS
39	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	157	59	20	S	1	NxSx	168	17	-20	Reactivada	1	NS
40	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	145	65	18	S	1	NxSx	153	16	-18	Reactivada	1.5	SS
41	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	165	58	33	S	1	NxSx	184	28	-33	Neoformada	1	NS
42	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	164	77	45	S	1	IxSx	331	44	45	Reactivada	2	TS
43	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	234	84	50	S	1	NxDx	47	50	-130	Reactivada	1	NS
44	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	4	78	22	P	4	NxSx	9	21	-22	Neoformada	1.5	SS
45	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	184	81	37	S	1	IxSx	357	36	37	Neoformada	2	TS
46	820181	8503945	E19	Fm. Chilca	Falla	137	41	68	P	1	NxSx	199	37	-68	Reactivada	0.5	NF
47	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	51	71	20	C	1	NxDx	224	19	-160	Reactivada	1.5	SS
48	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	18	66	58	C	1	IxDx	51	51	122	Reactivada	2.5	TF
49	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	178	63	10	P	1	SxNx	183	9	-10	Neoformada	1.5	SS
50	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	285	74	55	P	1	NxDx	84	52	-125	Reactivada	1	NS
51	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	153	86	10	P	2	SxIx	332	10	10	Reactivada	1.5	SS
52	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	76	65	P	1	IxSx	247	62	65	Estable	1	UF
53	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	144	66	35	P	1	SxIx	308	32	35	Reactivada	2	TS
54	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	244	26	80	S	1	IxSx	345	26	80	Estable	2.5	TF
55	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	131	69	7	S	1	Sx	308	7	7	Reactivada	1.5	SS
56	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	131	69	88	S	1	Ix	227	69	88	Reactivada	2.5	TF
57	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	157	82	88	P	1	Ix	261	82	88	Reactivada	1	UF
58	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	99	86	78	P	1	Ix	261	77	78	Estable	1	UF
59	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	168	60	75	P	1	Ix	286	57	75	Neoformada	2.5	TF
60	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	281	78	80	S	1	Nx	331	74	-80	Estable	0.5	NF
61	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	276	78	82	S	1	Nx	332	76	-82	Estable	0.5	NF
62	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	206	41	87	S	1	Ix	300	41	87	Reactivada	2.5	TF
63	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	189	62	90	C	1	Ix	279	62	90	Neoformada	2.5	TF
64	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	188	54	80	C	1	Ix	295	53	80	Neoformada	2.5	TF
65	821960	8501108	E13	Fm. Chilca	Falla	179	45	80	C	3	Ix	283	44	80	Neoformada	2.5	TF

Tabla 4. 1: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 1 de régimen transpresivo. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Nx: Falla normal, Ix: Falla inversa, Dx: Falla dextral, Sx: Falla sinistral.

Stress tensor type	EXTENSIVE				STRIKE-SLIP				COMPRESSIVE				
Stress symbols													
Stress ratio R	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	0.75	0.5	0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Stress regime	Radial EXTENSIVE		Pure EXTENSIVE		TRANS-TENSIVE	Pure STRIKE-SLIP		TRANS-PRESSIVE	Pure COMPRESSIVE		Radial COMPRESSIVE		
Stress index R'	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00
Determination of R'	$R' = R$				$R' = 2 - R$				$R' = 2 + R$				

Tabla 4. 2: Tipo de régimen de esfuerzo. Fuente: Guiraud et al. (1989).

Nota: Ilustración del significado del índice de régimen de tensiones R' frente a la relación de tensiones R y orientación de los ejes principales de los elipsoides de tensiones. Símbolos de tensión con ejes de tensión horizontales (S_{Hmax} y S_{Hmin}), en función de la relación de tensión R . Su longitud y color simbolizan la magnitud de la tensión desviadora horizontal, relativa a la tensión isotrópica (σ_1). Flechas blancas hacia afuera: desviación del esfuerzo extensional ($<\sigma_1$). Flechas azules hacia adentro: desviación del esfuerzo compresional ($>\sigma_1$). El esfuerzo vertical (σ_v) está simbolizado por un círculo sólido para regímenes extensionales ($\sigma_1=\sigma_v$), para regímenes de rumbo ($\sigma_2=\sigma_v$) o un círculo abierto para regímenes compresionales ($\sigma_3=\sigma_v$) (Guiraud et al., 1989).

El diagrama ternario de Frohlich (Figura 4. 56) nos indica el régimen tectónico local por estructura, muestra la proyección de cada una de las fallas que forman parte de este Grupo 1, indicando el régimen tectónico en colores y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr muestran 15 fallas de carácter neoformadas, 36 reactivadas y 14 estables, hay un número importante de fallas situadas sobre la envolvente externa lo que estaría indicando un carácter reactivado o neoformado si se proyecta al borde del círculo de Mohr; estos realizados mediante el software Win-Tensor 5.9.2.

En la Figura 4. 56 los últimos estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 (Yamaji, 2000), cada subsolución se representa como un renacuajo que indica la orientación de uno de los ejes principales con una "cola" adjunta, que apunta hacia la orientación del eje principal complementario (es decir, el renacuajo de σ_1 apunta hacia la orientación de σ_3 y viceversa). Este símbolo está, además, codificado por colores según la relación de tensión calculada ($\varphi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$). Así, grupos de renacuajos con colores similares y orientaciones similares de sus colas indican una solución de campo de tensión compatible (Federico et al., 2010; Otsubo et al., 2006; Veloso et al., 2015, 2009; Yamaji, 2000). Por lo tanto, la distribución de valores de φ de cada uno de los datos, se utiliza para establecer un rango de valores de φ para la solución de ejes de tensión principal; en el gráfico (Figura 4. 56) observamos la orientación de datos del σ_1 (124.6/16.1) hacia el NO-SE, con colas que apuntan en dirección NE donde se ubica el σ_3 (15.9/48.1), el valor de la relación de tensión (φ) es igual a 0.82 que a partir de la clasificación de Ritz (1994) de los diferentes tipos de régimen tectónico (Figura 1. 31), estamos frente a un régimen compresivo casi radial.

Evento I

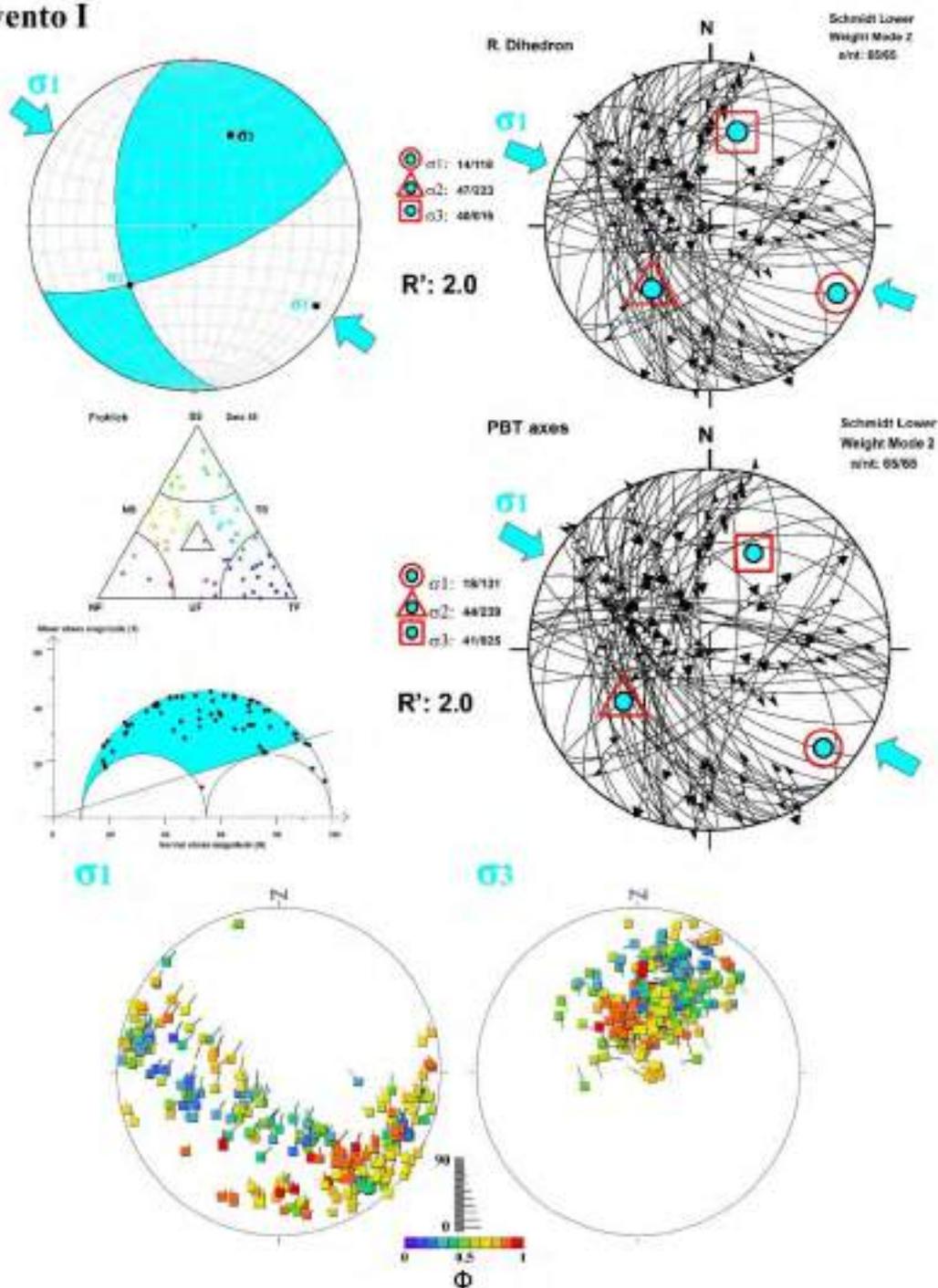


Figura 4. 56: Representación de todos los planos de falla del Grupo 1 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal σ_1 NO-SE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen transpresivo, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia.

GRUPO 2: OSO-ENE Transtensión

Con un total de 64 datos de fallas con cinemática (Tabla 4. 3), en este grupo se realiza el procesamiento de los datos por estaciones estructurales con ayuda del software FaultKin 8.1

(Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color amarillo) y campos de acortamiento (Color blanco), los datos que pertenecen a este grupo son de las estaciones (E1, E3, E4, E5, E7, E9, E10, E11, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E20, E21 y E22) realizadas en el área de estudio, casi todas las estaciones con orientación del esfuerzo principal (σ_3) OSO-ENE, pero algunas varían (E3, E4, E9, E10 y E14) debido a ubicación de la estación o porque se cuenta con algunos datos puntuales variables (Figura 4. 57).

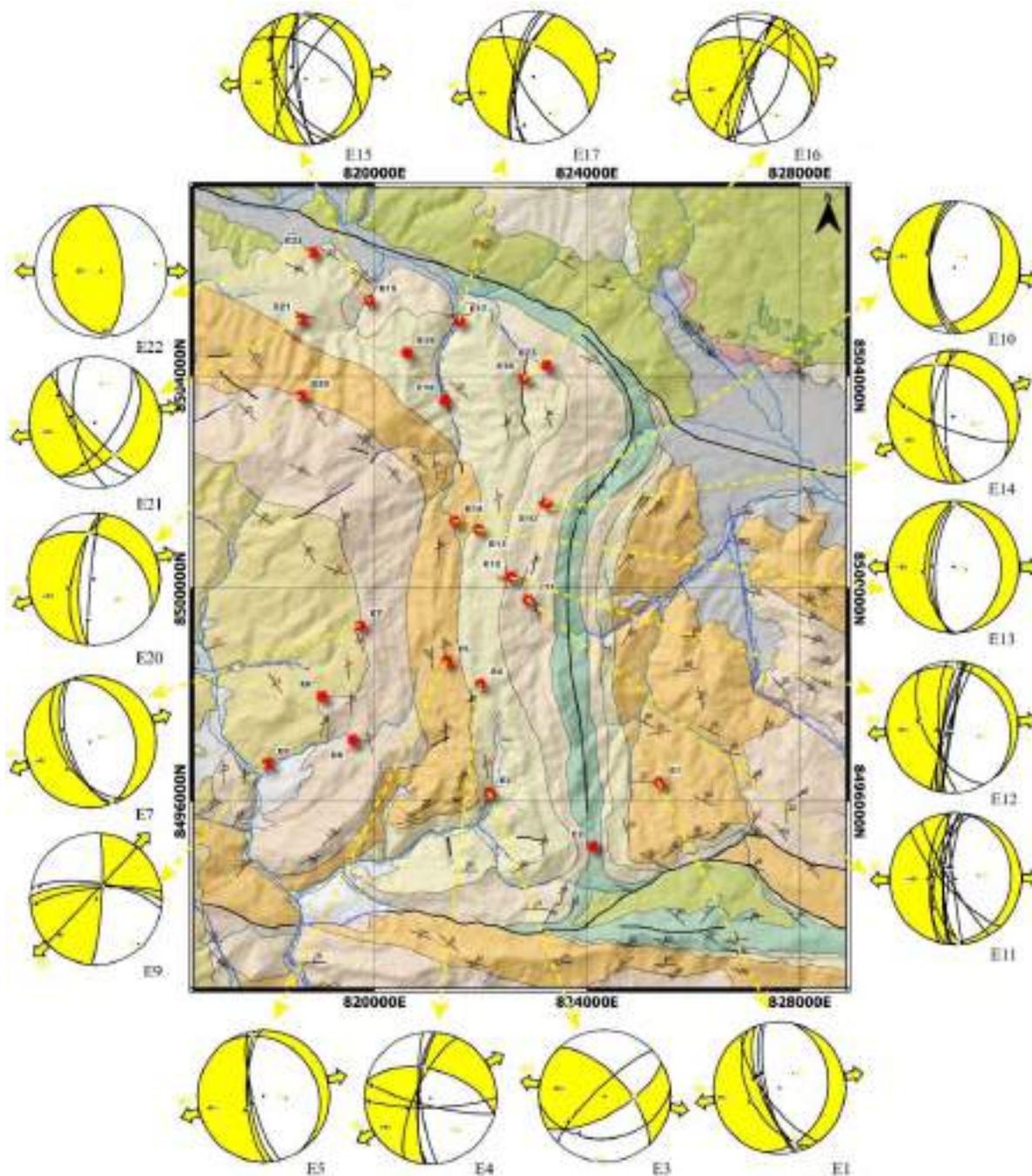


Figura 4. 57: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 2, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia.

ID	Coordenadas		Estación estructural	Unidad Geologica	Datos estructurales										Círculo de Mohr	R'	Regimen
	Este	Norte			Estructura	Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Movimiento	Trend	Plunge	Rake			
1	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	167	74	70	S	1	NxDx	310	65	-110	Reactivada	0.5	NF
2	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	144	71	65	S	1	NxDx	289	59	-115	Reactivada	0.5	NF
3	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	152	52	88	S	1	NxDx	245	52	-92	Reactivada	0.5	NF
4	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	164	70	70	S	1	NxDx	301	62	-110	Reactivada	0.5	NF
5	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	226	79	38	S	1	NxSx	234	37	-38	Reactivada	1	NS
6	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	84	35	55	S	1	lxSx	215	28	55	Estable	2.5	TF
7	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	183	74	23	P	1	NxSx	190	22	-23	Neoformada	1.5	SS
8	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	204	71	69	P	1	NxSx	244	62	-69	Reactivada	0.5	NF
9	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	104	80	15	S	1	NxDx	281	15	-165	Estable	1.5	SS
10	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	174	78	85	S	1	NxDx	287	77	-95	Neoformada	0.5	NF
11	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	89	78	13	S	1	NxDx	266	13	-167	Estable	1.5	SS
12	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	178	69	75	S	1	NxSx	231	64	-75	Neoformada	0.5	NF
13	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	162	63	68	P	1	NxDx	294	56	-112	Neoformada	0.5	NF
14	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	279	70	10	P	1	lxDx	282	9	170	Reactivada	1.5	SS
15	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	264	77	5	P	1	lxDx	265	5	175	Estable	1.5	SS
16	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	183	59	78	S	1	NxDx	295	57	-102	Neoformada	0.5	NF
17	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	174	60	70	S	1	NxDx	300	54	-110	Neoformada	0.5	NF
18	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	149	83	77	S	1	NxSx	177	75	-77	Reactivada	1	UF
19	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	183	76	85	S	1	NxDx	293	75	-95	Neoformada	0.5	NF
20	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	183	76	80	S	1	NxDx	309	73	-100	Neoformada	0.5	NF
21	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	174	87	80	S	1	NxDx	337	80	-100	Neoformada	1	UF
22	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	187	82	80	S	1	NxDx	329	77	-100	Reactivada	1	UF
23	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	137	76	60	S	1	NxDx	294	57	-120	Reactivada	1	NS
24	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	184	75	75	S	1	NxDx	320	69	-105	Neoformada	0.5	NF
25	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	174	59	60	C	1	NxSx	216	48	-60	Neoformada	0.5	NF
26	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	199	85	70	P	2	NxSx	212	69	-70	Reactivada	1	UF
27	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	194	80	65	P	1	NxSx	214	63	-65	Reactivada	1	UF
28	822320	8499497	E12	Fm. Quilque	Falla	151	56	66	C	1	NxDx	280	49	-114	Reactivada	0.5	NF
29	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	111	73	30	P	2	DxNx	281	29	-150	Reactivada	1.5	SS
30	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	179	80	55	C	2	NxSx	193	54	-55	Neoformada	1	NS
31	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	172	77	76	S	1	NxDx	310	71	-104	Neoformada	0.5	NF
32	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	304	51	20	S	1	lxDx	317	15	160	Reactivada	2	TS
33	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	152	60	65	S	1	NxDx	285	52	-115	Reactivada	0.5	NF
34	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	209	78	52	S	1	NxSx	224	50	-52	Reactivada	1	NS
35	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	174	81	65	S	1	NxSx	193	64	-65	Neoformada	1	UF

36	819899	8505407	E15	Fm. Quilque	Falla	159	53	56	C	2	NxDx	297	41	-124	Reactivada	0.5	NF
37	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	315	16	88	S	1	NxSx	43	16	-88	Estable	0.5	NF
38	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	166	83	58	S	1	NxDx	335	57	-122	Reactivada		XF
39	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	202	72	28	P	1	NxSx	211	27	-28	Reactivada	1.5	SS
40	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	26	54	17	S	2	IxSx	196	14	17	Reactivada	2	TS
41	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	197	88	50	P	1	NxSx	199	50	-50	Reactivada		XF
42	822784	8503106	E16	Fm. Chilca	Falla	217	79	35	S	1	NxSx	225	34	-35	Reactivada	1	NS
43	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	186	65	65	S	1	NxSx	228	55	-65	Neoformada	0.5	NF
44	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	189	70	25	S	1	NxSx	198	23	-25	Reactivada	1.5	SS
45	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	200	69	36	S	1	NxSx	11	158	-36	Reactivada	1.5	SS
46	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	151	73	20	S	1	NxDx	325	19	-160	Reactivada	1.5	SS
47	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	192	63	74	C	2	NxSx	250	59	-74	Neoformada	0.5	NF
48	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	185	86	41	P	1	NxSx	188	41	-41	Neoformada	1	NS
49	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	146	64	40	C	1	NxDx	306	35	-140	Reactivada	1	NS
50	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	169	65	79	P	1	NxDx	284	63	-101	Neoformada	0.5	NF
51	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	34	64	34	P	1	IxSx	198	30	34	Reactivada	2	TS
52	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	169	27	85	S	1	IxSx	265	27	85	Reactivada	2.5	TF
53	821269	8499107	E5	Fm. Kayra	Falla	166	76	87	P	1	Nx	244	76	-87	Reactivada	0.5	NF
54	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	149	51	78	P	1	Nx	220	49	-78	Reactivada	0.5	NF
55	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	194	65	85	P	1	Nx	272	65	-85	Reactivada	0.5	NF
56	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	189	60	85	S	1	Nx	269	60	-85	Neoformada	0.5	NF
57	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	189	90	86	S	1	Nx	189	86	-86	Neoformada	1	UF
58	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	176	73	88	S	1	Nx	259	73	-88	Neoformada	0.5	NF
59	822320	8499497	E12	Fm. Quilque	Falla	192	78	84	C	1	Nx	255	77	-84	Reactivada	0.5	NF
60	822516	8500332	E12	Fm. Quilque	Falla	190	88	84	C	1	Nx	208	84	-84	Neoformada	1	UF
61	821960	8501108	E13	Fm. Chilca	Falla	180	55	85	C	3	Nx	261	55	-85	Neoformada	0.5	NF
62	821960	8501108	E13	Fm. Chilca	Falla	184	67	89	C	3	Nx	271	67	-89	Neoformada	0.5	NF
63	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	184	65	85	S	1	Nx	262	65	-85	Neoformada	0.5	NF
64	819899	8505407	E15	Fm. Quilque	Falla	192	53	83	C	1	Nx	270	52	-83	Neoformada	0.5	NF

Tabla 4. 3: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 2 de régimen transtensivo. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Nx: Falla normal, Ix: Falla inversa, Dx: Falla dextral, Sx: Falla sinistral.

La representación de todos los planos de falla del Grupo 2 (Figura 4. 57) con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color amarillo) y campos de acortamiento (Color blanco), muestra la dirección del esfuerzo principal (σ_3) OSO-ENE; la representación del tensor de tensión facilitada por el Win-Tensor programa (Delvaux, 2012) con ejes de tensiones principales σ_1 (círculo), σ_2 (triángulo) y σ_3 (cuadrado); muestra los resultados de los esfuerzos por dos métodos, uno de ellos R. Dihedron (Diedros rectos) en el cual el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 118/41, con un R' (índice de esfuerzo) de 1.0 que me indica un régimen de esfuerzo transtensivo (Tabla 4. 2) y el segundo PBT axes, el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 097/66, con un R' (índice de esfuerzo) de 1.0 que me indica un régimen de esfuerzo transtensivo. Podemos ver que en ambos métodos el régimen de esfuerzo es el mismo, pero los valores de los esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) tiene variaciones no significativas.

En la Figura 4. 58 el diagrama ternario de Frohlich que nos indica el régimen tectónico local por estructura, muestra la proyección de cada una de las fallas que forman parte de este Grupo 2, indicando el régimen tectónico en colores y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr muestran 26 fallas de carácter neoformadas, 33 reactivadas y 05 estables, hay un número importante de fallas situadas sobre la envolvente externa lo que estaría indicando un carácter reactivado o neoformado si se proyecta al borde del círculo de Morh, estos realizados mediante el software WinTensor 5.9.2.

Los últimos estereogramas (Figura 4. 58) por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 (Yamaji, 2000), en el gráfico observamos la orientación de datos del σ_1 (39.4/45.3) hacia el NNO-SSE, con colas que apuntan en dirección OSO-ENE donde se ubica el σ_3 (270.9/31.6), el valor de la relación de tensión (φ) es igual a 0.99 que a partir de la clasificación de Ritz (1994) de los diferentes tipos de régimen tectónico (Figura 1. 31), estamos frente a un régimen transtensivo.

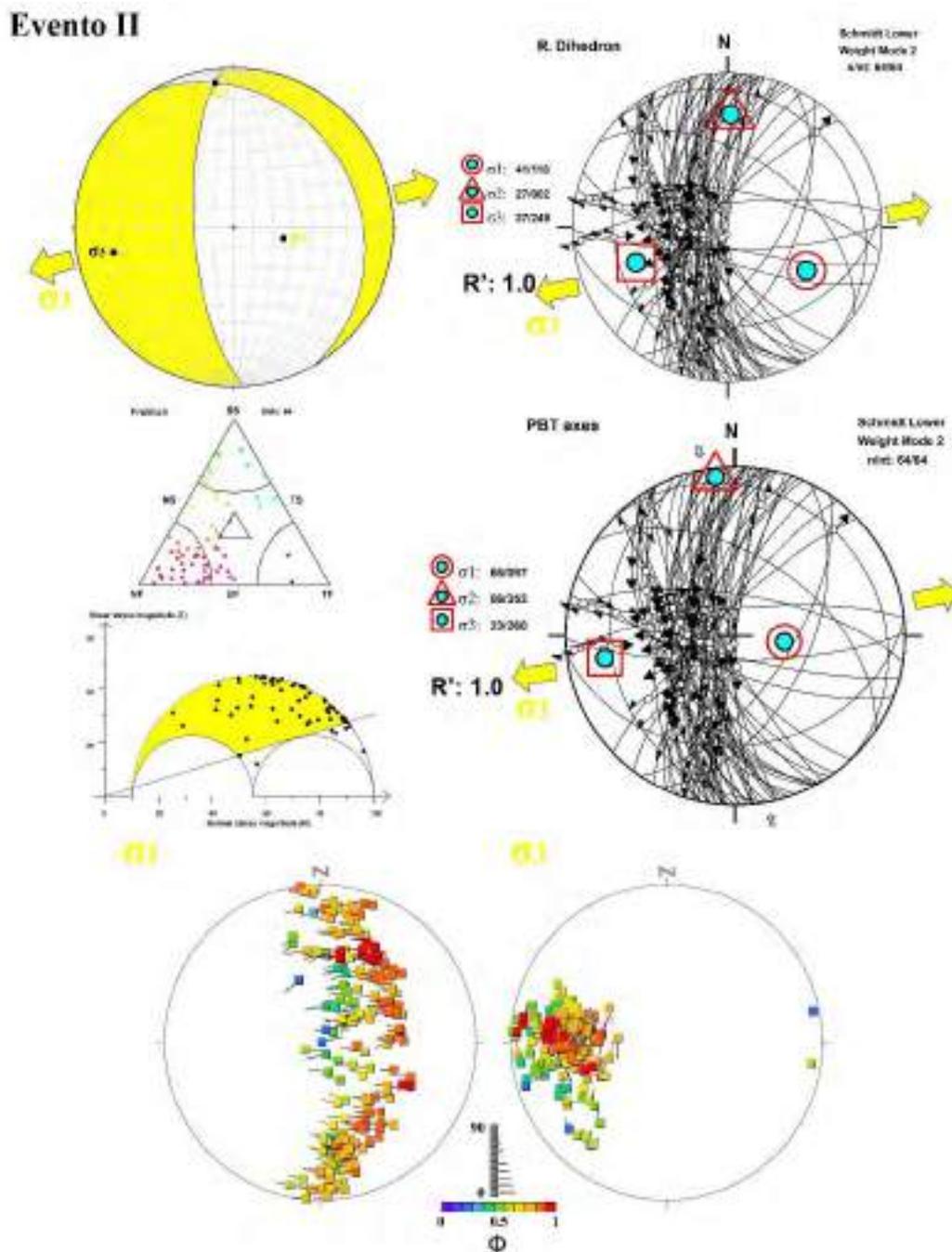


Figura 4. 58: Representación de todos los planos de falla del Grupo 2 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal (σ_3) OSO-ENE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen transtensivo, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia.

GRUPO 3: NO-SE Rumbo puro

Con un total de 66 datos de fallas con cinemática (Tabla 4. 4) en este grupo se realiza el procesamiento de los datos por estaciones estructurales con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color morado) y campos de acortamiento (Color blanco), los datos que pertenecen a este grupo son de las estaciones (E3, E5,

E6, E10, E11, E12, E14, E15, E16, E18, E19, E20, E21, E22 y E23) realizadas en el área de estudio, todas las estaciones con orientación del esfuerzo principal (σ_3) NO-SE (Figura 4. 59).

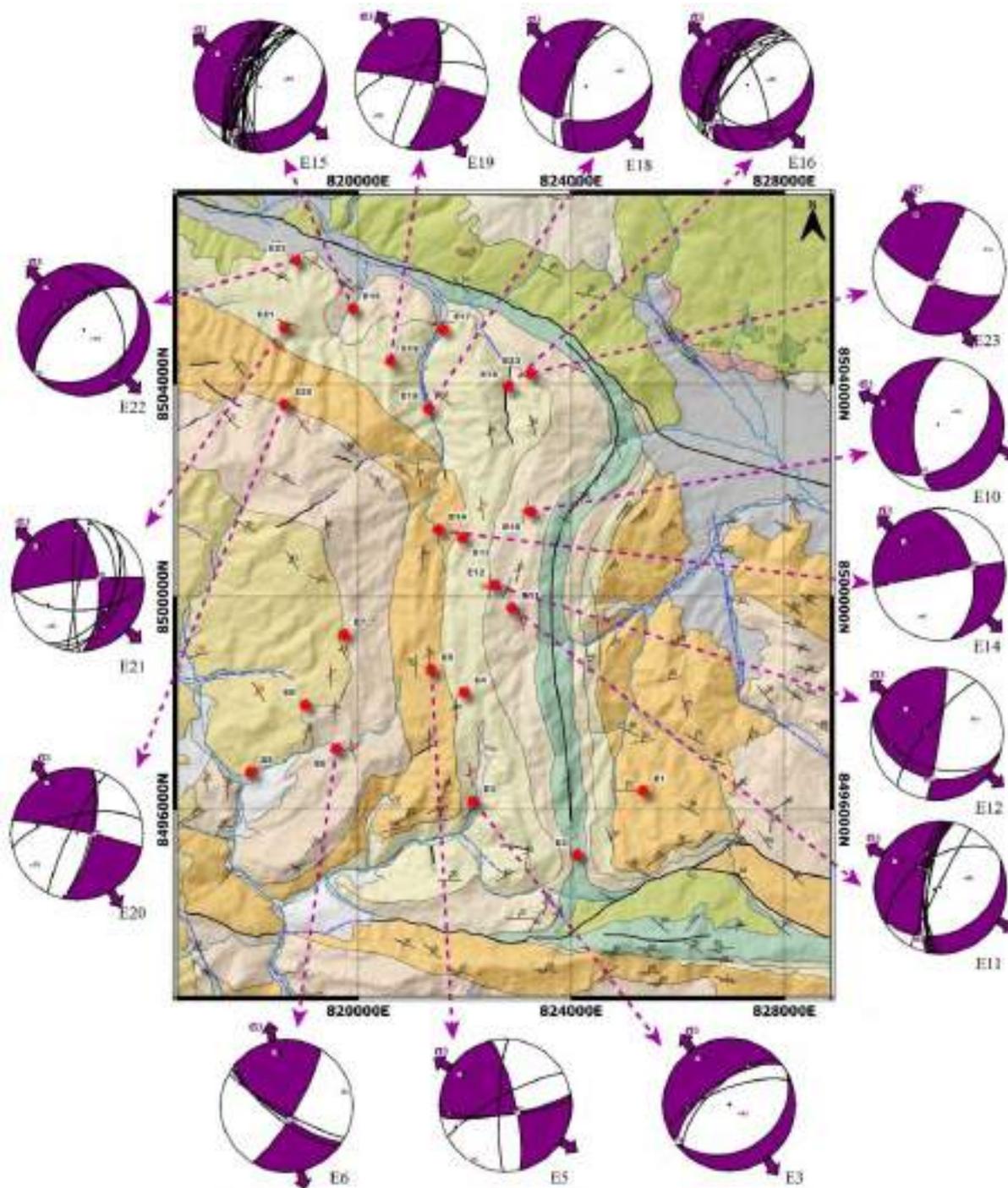


Figura 4. 59: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 3, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia.

ID	Coordenadas		Estación estructural	Unidad Geologica	Datos estructurales										Círculo de Mohr	R'	Regimen
	Este	Norte			Estructura	Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Movimiento	Trend	Plunge	Rake			
1	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	226	64	40	S	1	NxDx	26	35	-140	Reactivada	1	NS
2	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	249	70	40	S	1	NxSx	265	37	-40	Reactivada	1	NS
3	821269	8499107	E5	Fm. Kayra	Falla	241	78	24	S	1	SxNx	246	23	-24	Reactivada	1.5	SS
4	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	182	82	33	S	1	DxDx	357	33	-147	Neoformada	1.5	SS
5	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	85	78	15	S	1	SxIx	262	15	15	Estable	1.5	SS
6	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	119	82	18	P	1	IxSx	296	18	18	Reactivada	1.5	SS
7	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	184	60	65	S	1	NxDx	317	52	-115	Neoformada	0.5	NF
8	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	184	70	70	S	2	NxDx	321	62	-110	Neoformada	0.5	NF
9	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	186	75	53	S	1	NxDx	347	50	-127	Neoformada	1	NS
10	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	185	69	70	S	1	NxDx	320	61	-110	Neoformada	0.5	NF
11	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	189	75	55	P	1	NxDx	349	52	-125	Neoformada	1	NS
12	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	179	69	47	S	1	NxDx	338	43	-133	Neoformada	1	NS
13	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	109	47	42	S	1	SxIx	257	29	42	Reactivada	2.5	TF
14	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	259	89	60	P	1	NxSx	261	60	-60	Estable	1	UF
15	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	259	89	25	P	1	SxNx	259	25	-25	Estable	1.5	SS
16	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	192	76	58	S	1	NxDx	351	55	-122	Reactivada	1	NS
17	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	214	62	76	S	1	NxSx	276	59	-76	Reactivada	0.5	NF
18	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	194	75	70	S	1	NxDx	339	65	-110	Reactivada	0.5	NF
19	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	194	67	58	S	1	NxDx	342	51	-122	Reactivada	0.5	NF
20	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	208	74	48	S	1	NxDx	11	46	-132	Reactivada	1	NS
21	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	185	84	70	S	1	NxDx	349	69	-110	Neoformada	1	UF
22	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	212	65	63	S	1	NxDx	352	54	-117	Reactivada	0.5	NF
23	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	214	76	64	S	1	NxDx	8	61	-116	Reactivada	1	UF
24	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	194	74	67	S	1	NxDx	341	62	-113	Reactivada	0.5	NF
25	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	192	75	58	S	1	NxDx	350	55	-122	Reactivada	1	NS
26	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	211	67	67	S	1	NxDx	348	58	-113	Reactivada	0.5	NF
27	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	196	48	75	S	1	NxDx	308	46	-105	Reactivada	0.5	NF
28	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	209	55	79	S	1	NxDx	318	54	-101	Reactivada	0.5	NF
29	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	209	80	34	S	1	NxDx	22	33	-146	Reactivada	1.5	SS
30	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	186	54	72	S	1	NxDx	305	50	-108	Neoformada	0.5	NF
31	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	181	70	58	S	1	NxDx	332	53	-122	Neoformada	1	NS
32	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	204	75	59	S	1	NxDx	1	56	-121	Reactivada	1	NS
33	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	187	70	56	S	1	NxDx	340	51	-124	Neoformada	1	NS
34	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	174	70	54	S	1	NxDx	329	49	-126	Neoformada	1	NS
35	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	217	75	65	S	1	NxDx	8	61	-115	Reactivada	1	UF

36	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	217	52	70	S	1	NxDx	338	48	-110	Reactivada	0.5	NF
37	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	204	51	75	S	1	NxDx	317	49	-105	Reactivada	0.5	NF
38	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	228	58	47	S	1	NxDx	18	38	-133	Reactivada	1	NS
39	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	222	55	65	S	1	NxDx	351	48	-115	Reactivada	0.5	NF
40	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	222	75	55	S	1	NxDx	22	52	-125	Reactivada	1	NS
41	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	216	48	86	S	1	NxDx	312	48	-94	Reactivada	0.5	NF
42	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	184	54	50	P	1	NxDx	329	38	-130	Neoformada	0.5	NF
43	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	339	75	5	S	1	NxDx	158	5	-175	Reactivada	1.5	SS
44	822784	8503106	E16	Fm. Chilca	Falla	121	40	40	S	1	IxSx	268	24	40	Reactivada	2.5	TF
45	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	225	80	75	P	2	NxDx	12	72	-105	Reactivada	1	UF
46	821326	8503539	E18	Fm. Chilca	Falla	24	68	15	C	1	IxDx	30	14	165	Reactivada	1.5	SS
47	821326	8503539	E18	Fm. Chilca	Falla	14	62	29	C	1	IxDx	29	25	151	Reactivada	2	TS
48	820181	8503945	E19	Fm. Chilca	Falla	207	65	34	P	1	NxDx	11	30	-146	Reactivada	1	NS
49	820181	8503945	E19	Fm. Chilca	Falla	187	74	60	P	1	NxDx	341	56	-120	Neoformada	1	NS
50	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	13	74	8	P	1	NxDx	191	8	-172	Reactivada	1.5	SS
51	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	206	81	20	C	1	NxDx	23	20	-160	Reactivada	1.5	SS
52	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	258	66	47	C	1	NxSx	282	42	-47	Estable	1	NS
53	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	190	90	10	C	2	NxDx	10	10	-170	Reactivada	1.5	SS
54	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	179	83	18	P	1	NxDx	357	18	-162	Neoformada	1.5	SS
55	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	22	33	58	C	1	NxDx	149	28	-122	Reactivada	0.5	NF
56	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	28	44	80	P	0	NxDx	132	43	-100	Reactivada	0.5	NF
57	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	8	44	36	P	1	NxDx	160	24	-144	Neoformada	1	NS
58	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	89	58	50	P	1	IxSx	237	41	50	Estable	2.5	TF
59	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	229	58	59	S	1	NxDx	8	47	-121	Reactivada	0.5	NF
60	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	341	42	16	S	1	NxDx	149	11	-164	Neoformada	1	NS
61	823239	8504196	E23	Fm. Quilque	Falla	204	88	20	S	2	NxDx	23	20	-160	Reactivada	1.5	SS
62	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	128	72	5	P	2	Sx	306	5	5	Reactivada	1.5	SS
63	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	207	87	87	P	1	Nx	252	86	-87	Reactivada	1	UF
64	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	235	53	83	S	1	Nx	313	52	-83	Reactivada	0.5	NF
65	822516	8500332	E12	Fm. Quilque	Falla	217	76	84	C	1	Nx	284	75	-84	Reactivada	0.5	NF
66	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	234	49	90	S	1	Nx	324	49	-90	Reactivada	0.5	NF

Tabla 4. 4: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 3 de régimen de rumbo puro. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Nx: Falla normal, Ix: Falla inversa, Dx: Falla dextral, Sx: Falla sinistral.

La representación de todos los planos de falla del Grupo 3 (Figura 4. 59) con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color morado) y campos de acortamiento (Color blanco), muestra la dirección del esfuerzo principal (σ_3) NO-SE; la representación del tensor de tensión facilitada por el Win-Tensor programa (Delvaux, 2012) con ejes de tensiones principales σ_1 (círculo), σ_2 (triángulo) y σ_3 (cuadrado); muestra los resultados de los esfuerzos por dos métodos, uno de ellos R. Dihedron (Diedros rectos) en el cual el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 050/24, con un R' (índice de esfuerzo) de 1.5 que me indica un régimen de esfuerzo de rumbo puro (Tabla 4. 3) y el segundo PBT axes, el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 066/48, con un R' (índice de esfuerzo) de 1.5 que me indica un régimen de esfuerzo de rumbo puro. Podemos ver que en ambos métodos el régimen de esfuerzo es el mismo, pero los valores de los esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) tiene variaciones no significativas.

En la Figura 4. 60 el diagrama ternario de Frohlich nos indica el régimen tectónico local por estructura, muestra la proyección de cada una de las fallas que forman parte de este Grupo 3, indicando el régimen tectónico en colores y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr muestran 17 fallas de carácter neoformadas, 44 reactivadas y 05 estables, hay un número importante de fallas situadas sobre la envolvente externa lo que estaría indicando un carácter reactivado o neoformado si se proyecta al borde del círculo de Morh, estos realizados mediante el software WinTensor 5.9.2.

Los últimos estereogramas (Figura 4. 60) por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 (Yamaji, 2000), en el gráfico observamos la orientación de datos del σ_1 (109.7/71.7) hacia el NE-SO, con colas que apuntan en dirección NO-SE donde se ubica el σ_3 (315.8/16.5), el valor de la relación de tensión (φ) es igual a 0.67 que a partir de la clasificación de Ritz (1994) de los diferentes tipos de régimen tectónico (Figura 1. 31), estamos frente a un régimen de rumbo puro.

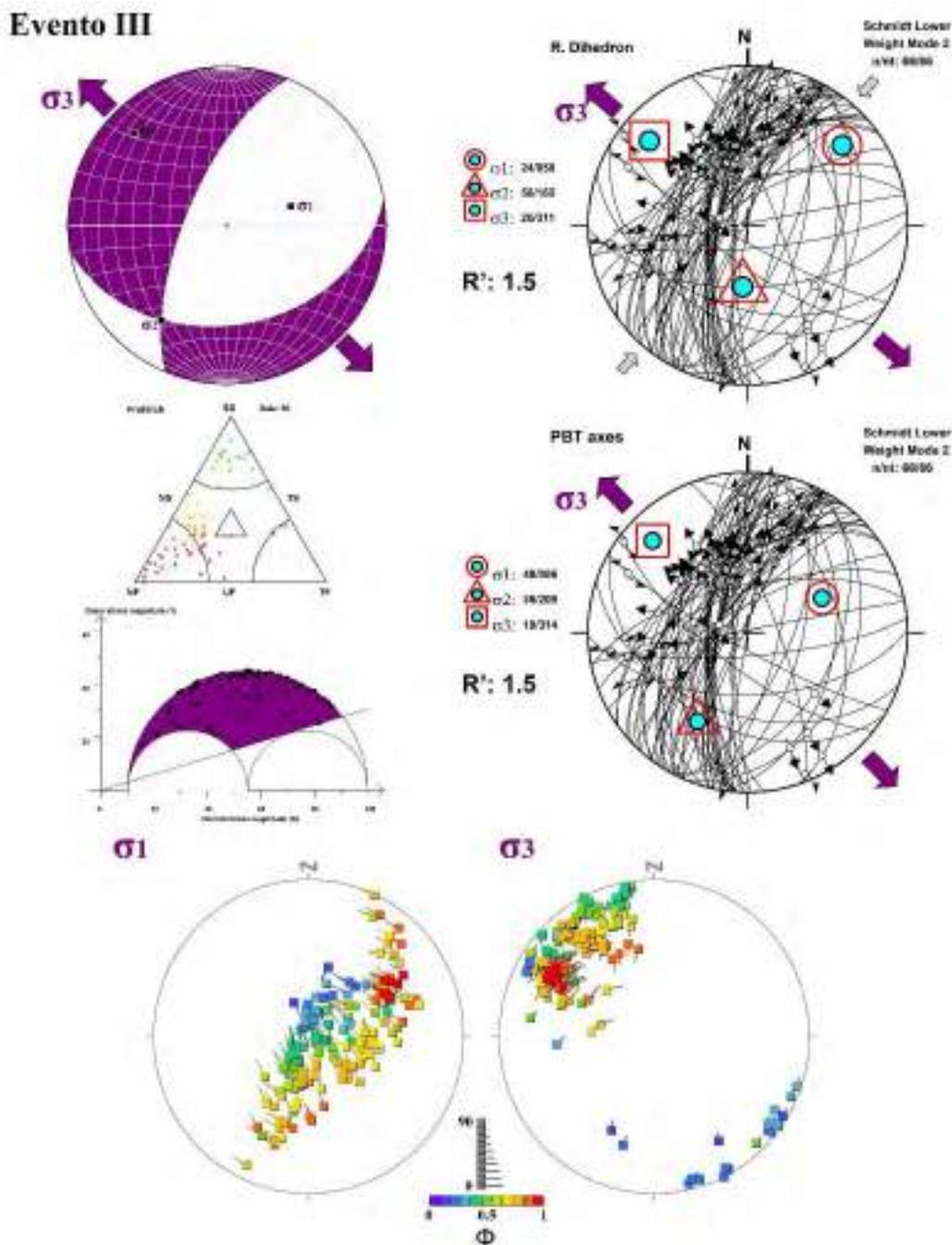


Figura 4. 60: Representación de todos los planos de falla del Grupo 3 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal (σ_3) NO-SE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen de rumbo puro, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia.

GRUPO 4: ONO-ESE Extensión pura

Con un total de 69 datos de fallas con cinemática (Tabla 4. 5) en este grupo se realiza el procesamiento de los datos por estaciones estructurales con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color anaranjado) y campos de acortamiento (Color blanco), los datos que pertenecen a este grupo son de las estaciones (E1,

E4, E5, E7, E10, E11, E12, E14, E15, E16, E17, E18, E20, E21 y E22) realizadas en el área de estudio, pero algunas varían (E1, E7 y E17) debido a ubicación de la estación o porque se cuenta con algunos datos puntuales variables (Figura 4. 61).

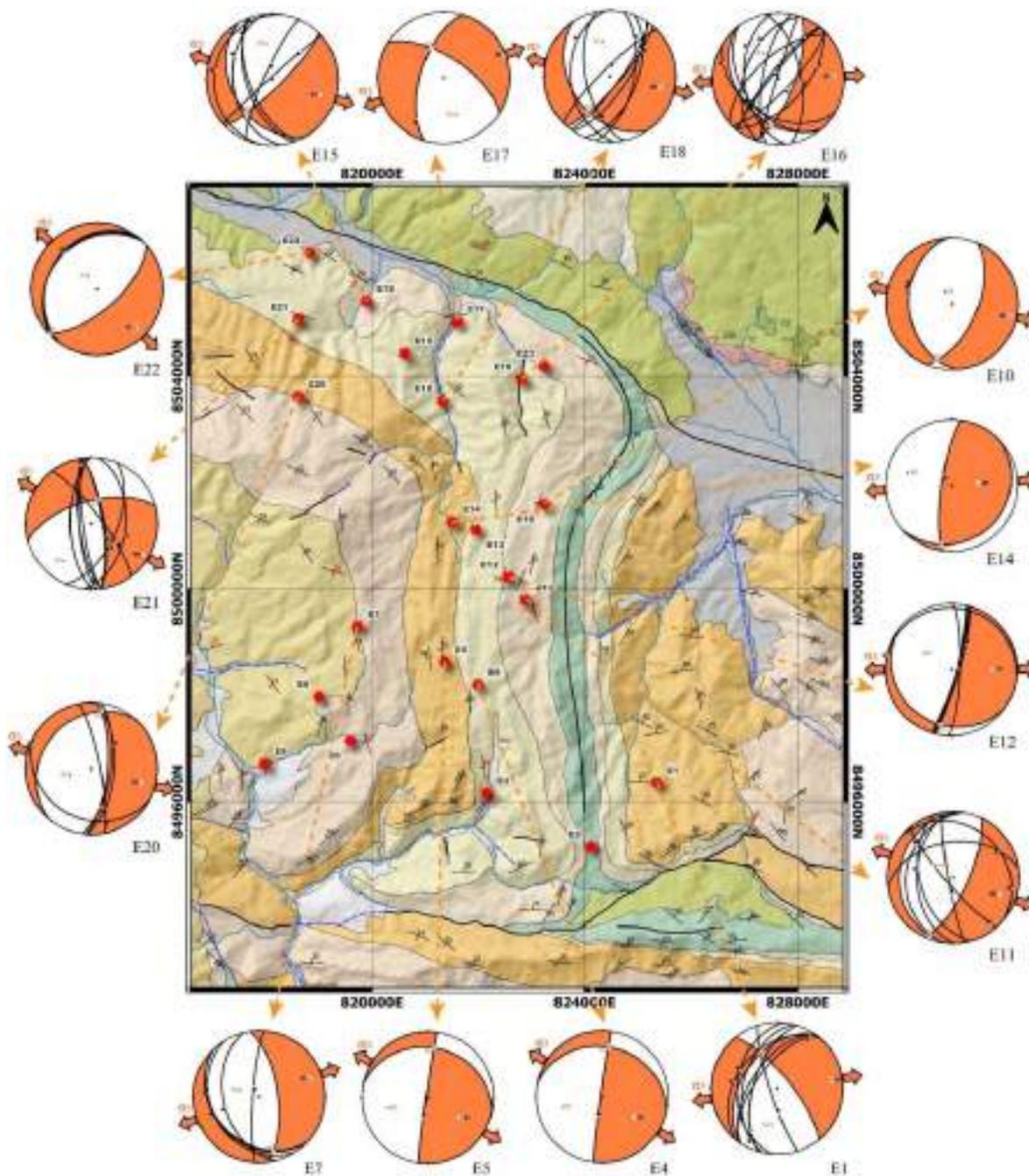


Figura 4. 61: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 4, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia.

ID	Coordenadas		Estación estructural	Unidad Geologica	Datos estructurales										Círculo de Mohr	R'	Regimen
	Este	Norte			Estructura	Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Movimiento	Trend	Plunge	Rake			
1	825056	8495300	E1	Fm. Kayra	Falla	24	60	55	P	2	NxSx	60	45	-55	Reactivada	0.5	NF
2	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	206	88	29	S	1	IxSx	25	29	29	Reactivada	1.5	SS
3	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	194	47	20	P	1	SxNx	208	14	-20	Reactivada	1	NS
4	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	197	60	26	P	1	NxSx	211	22	-26	Reactivada	1	NS
5	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	220	38	64	P	1	NxSx	278	34	-64	Reactivada	0.5	NF
6	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	185	39	73	S	1	NxDx	296	37	-107	Neoformada	0.5	NF
7	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	162	81	60	S	1	IxDx	177	59	120	Reactivada	1	UF
8	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	188	88	65	S	1	IxDx	192	65	115	Neoformada	1	UF
9	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	134	30	67	P	1	NxDx	250	27	-113	Reactivada	0.5	NF
10	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	148	27	57	P	1	NxDx	274	22	-123	Reactivada	0.5	NF
11	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	176	35	65	S	1	NxDx	296	31	-115	Neoformada	0.5	NF
12	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	176	35	70	S	1	NxDx	290	33	-110	Neoformada	0.5	NF
13	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	309	21	30	S	1	IxSx	101	10	30	Reactivada	1	UF
14	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	262	45	30	S	1	IxSx	60	21	30	Estable	2	TS
15	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	164	48	40	S	1	NxDx	315	29	-140	Neoformada	0.5	NF
16	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	189	30	60	S	1	NxDx	313	26	-120	Neoformada	0.5	NF
17	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	170	84	70	S	1	IxDx	186	69	110	Neoformada	1	UF
18	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	139	81	10	S	1	IxDx	141	10	170	Reactivada	1.5	SS
19	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	179	44	80	S	1	NxDx	283	43	-100	Neoformada	0.5	NF
20	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	17	80	54	P	2	NxSx	30	53	-54	Reactivada	1	NS
21	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	15	83	60	S	1	NxSx	27	59	-60	Reactivada	1	UF
22	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	161	58	10	S	1	NxDx	336	8	-170	Reactivada	1.5	SS
23	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	158	62	23	S	1	NxDx	327	20	-157	Reactivada	1.5	SS
24	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	228	87	40	S	1	IxSx	45	40	40	Reactivada	2	TS
25	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	204	80	72	S	1	IxSx	356	69	72	Reactivada	1	UF
26	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	173	40	57	S	1	NxDx	303	33	-123	Neoformada	0.5	NF
27	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	191	70	20	S	1	NxSx	198	19	-20	Reactivada	1.5	SS
28	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	199	47	55	S	1	NxDx	335	37	-125	Reactivada	0.5	NF
29	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	143	45	88	S	1	NxDx	236	45	-92	Reactivada	0.5	NF
30	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	44	75	87	S	1	NxDx	145	75	-93	Reactivada	0.5	NF
31	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	349	62	80	S	1	NxDx	100	60	-100	Neoformada	0.5	NF
32	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	218	79	75	S	1	IxSx	3	71	75	Reactivada	1	UF
33	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	228	62	30	S	1	IxSx	33	26	30	Reactivada	2	TS
34	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	174	47	50	P	2	NxDx	315	34	-130	Neoformada	0.5	NF
35	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	197	88	40	P	1	SxIx	15	40	40	Reactivada	2	TS

36	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	42	58	47	P	1	NxSx	72	38	-47	Reactivada	1	NS
37	822784	8503106	E16	Fm. Chilca	Falla	121	42	21	P	1	NxDx	285	14	-159	Reactivada	1	NS
38	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	197	61	30	S	1	NxSx	213	26	-30	Reactivada	1	NS
39	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	12	60	38	P	2	NxSx	33	32	-38	Reactivada	1	NS
40	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	22	56	48	S	1	NxSx	54	38	-48	Reactivada	0.5	NF
41	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	34	69	50	P	1	NxSx	57	46	-50	Reactivada	1	NS
42	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	36	78	40	P	3	NxSx	46	39	-40	Reactivada	1	NS
43	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	176	40	45	S	1	NxDx	319	27	-135	Neoformada	0.5	NF
44	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	225	80	75	P	2	IxSx	12	72	75	Reactivada	1	UF
45	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	168	60	40	P	2	IxDx	191	34	140	Reactivada	2	TS
46	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	8	66	43	P	1	NxDx	167	39	-137	Neoformada	1	NS
47	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	4	62	60	P	1	NxSx	43	50	-60	Neoformada	0.5	NF
48	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	349	79	18	P	1	NxDx	165	18	-162	Neoformada	1.5	SS
49	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	118	24	7	P	1	NxDx	292	3	-173	Estable	1	UF
50	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	176	74	10	C	1	DxIx	179	10	170	Neoformada	1.5	SS
51	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	323	78	52	P	1	NxDx	128	50	-128	Reactivada	1	NS
52	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	172	74	10	C	2	DxNx	349	10	-170	Neoformada	1.5	SS
53	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	179	63	8	P	1	NxDx	355	7	-172	Neoformada	1.5	SS
54	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	172	79	10	P	1	DxNx	350	10	-170	Neoformada	1.5	SS
55	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	23	58	74	P	0	NxDx	141	55	-106	Reactivada	0.5	NF
56	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	6	47	81	P	1	NxDx	109	46	-99	Neoformada	0.5	NF
57	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	352	75	72	P	1	NxDx	133	67	-108	Neoformada	0.5	NF
58	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	224	27	87	S	1	NxDx	317	27	-93	Estable	0.5	NF
59	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	214	25	76	S	1	NxDx	319	24	-104	Estable	0.5	NF
60	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	214	57	5	P	1	Sx	31	4	5	Reactivada	1.5	SS
61	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	216	63	10	C	1	Sx	31	9	10	Reactivada	1.5	SS
62	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	166	45	86	P	1	Nx	250	45	-86	Neoformada	0.5	NF
63	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	184	82	78	P	1	Ix	331	76	78	Neoformada	1	UF
64	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	2	79	75	P	1	Nx	37	71	-75	Neoformada	1	UF
65	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	17	83	85	S	1	Nx	71	81	-85	Reactivada	1	UF
66	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	282	7	0	C	1	Sx	282	0	0	Estable	1	UF
67	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	188	78	80	P	2	Ix	318	74	80	Neoformada	2.5	TF
68	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	189	13	90	S	1	Nx	279	13	-90	Estable	0.5	NF
69	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	219	82	87	S	1	Ix	330	81	87	Reactivada	1	UF

Tabla 4. 5: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 4 de régimen de extensión pura. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Nx: Falla normal, Ix: Falla inversa, Dx: Falla dextral, Sx: Falla sinistral.

La representación de todos los planos de falla del Grupo 4 (Figura 4. 61) con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color anaranjado) y campos de acortamiento (Color blanco), muestra la dirección del esfuerzo principal (σ_3) ONO-ESE; la representación del tensor de tensión facilitada por el Win-Tensor programa (Delvaux, 2012) con ejes de tensiones principales σ_1 (círculo), σ_2 (triángulo) y σ_3 (cuadrado); muestra los resultados de los esfuerzos por dos métodos, uno de ellos R. Dihedron (Diedros rectos) en el cual el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 299/66, con un R' (índice de esfuerzo) de 0.5 que me indica un régimen de esfuerzo de extensión pura (Tabla 4. 2) y el segundo PBT axes en el cual el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 303/65, con un R' (índice de esfuerzo) de 0.5 que me indica un régimen de esfuerzo de extensión pura. Podemos ver que en ambos métodos el régimen de esfuerzo es el mismo, pero los valores de los esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) tiene variaciones no significativas.

En la Figura 4. 62 el diagrama ternario de Frohlich que nos indica el régimen tectónico local por estructura, muestra la proyección de cada una de las fallas que forman parte de este Grupo 4, indicando el régimen tectónico en colores y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr muestran 25 fallas de carácter neoformadas, 38 reactivadas y 06 estables, hay un número importante de fallas situadas sobre la envolvente externa lo que estaría indicando un carácter reactivado o neoformado si se proyecta al borde del círculo de Morh, estos realizados mediante el software Win-Tensor 5.9.2.

Los últimos estereogramas (Figura 4. 62) por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 (Yamaji, 2000), en el gráfico observamos la orientación de datos del σ_1 (336.3/48.5) hacia el NNE-SSO, con colas que apuntan en dirección ONO-ESE donde se ubica el σ_3 (95.3/23.2), el valor de la relación de tensión (φ) es igual a 0.61 que a partir de la clasificación de Ritz (1994) de los diferentes tipos de régimen tectónico (Figura 1. 31), estamos frente a un régimen de extensión puro casi uniaxial.

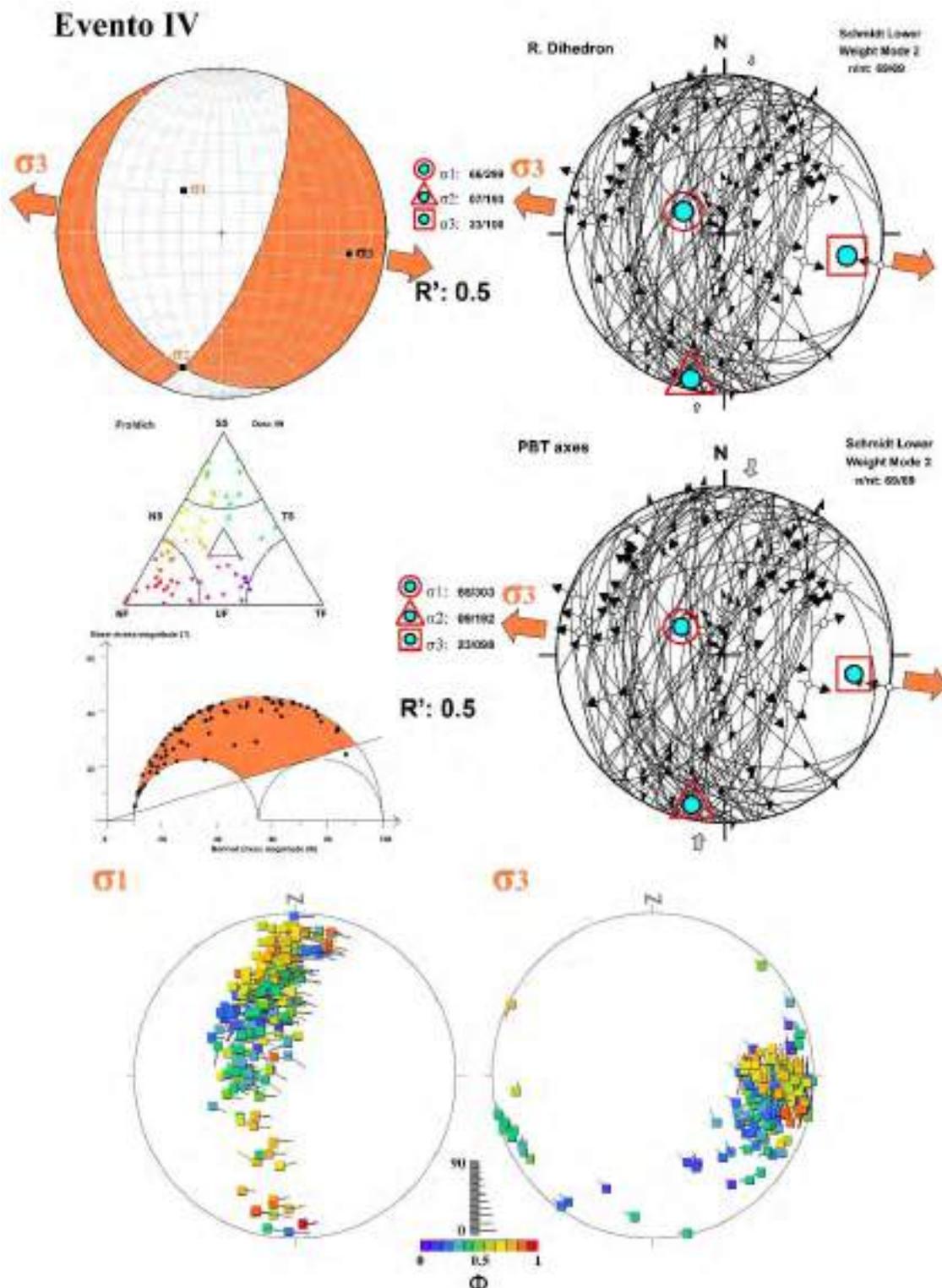


Figura 4. 62: Representación de todos los planos de falla del Grupo 4 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal (σ_3) ONO-ESE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen de extensión pura, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia.

GRUPO 5: NNO-SSE Extensión pura

Con un total de 45 datos de fallas con cinemática (Tabla 4. 6) en este grupo se realiza el procesamiento de los datos por estaciones estructurales con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color azul) y campos de acortamiento (Color blanco), los datos que pertenecen a este grupo son de las estaciones (E1, E3, E4, E6, E9, E10, E11, E12, E15, E16, E17, E18, E20, E21 y E22) realizadas en el área de estudio, pero algunas varían (E4, E10 y E22) debido a ubicación de la estación y porque se cuenta con algunos datos puntuales variables (Figura 4. 63).

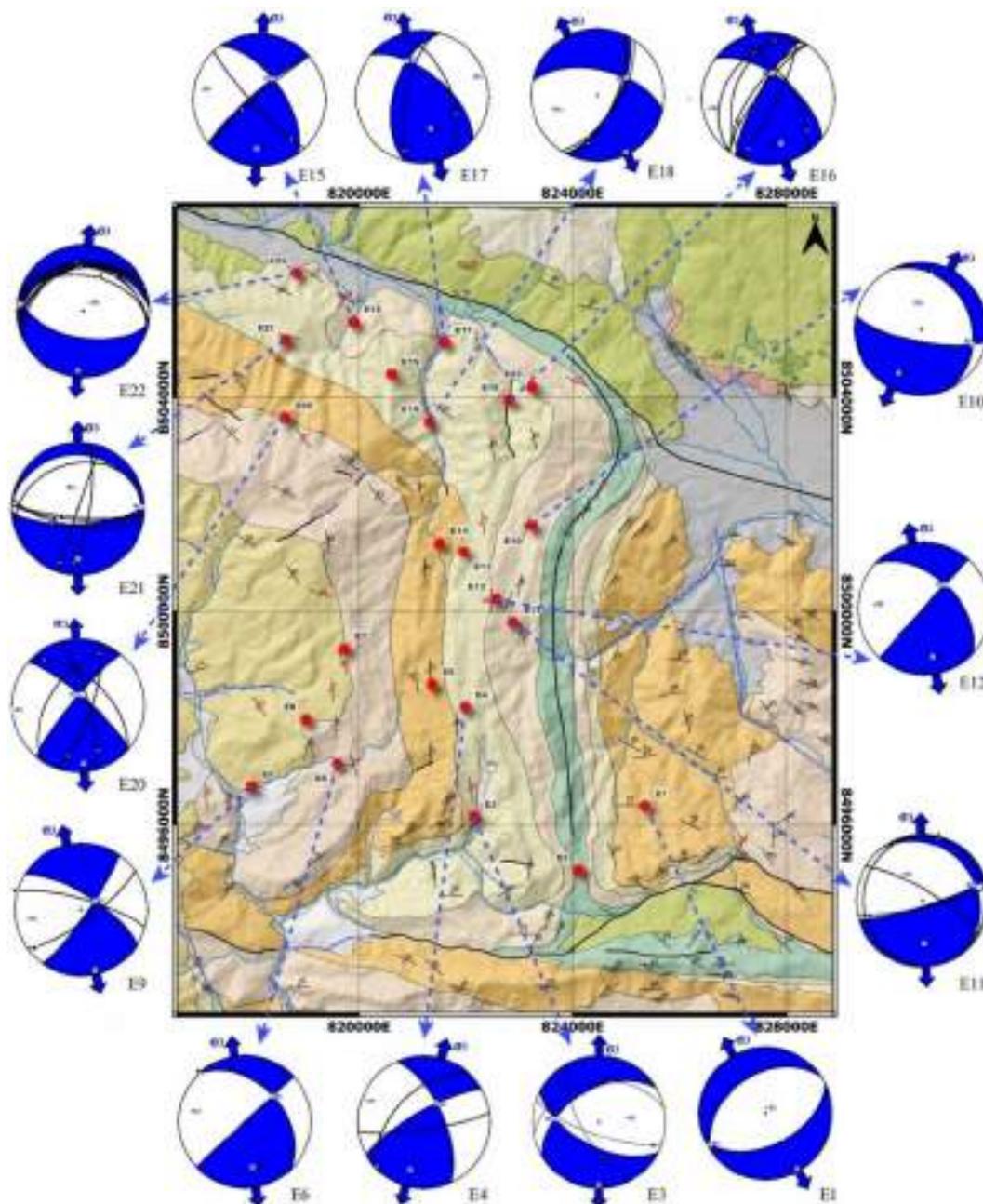


Figura 4. 63: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 5, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación a que corresponde. Fuente: Elaboración propia.

ID	Coordenadas		Estación estructural	Unidad Geologica	Datos estructurales										Círculo de Mohr	R'	Regimen
	Este	Norte			Estructura	Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Movimiento	Trend	Plunge	Rake			
1	823208	8501788	E3	Fm. Chilca	Falla	259	40	70	C	3	NxDx	14	37	-110	Estable	0.5	NF
2	822376	8497207	E3	Fm. Chilca	Falla	151	68	50	S	1	NxSx	175	45	-50	Reactivada	1	NS
3	822376	8497207	E3	Fm. Chilca	Falla	109	74	17	S	1	NxSx	114	16	-17	Reactivada	1.5	SS
4	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	82	81	38	S	1	NxDx	255	37	-142	Estable	1	NS
5	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	54	76	15	P	1	NxDx	230	15	-165	Reactivada	1.5	SS
6	823267	8501420	E10	Fm. Quilque	Falla	334	25	40	C	1	NxSx	11	16	-40	Neoformada	0.5	NF
7	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	344	5	30	S	1	NxSx	14	2	-30	Estable	1	UF
8	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	179	12	26	S	1	NxDx	333	5	-154	Estable	1	UF
9	823163	8500550	E11	Fm. Quilque	Falla	78	81	24	C	1	DxDx	254	24	-156	Estable	1.5	SS
10	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	222	89	40	C	1	lxDx	223	40	140	Reactivada	2	TS
11	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	229	85	67	S	1	lxDx	241	66	113	Reactivada	1	UF
12	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	137	82	25	S	1	NxSx	141	25	-25	Reactivada	1.5	SS
13	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	216	77	75	S	1	lxDx	256	70	105	Reactivada	2.5	TF
14	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	199	47	18	S	1	NxDx	7	13	-162	Reactivada	1	NS
15	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	216	70	40	S	1	lxDx	232	37	140	Reactivada	2	TS
16	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	216	34	58	S	1	NxDx	343	28	-122	Reactivada	0.5	NF
17	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	26	80	20	S	2	NxDx	202	20	-160	Reactivada	1.5	SS
18	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	326	59	30	P	1	lxDx	129	25	30	Reactivada	2	TS
19	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	192	70	18	S	1	lxDx	198	17	162	Reactivada	1.5	SS
20	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	338	54	57	S	1	lxDx	116	43	57	Reactivada	2.5	TF
21	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	33	65	40	S	1	NxDx	193	36	-140	Reactivada	1	NS
22	821326	8503539	E18	Fm. Chilca	Falla	24	68	30	C	1	NxDx	192	28	-150	Reactivada	1	NS
23	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	19	74	24	P	1	NxDx	192	23	-156	Reactivada	1.5	SS
24	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	214	54	20	P	1	NxDx	22	16	-160	Reactivada	1	NS
25	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	313	55	18	P	1	NxSx	324	15	-18	Reactivada	1	NS
26	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	344	77	28	C	1	lxDx	157	27	28	Reactivada	1.5	SS
27	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	199	90	15	S	1	DxDx	199	15	165	Reactivada	1.5	SS
28	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	9	76	20	P	1	NxDx	184	19	-160	Neoformada	1.5	SS
29	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	76	65	P	1	NxDx	247	62	-115	Estable	1	UF
30	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	76	65	P	1	NxDx	247	62	-115	Estable	1	UF
31	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	256	32	48	P	1	NxDx	33	23	-132	Estable	0.5	NF
32	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	99	68	69	P	1	NxDx	235	60	-111	Estable	0.5	NF
33	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	80	74	P	1	NxDx	243	71	-106	Estable	1	UF
34	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	281	34	64	S	1	NxDx	41	30	-116	Reactivada	0.5	NF
35	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	286	30	68	S	1	NxDx	41	28	-112	Reactivada	0.5	NF

36	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	244	34	72	S	1	NxDx	355	32	-108	Estable	0.5	NF
37	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	279	45	78	S	1	NxDx	26	44	-102	Reactivada	0.5	NF
38	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	255	33	80	S	1	NxDx	357	32	-100	Estable	0.5	NF
39	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	254	36	85	S	1	NxDx	350	36	-95	Estable	0.5	NF
40	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	257	27	85	S	1	NxDx	353	27	-95	Estable	0.5	NF
41	825056	8495300	E1	Fm. Kayra	Falla	64	50	85	P	2	Nx	146	50	-85	Reactivada	0.5	NF
42	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	224	53	5	P	1	Dx	227	4	175	Reactivada	2	TS
43	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	317	42	0	P	3	Sx	317	0	0	Reactivada		XF
44	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	286	77	0	C	1	Ix	286	0	0	Estable	1.5	SS
45	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	301	77	10	C	1	Sx	119	10	10	Reactivada	1.5	SS

Tabla 4. 6: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 5 de régimen de extensión pura. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Nx: Falla normal, Ix: Falla inversa, Dx: Falla dextral, Sx: Falla sinistral.

La representación de todos los planos de falla del Grupo 5 (Figura 4. 63) con ayuda del software FaultKin 8.1 (Marrett y Allmendinger, 1990) que muestra campos de extensión (Color azul) y campos de acortamiento (Color blanco), muestra la dirección del esfuerzo principal (σ_3) NNO-SSE; la representación del tensor de tensión facilitada por el Win-Tensor programa (Delvaux, 2012) con ejes de tensiones principales σ_1 (círculo), σ_2 (triángulo) y σ_3 (cuadrado); muestra los resultados de los esfuerzos por dos métodos, uno de ellos R. Dihedron (Diedros rectos) en el cual el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 293/62, con un R' (índice de esfuerzo) de 0.5 que me indica un régimen de esfuerzo de extensión pura (Tabla 4. 2) y el segundo PBT axes en el cual el esfuerzo de compresión principal (sigma 1) es 306/58, con un R' (índice de esfuerzo) de 0.5 que me indica un régimen de esfuerzo de extensión pura. Podemos ver que en ambos métodos el régimen de esfuerzo es el mismo pero los valores de los esfuerzos (σ_1 , σ_2 y σ_3) tiene variaciones no significativas.

En la Figura 4. 64 el diagrama ternario de Frohlich nos indica el régimen tectónico local por estructura, muestra la proyección de cada una de las fallas que forman parte de este Grupo 5, indicando el régimen tectónico en colores y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr muestra 02 fallas de carácter neoformadas, 28 reactivadas y 15 estables, hay un número importante de fallas situadas sobre la envolvente externa lo que estaría indicando un carácter reactivado, seguido de fallas de carácter estable, estos realizados mediante el software WinTensor 5.9.2.

Los últimos estereogramas (Figura 4. 64) por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 (Yamaji, 2000), en el gráfico observamos la orientación de datos del σ_1 (297.1/58.3) hacia el OSO-ENE, con colas que apuntan en dirección NNO-SSE donde se ubica el σ_3 (178.6/16.4), el valor de la relación de tensión (φ) es igual a 0.90 que a partir de la clasificación de Ritz (1994) de los diferentes tipos de régimen tectónico (Figura 1. 31), estamos frente a un régimen de extensión puro uniaxial.

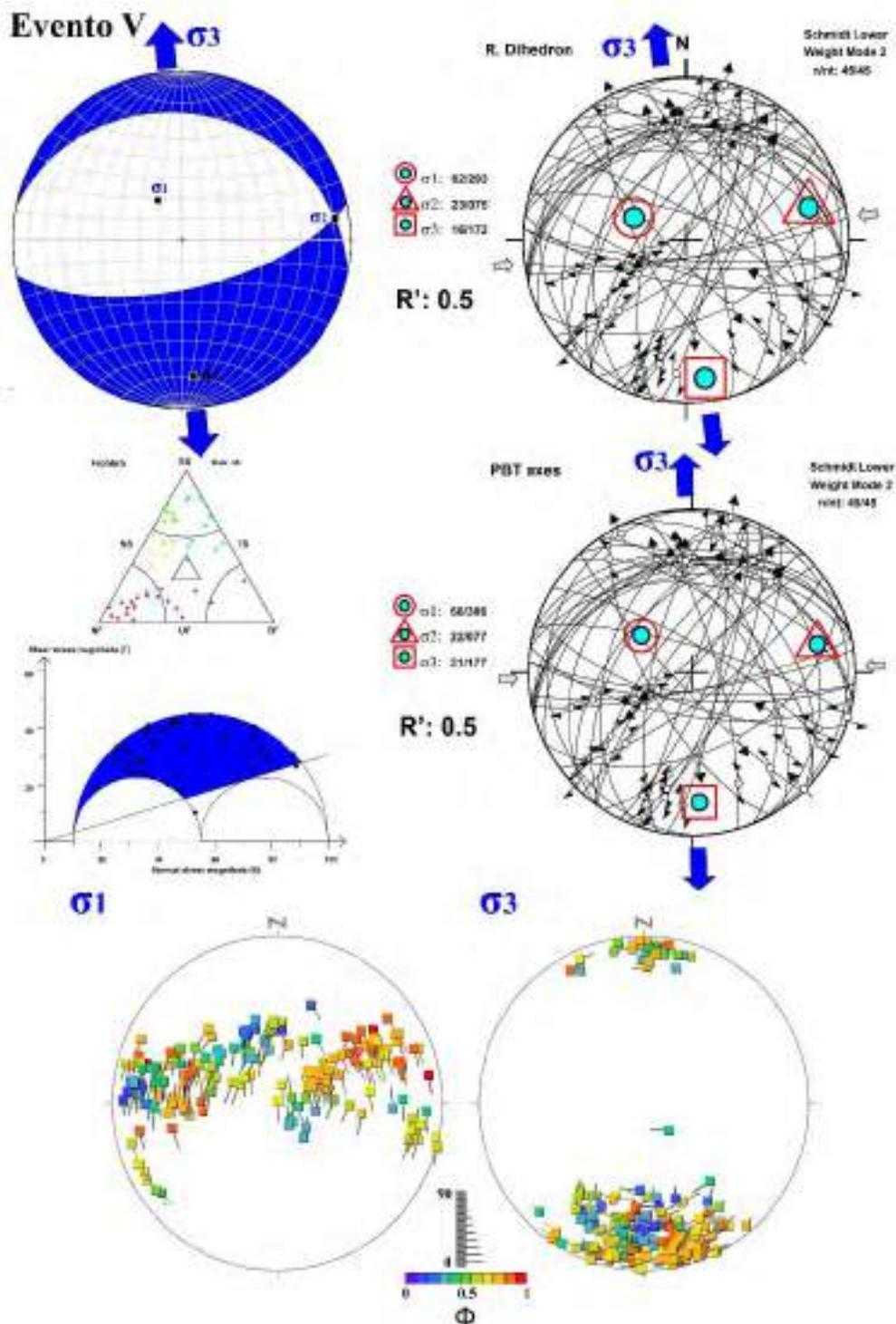


Figura 4. 64: Representación de todos los planos de falla del Grupo 5 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal σ_3 NNO-SSE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen de extensión pura, diagrama ternario de Froehlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia.

La interpretación del análisis de las estaciones estructurales por poblaciones de grupos, ha definido la dirección de paleoesfuerzos y eventos que han intervenido en el área de estudio, afectado la evolución del anticlinal de Puquín y deformaciones posteriores que nos muestra la configuración estructural actual.

A través de la tabla de correlación de las edades de las unidades estratigráficas del Altiplano, su régimen tectónico regional y las relaciones de corte de las estructuras geológicas de campo, se realiza la comparación de los eventos y las poblaciones de grupos de datos de fallas tomados en campo a partir de las estaciones estructurales para determinar la evolución del área de estudio (Figura 4. 103), diferenciando cinco eventos a partir de los grupos de poblaciones de fallas con cinemática, el Grupo 1 pertenece a un régimen tectónico transpresional que forma parte de la génesis del anticlinal de Puquín, con el esfuerzo principal σ_1 en dirección NO-SE, como segundo evento el Grupo 2 que presenta un régimen tectónico transtensional con dirección del esfuerzo principal (σ_3) OSO-ENE, este evento es posterior a la formación del anticlinal de Puquín, como tercer evento el Grupo 3 que presenta un régimen tectónico de rumbo puro con dirección del esfuerzo principal (σ_3) NO-SE, como cuarto evento el Grupo 4 que presenta un régimen tectónico de extensión pura con dirección el esfuerzo principal (σ_3) ONO-ESE, finalmente el evento del Grupo 5 que presenta un régimen tectónico de extensión pura con dirección del esfuerzo principal (σ_3) NNO-SSE siendo el evento tectónico actual.

EVENTO	Cantidad de datos	Win-Tensor												R'	Régimen
		Círculo de Morh			Diedros Rectos				PBT axes						
		Reactivada	Estable	Neoformada	σ_1		σ_3		σ_1		σ_3				
					Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge	Trend	Plunge			
I	65	36	14	15	118	14	16	40	131	18	25	41	2.0	Transpresivo	
II	64	33	5	26	118	41	249	37	97	66	260	23	1.0	Transtensivo	
III	66	44	5	17	50	24	311	20	66	48	314	19	1.5	Rumbo puro	
IV	69	38	6	25	299	66	100	23	303	65	98	23	0.5	Extensión pura	
V	45	28	15	2	293	62	172	16	306	58	177	21	0.5	Extensión pura	

EVENTO	Cantidad de datos	MIM						Porcentaje del carácter de las fallas (%)			
		Método inverso múltiple						Régimen	Reactivada	Estable	Neoformada
		σ_1		σ_3		ϕ					
		Trend	Plunge	Trend	Plunge						
I	65	124.6	16.1	15.9	48.1	0.82	Transpresivo casi radial	55	22	23	
II	64	39.4	45.3	270.9	31.6	0.99	Transtensivo	52	8	41	
III	66	109.7	71.7	315.8	16.5	0.67	Rumbo puro	67	8	26	
IV	69	336.3	48.5	95.3	23.2	0.61	Extensión pura casi uniaxial	55	9	36	
V	45	297.1	58.3	178.6	16.4	0.90	Extensión pura uniaxial	62	33	4	

Tabla 4. 7: Resumen de los paleoesfuerzos principales σ_1 y σ_3 por diferentes métodos y usando softwares como Win-Tensor y MIM. Fuente: Elaboración propia.

4.4 ANÁLISIS MICROTTECTÓNICO EN SECCIONES DELGADAS ORIENTADAS

Se recolectaron muestras en las estaciones estructurales para el análisis petrográfico y microestructural. Se seleccionaron muestras orientadas para análisis de sección delgada con el fin de analizar las microestructuras para compararlas con las estructuras macroscópicas.

Las 10 muestras orientadas MO-E4-AP-01, MO-E4-AP-02, MO-E10-AP, MO-E13-AP-01, MO-E13-AP-02, MO-E15-AP, MO-E18-AP, MO-E22-AP-01, MO-E22-AP-02 y MO-E22-AP-03 (Figura 4. 3) que pertenecen a las estaciones estructurales E4, E10, E13, E15, E18 y E22 son analizadas en el laboratorio de microscopía de la Escuela profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. El procedimiento del trabajo con las muestras seleccionadas se observa en la Figura 4. 65 desde la etapa de campo hasta la etapa de descripción microscópica.



Figura 4. 65: Flujo de trabajo de las muestras destinadas al análisis petrográfico y microestructural en secciones delgadas, en el Laboratorio de Microscopía-Ingeniería Geológica (UNSAAC). Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE LAS MUESTRAS ORIENTADAS.

Con el fin de describir petrográficamente las muestras orientadas, se tienen muestras de areniscas de las formaciones Quilque y Chilca, estas areniscas se clasificaron siguiendo la propuesta de Folk et al. (1970).

Muestras de la Formación Quilque.

La muestra MO-E10-AP, perteneciente a la estación E10 es una roca detrítica de grano muy fino cuyo contenido de matriz es <15%. El porcentaje promedio de los minerales presentes en base al porcentaje de clastos al 40% es de cuarzo (35%), feldespatos (25%), líticos (20%), accesorios (5%) y opacos (15%). Los feldespatos son en su mayoría plagioclasas (con macla de Carlsbad). La roca es, por lo tanto, una Grauvaca feldespática (Figura 4. 66).

La muestra MO-E15-AP, perteneciente a la estación E15 es una roca detrítica de grano fino cuyo contenido de matriz es <15%. El porcentaje promedio de los minerales presentes son cuarzo (25%), feldespatos (20%), líticos (35%), accesorios (10%) y opacos (10%). Los clastos de cuarzo se encuentran fracturados y el feldespato en su mayoría son plagioclasas (con macla polisintética). La roca es, por lo tanto, una Arcosa lítica (Figura 4. 66).

Muestras de la Formación Chilca.

Las muestras MO-E4-AP, perteneciente a la estación E4 son rocas detríticas de grano muy fino a fino cuyo contenido de matriz es <15%. El porcentaje promedio de los minerales presentes son cuarzo (35%), feldespatos (30%), líticos (20%), accesorios (5%) y opacos (10%). Los clastos de feldespato son en su mayoría plagioclasas (con macla polisintética). La roca es, por lo tanto, una Arcosa lítica (Figura 4. 66).

Las muestras MO-E13-AP, perteneciente a la estación E13 son rocas detríticas de grano fino cuyo contenido de matriz es <15%. El porcentaje promedio de los minerales presentes son cuarzo (40%), feldespatos (30%), líticos (15%), accesorios (5%) y opacos (10%). Los feldespatos son en su mayoría plagioclasas (con macla polisintética), hay varios cristales fracturados. La roca es, por lo tanto, una Litarenita feldespática (Figura 4. 66).

La muestra MO-E18-AP, perteneciente a la estación E18 es una roca detrítica de grano muy fino a fino cuyo contenido de matriz es <15%. El porcentaje promedio de los minerales presentes son cuarzo (25%), feldespatos (35%), líticos (15%), accesorios (15%) y opacos (10%). Los clastos de cuarzo están fracturados, los feldespatos son en su mayoría plagioclasas (con macla polisintética) y algunos cristales presentes con zonación, así también existen varios cristales alterados. La roca es, por lo tanto, una Arcosa lítica (Figura 4. 66).

Las muestras MO-E22-AP, perteneciente a la estación E22 es una roca detrítica de grano fino cuyo contenido de matriz es <15%. El porcentaje promedio de los minerales presentes son cuarzo (25%), feldespatos (15%), líticos (35%), accesorios (15%) y opacos (10%). Los clastos de feldespato son en su mayoría plagioclasas (con macla polisintética). La roca es, por lo tanto, una Litarenita (Figura 4. 66).

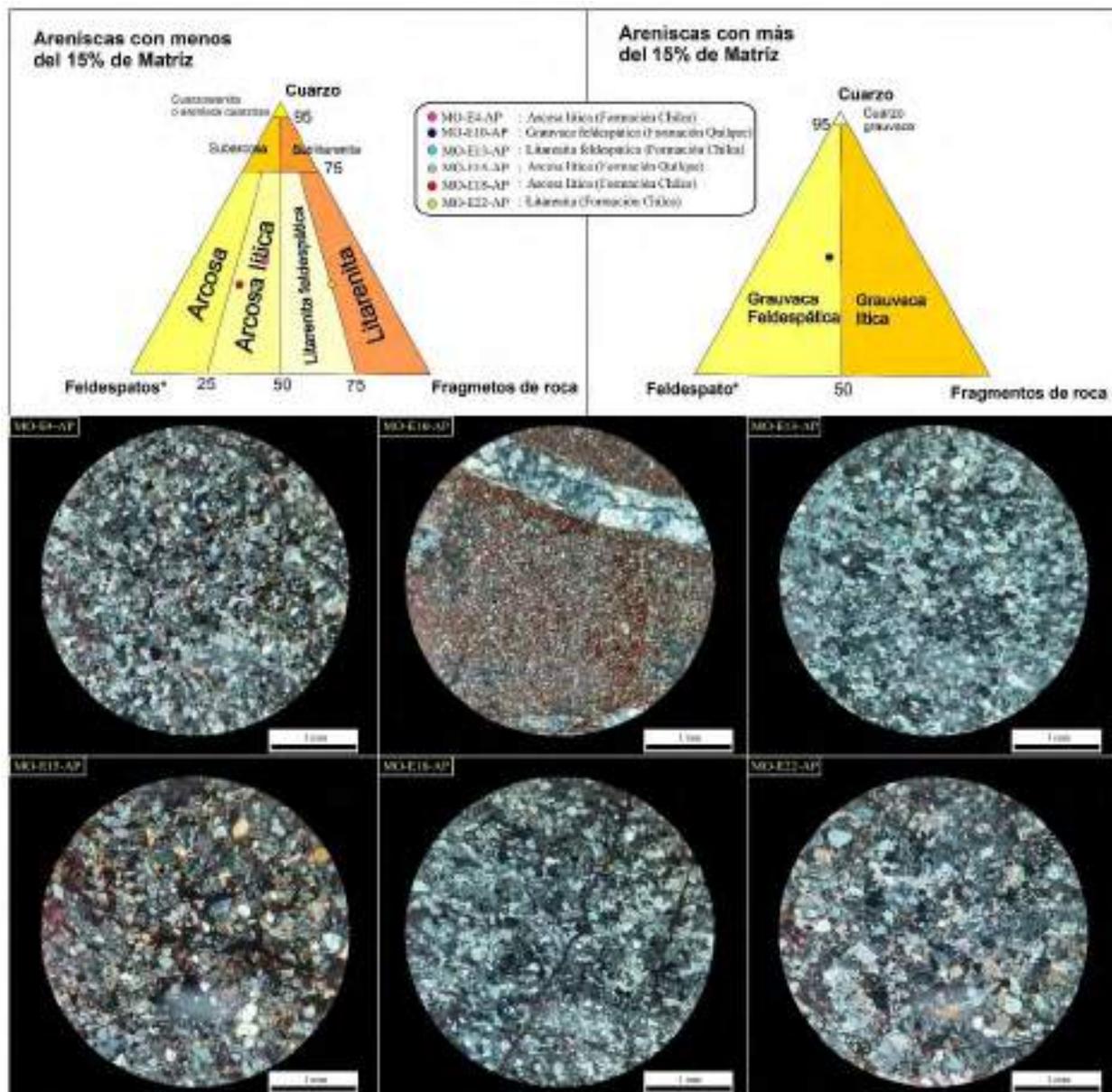


Figura 4. 66: Clasificación de Folk et al. (1970) de las rocas siliciclásticas. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 MICROTTECTÓNICA A PARTIR DE MUESTRAS ORIENTADAS.

Como se menciona el objetivo de la microtectónica en este trabajo de tesis es comprender los mecanismos de las deformaciones, la geometría de las estructuras y su relación con las macroestructuras que se realizaron en el análisis de estaciones estructurales con datos de campo y datos bibliográficos. Así también el tomar muestras orientadas permite tener la orientación real de la muestra y sus elementos estructurales en relación espacial.

Toma de muestras orientadas.

La metodología que se usó para la toma de las 10 muestras orientadas, sigue este procedimiento; primer paso, se tomó la muestra en una zona con presencia de fracturas; segundo se identificó cuál es el tope de la muestra, marcándolo con una X y en un lado una flecha que indica la dirección del

tope; tercero se escribió en la muestra una flecha que indica la dirección del norte y la medida de los elementos estructurales (lineación, foliación, estratificación, etc.); cuarto se puso la muestra de nuevo sobre el lugar que se tomó y se realizó un dibujo en la libreta de campo, con todos los detalles; quinto se tomó una foto orientada de la misma manera que el dibujo, indicando la dirección de corte y finalmente se etiquetó y empaquetó la muestra (Figura 4. 65).

Dirección de corte.

La dirección de corte definida en cada muestra orientada se realiza a partir de las estructuras encontradas en cada una de ellas (Tabla 4. 8); Por lo tanto, las superficies de observación que se escogieron son a partir del mejor plano de corte de los elementos estructurales (Figura 4. 67 y 4. 68).

Hay que tener en cuenta que el corte óptimo que se lleva a cabo para el análisis de microestructuras es la sección XZ del elipsoide de deformación finita y siempre es paralelo a la lineación (si existe) y perpendicular a la foliación (si existe), ya que este plano registra la deformación que ha sufrido la roca.

De no existir estos elementos ideales se toma decisión con base en; si la estructura es estratificación solamente se hace un corte perpendicular a este elemento estructural, si solo hay lineación se corta paralelo a ella y si no es bien reconocido un elemento se puede obtener 3 cortes diferentes a partir de la muestra para generar el elipsoide de deformación.

En las muestras MO-E4-AP-01, MO-E13-AP-01 y MO-E22-AP-02 tomadas de las estaciones E4, E13 y E22, los mejores planos de corte (272/90), (278/71) y (288/76) se realizan a partir del patrón fundamental a tener en cuenta como es la estratificación (182/70), (185/80) y (038/35) respectivamente; Por lo tanto, estos cortes son perpendiculares a la estratificación de cada una de ellas (Figura 4. 67 y 4. 68).

En las muestras MO-E4-AP-02, MO-E13-AP-02, MO-E15-AP, MO-E18-AP y MO-E22-AP-01 tomadas de las estaciones E4, E13, E15, E18 y E22, los mejores planos de corte (061/39), (263/60), (192/13), (292/42) y (360/87) se realizan a partir del patrón importante a tener en cuenta como es la falla (197/60), (170/85), (135/78), (036/78) y (255/10) respectivamente; Por lo tanto, estos cortes son los cortes óptimos en el plano XZ del elipsoide de deformación finita de cada una de ellas (Figura 4. 67 y 4. 68).

En las muestras MO-E10-AP y MO-E22-AP-03 tomadas de las estaciones E10 y E22, los mejores planos de corte (168/84) y (242/83) se realizan a partir del patrón fundamental a tener en cuenta como es la vetilla extensional (265/40) y (333/85) respectivamente; Por lo tanto, estos cortes son perpendiculares a la vetilla extensional de cada una de ellas (Figura 4. 67 y 4. 68).

Muestra	Estación estructural	Litología	Dato estructural				Plano de corte	
			Estructura	Strike	Dip	Rake	Strike	Dip
MO-E4-AP-01	Estación 4	Areosa lítica	Estratificación	182°	70°		272°	90°
MO-E4-AP-02	Estación 4	Areosa lítica	Falla	197°	60°	-026	061°	39°
MO-E10-AP	Estación 10	Gravuca feldespática	Vetilla extensional	265°	40°		168°	84°
MO-E13-AP-01	Estación 13	Litarenita feldespática	Estratificación	185°	80°		278°	71°
MO-E13-AP-02	Estación 13	Litarenita feldespática	Falla	170°	85°	-120	263°	60°
MO-E15-AP	Estación 15	Areosa Lítica	Falla	135°	78°	-175	192°	13°
MO-E18-AP	Estación 18	Areosa Lítica	Falla	036	78°	-040	292°	42°
MO-E22-AP-01	Estación 22	Litarenita	Falla	255°	10°	-105	360°	87°
MO-E22-AP-02	Estación 22	Litarenita	Estratificación	038	35°		288°	76°
MO-E22-AP-03	Estación 22	Litarenita	Vetilla extensional	333°	85°		242°	83°

Tabla 4. 8: Datos estructurales y planos de corte óptimos de las muestras orientadas. Fuente: Elaboración propia.

Determinar la elipse y el elipsoide.

Para determinar la elipse de deformación se usó el método de ajuste de una elipse, a una forma arbitraria denominado elipse de momento (Steger, 1996), pero hay que tener en cuenta que esta técnica para calcular elipses no es el mejor ajuste de mínimos cuadrados, lo que dará resultados inexactos para partículas irregulares (Mulchrone y Choudhury, 2004), por ese motivo se selecciona clastos representativos que tengan relación con la deformación frágil – dúctil. Se usó el software EllipseFit 3.9.0 (Vollmer, 2022) para determinar las elipses con la metodología y criterios mencionados.

Para determinar los elipsoides se usaron los softwares SPO 2003 y el ELLIPSOID 2003 (Launeau y Robin, 2003a; 2003b y 2005). El primero nos permite la obtención de parámetros de la elipse, mientras que el segundo a partir de tres elipses determina el elipsoide.

El ELLIPSOID 2003 permite la obtención del elipsoide con los datos obtenidos por el SPO2003 que corresponden básicamente a los ejes mayor y menor y el rake de las elipses seleccionadas, también se coloca el strike y dip del plano que contiene cada elipse. Lo que se obtiene del ELLIPSOID 2003 además de obtener los parámetros para construir el elipsoide, son los parámetros para construir los diagramas de Flinn. Esta metodología es bien descrita en el trabajo de Botero et al. (2015). Cabe mencionar que en este estudio se ha realizado un reprocesamiento de la elipse determinada con el software EllipseFit 3.9.0 a la construcción de la elipse con el Software SPO2003, para así trabajar con el ELLIPSOID 2003 y determinar el elipsoide.

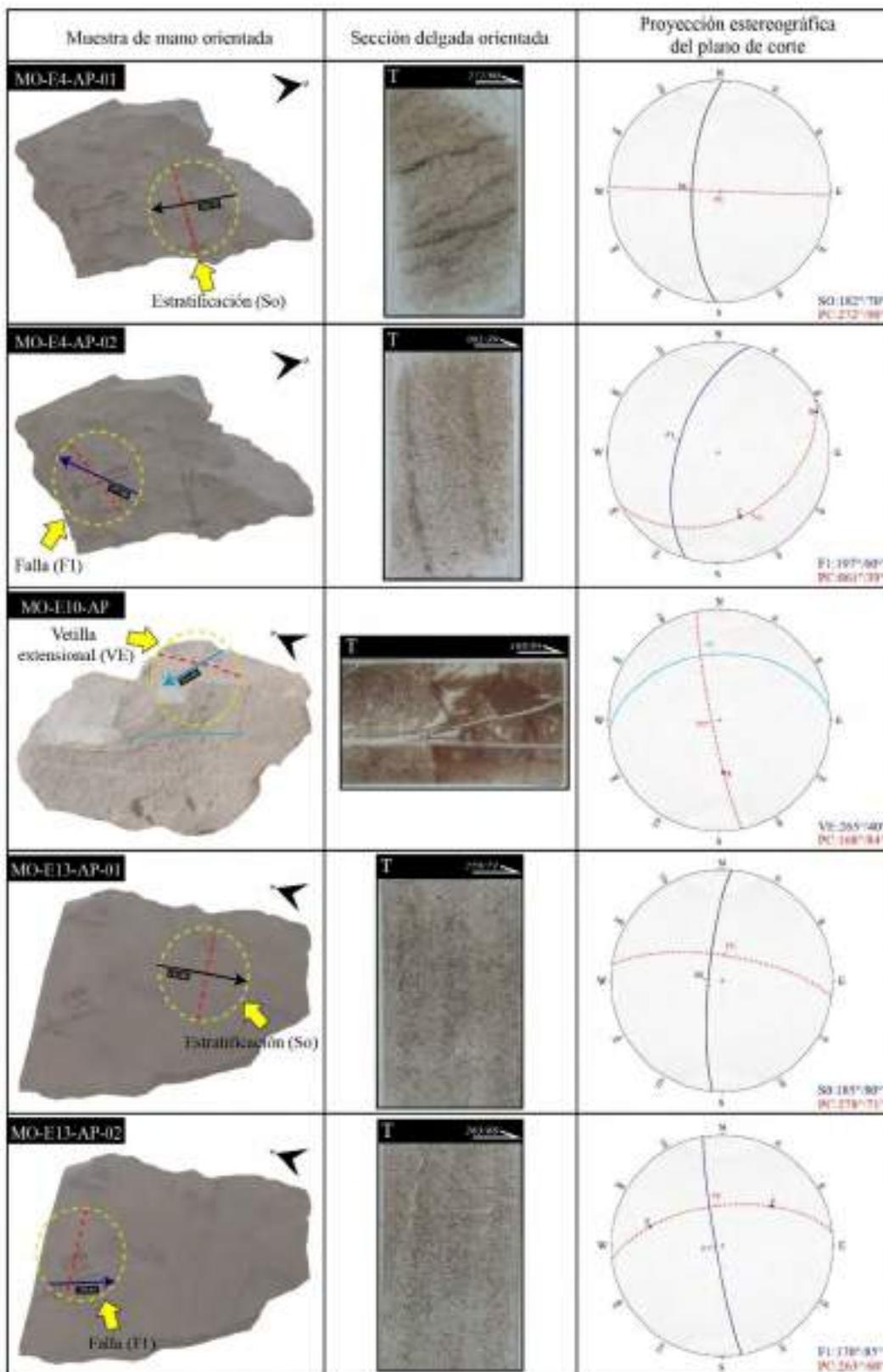


Figura 4. 67: Proyección estereográfica de los planos de corte óptimos de las muestras orientadas (SO: Estratificación PC: Plano de corte F1: Falla VE: Vetilla extensional T: Tope). Fuente: Elaboración propia.

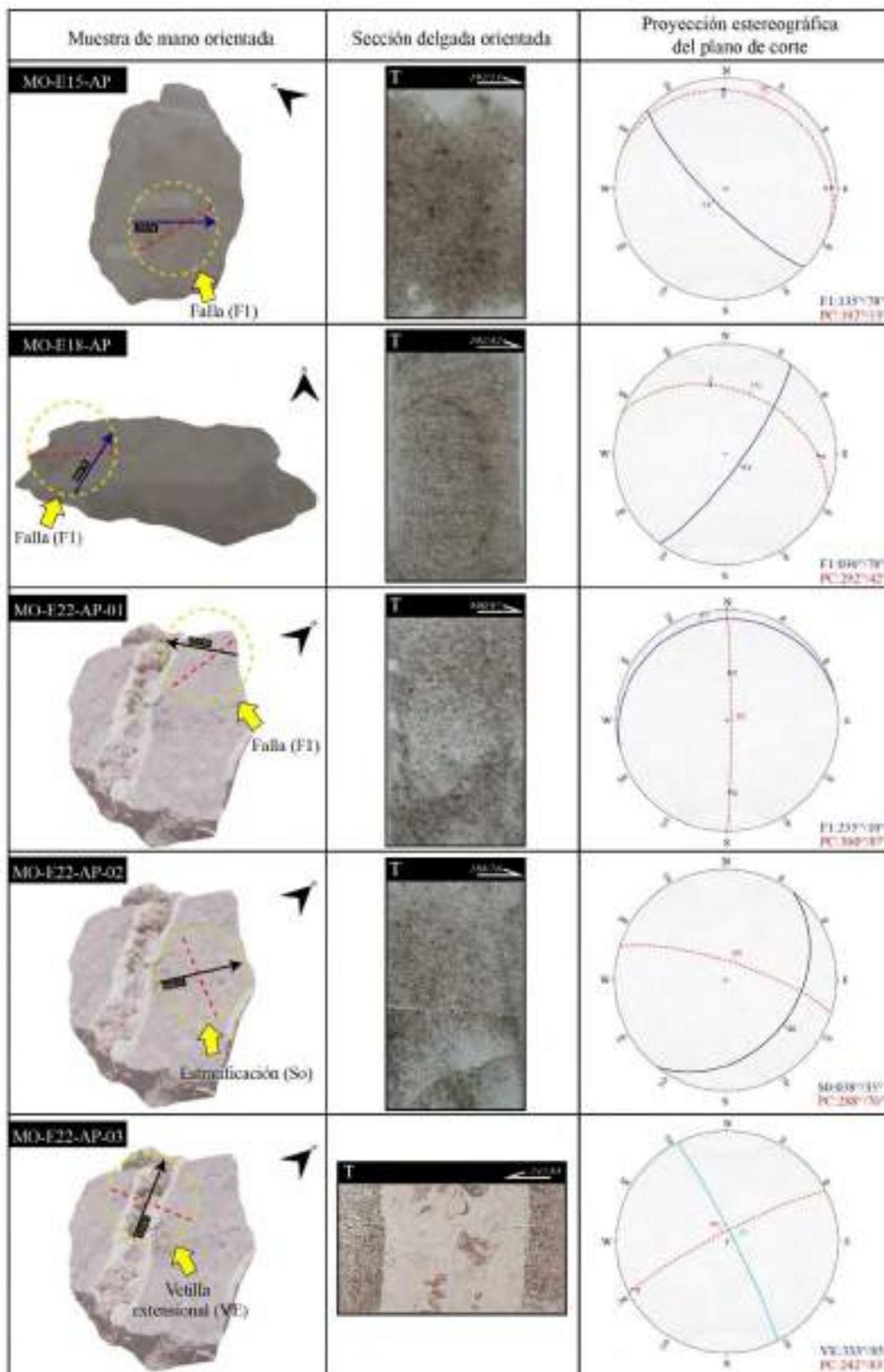


Figura 4. 68: Proyección estereográfica de los planos de corte óptimos de las muestras orientadas (SO: Estratificación PC: Plano de corte F1: Falla VE: Vetilla extensional T: Tope). Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 ANÁLISIS DE SECCIONES ORIENTADAS.

4.4.1 MO-E4-AP-01

En esta muestra se puede identificar fracturas que aprovechan las zonas de debilidad como estratificaciones (So) (Figura 4. 69). Así también presenta cristales fracturados que pertenecen a una deformación frágil. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (272/90) y por ende las estructuras tienen una orientación relativa de NO-SE.

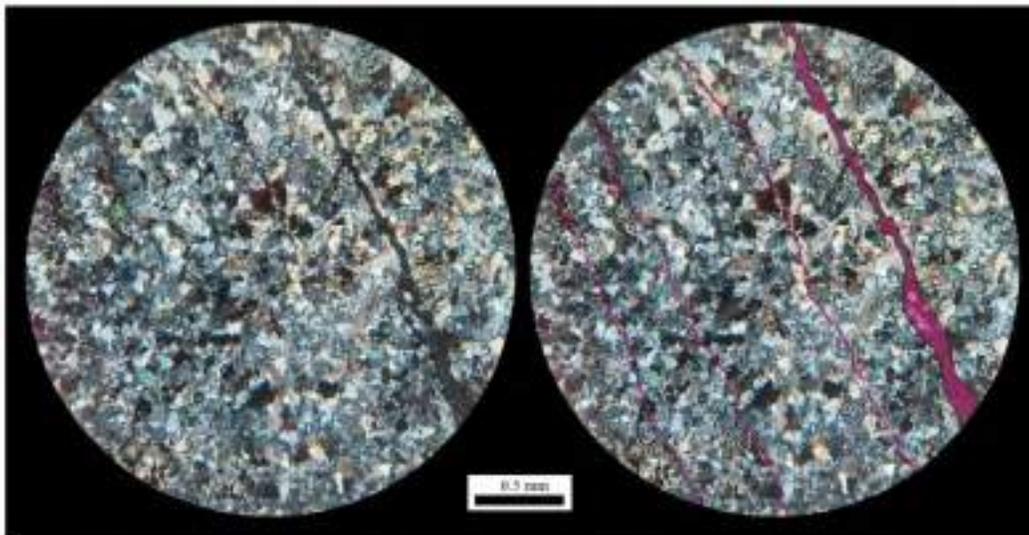


Figura 4. 69: Microfotografía en nicols cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra la fractura paralela a las estratificaciones (So) (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

Se orienta la muestra con observación al norte, para el análisis microtectónico y observamos que las estructuras como fracturas y estratificaciones tienen una orientación de NE-SO.

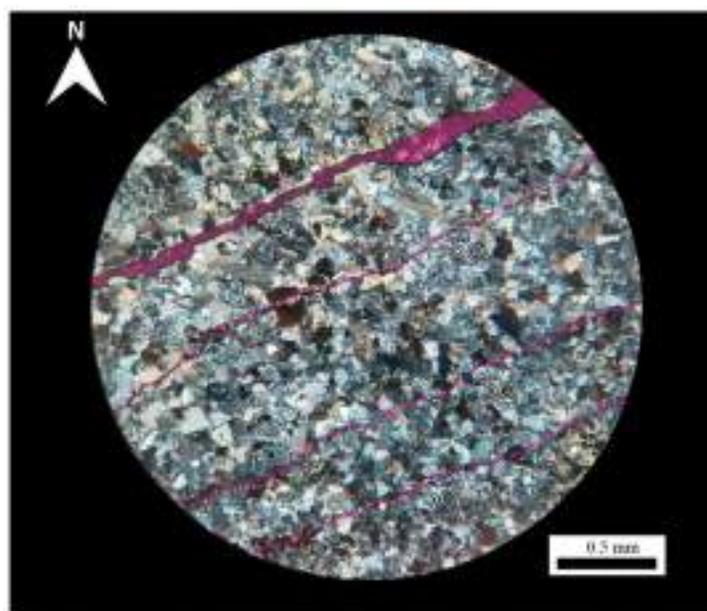


Figura 4. 70: Microfotografía en nicols cruzados y orientada al norte (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 MO-E4-AP-02

En esta muestra (Figura 4. 71) se identifica una vetilla que presenta un pliegue asimétrico que nos indica movimiento relativo dextral (V3n), determinado a partir de la forma de la vetilla que además los cristales presentan un leve movimiento. Las estructuras que se encuentran pertenecen a una deformación frágil. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (061/39).

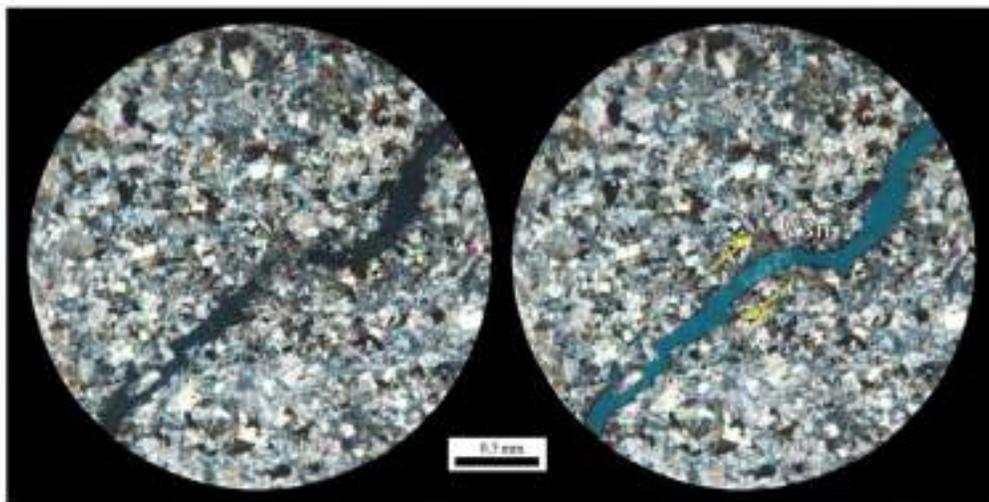


Figura 4. 71: Microfotografía en nicols cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra vetilla que presenta un pliegue asimétrico que nos indica movimiento relativo dextral (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte, para el análisis microtectónico; observamos que la estructura encontrada tiene una orientación de extensión NE-SO. Los paleoesfuerzos (σ_1 , σ_3) que se muestran en la microfotografía, al realizar la correlación con los eventos encontrados en el análisis estructural macroscópico, se relacionan con el evento 4 de régimen regional extensivo y con los datos de vetillas extensionales encontradas en campo en la estación E22 (Tabla 4. 11).

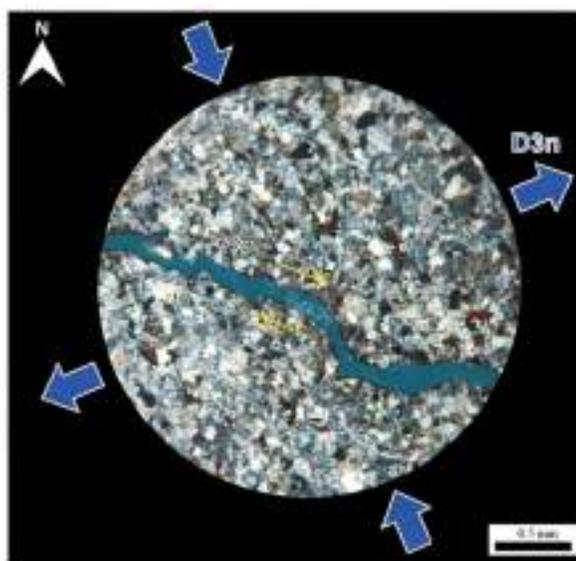


Figura 4. 72: Microfotografía en nicols cruzados y orientada al norte (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 MO-E10-AP

En esta muestra se identifica diversas estructuras, en la Figura 4. 73 tenemos una microbrecha (Bx1n) que es cortada por la vetilla sintaxial (V2n); estas vetillas sintaxiales se producen en sitios de dilatación y presentan naturalmente cristales alargados como cristales que normalmente no tienen una forma alargada como en este caso la calcita, esta vetilla se conoce como crecimiento sintaxial, ya que suelen ser asimétricas, es decir, con una línea media descentrada; al mismo tiempo que se produce esta vetilla sintaxial se genera una sutura (negro) que parte de la zona de abertura asociada a esta estructura, como también se produce los cristales ataxiales (MA2n), la vetilla sintaxial es con cortada por una falla (F2n) con movimiento relativo normal sinistral, que aprovechó el plano de la microbrecha y desplazó la vetilla (V2n), por último, se tienen las vetillas (V4n) que rellenan sitios fracturados. En esta muestra se observa claramente la relación de corte de las estructuras con deformación progresiva frágil-dúctil. En la Figura 4. 74 tenemos la vetilla sintaxial (V2n) con la sutura (negro) presentada anteriormente, pero en diferente posición, acompañada con vetillas (V4n). En las microfotografías la muestra, se encuentra con una dirección de corte (168/84).

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 75), observamos que la vetilla sintaxial tiene una orientación NE-SO. Los eventos reconocidos son los siguientes; el evento (D1n?) es representado por una microbrecha (Bx1n) que posiblemente está asociado a un evento más antiguo que tiene esta tendencia como se produce en el análisis de estructuras regionales. Posteriormente, se tiene un evento (D2n) que se determinó en el análisis estructural macroscópico a partir del análisis de las vetillas extensionales sigmoidales, que nos representa una deformación progresiva, así también en el análisis de fallas con cinemática (evento 3) y los pliegues reconocidos en el Grupo Tacaza, este evento esta representado por una vetilla (V2n), cristales ataxiales de calcita, la falla (F2n) que la desplaza, se plantea que se originaron en el mismo evento, ya que se puede ver que la falla no corta la otra vetilla asociada a V4n. Por último, tenemos un evento (D4n), representado por una serie de vetillas (V4n) que cortan todas las estructuras y se correlaciona con el último evento de extensión del área de estudio, que fue reconocido en el análisis estructural macroscópico de fallas (evento 5) y con la extensión regional del área de estudio (Tabla 4. 11).

A partir de la presencia de los cristales ataxiales de calcita se construye la elipse de deformación, determinando los parámetros de la elipse con una cantidad de datos (N) de 04, un aspecto de la elipse que se refiere a la relación entre el eje mayor y el eje menor (R) de 3.9 y el ángulo de inclinación de la elipse (Φ) de 57.72°. Los ejes de deformación (Z, X) que se muestran pertenecen del mismo modo al evento D2n (Figura 4. 75).

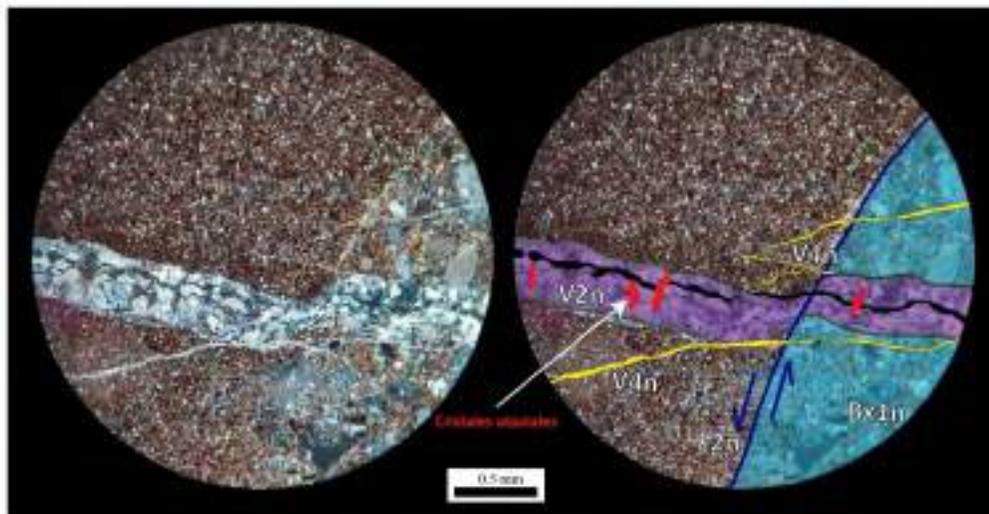


Figura 4. 73: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra las estructuras con deformación progresiva (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

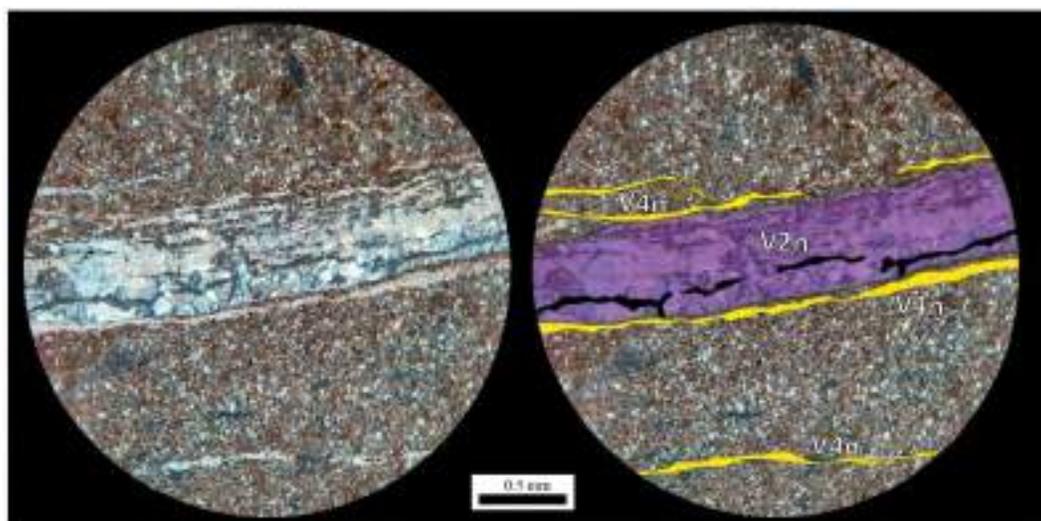


Figura 4. 74: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra la vetilla sintaxial (V2n), la fractura (negra) y vetillas (4n) (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

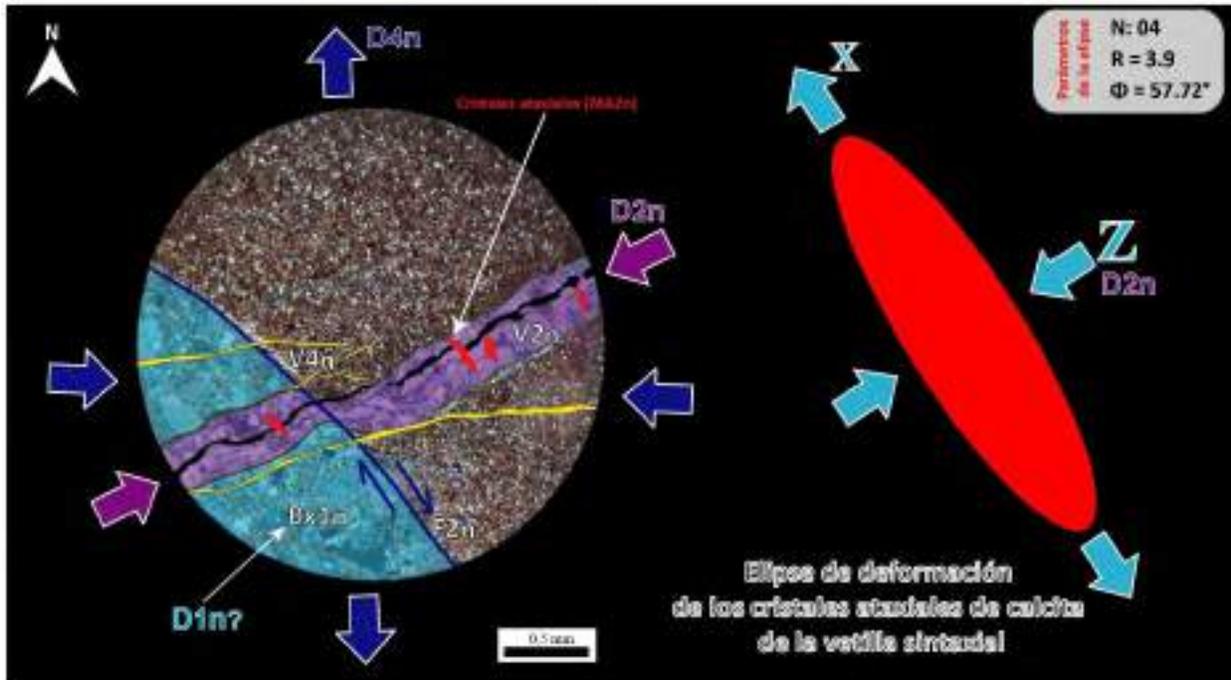


Figura 4. 75: Microfotografía en nicóles cruzados orientada al norte, mostrando los paleoesfuerzos y la elipse de deformación a partir de los cristales ataxiales de calcita (rojo) realizado en el software EllipseFit 3.9.0. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4. 76, a partir de los clastos que presentan deformación se construye la elipse de deformación, usando el software EllipseFit 3.9.0, de la microbrecha (Bx1n), determinando los parámetros de la elipse con una cantidad de datos (N) de 71, un aspecto de la elipse que se refiere a la relación entre el eje mayor y el eje menor (R) de 1.5 y el ángulo de inclinación de la elipse (Φ) de 35° . Los ejes de deformación (Z, X) que se muestran pertenecen a un evento más antiguo que tiene esta tendencia como se produce en el análisis de estructuras regionales, el cual no se determinó en el análisis estructural macroscópico, pero sí en el análisis microtectónico.

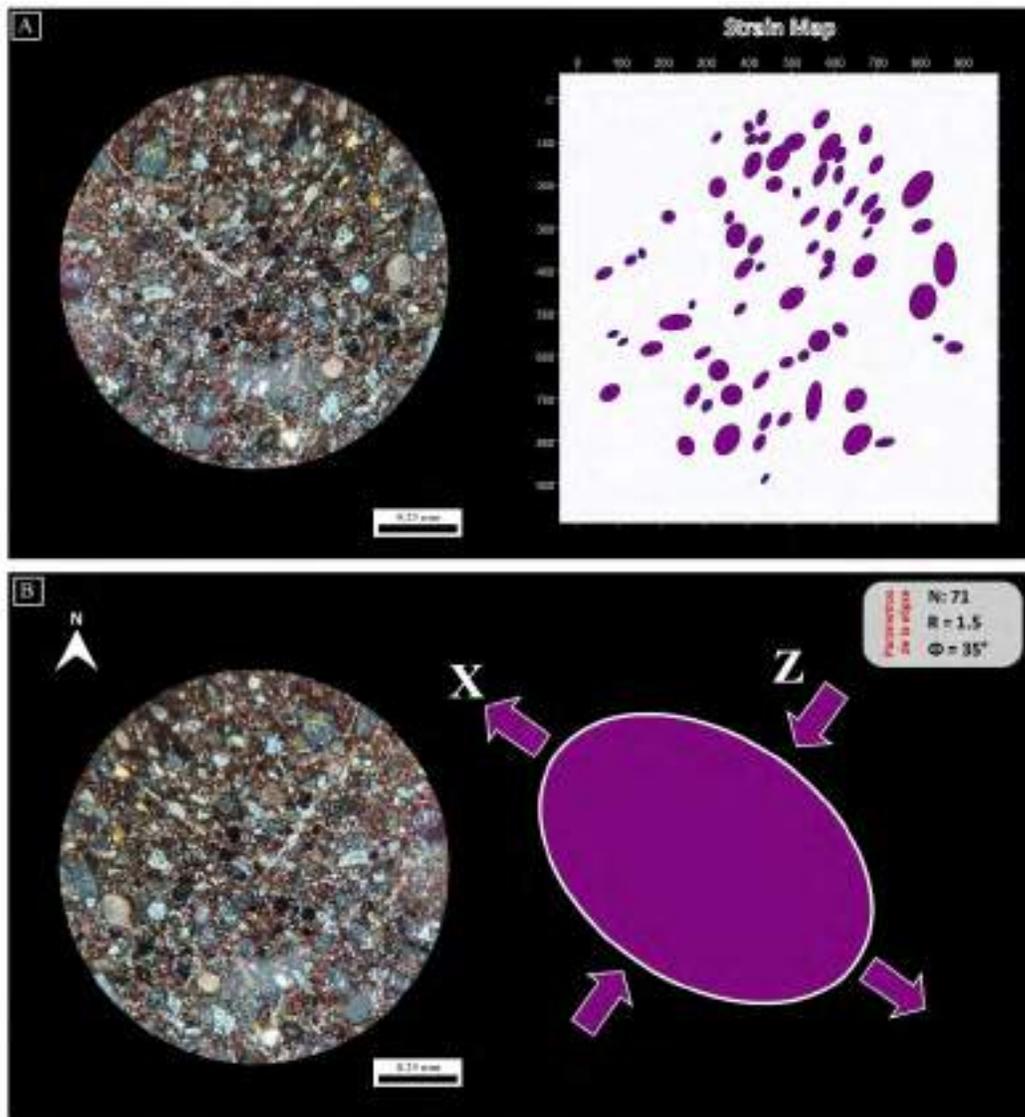


Figura 4. 76: Microfotografía en nicoles cruzados (objetivo 10x/0.25). (A) Strain Map a partir de los clastos y (B) elipse de deformación realizado en el software EllipseFit 3.9.0. Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 MO-E13-AP-01

En esta muestra (Figura 4. 77) se identifica estructuras como vetillas (V4n) que son cortadas por fallas (F4n) con movimiento relativo dextral, pero producto de un mismo evento de deformación. Los cristales se encuentran fracturados e indican una deformación frágil. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (278/71).

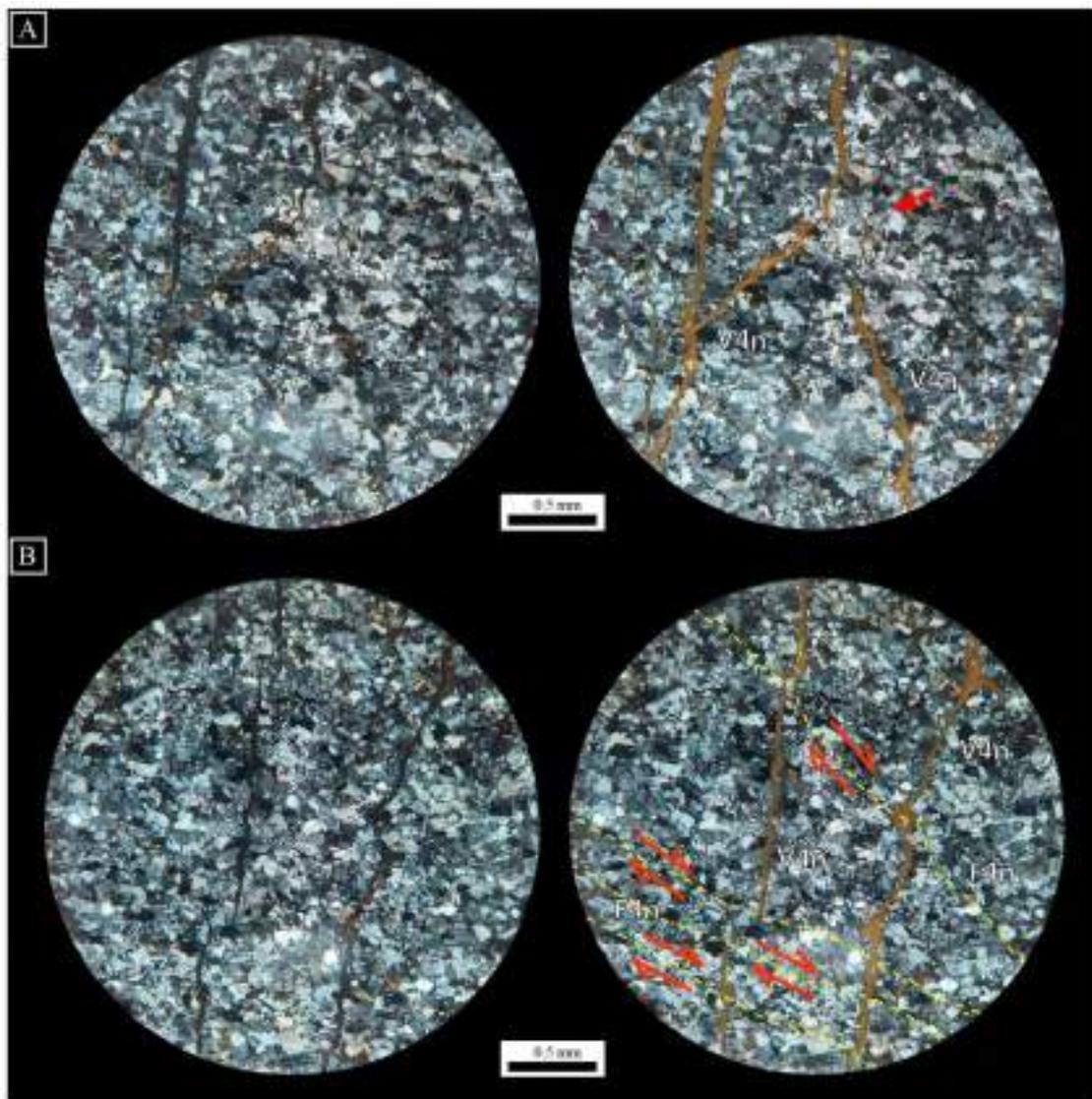


Figura 4. 77: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) vetillas (V4n) y (B) vetillas (V4n) cortadas por un conjunto de fallas dextrales paralelas (F4n). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 78), observamos que las vetillas (V4n) tienen una orientación E-O, cortadas por las fallas (F4n) de orientación NO-SE. Los paleoesfuerzos (σ_1 , σ_3) que se muestran en la microfotografía, al realizar la correlación con los eventos encontrados en el análisis estructural macroscópico, se relacionan con el evento 5 del análisis de fallas macroscópicas de un régimen extensivo (Tabla 4. 11).

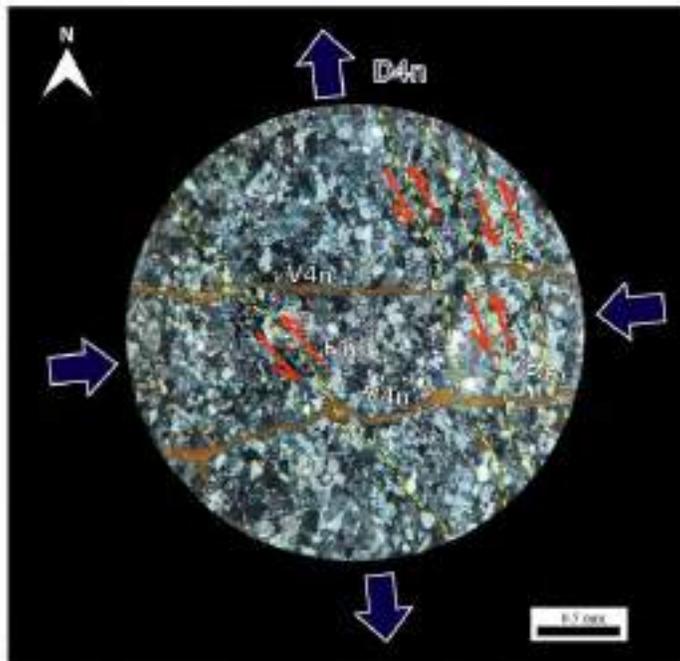


Figura 4. 78: Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Fuente: Elaboración propia.

4.4.5 MO-E13-AP-02

En esta muestra, la Figura (4. 79 A) tiene una vetilla que presenta un pliegue asimétrico que nos indica movimiento relativo dextral (V3n), la Figura (4. 79 B) tiene una vetilla (V3n) que es cortada por una falla (F3n) con movimiento relativo dextral producto de un mismo evento de deformación y la Figura (4. 79 C) muestra vetillas (V3n) con movimiento sinextral. Las estructuras indican una deformación frágil. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (263/60).

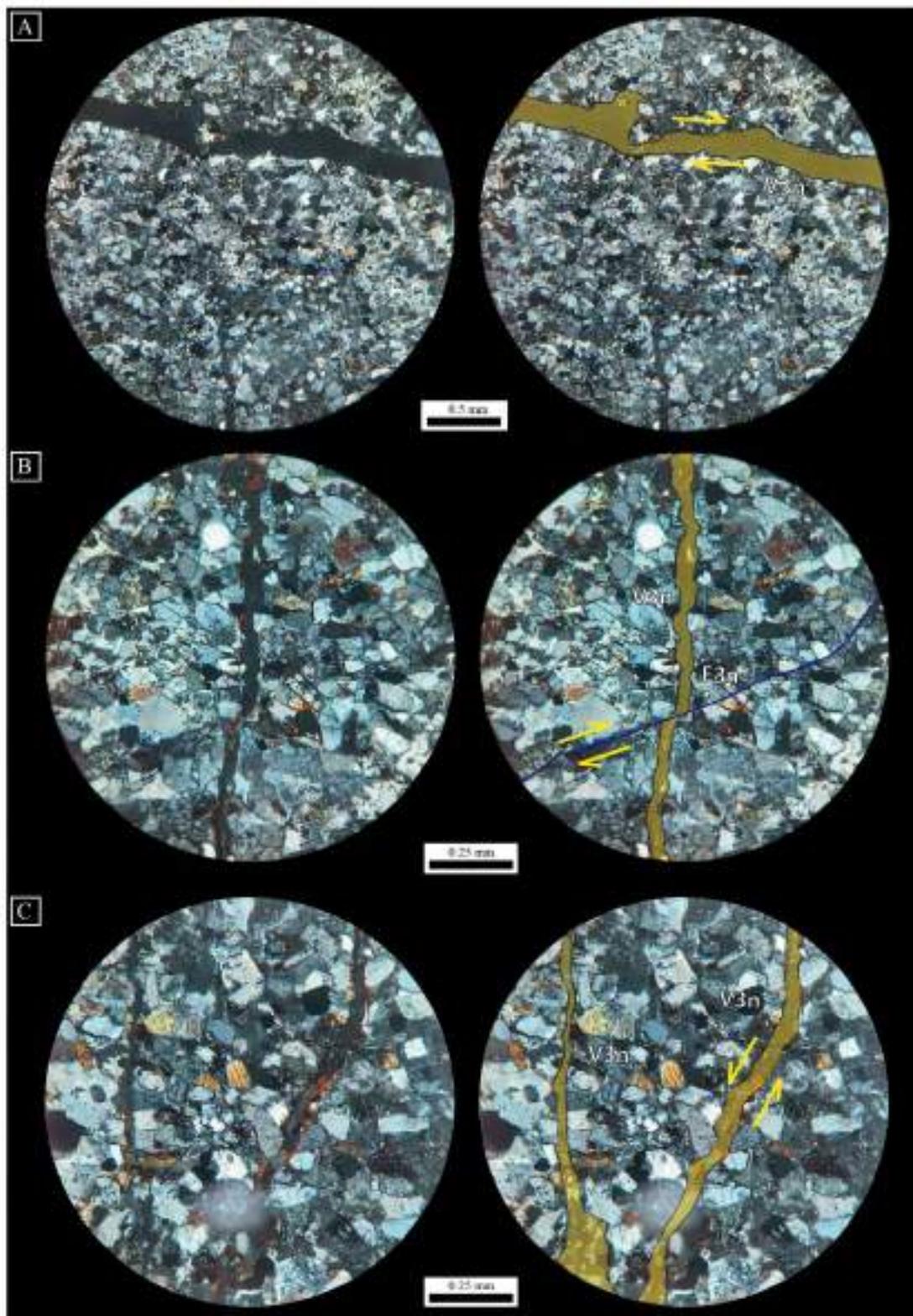


Figura 4. 79: Microfotografía en nicols cruzados. Las barras de escala varían de 0.25 mm (objetivo 10x/0.25) y 0.5 mm (objetivo 4x/0.10). (A) vetilla (V3n), (B) vetilla (V3n) cortada por una falla dextral (F3n) y (C) vetillas (V3n) con movimiento de falla sinistral. Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 80), observamos que la vetilla (V3n) tiene una orientación NO-SE. Los paleoesfuerzos (σ_1 , σ_3) que se muestran en la microfotografía, al realizar la correlación con los eventos encontrados en el análisis estructural macroscópico, se relacionan con el evento 4 que pertenecen a un régimen regional extensivo y con los datos de vetillas extensionales encontradas en campo en la estación E22 (Tabla 4. 11).

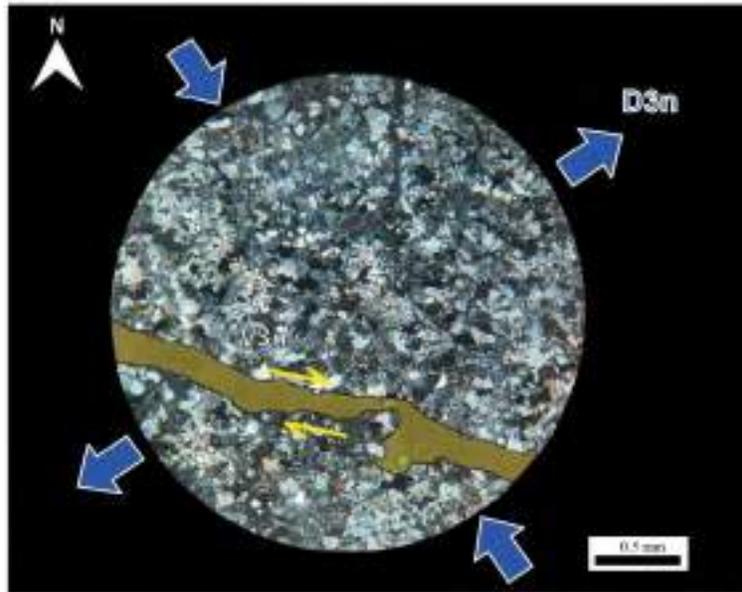


Figura 4. 80: Microfotografía en nicols cruzados, orientado al norte con un evento de deformación D3n. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4. 81, a partir de los clastos que presentan deformación se construye la elipse de deformación, usando el software EllipseFit 3.9.0, determinando los parámetros de la elipse con una cantidad de datos (N) de 17, un aspecto de la elipse que se refiere a la relación entre el eje mayor y el eje menor (R) de 1.6 y el ángulo de inclinación de la elipse (Φ) de 10° . Los ejes de deformación (Z, X) que se muestran pertenecen al evento frágil-dúctil (D2n), reconocido con la microtectónica y se correlaciona con el análisis fallas macroscópicas (evento 3).

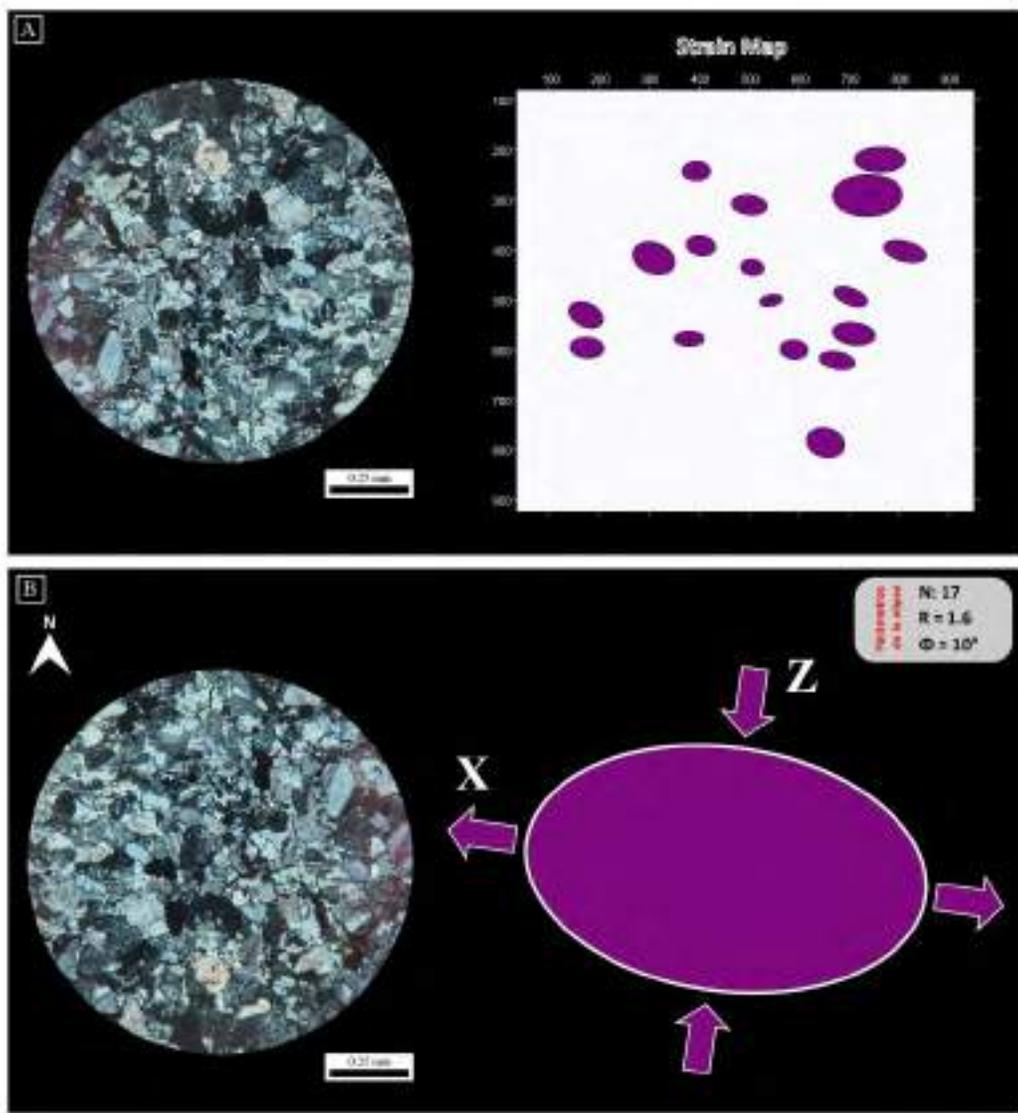


Figura 4. 81: Microfotografía en niclos cruzados (objetivo 10x/0.25). (A) Strain Map a partir de los clastos y (B) elipse de deformación realizado en el software EllipseFit 3.9.0. Fuente: Elaboración propia.

4.4.6 MO-E15-AP

En esta muestra, la Figura (4. 82 A) tiene una falla (FV2n) que corta una vetilla, cuyo movimiento relativo es dextral y la Figura (4. 82 B) tiene una falla (FV2n) que presenta foliaciones y estilolitos (S2n) lo que nos indica un movimiento sinistral. Las estructuras indican una deformación frágil. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (192/13).

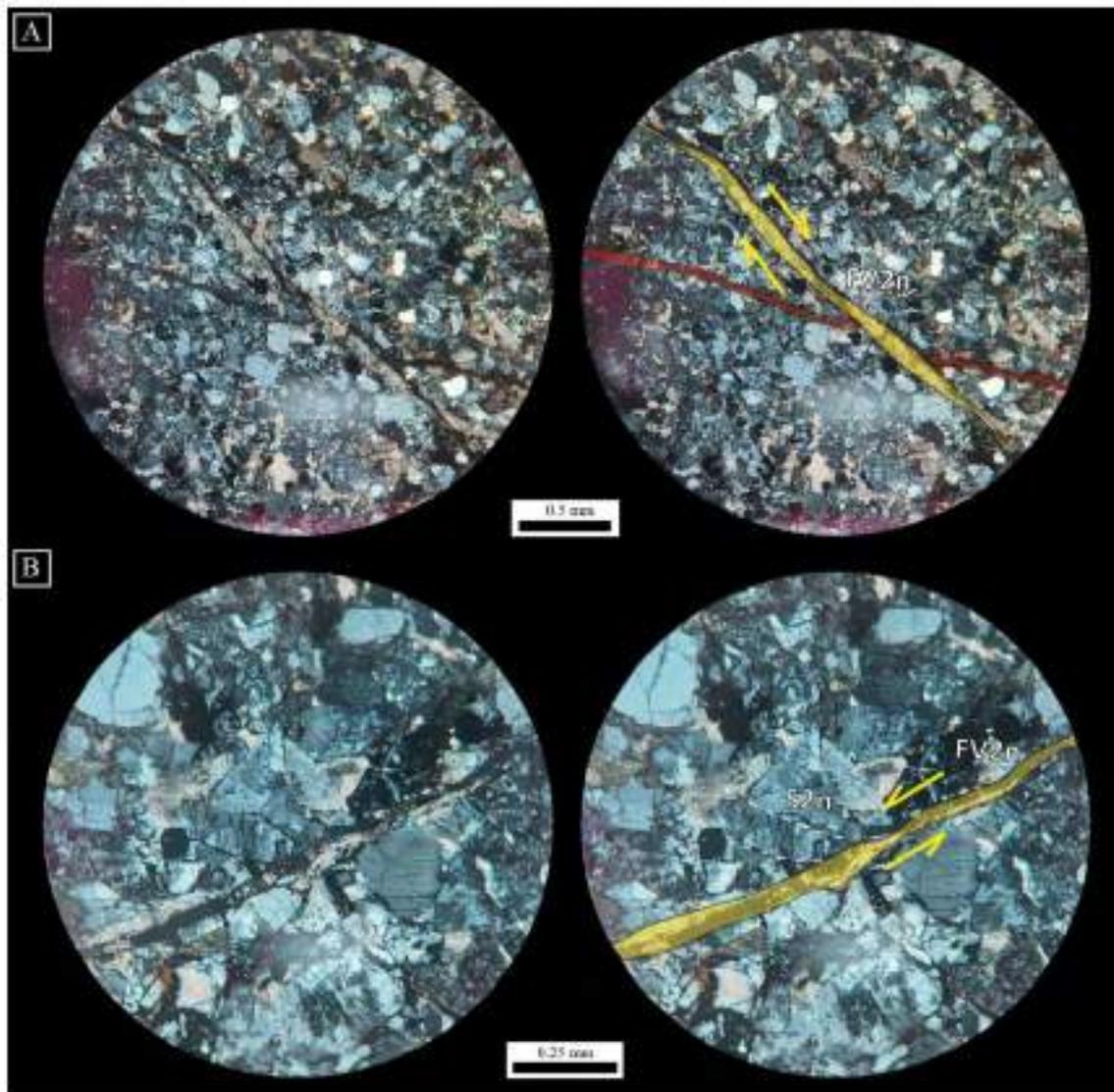


Figura 4. 82: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) falla (FV2n) que corta una vetilla (objetivo 4x/0.10) y (B) falla (FV2n) que presenta foliaciones y estilolitos (S2n) (objetivo 10x/0.25). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte, observamos que la falla (FV2n) que corta la vetilla tiene una orientación NO-SE en la primera imagen (Figura 4. 83) y la falla (FV2n) de la segunda imagen tiene una orientación NE-SO. Los paleoesfuerzos (σ_1) que se muestran en las microfotografías (D2n), al realizar la correlación con los eventos encontrados en el análisis estructural macroscópico, se relacionan con el evento 3 del análisis de fallas (Tabla 4. 11).

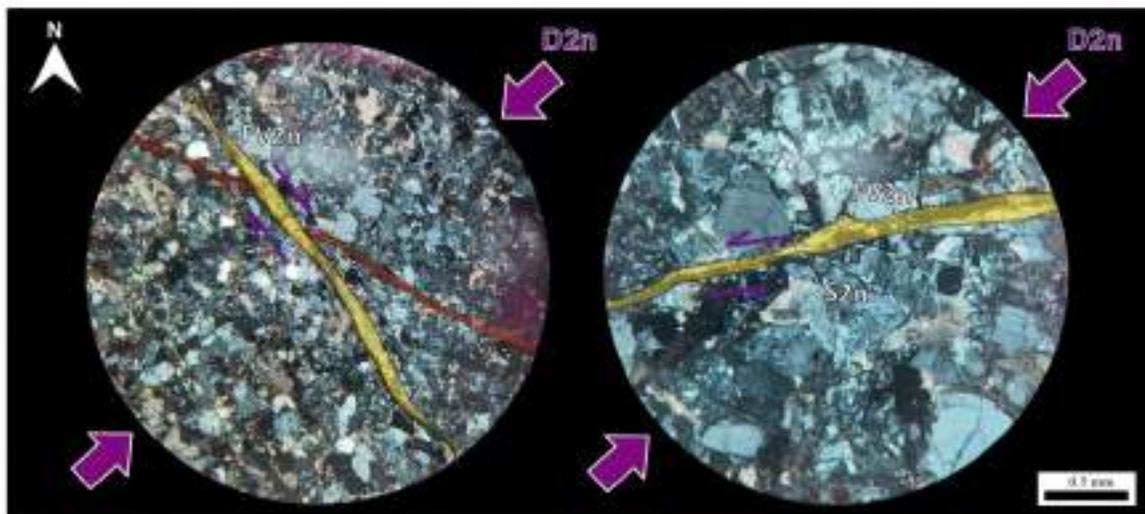


Figura 4. 83: Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte con orientación del sigma 1 NE-SO. Fuente: Elaboración propia.

4.4.7 MO-E18-AP

En esta muestra, se identificó dos estructuras. La Figura 4. 84 tiene una estructura que de acuerdo a sus características y por presentar foliación (S2n) nos indica un ambiente frágil-dúctil y otras estructuras como vetillas (V3n) más recientes que cortan a las anteriores y que por sus características son de ambiente de deformación frágil. La cinemática de estas estructuras más antiguas y que presentan foliación (S2n) es de una falla sinistral (C2n) y de las estructuras más recientes por presentar pliegue asimétrico, representa una falla dextral. Por lo tanto, estas rocas tienen deformación frágil-dúctil. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (292/42).

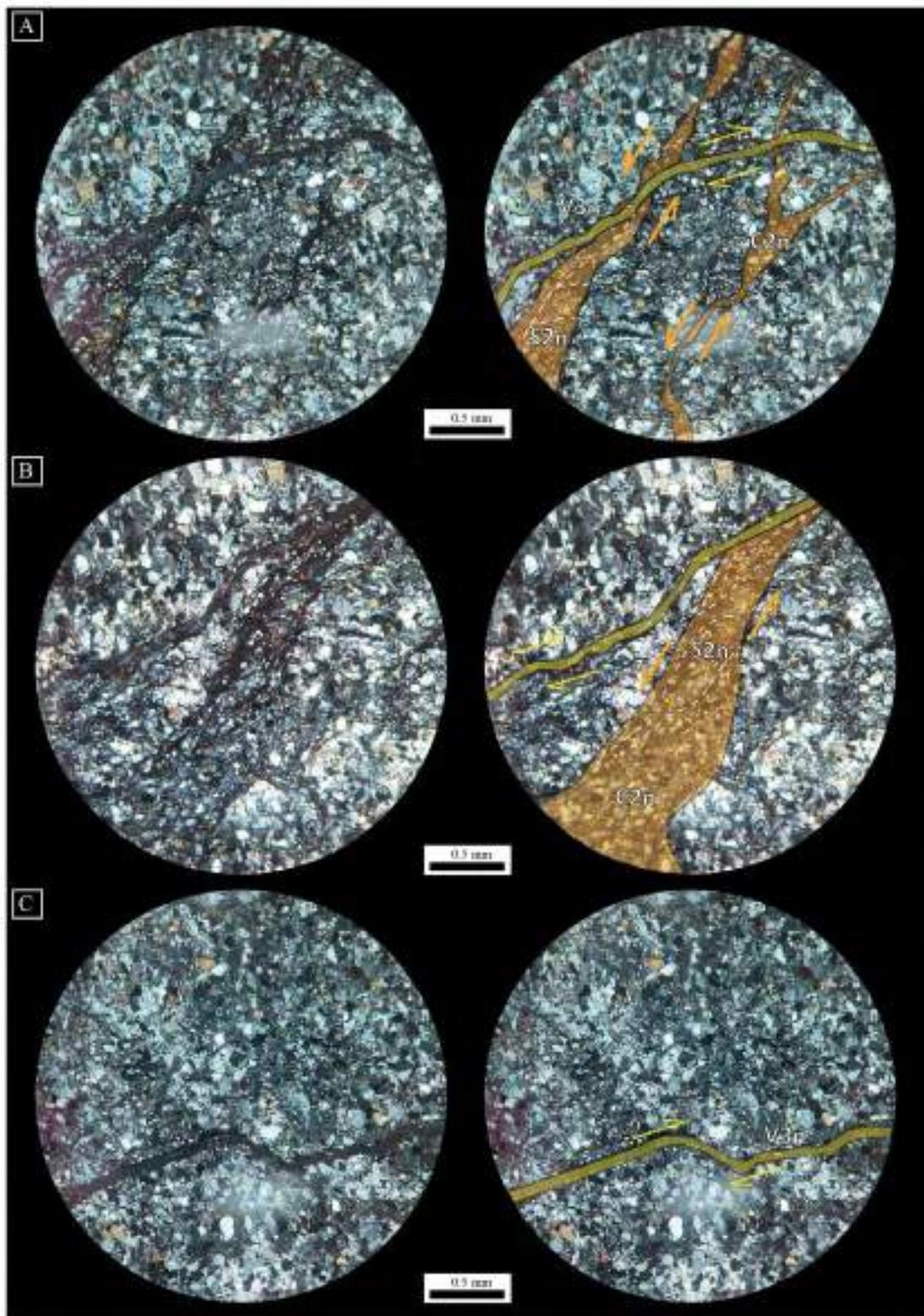


Figura 4. 84: Microfotografía en nicotes cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) y (B) foliaciones S2n y C2n con vetilla que presenta un pliegue asimétrico que indica el movimiento de una falla dextral y (C) vetillas (V3n) que presenta la forma de un pliegue asimétrico con movimiento dextral (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 85), observamos que la vetilla (V3n) tiene una orientación NNO-SSE que corta las foliaciones (S2n y C2n) que se presentan con orientación NO-SE. Los eventos reconocidos en la lámina son los siguientes, un evento frágil-dúctil (D2n), reconocido en el análisis fallas macroscópicas como evento 3 y un evento frágil (D3n) que corta a las estructuras anteriores y nos representa el evento 4 extensivo, el cual se reconoció mediante el análisis de fallas macroscópicas, vetillas extensionales de la estación E22 y un evento reconocido por estructuras regionales (Tabla 4. 11).

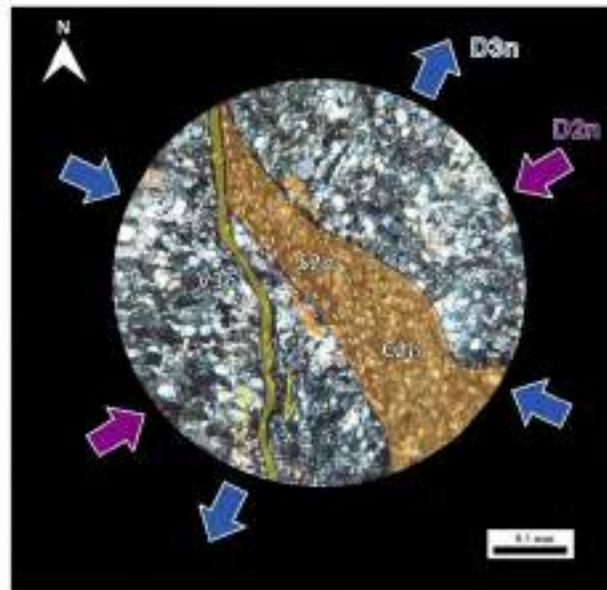


Figura 4. 85: Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Se reconocieron dos eventos de deformación D2n y D3n (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

4.4.8 MO-E22-AP-01

En esta muestra, la Figura (4. 86 A) tiene una falla (F3n) con movimiento relativo dextral que corta una vetilla y la Figura (4. 86 B) tiene vetillas (V3n) cuyo movimiento relativo es dextral. Las estructuras indican una deformación frágil y ambos pertenecen a un mismo régimen. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (360/87).

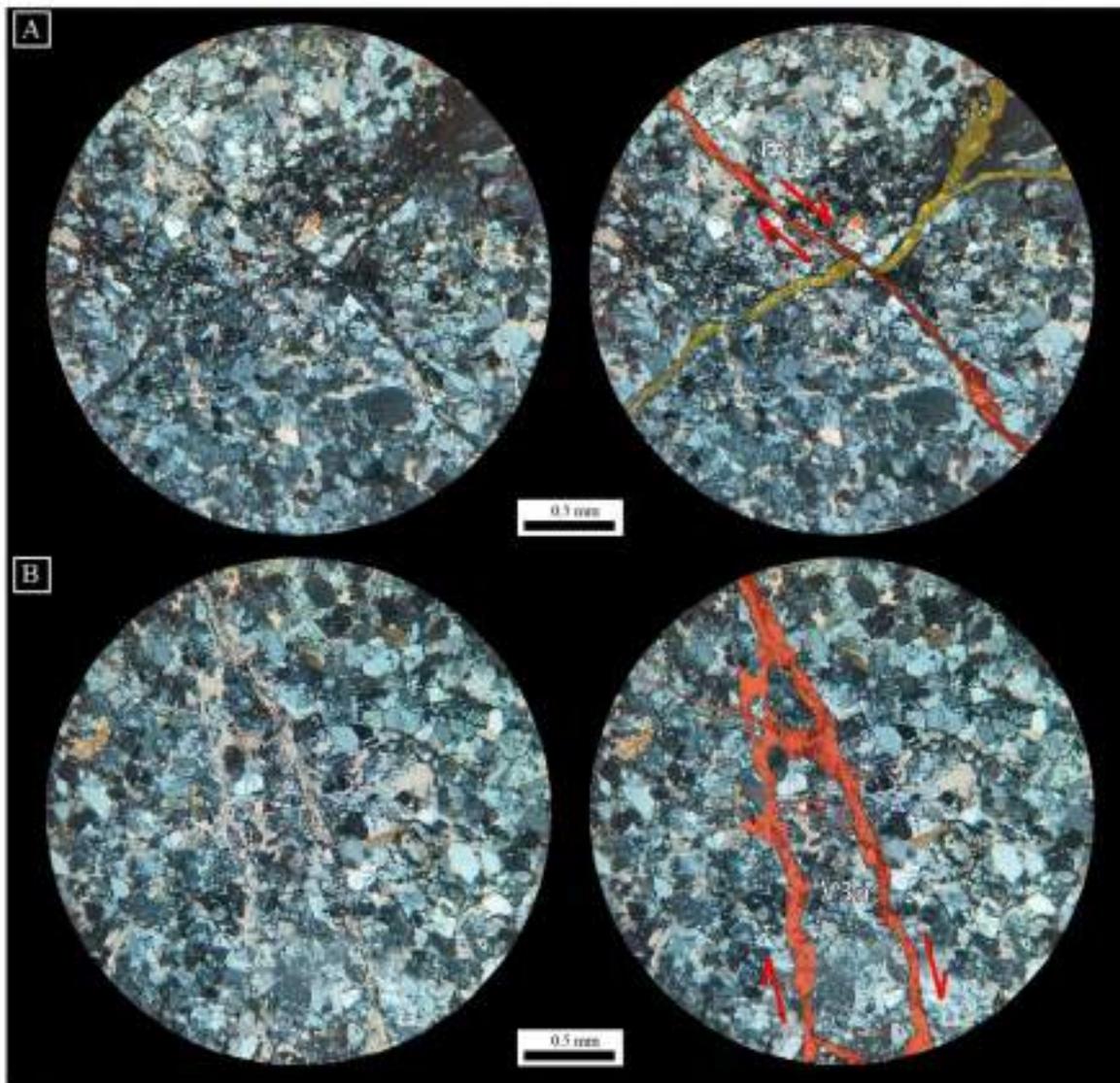


Figura 4. 86: Microfotografía en niclos cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) presenta una falla (F3n) dextral que corta las vetillas y (B) se presenta las vetillas (V3n) con un movimiento de falla dextral (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 87), observamos que la falla (F3n) tiene una orientación NO-SE que corta las vetillas que se presentan con orientación NE-SO. Los eventos reconocidos en esta lámina son los siguientes, un evento frágil-dúctil y más antiguo propuesto (D2n?) de la vetilla que es cortada por la falla de evento de deformación (D3n) que nos representa el evento 4 extensivo, el cual se reconoció mediante el análisis de fallas macroscópicas, vetillas extensionales de la estación E22 y un evento reconocido por estructuras regionales (Tabla 4. 11).

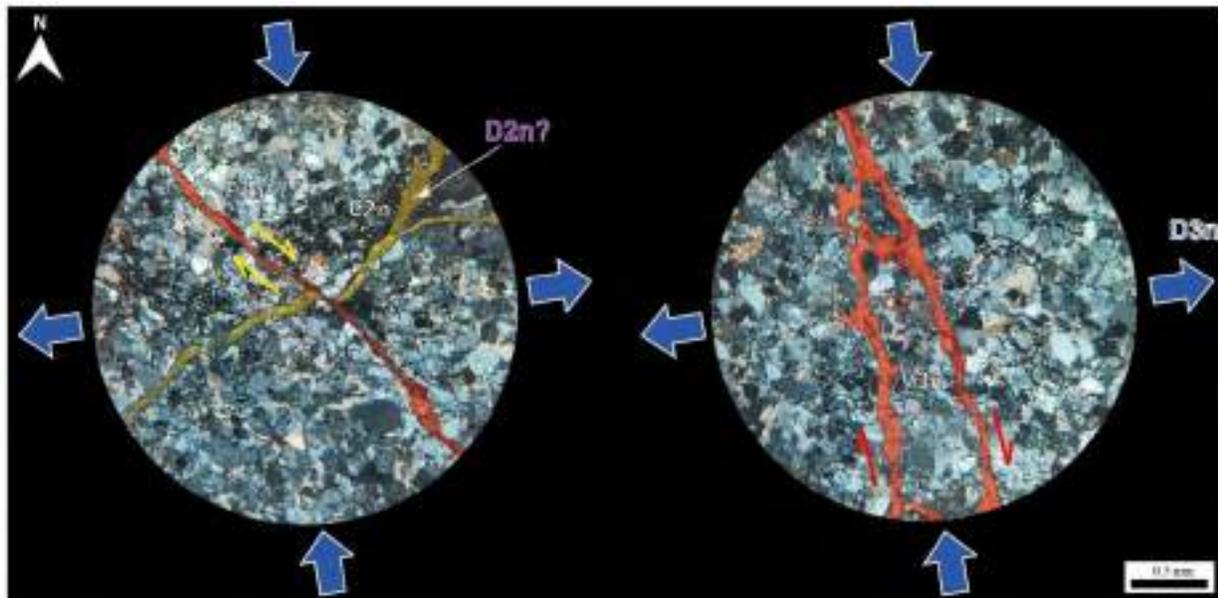


Figura 4. 87: Microfotografía en nicols cruzados, orientado al norte. Se reconocieron dos eventos de deformación D2n? y D3n (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

4.4.9 MO-E22-AP-02

En esta muestra, la Figura 4. 88 tiene dos estructuras, unas vetillas (V3n) y una estructura que vendrían a ser reconocidas como boudinages (B4n). Las estructuras indican una deformación frágil principalmente ambos pertenecen a distintos regímenes. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (288/76).

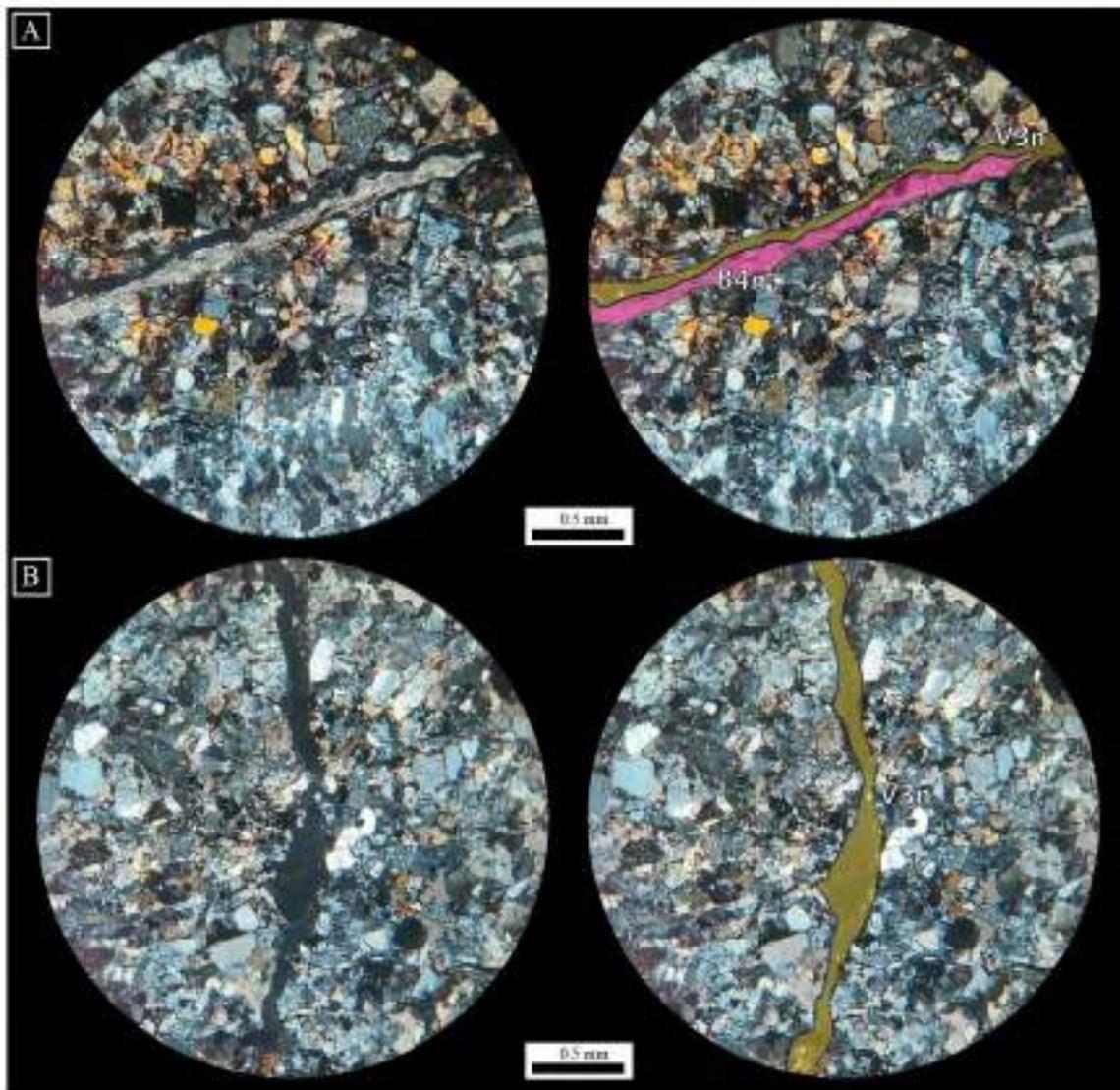


Figura 4. 88: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) presenta una vetilla (V3n) y un boudinage (B4n) y (B) se presenta una vetilla (V3n) (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 89), observamos que la vetilla (V3n) y el boudinage (B4n) presentan una orientación N-S. Los eventos reconocidos en esta lámina son los siguientes; un evento que está representado por vetillas, que posiblemente son (D3n?) siendo el más reciente y (D4n) que está representado por un boudinage sobre impuesta a la vetilla, que nos representa el evento 5 extensivo el cual se reconoció mediante el análisis de fallas macroscópicas (Tabla 4. 11).

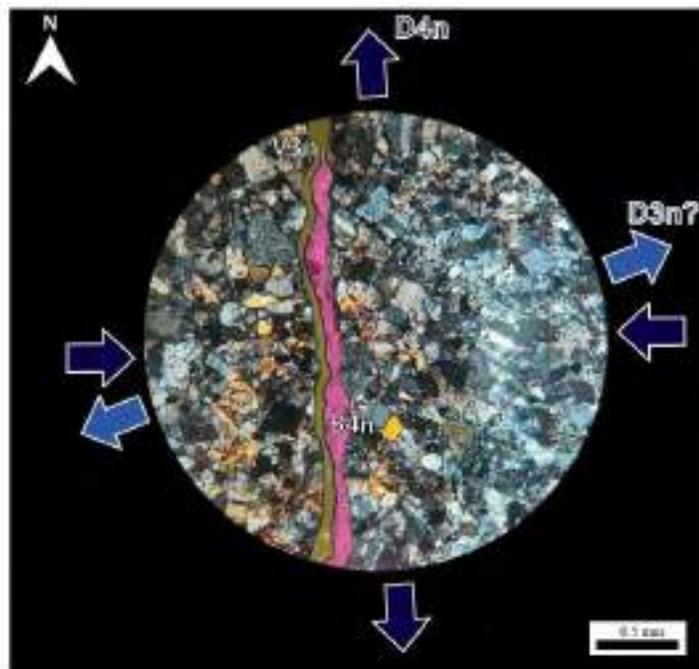


Figura 4. 89: Microfotografía en nicols cruzados, orientado al norte. Se reconoce dos eventos de deformación D3n? y D4n (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.

4.4.10 MO-E22-AP-03

En esta muestra (Figura 4. 90), se identifica tres secuencias paragenéticas que a su vez están asociados a tres eventos de deformación. La calcita (Cb1) presenta una macla tipo 3 (Burkhard, 1993) que nos indica deformación frágil-dúctil con temperaturas entre 200° C a 300°C (Weiss 1954, Ferrill 1991), después se tiene una vetilla con relleno de cuarzo y calcita (Qz + Cb2) y por último una vetilla sintaxial de calcita (Cb3). Por lo tanto, estas rocas tienen deformación frágil-dúctil y frágil respectivamente. En la microfotografía la muestra, se encuentra con una dirección de corte (242/83).

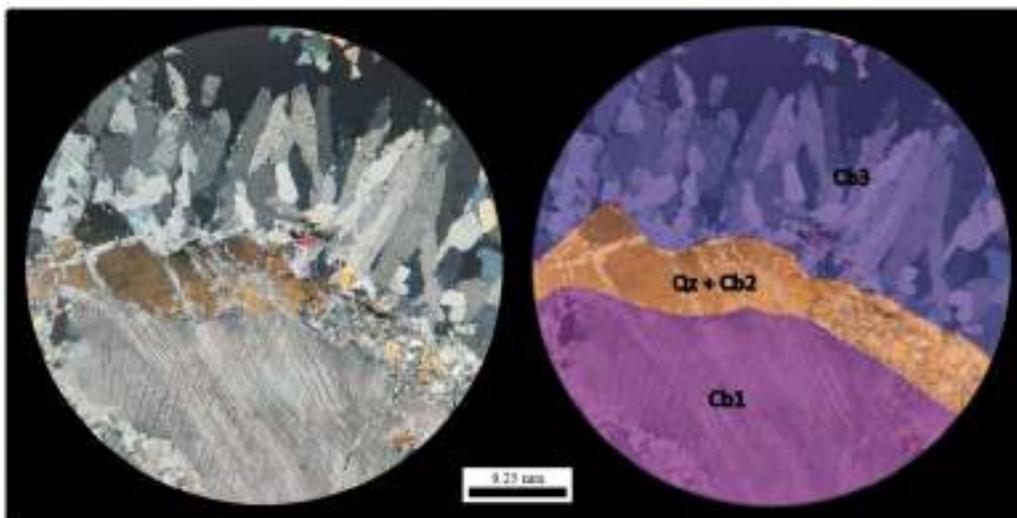


Figura 4. 90: Microfotografía en nicols cruzados. La barra de escala es 0.25 mm. Muestra las estructuras con deformación progresiva en los carbonatos (objetivo 10x/0.25). Fuente: Elaboración propia.

Al orientar la muestra con observación al norte (Figura 4. 91), observamos que el evento más antiguo reconocido es el D2n que está relacionado con Cb1 y nos representa un régimen de rumbo reconocido en el análisis de fallas macroscópicas del evento 3, después el evento relativo D3n? posiblemente está relacionado a la extensión, reconocido en el análisis de fallas macroscópicas del evento 4 y la vetilla sintaxial compuesto de Cb3 nos representa también una extensión asociado al evento D3n y es reconocido regionalmente (Tabla 4. 11).

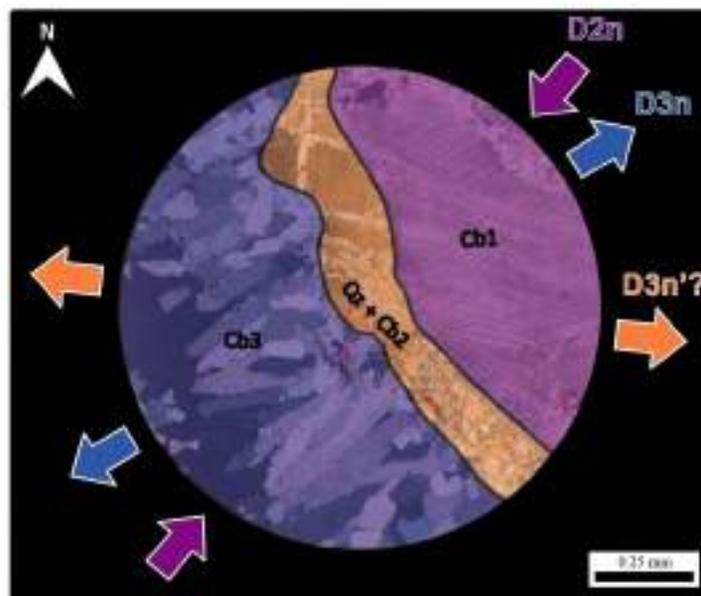


Figura 4. 91: Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Se reconocieron dos eventos de deformación D2n, D3n? y D3n (objetivo 10x/0.25). Fuente: Elaboración propia.

A partir de los clastos que presentan deformación de las muestras MO-E22-AP-01 (Figura 4. 92 A), MO-E22-AP-02 (Figura 4. 92 B) y MO-E22-AP-02 (Figura 4. 92 C) se construye las elipses de deformación, usando el software EllipseFit 3.9.0. Estas elipses generadas se reproceso con el software SPO2003 para la obtención de los parámetros (Tabla 4. 9) que se puedan trabajar con el software Ellipsoid2003 y obtener la elipse de deformación. Se obtuvo lo datos de los ejes de deformación de la elipse y los parámetros para el gráfico de Flinn (Tabla 4. 10). El elipsoide según los parámetros se ubica en el campo de deformación plana (Figura 4. 93), relacionado a una deformación no-coaxial (cizallamiento simple) y por su disposición está asociado al evento D2n que es equivalente al evento 3 que se determinó a partir de las fallas macroscópicas con cinemática. Cabe mencionar que este evento 3 corresponde a un régimen de rumbo y correlaciona con lo obtenido en el gráfico de Flinn que corresponde a un cizallamiento simple.

Código	Strike	Dip	Rake	Long axis	Short axis	Weigth
MO-E22-AP-01	90	87	53,804	8,652611	5,705949	1
MO-E22-AP-02	18	76	73,359	8,595451	5,706667	1
MO-E22-AP-03	242	83	100,154	9,04916	5,70652	1

Tabla 4. 9: Parámetros obtenidos del software SPO2003, realizados con el software Ellipsoid2003 para determinar el elipsoide. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros de la elipse				Parámetros para el gráfico de Flinn	
Ejes del elipsoide	X	Y	Z	X/Z	2.9
Longitud	1.703	1	0.587	X/Y	1.702
Trend	315,2°	066,1°	222,9°	Y/Z	1.704
Plunge	7,1°	70,8°	17,7°	Flinn	0.997

Tabla 4. 10: Parámetros de la elipse y parámetros para el gráfico de Flinn. Fuente: Elaboración propia.

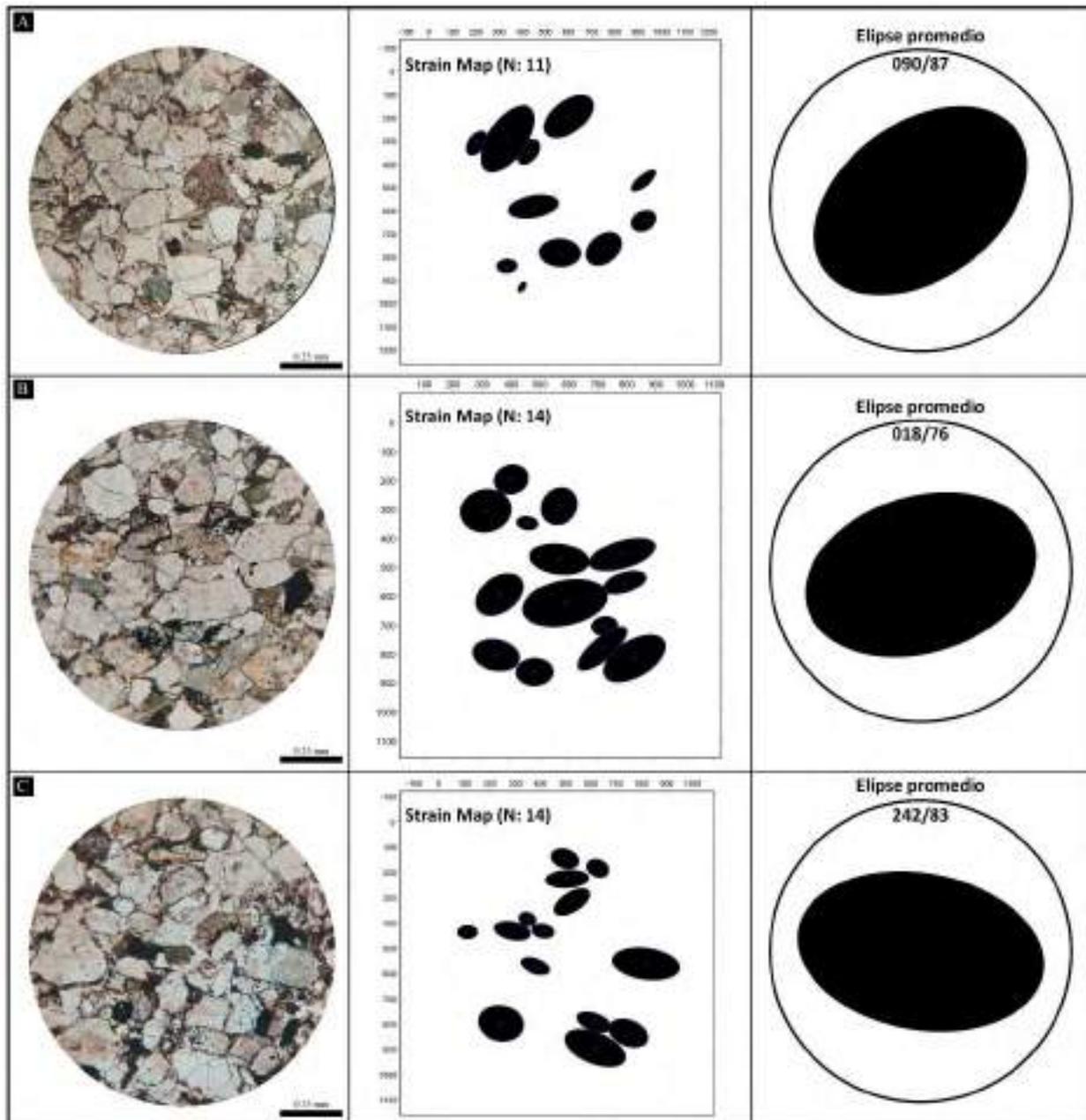


Figura 4. 92: Microfotografías en nicols paralelos (objetivo 10x/0.25), Strain Maps a partir de los clastos y elipses de deformación realizado en el software EllipseFit 3.9.0 de las muestras MO-E22-AP-01 (A), MO-E22-AP-02 (B) y MO-E22-AP-03 (C). Fuente: Elaboración propia.

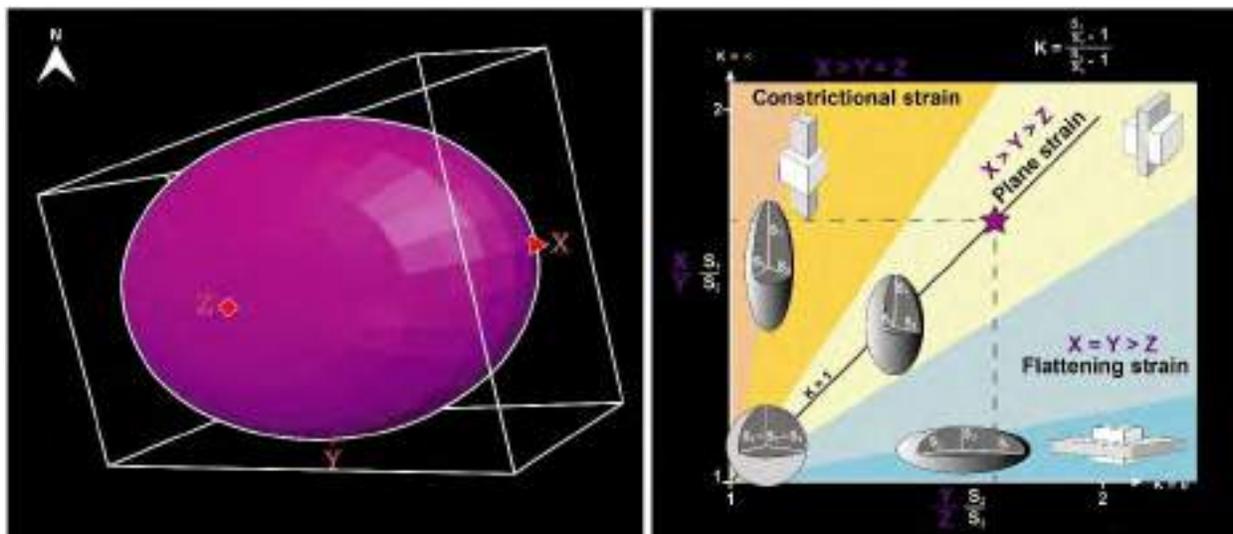


Figura 4. 93: Elipsoide de deformación y Diagrama de Flinn. Fuente: Modificado de Ramsay y Huber (1984).

Secuencia paragenética a partir de las secciones delgadas orientadas						
Minerales/ Estructuras	Eventos reconocidos					
	D1n	D2n	D3n'	D3n	D4n	
Bx1n						
MA2n						
S2n						
V2n						
V3n						
V4n						
F2n						
F3n						
F4n						
VF2n						
C2n						
B4n						
Cb1						
Qz+Cb2						
Cb3						
Comparación con los eventos determinados en el análisis estructural	Evento regional	Evento 3	Evento 4 (Fallas)	Evento 4.1 (Regional - Vetilla extensional)		Evento 5

Bx: Microbrecha; MA: Mineral ataxial; S: Foliación; V: Vetilla; F: Falla; VF: Vetilla Falla; C: Cizalla; B: Boudinage; Cb: Carbonatos, Qz: Cuarzo.

Tabla 4. 11: Secuencia paragenética a partir de las secciones delgadas orientadas. Fuente: Elaboración propia.

4.5 GEOMETRÍA DEL ANTICLINAL

La geometría del anticlinal de Puquín, se determina a partir de diferentes clasificaciones de pliegues; el gráfico muestra las representaciones estereográficas de los flancos promedio con datos superficiales de estratificación tanto de la sección geológica norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F') en los cuales se determinaron los valores de los diferentes elementos de pliegue como: Eje de pliegue, plano axial, ángulo interflanco y la vergencia (Figura 4. 94).

Según la clasificación de los pliegues por Fleuty (1964) tomando la inclinación del plano axial y el plunge de la línea de charnela o del eje de pliegue, determinamos el pliegue en el sector norte teniendo 86.5° de inclinación del plano axial y 12.6° de plunge de la línea de charnela como un pliegue casi recto con inmersión suave, en el sector centro teniendo 78.6° de inclinación del plano axial y 30.4° de plunge de la línea de charnela como un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada y en el sector sur teniendo 76.5° de inclinación del plano axial y 34.5° de plunge de la línea de charnela como un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada (Figura 4. 94).

Según la clasificación de los pliegues por Fleuty (1964) tomando el ángulo de interflanco, determinamos el pliegue en el sector norte teniendo 58.5° de ángulo de interflanco como un pliegue cerrado, en el sector centro teniendo 56.8° de ángulo de interflanco como un pliegue cerrado y en el sector sur teniendo 81.9° de ángulo de interflanco como un pliegue abierto.

La dirección del eje de pliegue en el sector norte es de $206.0^\circ/12.6^\circ$ SO, en el sector centro es de $184.8^\circ/30.4^\circ$ SSE y en el sector sur es de $340.5^\circ/34.5^\circ$ NO. La orientación de la vergencia en el sector norte es hacia el NO, en el centro hacia el ONO y en el sur hacia el SO.

Se caracteriza como un pliegue asimétrico, ya que el plano axial presenta inclinación, cerrado en el sector norte y centro; abierto en el sector sur. Con eje de pliegue con doble inmersión de $\sim 21^\circ$ S y $\sim 34^\circ$ N (no cilíndrico).

El anticlinal de Puquín se considera un pliegue por propagación de falla, puesto que según algunos criterios geométricos como las capas que se encuentran sobre la zona de rampa de la falla están truncadas por la misma, a diferencia de pliegues por flexión de falla que las capas son paralelas a la rampa de la falla y son las capas que se encuentran en el rellano superior de dicha falla las que están truncadas por ella según los modelos propuestos por Suppe y Medwedeff (1990); los pliegues de propagación de falla (Dahlstrom, 1970) se forman contemporáneamente a la propagación de una falla en situación de rampa como se observa en los modelos de evolución del anticlinal de Puquín (Figura 4. 95, 4. 96 y 4. 97), a través de una serie de estratos, de forma que el acortamiento da lugar a la formación de un pliegue en la zona próxima a su terminación.

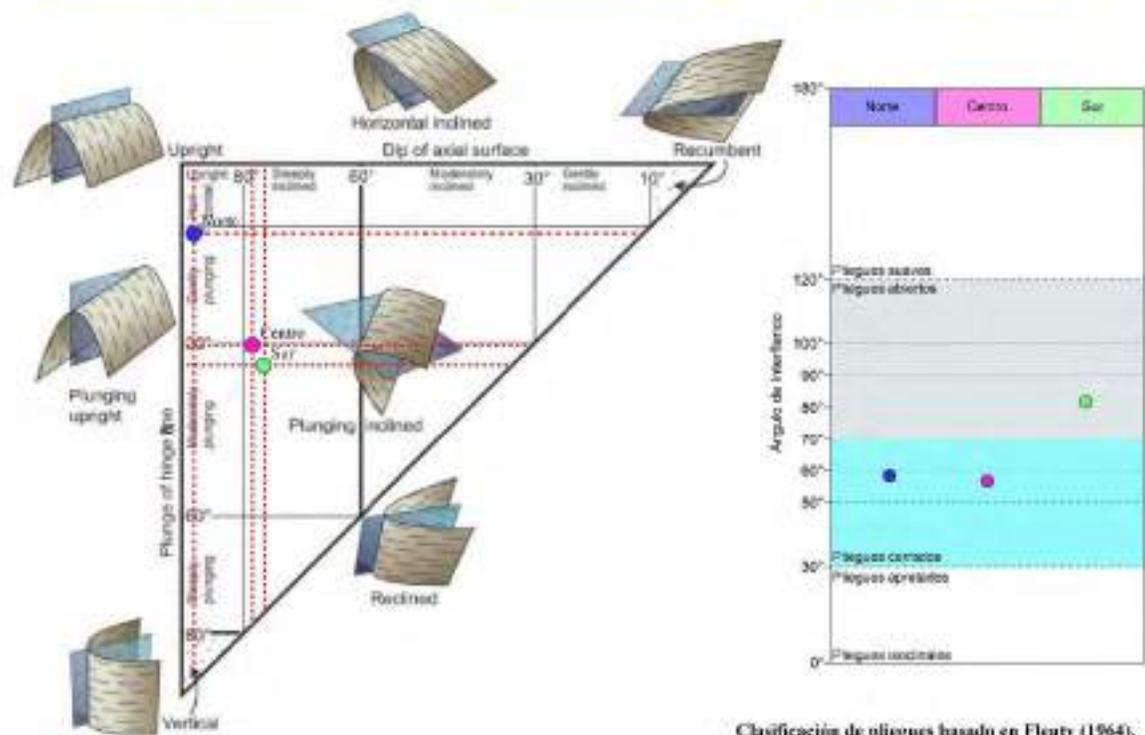
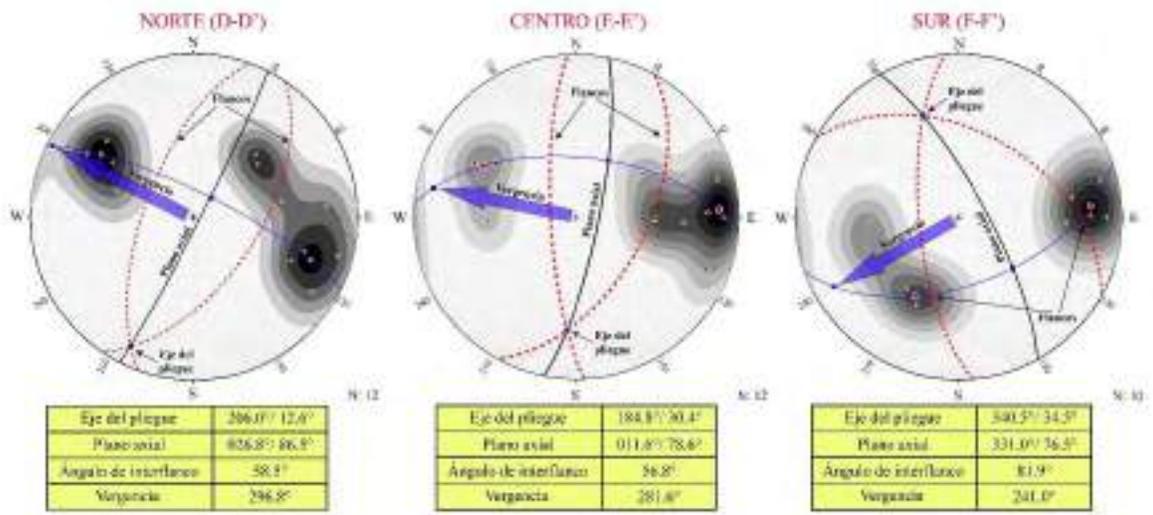


Figura 4. 94: Clasificaciones de pliegue por Fleuty (1964) tomando en cuenta la inclinación del plano axial y el plunje de la línea de charnela o del eje de pliegue; así como el ángulo de interflanco para el sector norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F'). Fuente: Elaboración propia.

4.6 EVOLUCIÓN DEL ANTICLINAL

Para analizar la evolución cinemática del anticlinal de Puquín, construimos tres modelos directos usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012) a partir de las secciones geológicas norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F') realizadas por la metodología de kink (Figura 3. 24). Este programa permite reconstruir las estructuras como pliegues de propagación de falla por la metodología de trishear y sirve para calcular el acortamiento en cada etapa de deformación. Este tipo de pliegue relacionado con la falla depende de dos variables: el ángulo apical de la zona trishear y la propagación al deslizamiento relación (p/s). En zonas trishear con pequeños ángulos apicales, la tensión es intensa y se concentra en una estrecha cuña de roca, mientras que la tensión es menos intensa y resulta más difusa cuando los ángulos son más amplios. Por otro lado, la relación p/s determina que tan rápido la línea de la punta se propaga en relación con el deslizamiento en la misma (Allmendinger, 1998). Valores bajos de p/s dan como resultado un pronunciado engrosamiento de las extremidades anteriores y plegado en la zona trishear, mientras que $p/s > 1$ da como resultado menos engrosamiento y plegamiento más abierto (Hardy y Ford, 1997).

Se usa este método de trishear para pliegues de propagación de falla, porque a diferencia del método propuesto por Suppe y Medwedeff (1990) que es práctico y fácil de usar, solo constituye una de las aproximaciones geométricas a las estructuras de este tipo que se encuentran en la naturaleza, para ejemplos naturales como el anticlinal de Puquín es muy común encontrar pliegues de propagación de falla de limbos curvos y con cambios de espesor en los estratos. Predecir y reconstruir este tipo de estructuras no es tan simple como los modelos geométricos propuestos por Suppe (1985) y no se puede hacer sin el uso de una computadora.

En los tres modelos de evolución cinemática a partir de las secciones geológicas realizadas, el nivel de despegue basal elegido fue el de las evaporitas de la Formación Maras.

4.6.1 NORTE (D-D')

Para obtener el modelo directo de la evolución cinemática del sector norte a lo largo de la sección geológica (D-D') del anticlinal de Puquín usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012), se probó alrededor de veinticinco veces con diferentes valores para los diferentes parámetros de reconstrucción, se encuentra que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un ángulo apical de la zona trishear de 60° y una propagación al deslizamiento relación p/s de (1.5). El ángulo de rampa se determina solamente aplicando criterios geométricos y de relaciones angulares, en el sector norte se tiene un ángulo de rampa de -45° (negativo ya que es un pliegue con vergencia con orientación oeste). Es importante destacar el valor que tiene este dato debido a que frecuentemente el ángulo de buzamiento del plano de falla es difícil de conocer, producto de una mala exposición o porque la falla es ciega.

La Figura 4. 95 representa el estadio inicial del anticlinal de Puquín sin deformar, a partir del cual se realizó el modelado hacia adelante o forward modeling (en este caso hacia el oeste porque es una estructura retrovergente), muestra capas horizontales de las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca, con una longitud inicial de 9.8 km; en línea roja se observa la falla vinculada con la estructuración de este pliegue.

En el Estadio 1 de contracción, se observa la deformación de las capas del estadio inicial y se desarrolla una falla en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance a lo largo del pliegue, teniendo esta falla se superpone la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, el acortamiento no se observa, ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 se observa la deformación de capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; las últimas formaciones Kayra y Soncco superpuestas como capas de crecimiento, también podemos ver que se sigue desarrollando una falla con el mismo buzamiento en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance y que finalizando este estadio se tiene como longitud de las capas de 9.67 km con un porcentaje de acortamiento de 1.3% de la longitud inicial obtenido a partir de la operación $(L_f - L_i) / L_i$ multiplicado por el 100%, siendo L_f : Longitud final y L_i : Longitud inicial.

En el estadio 3 se observa la deformación de todas las formaciones y más en los niveles afectados por la falla de avance que tiene el mismo buzamiento en línea roja continua, teniendo como longitud de las capas de 8.98 km equivalente a un porcentaje de acortamiento de 8.3% de la longitud inicial.

En el estadio 4 se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la estructura mostrada en la sección geológica D-D', dejando ver el anticlinal de Puquín y teniendo una longitud final de las capas de 8.32 km, representando un porcentaje de acortamiento total de 15.1% de la longitud inicial.

Posterior al estadio 4 se observa la rotación de 7° de la estructura modelada, según modelos bibliográficos regionales (Figura 4. 95 f); finalmente la última imagen enfoca el anticlinal de Puquín de manera puntual, pudiendo observar la topografía actual y el modelo de evolución del anticlinal de Puquín en un evento de compresión.

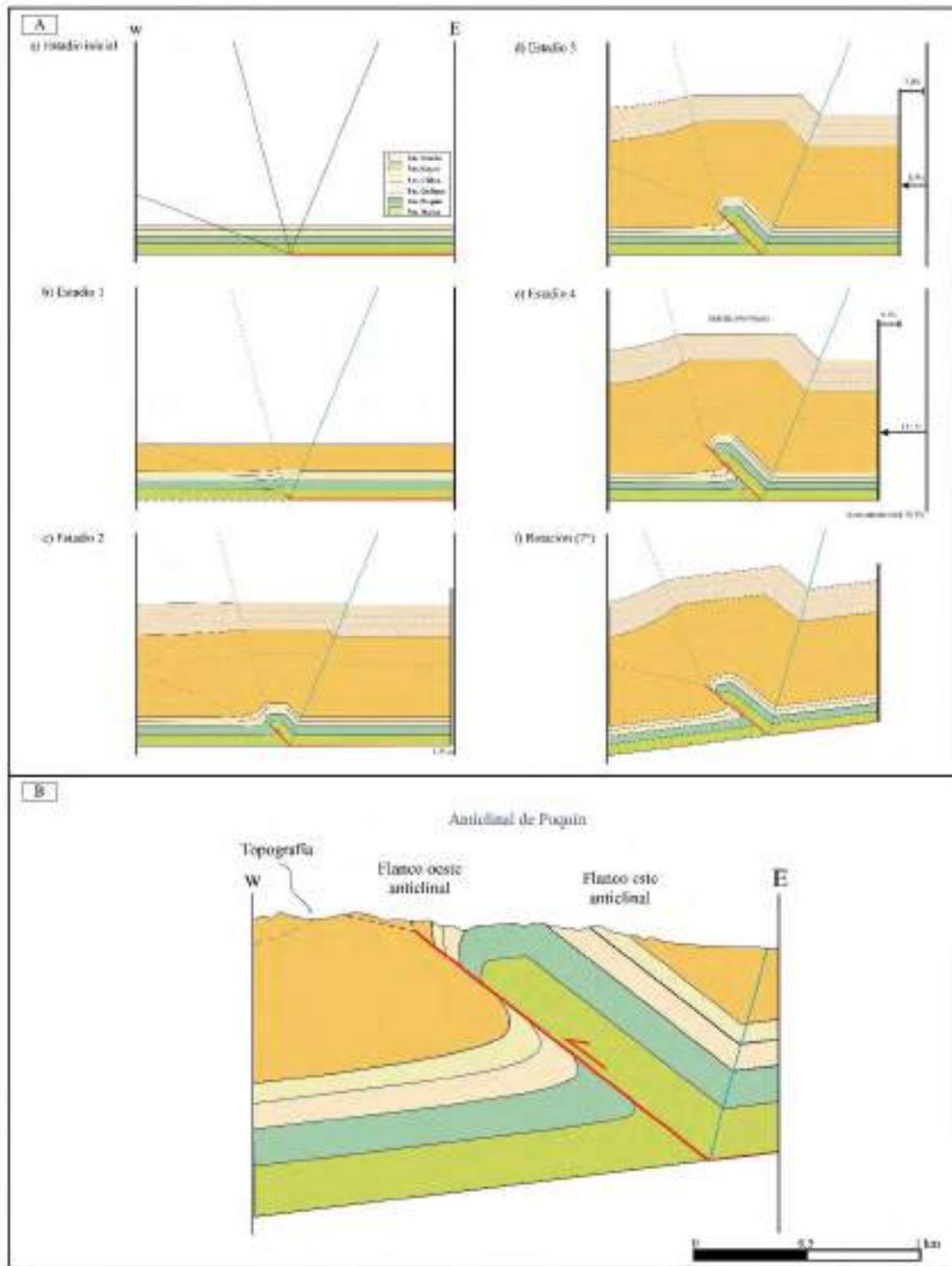


Figura 4. 95: Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector norte (D-D') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. A-a) Estadío inicial previo a la deformación; b) Superposición de la capa de crecimiento de la Formación Kayra; c) Formación de un pliegue por propagación de falla sobre una rampa buzante de 45° con un porcentaje de acortamiento de 1.3% respecto a la longitud inicial de la sección; d) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance tiene un porcentaje de acortamiento de 8.3%; e) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance, pero no llega a corta la Formación Kayra, ya que este es de un espesor muy grande y tiene un porcentaje de acortamiento final de 15.1 %; f) El conjunto de formaciones es rotado en 7° y B) Modelo del anticlinal de Puquín sector norte. Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 CENTRO (E-E')

Para obtener el modelo directo de la evolución cinemática del sector centro a lo largo de la sección geológica (E-E') del anticlinal de Puquín usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012), se probó alrededor de diez veces con diferentes valores (siendo este valor menor, ya que se sigue el modelo a partir de la sección norte) para los diferentes parámetros de reconstrucción y se encuentra que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un ángulo apical de la zona trishear de 60° y una propagación al deslizamiento relación p/s de (1.5) al igual que el sector norte. El ángulo de rampa se determina solamente aplicando criterios geométricos y de relaciones angulares, en el sector centro se tiene un ángulo de rampa de -49° .

La Figura 4. 96 representa el estadio inicial del anticlinal de Puquín sin deformar, a partir del cual se realizó el modelado hacia adelante o forward modeling (en este caso hacia el oeste porque es una estructura retrovergente), muestra capas horizontales de las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca, con una longitud inicial de 9.8 km; en línea roja se observa la falla vinculada con la estructuración de este pliegue.

En el Estadio 1 de contracción, se observa la deformación de las capas del estadio inicial y se desarrolla una falla en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance a lo largo del pliegue, teniendo esta falla se superpone la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, el acortamiento no se observa, ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 se observa la deformación de capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; las últimas formaciones Kayra y Soncco superpuestas como capas de crecimiento, también podemos ver que se sigue desarrollando una falla con el mismo buzamiento en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance y que finalizando este estadio se tiene como longitud de las capas de 9.71 km con un porcentaje de acortamiento de 0.9% de la longitud inicial.

En el estadio 3 se observa la deformación de todas las formaciones y más en los niveles afectados por la falla de avance que tiene el mismo buzamiento en línea roja continua, teniendo como longitud de las capas de 9.03 km equivalente a un porcentaje de acortamiento de 7.8% de la longitud inicial.

En el estadio 4 se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la estructura mostrada en la sección geológica E-E', dejando ver el anticlinal de Puquín y teniendo una longitud final de las capas de 8.61 km, representando un porcentaje de acortamiento total de 12.1% de la longitud inicial.

Posterior al estadio 4 se observa la rotación de 7° de la estructura modelada, según modelos bibliográficos regionales (Figura 4. 96 f); finalmente la última imagen enfoca el anticlinal de Puquín de manera puntual, pudiendo observar la topografía actual y el modelo de evolución del anticlinal de Puquín en un evento de compresión.

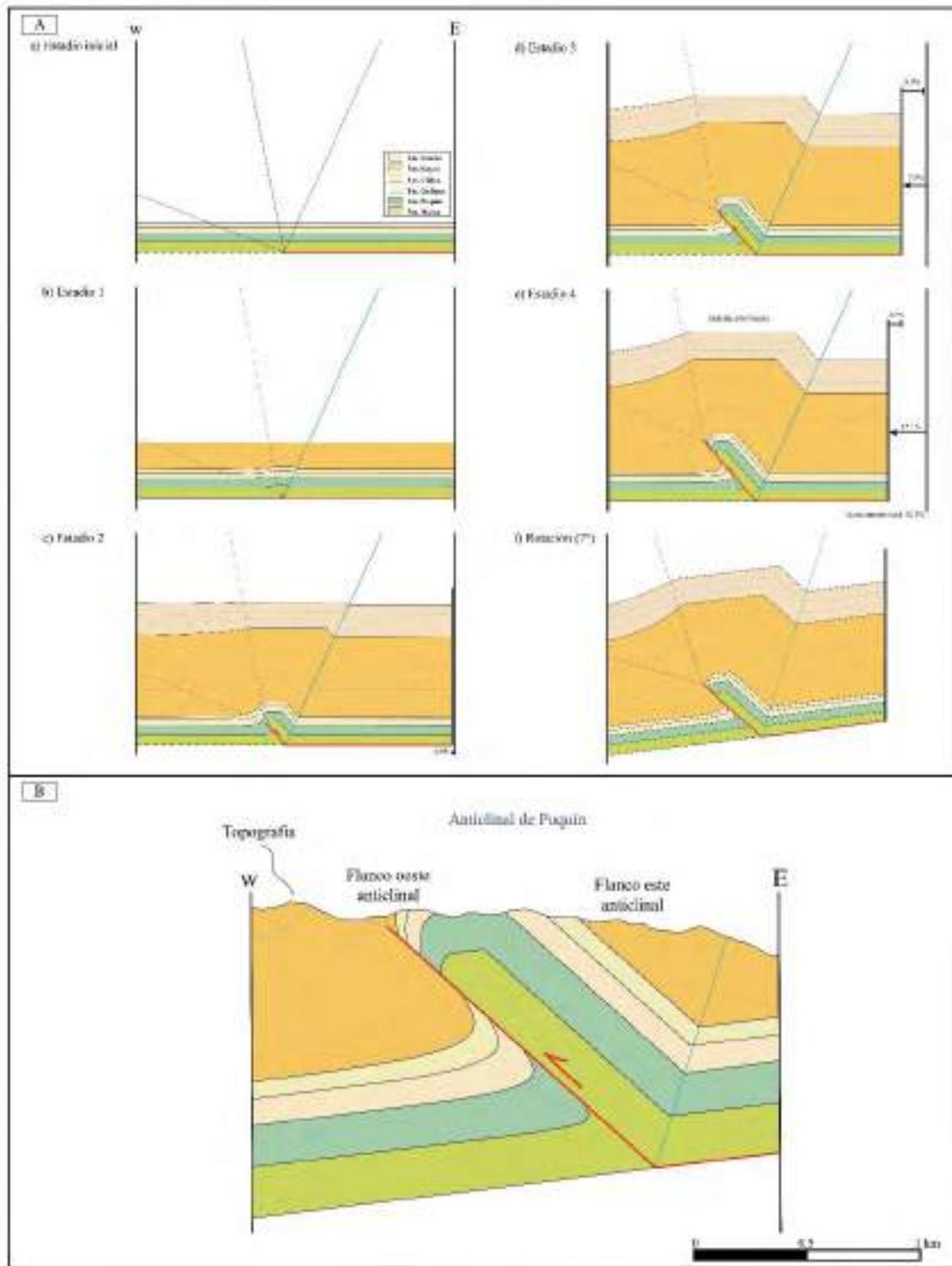


Figura 4. 96: Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector centro (E-E') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. A-a) Estadio inicial previo a la deformación; b) Superposición de la capa de crecimiento de la Formación Kayra; c) Formación de un pliegue por propagación de falla sobre una rampa buzante de 49° con un porcentaje de acortamiento de 0.9% respecto a la longitud inicial de la sección; d) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance tiene un porcentaje de acortamiento de 7.8%; e) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance, pero no llega a corta la Formación Kayra, ya que este es de un espesor muy grande y tiene un porcentaje de acortamiento final de 12.1 %; f) El conjunto de formaciones es rotado en 7° y B) Modelo del anticlinal de Puquín sector centro. Fuente: Elaboración propia.

4.6.3 SUR (F-F')

Para obtener el modelo directo de la evolución cinemática del sector sur a lo largo de la sección geológica (F-F') del anticlinal de Puquín usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012), se probó alrededor de diez veces con diferentes valores (siendo este valor menor, ya que se sigue el modelo a partir de la sección norte y centro) para los diferentes parámetros de reconstrucción y se encuentra que la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín puede explicarse adecuadamente utilizando un ángulo apical de la zona trishear de 60° y una propagación al deslizamiento relación p/s de (1.5) al igual que el sector norte y centro. El ángulo de rampa se determina solamente aplicando criterios geométricos y de relaciones angulares, en el sector centro se tiene un ángulo de rampa de -44° .

La Figura 4. 97 representa el estadio inicial del anticlinal de Puquín sin deformar, a partir del cual se realizó el modelado hacia adelante o forward modeling (en este caso hacia el oeste porque es una estructura retrovergente), muestra capas horizontales de las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca, con una longitud inicial de 9.8 km; en línea roja se observa la falla vinculada con la estructuración de este pliegue.

En el Estadio 1 de contracción, se observa la deformación de las capas del estadio inicial y se desarrolla una falla en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance a lo largo del pliegue, teniendo esta falla se superpone la primera capa de crecimiento de la Formación Kayra, el acortamiento no se observa, ya que este es imperceptible a esta escala.

En el estadio 2 se observa la deformación de capas de las formaciones Maras, Puquín, Quilque, Chilca, Kayra y Soncco; las últimas formaciones Kayra y Soncco superpuestas como capas de crecimiento, también podemos ver que se sigue desarrollando una falla con el mismo buzamiento en línea roja continua que crece lenta y sincrónicamente con el plegamiento de avance y que finalizando este estadio se tiene como longitud de las capas de 9.70 km con un porcentaje de acortamiento de 1.0% de la longitud inicial.

En el estadio 3 se observa la deformación de todas las formaciones y más en los niveles afectados por la falla de avance que tiene el mismo buzamiento en línea roja continua, teniendo como longitud de las capas de 8.96 km equivalente a un porcentaje de acortamiento de 8.5% de la longitud inicial.

En el estadio 4 se observa que la geometría final de la estructura modelada es comparable con la estructura mostrada en la sección geológica F-F', dejando ver el anticlinal de Puquín y teniendo una longitud final de las capas de 8.62 km, representando un porcentaje de acortamiento total de 12.0% de la longitud inicial.

Posterior al estadio 4 se observa la rotación de 7° de la estructura modelada, según modelos bibliográficos regionales (Figura 4. 97 f); finalmente la última imagen enfoca el anticlinal de Puquín de manera puntual, pudiendo observar la topografía actual y el modelo de evolución del anticlinal de Puquín en un evento de compresión.

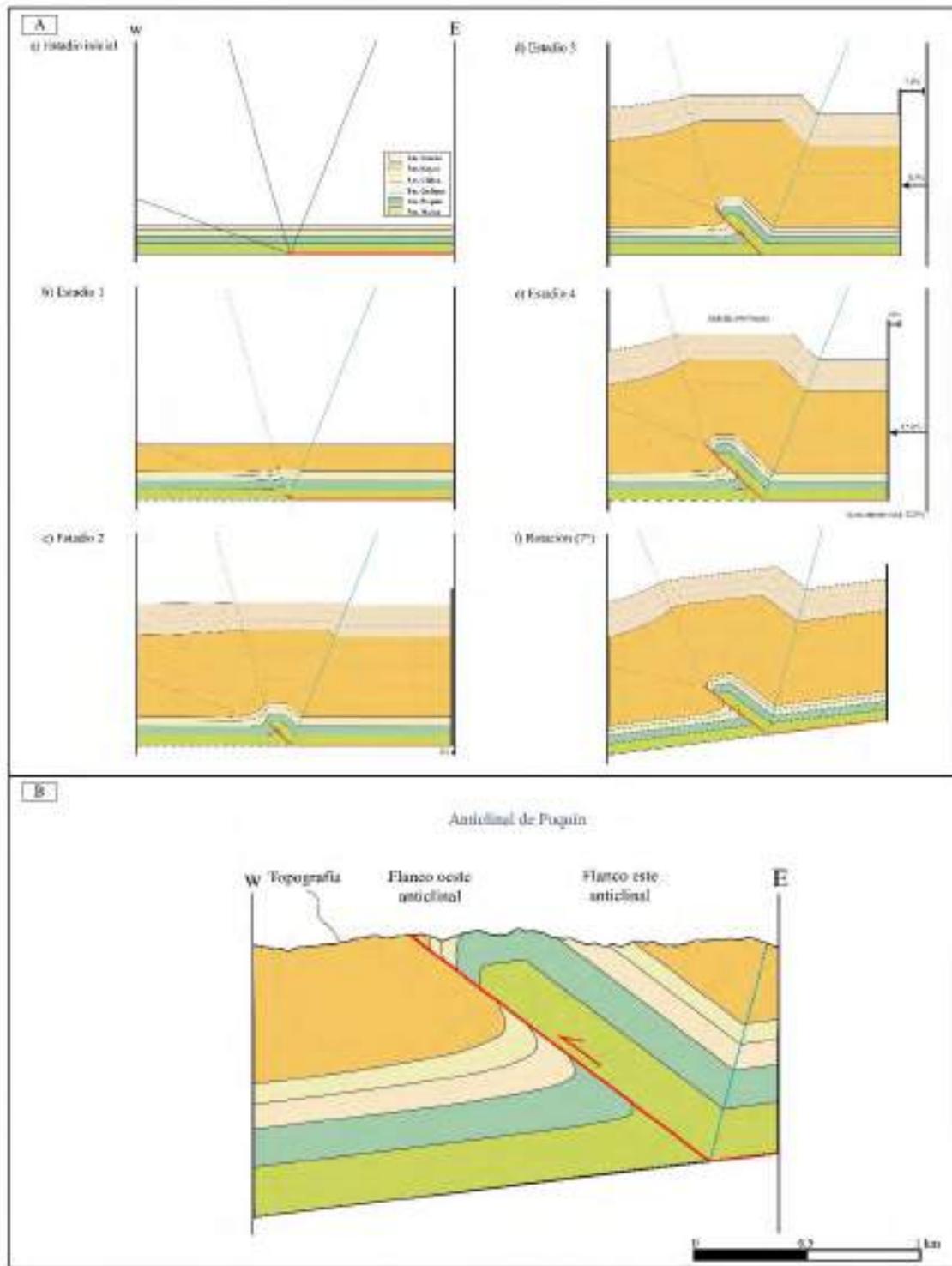


Figura 4. 97: Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector sur (F-F') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. A-a) Estadio inicial previo a la deformación; b) Superposición de la capa de crecimiento de la Formación Kayra; c) Formación de un pliegue por propagación de falla sobre una rampa buzante de 44° con un porcentaje de acortamiento de 1.0% respecto a la longitud inicial de la sección; d) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance tiene un porcentaje de acortamiento de 8.5%; e) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance, pero no llega a corta la Formación Kayra, ya que este es de un espesor muy grande y tiene un porcentaje de acortamiento final de 12.0 %; f) El conjunto de formaciones es rotado en 7° y B) Modelo del anticlinal de Puquín sector sur. Fuente: Elaboración propia.

4.7 EVOLUCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, que consta de 186.88 km² ubicada entre la unidad geomorfológica del Altiplano, muestra un conjunto de fallas, entre las fallas importantes regionales tenemos la falla Cusco al norte y la falla Paruro al Sur; con un pliegue que afecta capas cretácicas, paleógenas y cuaternarias. La Figura 4. 103, muestra la depositación de la Formación Maras en un régimen tectónico puro extensional entre 145 y 100.5 Ma (Cretácico inferior), teniendo un modelo conceptual con vista en perfil estructuras de tipo graben formado por un conjunto de fallas normales; se observa también que alrededor del Cretácico superior (100.5 y 65 Ma) se deposita la Formación Puquín en un régimen tectónico extensional hasta una cierta parte y seguido de un régimen transpresivo, teniendo así la reactivación de las fallas normales a inversas como se muestra en el modelo conceptual y estas estructuras aún se preservan en el área de estudio (Figura 4. 98 y 4. 99).



Figura 4. 98: Formación Puquín con un conjunto de fallas normales formando estructuras de tipo horst con reactivación inversa. Tomado en el poblado Chaconayoc.

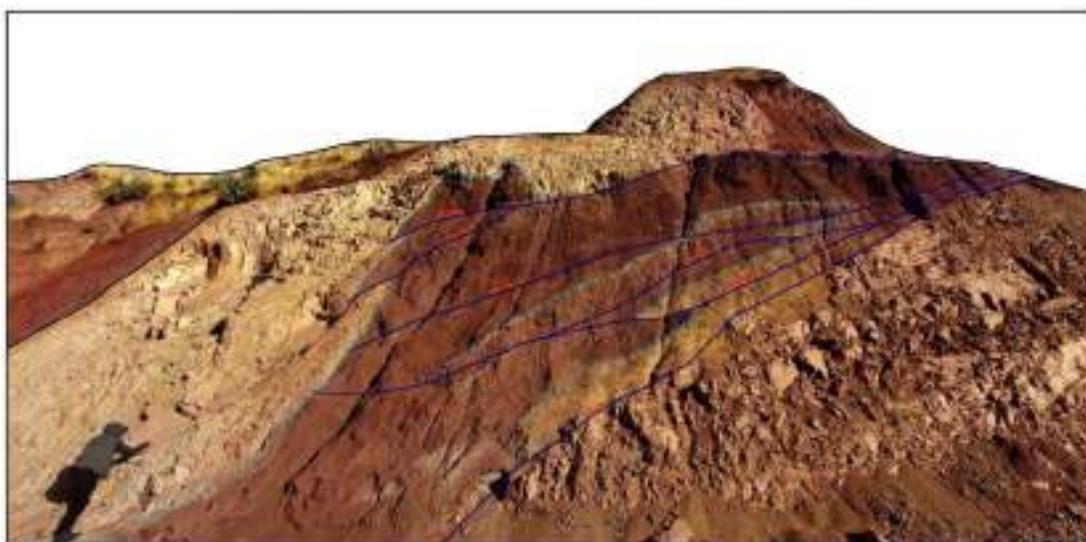


Figura 4. 99: Formación Puquín con estructuras de fallas normales con reactivación inversa. Tomado en el poblado Chaconayoc.

Entre el Paleoceno y Eoceno mientras se sedimenta las formaciones Quilque, Chilca y Kayra se tiene una deformación dúctil-frágil es decir, que presenta deformaciones combinadas dúctil (cambio de forma sin fracturamiento; produciendo pliegues) y frágil (fracturas); con un régimen tectónico transpresivo y en el modelo conceptual (Figura 4. 103) se muestran las estructuras que se forman al comparar el régimen regional con lo interpretado en el área de estudio, es decir, el pliegue del anticlinal de Puquín con una dirección NO-SE formado en una deformación dúctil acompañado de fallas paralelas Cusco y Paruro tanto en la parte norte y sur de cinemática inversa y con la misma dirección ONO-ESE; en la Figura 4. 100 se muestra un modelo continuo de cizallamiento simple que de manera teórica intenta explicar la distribución y cantidad de rotaciones en sistemas de fallas de rumbo, en la siguiente imagen muestra el modelo de la disposición de las estructuras en este régimen transpresivo, en los límites norte y sur del anticlinal de Puquín que se viene formando se observa pliegues de arrastre debido al movimiento de rumbo sinistral con componente compresivo; el procesamiento y análisis de los datos de foliaciones encontrados en campo en la Formación Chilca y la Estación estructural 04 pertenecen a este régimen transpresional; los datos de las fallas con cinemática del Grupo 1 pertenecen también a este régimen como primer evento.

Entre el Eoceno y Oligoceno mientras se sedimenta la Formación Soncco se tiene una deformación frágil-dúctil con un régimen tectónico que cambia entre transpresivo a transtensivo por relajamiento; en la tercera imagen (Figura 4. 100) se observa un modelo cuasi continuo de cizallamiento simple de manera teórica que explica la rotación en fallas de rumbo y en la cuarta imagen vemos las estructuras del área de estudio que se mostraban en la segunda imagen, pero con una rotación de $\sim 40^\circ$ con un movimiento de rumbo dextral extensivo que deforma la falla Paruro y produce un pliegue de amortiguamiento como es el anticlinal de Puquín que presenta en los límites con la falla, pliegues de arrastre en dirección del movimiento de rumbo; el procesamiento y análisis de los datos de las fallas con cinemática del Grupo 2 pertenecen también a este régimen como segundo evento en la evolución del área de estudio. La última imagen muestra el mapa geológico de la configuración actual de las estructuras mostradas esquemáticamente, observándose que la rotación de las estructuras a la parte norte afecta disminuyendo sus espesores y produciendo mucho más acortamiento que en la parte sur.

La depositación del Grupo Tacaza en forma de micropliegues, se encuentra en discordancia con la Formación Soncco y presenta un régimen tectónico de rumbo dado entre el Oligoceno superior y Mioceno, presenta datos estructurales de campo que indican este régimen como el caso de las fallas con cinemática del Grupo 3, que pertenece al evento 3 de la evolución del área de estudio; datos de vetillas extensionales que se muestran en la Estación 10 y Estación 22 (Figura 4. 101 y 4. 102), por comparación de los paleoesfuerzos con el régimen regional pertenece a este evento; los micropliegues con la misma dirección de paleoesfuerzo tomados en el Grupo Tacaza se ubican del mismo modo en este régimen de rumbo puro; estos paleoesfuerzos nos indican que se formó después de la génesis del anticlinal de Puquín. La Figura 4. 103 muestra en vista en perfil la depositación de las capas del Grupo Tacaza en el área de estudio.

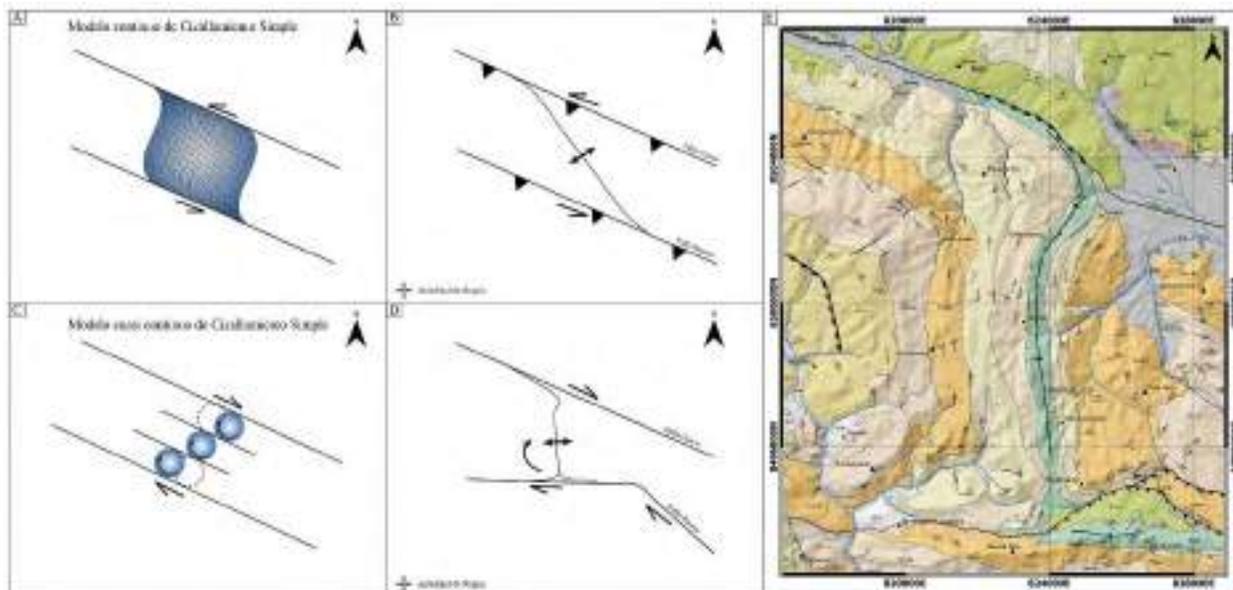


Figura 4. 100: Modelos cinemáticos que intentan explicar la distribución y cantidad de rotaciones en sistemas de fallas de rumbo. (A) Modelo continuo de cizallamiento simple, (B) modelo de la configuración de las estructuras con una deformación Dúctil-frágil, (C) modelo cuasi continuo de cizallamiento simple, (D) modelo de la configuración de las estructuras con una deformación Frágil-dúctil y (E) mapa geológico con la configuración estructural actual. Fuente: Elaboración propia.

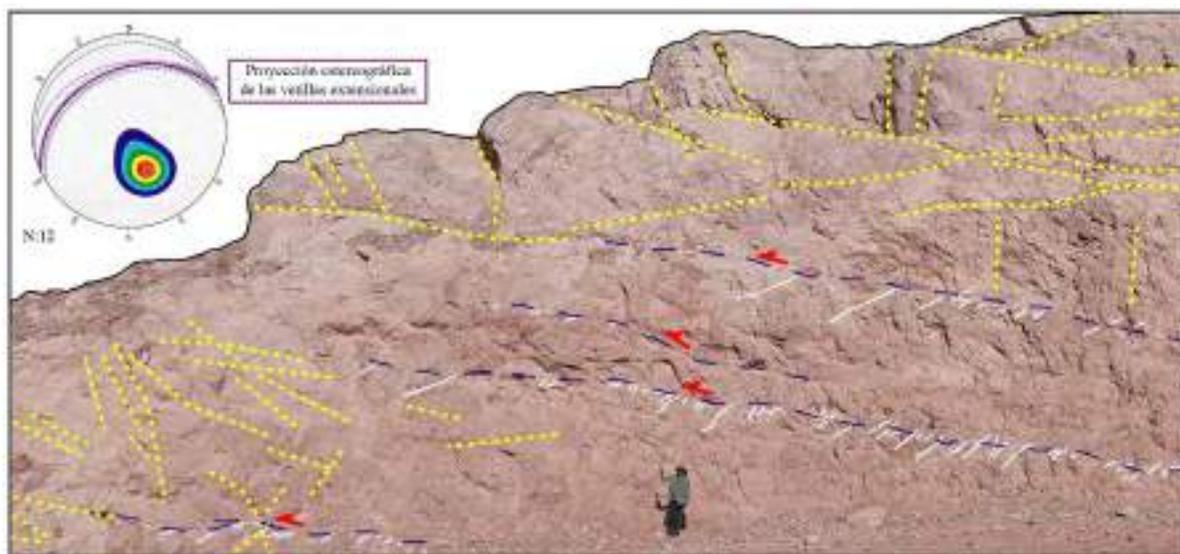


Figura 4. 101: Estación 10 con cuatro niveles de vetillas extensionales que pertenecen a un régimen de rumbo puro, posterior a la génesis del anticlinal de Puquín. Fuente: Elaboración propia.

En el Pleistoceno entre 2.5 y 0.01 Ma al depositarse la Formación San Sebastián tuvimos un régimen tectónico de extensión pura casi uniaxial, nos representan datos de campo como las fallas con cinemática del Grupo 4 que pertenecen al evento 4 de la evolución del área de estudio; así como datos de vetillas extensionales de la Estación 22 (Figura 4. 103); por comparación e interpretación pertenecen a este régimen extensivo.



Figura 4. 102: Estación 22, muestra de vetillas extensionales con relleno de calcita. Fuente: Elaboración propia.

En el Holoceno tenemos un leve cambio de régimen, siendo extensivo uniaxial en el cual presenta las estructuras como la falla de Cusco con una cinemática normal, los datos de fallas con cinemática del Grupo 5, pertenecen al evento 5 o evento actual extensivo como se muestra en la Figura 4. 103.

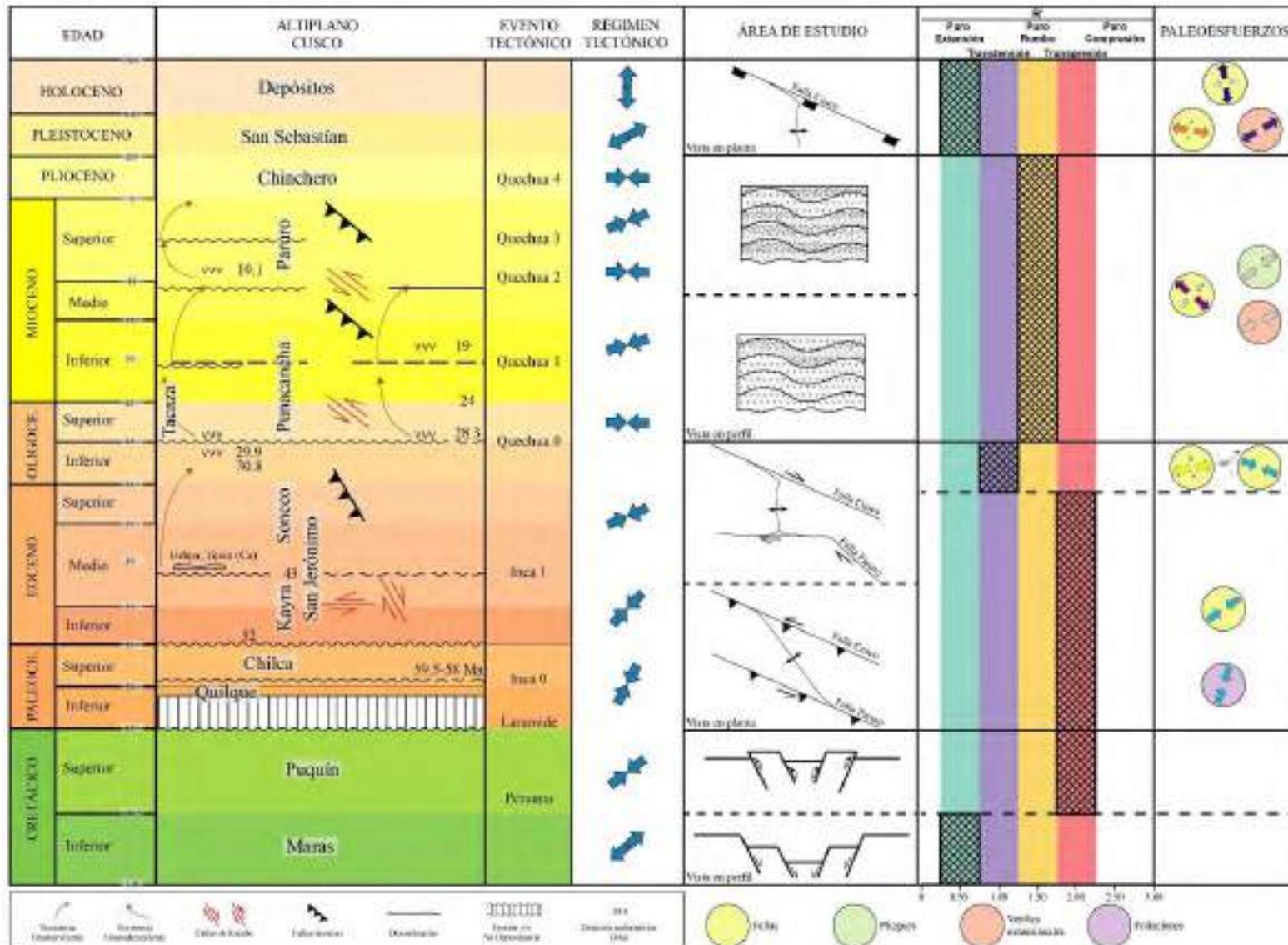


Figura 4. 103: Tabla de correlación de las edades de las unidades estratigráficas del Altiplano y el régimen tectónico en comparación con el modelo de evolución del anticlinal de Puquín y la configuración estructural. Fuente: Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005).

CAPITULO V: DISCUSIONES

5.1 Cartografiado Geológico.

En la Figura 3. 3 se muestra el gráfico del mapeo preliminar de las unidades geológicas y estructuras geológicas, se usó la técnica de las combinaciones de bandas en tres tipos de imágenes como Lansat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A, mostrando en distintas coloraciones las unidades geológicas de acuerdo a su composición y los lineamientos estructurales de acuerdo a la forma bajo la superficie. Por consiguiente, las diferencias de la delimitación a partir del procesamiento de imágenes satelitales y la información vectorial de INGEMMET se da en algunas unidades geológicas como la delimitación de la Formación Chinchero al norte y noroeste del área de estudio, la delimitación de la Formación Quilque en el poblado de Poroy y la delimitación del Grupo Tacaza al oeste del área de estudio, variando el espesor de las unidades más antiguas como las formaciones Soncco y Kayra. Esta información sirve de base sobre el cual parte el trabajo de cartografiado geológico en campo.

En la Figura 2. 44 se muestra el mapa geológico final del área de estudio de acuerdo a información obtenida en campo, se observa las diferencias respecto a la información base vectorial de INGEMMET, procesamiento de imágenes satelitales y según el Cuadrángulo 28-s (Carlotto et al., 2011). Las diferencias entre la delimitación a partir del procesamiento de imágenes y el campo se muestra en el Grupo Tacaza compuesta por material volcano-sedimentario, ubicado en el poblado Huayllay al oeste del área de estudio, es un bloque más aflorante en la zona, reduciendo el espesor de afloramiento de las capas rojas (Kayra y Soncco), de las formaciones Chilca y Quilque que pertenecen al flanco oeste al igual que las anteriores y de la Formación Puquín que es el núcleo del anticlinal. Finalmente, el bloque denominado Formación Chinchero, según la información vectorial de geología por INGEMMET, ubicado al sur del poblado de Batampata, no presenta la litología de esta formación; por el contrario, presenta materiales que pertenecen a la Formación Maras.

5.2 Análisis Estructural.

5.2.1 Fotointerpretación estructural.

En las Figuras 2.46 y 2.47 se muestra los gráficos de rosetas e histogramas de las fallas identificadas por la técnica de sombreado combinado C1 y C2, en el trabajo regional de Puma et al. (2021), revisar Anexo 4; que incluye el área de trabajo en esta tesis. A partir de este trabajo se realiza la comparación de tendencias de estructuras.

La obtención de estructuras geológicas a partir del procesamiento de imágenes satelitales como Lansat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A (Figura 4. 1) nos muestra cuatro tendencias principales a partir del análisis mediante la frecuencia de azimut T1 (055°) NE-SO, T2 (170°) NNO-SSE, T3 (080°) ENE-OSO y T4 (025°) NE-SO. Solo dos tendencias en el área de estudio se correlacionan con las tendencias regionales del trabajo de Puma et al. (2021); T2 (170°) de fotointerpretación estructural es equivalente a T2 (153°) de C1 y T2 (147°) de C2; T4 (025°) de fotointerpretación estructural es equivalente a T3 (035°) de C1 y T4 (035°) de C2.

En la Figura 4. 2 nos muestra seis tendencias principales a partir de los resultados del Ajuste Gaussiano Polimodal T1 (50,54°), T2 (171,22°), T3 (80,16°), T4 (24,80°), T5 (139,50°) y T6 (115,88°); que a diferencia del método de análisis mediante frecuencias de azimut nos adicionan dos tendencias y el resultado es más preciso. Las tendencias que se correlacionan a partir de la frecuencia de azimut, se correlacionan también en esta metodología, pero se adiciona la correlación de la tendencia T6 de ajuste Gaussiano Polimodal que es equivalente a T1 (113°) de C1 y T3 (113°) de C2.

5.2.2 Análisis estructural de las estaciones estructurales.

Se ha realizado 23 estaciones estructurales (Figura 4. 3), en los cuales se ha recolectado datos estructurales de estratificaciones, vetillas, foliaciones, fracturas y fallas que sirven para el análisis estructural en el área de estudio.

El área de estudio estructuralmente es bastante compleja, por ende, realizar el análisis estructural por geometría de fallas usando el modelo de fallas conjugadas o fracturas conjugadas de Anderson no es muy factible. La mayor deformación en el área de estudio se produce con la formación del anticlinal de Puquín; Por ese motivo, optamos por correlacionar con modelos de estructuras generadas al formar el pliegue, como el modelo propuesto por Twiss y Moores (2007); en donde se relacionan las fracturas y fallas sin cinemática interpretando su orientación respecto al plegamiento.

El análisis estructural de los 480 datos de fracturas se divide en dos sectores, en la Figura 4. 48 se tiene la representación estereográfica de las 264 fracturas del sector norte, en las cuales se cuenta con fracturas oblicuas denominadas tipo m de color azul que son particularmente comunes en los flancos del pliegue y las fracturas oblicuas denominadas tipo n' de color mostaza que tienden a asociarse con la charnela del pliegue (Figura 4. 53). Además, en la Figura 4. 49 se tiene la representación estereográfica de las 216 fracturas del sector sur, en las cuales se cuenta con fracturas inclinadas denominadas tipo bb' de color verde oscuro y verde claro que tienden a asociarse con la charnela del pliegue y las fracturas denominadas tipo ac de color rojo que corresponden a fracturas de extensión formadas paralelas a la dirección del máximo esfuerzo compresivo σ_1 (Figura 4. 53).

El análisis estructural de los 769 datos de fallas sin cinemática se divide en dos sectores, en la Figura 4. 51 se tiene la representación estereográfica de las 278 fallas sin cinemática del sector norte en donde las fallas sin cinemática asociadas a fracturas inclinadas denominadas tipo bb' de color verde oscuro y verde claro tienden a asociarse a la charnela del pliegue. Además, en la Figura 4. 52 se tiene la representación estereográfica de las 182 fallas sin cinemática del sector sur, en donde las fallas sin cinemática relacionadas con fracturas oblicuas denominadas tipo m de color azul y tipo m' de color celeste, son particularmente comunes en los flancos del pliegue y las fallas sin cinemática relacionadas con fracturas denominadas tipo bb' de color verde oscuro tienden a asociarse a la charnela del pliegue (Figura 4. 53).

Al correlacionar con el modelo propuesto por Twiss y Moores (2007); se encuentra fracturas de tipo m relacionadas con flancos de pliegue, n' y bb' (charnela) y ac (extensionales); en las fallas sin cinemática tenemos de tipo bb' relacionada con la charnela de pliegue y m-m' (flancos de pliegue). Al observar las proyecciones estereográficas en ambas estructuras se cuenta con algunos

datos puntuales variables, esto debido a eventos que no están en relación con la génesis del anticlinal de Puquín.

Al realizar la comparación entre las representaciones estereográficas de datos estructurales a partir del procesamiento de imágenes (Figura 4. 1) y representaciones estereográficas de datos de fallas sin cinemática y fracturas recolectadas en campo de las estaciones estructurales se tiene: La Figura 4. 48 de fracturas del sector norte a partir de los datos de campo tiene dos tendencias con direcciones NE-SO y NO-SE, la tendencia con la que coincide es la T4 ($\sim 25^\circ$) NE-SO. La Figura 4. 49 de fracturas del sector sur tiene tres tendencias con direcciones NNE-SSO, NE-SO y ESE-ONO, la tendencia con la que coincide es la T4 ($\sim 25^\circ$) NE-SO al igual que el sector norte. La Figura 4. 51 de fallas sin cinemática del sector norte tiene dos tendencias con direcciones NNE-SSO y NE-SO, la tendencia con la que coincide es la T4 ($\sim 25^\circ$) NE-SO. Finalmente, la Figura 4. 52 de fallas sin cinemática del sector sur tiene tres tendencias con direcciones NNE-SSO, ENE-OSO y ESE-ONO, la tendencia con la que coincide es la T3 ($\sim 80^\circ$) ENE-OSO.

A partir del análisis de fallas con cinemática de los 309 datos recolectados en campo en las 23 estaciones estructurales, se determinó 5 grupos:

Grupo 1 de dirección de paleoesfuerzo principal (σ_1) NO-SE de régimen transpresivo; en la Figura 4. 55 muestra las proyecciones estereográficas de las estaciones estructurales con este régimen tectónico; pero se observa algunas estaciones con diferente dirección de paleoesfuerzo principal (σ_1) como las estaciones E5, E6, E7, E11, E12 y E13; debido a la ubicación, datos aleatorios por deformación local y tipo de litología de la estación estructural.

Grupo 2 de dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) OSO-ENE de régimen transtensivo; en la Figura 4. 57 muestra las proyecciones estereográficas de las estaciones estructurales con este régimen tectónico; pero se observa algunas estaciones con diferente dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) como las estaciones E3, E4, E9, E10 y E14; debido a la ubicación, datos aleatorios por deformación local, datos estructurales rotados y tipo de litología de la estación estructural.

Grupo 3 de dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) NO-SE de régimen de rumbo puro; en la Figura 4. 59 muestra las proyecciones estereográficas de las estaciones estructurales con este régimen tectónico. Se observa que, a diferencia de los anteriores grupos, todas las estaciones tienen la misma dirección de esfuerzo principal (σ_3).

Grupo 4 de dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) ONO-ESE de régimen de extensión pura; en la Figura 4. 61 muestra las proyecciones estereográficas de las estaciones estructurales con este régimen tectónico; pero se observa algunas estaciones con diferente dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) como las estaciones E1, E7 y E17; debido a la ubicación, datos aleatorios por deformación local, datos estructurales rotados y tipo de litología de la estación estructural.

Grupo 5 de dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) NNO-SSE de régimen de extensión pura; en la Figura 4. 63 muestra las proyecciones estereográficas de las estaciones estructurales con este régimen tectónico; pero se observa algunas estaciones con diferente dirección de paleoesfuerzo principal (σ_3) como las estaciones E4, E10 y E22; debido a la ubicación, datos aleatorios por deformación local, datos estructurales rotados y tipo de litología de la estación estructural.

El régimen de cada grupo determinado a partir del método de Diedros rectos y PBT axes (Tabla 4. 7) y el régimen tectónico de estos grupos a partir del método inverso múltiple son: Grupo 1 (transpresivo casi radial), Grupo 2 (transtensivo), Grupo 3 (rumbo puro), Grupo 4 (extensión pura casi uniaxial) y Grupo 5 (extensión pura uniaxial).

De esta información, se determinan cinco eventos y de acuerdo al régimen que comprende se realiza una comparación con la tabla de correlación de las edades de las unidades estratigráficas y el régimen tectónico (Tabla 4. 7, Figura 4. 103 y Figura 5. 1); en donde el Grupo 1 pertenece al evento más antiguo determinado a partir del análisis de las estructuras recolectadas en campo, seguido de los Grupos 2, 3, 4 y 5; el Grupo 5 pertenece al evento tectónico reciente.

En la tabla de resumen de paleoesfuerzos principales σ_1 y σ_3 por diferentes métodos (Tabla 4. 7), se muestra el dato exacto por cada método en los cuales se observa diferencia de resultados. Además del porcentaje del carácter de las fallas, hablando de reactivadas, estables o neoformadas por cada evento. El mayor porcentaje de fallas reactivadas con 67% se da en el evento III, el mayor porcentaje de fallas estables con 33% se da en el evento V o evento reciente y el mayor porcentaje de fallas neoformadas con 41% se da en el evento II.

Se analiza 10 muestras de secciones orientadas, en las que se identificaron diversas estructuras (Tabla 4. 11), tenemos una microbrecha (Bx1n) que representa el evento (D1n?) que posiblemente está asociado a un evento más antiguo que tiene esta tendencia como se representa en el análisis de estructuras regionales, esta estructura no se reconoció en el análisis estructural macroscópico, pero sí en el análisis microtectónico; las siguientes estructuras como los cristales ataxiales (MA2n), foliaciones y estilolitos (S2n), vetillas sintaxiales (V2n), fallas (F2n) y (VF2n), zonas de cizalla (C2n) y carbonatos con macla tipo 3 (Cb1), representan el evento (D2n) que aproximadamente se encuentra entre el Oligoceno superior a Mioceno (Figura 5. 1); las vetillas con relleno de cuarzo y calcita (Qz+Cb) de la estación estructural E22, representan el evento (D3n') que aproximadamente se encuentra entre el Plioceno y Pleistoceno (Figura 5. 1); las vetillas (V3n), fallas (F3n) y vetillas sintaxiales de calcita (Cb3) nos representan también una extensión asociado al evento (D3n) y es reconocido regionalmente, Así como en las vetillas extensionales macroscópicas de la estación E22, estas extensiones se han dado aproximadamente en el Pleistoceno (Figura 5. 1) y las vetillas (V4n), fallas (F4n) y Boudinage (B4n) que nos representan una extensión asociado al evento (D4n), reconocido mediante el análisis de fallas macroscópicas (Figura 5. 1) pertenece al evento del Holoceno.

5.2.3 Geometría del anticlinal.

En la Figura 4. 94 se muestran las clasificaciones usadas para determinar la geometría del pliegue; según las proyecciones estereográficas realizadas con datos superficiales en las secciones realizadas en tres sectores (Figura 3. 24); según la clasificación de pliegue por Fleuty (1964) tomando en cuenta la inclinación del plano axial y el plunge de la línea de charnela determinamos el pliegue en el sector norte como un pliegue casi recto con inmersión suave, en el sector centro y sur un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada. Tomando el ángulo de interflanco, determinamos el pliegue en el sector norte y centro como un pliegue cerrado y en el sector sur como un pliegue abierto. Además, que se caracteriza como un pliegue asimétrico y con eje de pliegue con doble inmersión de $\sim 21^\circ\text{S}$ y $\sim 34^\circ\text{N}$ (no cilíndrico).

Finalmente, en las secciones geológicas por la metodología de trishear el anticlinal de Puquín se clasifica geoméricamente como un pliegue por propagación de falla coincidiendo con estudios anteriores como el cuadrángulo de Cusco 28-s (Carlotto et al., 2011).

5.2.4 Evolución del anticlinal.

De los tres modelos directos usando el software Fault Fold Forward (Allmendinger, 2012) para reconstruir pliegues por propagación de falla; a partir de las secciones geológicas norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F') realizadas por la metodología de kink (Figura 3. 24). Se muestra los modelos de evolución cinemática con el porcentaje de acortamiento para cada estadio propuesto para el anticlinal, tomando como nivel de despegue las evaporitas de la Formación Maras como una zona dúctil. Porcentaje de acortamiento total de 15.1% (Figura 4. 95) de la longitud inicial para el sector norte, 12.1% (Figura 4. 96) para el sector centro y 12.0% (Figura 4. 97) para el sector sur; teniendo así el mayor acortamiento en el sector norte. Las unidades geológicas presentan disminución de espesor; debido a la presencia de estratos de crecimiento, así como la deformación del anticlinal que presenta al tener una rotación de dirección NO-SE a N-S en sentido horario e interpretándose como un amortiguamiento, teniendo como límite de rotación a la falla de Cusco.

5.2.5 Evolución del área de estudio.

Las fallas importantes regionales son la falla Cusco al norte y la falla Paruro al Sur; con un pliegue que afecta capas cretácicas, paleógenas y cuaternarias. La Figura 4. 103, muestra la depositación de la Formación Maras en un régimen tectónico extensional puro dentro del Cretácico inferior, teniendo estructuras de tipo horst y graben (Figura 4. 98 y 4. 99).

En el Cretácico superior se deposita la Formación Puquín en un régimen tectónico extensional hasta una cierta parte y seguido de un régimen transpresivo.

Entre el Paleógeno y Eoceno, mientras se sedimenta las formaciones Quilque, Chilca y Kayra se tiene una deformación Dúctil-Frágil con un régimen tectónico transpresivo y el pliegue del anticlinal de Puquín con una dirección NO-SE formado en una deformación dúctil acompañado de fallas paralelas Cusco y Paruro tanto en la parte norte y sur de cinemática inversa y con la misma dirección ONO-ESE; según el análisis de los datos las foliaciones y Grupo 1 de fallas recolectadas en campo pertenecen a este régimen transpresional.

Entre el Eoceno y Oligoceno, mientras se sedimenta la Formación Soncco se tiene una deformación Frágil-Dúctil con un régimen tectónico que cambia entre transpresivo a transtensivo por relajamiento; lo que originó una rotación de $\sim 40^\circ$ del pliegue Puquín con una orientación N-S y deforma la falla Paruro. El análisis de los datos de las fallas del Grupo 2 pertenecen a este régimen.

La depositación del Grupo Tacaza que se encuentra en discordancia con la Formación Soncco presenta un régimen tectónico de rumbo dado entre el Oligoceno superior y Mioceno, y esta unidad se encuentra plegada (pliegues suaves), las fallas del Grupo 3 y vetillas extensionales de la Estación 10 pertenecen a este régimen.

En el Pleistoceno, al depositarse la Formación San Sebastián se tuvo un régimen tectónico de extensión pura casi uniaxial y nos representan datos de campo como las fallas del Grupo 4 y vetillas extensionales de la Estación 22.

En el Holoceno tenemos un leve cambio de régimen siendo extensivo uniaxial, como la falla de Cusco con una cinemática normal, los datos de fallas del Grupo 5 pertenecen a este régimen.

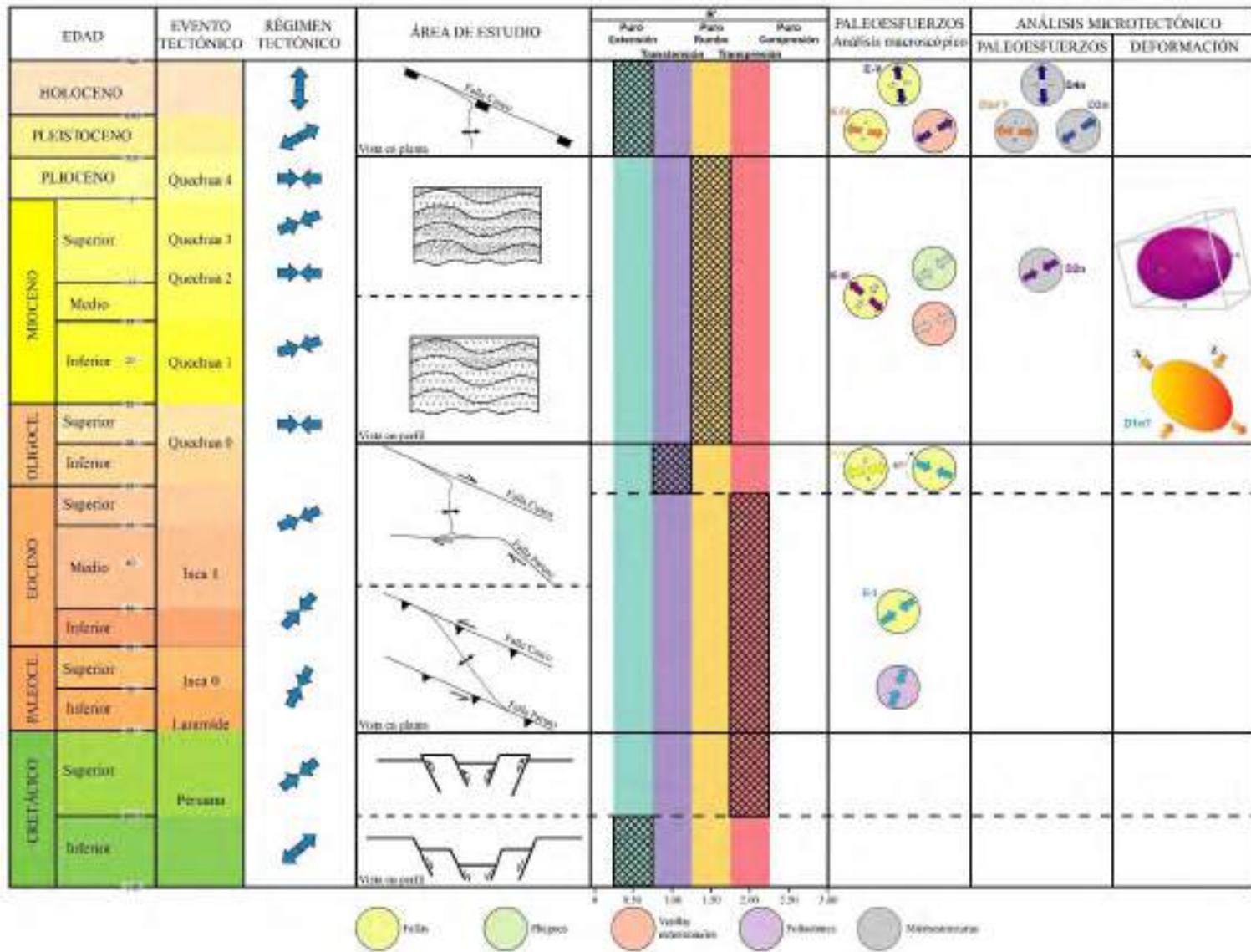


Figura 5. 1: Tabla de correlación del régimen tectónico regional con el régimen tectónico del área de estudio a partir del análisis estructural macroscópico y microtectónico. Fuente: Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005).

CONCLUSIONES

PRIMERA. -Se determinó las unidades geomorfológicas del área de estudio a partir del cartografiado en campo; teniendo montañas, colinas, vertientes, piedemonte, peneplanicies, altiplanicies, terrazas y cauce de río, que además constituyen el Altiplano como geoforma regional. Se generó el mapa geológico del área de estudio a una escala de 1:75000 a partir del cartografiado de campo realizado a una escala de 1:20000 delimitando a detalle las unidades cretácicas como las formaciones Maras y Puquín, unidades paleógenas como las formaciones Quilque, Chilca, Kayra, Soncco y el Grupo Tacaza; información bibliográfica vectorial de INGEMMET y procesamiento de imágenes satelitales como Lansat 8 OLI (RGB 4/3-6/2-7/4), Aster L1T (RGB 9-4-3) y Sentinel 2A (RGB 11/12-11/2-11/8).

SEGUNDA. -Se realizó el análisis estructural a partir de la fotointerpretación de estructuras usando las combinaciones de bandas en tres tipos de imágenes Lansat 8 OLI [RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4], Aster L1T (RGB 3-2-1) y Sentinel 2A (RGB 4/3-4/2-11/12), teniendo de acuerdo a la frecuencia de azimut cuatro tendencias principales de direcciones T1 (055°) NE-SO, T2 (170°) NNO-SSE, T3 (080°) ENE-OSO y T4 (025°) NE-SO; y a partir del ajuste Gaussiano polimodal, 6 tendencias principales T1 (50,54°), T2 (171,22°), T3 (80,16°), T4 (24,80°), T5 (139,50°) y T6 (115,88°) y a partir de la recolección de datos estructurales en las 23 estaciones estructurales, teniendo el análisis de estratificaciones, vetillas, foliaciones, fracturas y fallas con o sin cinemática. Los datos de fracturas y fallas sin cinemática se correlacionan con el modelo propuesto por Twiss y Moores (2007) y de las fallas con cinemática se determina cinco grupos, Grupo 1 NO-SE de régimen transpresivo como evento 1, Grupo 2 OSO-ENE de régimen transtensivo como evento 2, Grupo 3 NO-SE de régimen de rumbo puro como evento 3, Grupo 4 ONO-ESE de régimen de extensión pura como evento 4 y Grupo 5 NNO-SSE de régimen de extensión pura como evento 5.

TERCERA. -Se realizó un bloque diagrama 2.5D geológico, a partir de las secciones transversales realizadas aplicando el método kink, el cual permitió una primera aproximación de la sección y según la reconstrucción de un modelo directo usando el software Fault Fold Forward por la metodología trishear obteniendo la geología a profundidad.

CUARTA. -Se determinó la geometría del anticlinal de Puquín; según la clasificación de pliegue por Fleuty (1964) tomando en cuenta la inclinación del plano axial y el plunge de la línea de charnela, en el sector norte es un pliegue casi recto con inmersión suave, en el sector centro y sur es un pliegue inclinado abrupto con inmersión moderada; por el ángulo de interflanco, se clasifica el pliegue en el sector norte y centro como un pliegue cerrado y en el sector sur como un pliegue abierto. Además, que se caracteriza como un pliegue asimétrico y con eje de pliegue con doble inmersión (no cilíndrico); Finalmente, se interpreta el anticlinal de Puquín como un pliegue por propagación de falla transportado hacia el oeste. Se desarrolló tres modelos de evolución cinemática del anticlinal de Puquín, usando el método trishear que se realizó con el software Fault Fold Forward, teniendo los acortamientos totales de las secciones norte (15.1%), centro (12.1%) y sur (12%).

RECOMENDACIONES

PRIMERA. -Se recomienda hacer estudios estructurales similares en la región con el fin de entender con mayor detalle la evolución tectónica en la región de Cusco.

SEGUNDA. -Se recomienda hacer uso de técnicas geofísicas como sísmica de reflexión que permite obtener información del subsuelo con más detalle dependiendo del interés económico que pueda existir.

TERCERA. -Se recomienda hacer uso de la geocronología en el área de estudio como la Geocronología $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, en los que se debe emplear micas (de preferencia illitas autigénicas) que se puedan extraer del núcleo de las fallas y U-Pb en las vetillas de calcita con el fin de precisar algunas edades de la deformación tectónica con las que aún no se cuenta.

CUARTA. -Para el análisis de los grupos de fallas se recomienda hacer uso del software gratuito Win- Tensor, ya que genera los paleoesfuerzos por dos metodologías como PBT axes y Diedros rectos, así también determina el tipo de régimen tectónico al que pertenece cada grupo de fallas.

QUINTA. -Se recomienda hacer uso de la microtectónica en ambientes dúctiles, dúctil-frágil y frágil-dúctil ya que las estructuras se preservan mucho mejor en las rocas con este comportamiento. Además, se recomienda hacer uso de la microtectónica a partir de muestras orientadas que permiten tener la orientación real de la muestra y sus elementos estructurales en relación espacial con el fin de comprender mejor los mecanismos de las deformaciones, la geometría de las estructuras y su relación con las macroestructuras.

SEXTA. -Se recomienda hacer uso del software Fault Fold Forward que reconstruye modelos directos por la metodología trishear para zonas donde se encuentren pliegues por propagación de falla; ya que este software gratuito también construye modelos complejos en donde existen múltiples fallas.

SEPTIMA. -Teniendo en cuenta la importante variación de los espesores estratigráficos del anticlinal de Puquín se recomienda realizar un estudio sedimentológico y estructural más detallado con fin de entender esta variación. También se recomienda realizar un modelado en 3D para tener un mejor entendimiento de la geometría y cinemática del anticlinal de Puquín, lo cual también servirá para entender la geometría de los cuerpos sedimentarios teniendo en cuenta la variación que estos tienen en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Allmendinger, R.W. (1998). Inverse and forward modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*. 17(4): 640-656.
- Allmendinger, R.W. (1999). Propagation-to-slip ratio and fold style in fault-propagation folds: perspectives gleaned from trishear modeling, in *Geological Society of America Abstracts with Programs*.
- Allmendinger, R.W. y Shaw, J.H. (2000). Estimation of fault propagation distance from fold shape: implications for earthquake hazard assessment. *Geology* 28, p.1099–1102.
- Allmendinger, R., Cardozo, N., Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Allmendinger, R. (2015). *Modern Structural Practice. A structural geology laboratory manual for the 21 Century*. Chapter 6, p. 106-129.
- Anderson, E.M. (1951). *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Brittan*, Edinburgh, Oliver and Boyd, 241 p.
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977). Sur un méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, 7: 1309-1318.
- Angelier, J.(1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research* 89, 5835-5848.
- Angelier, J. (1994). Fault slip analysis and paleostress reconstruction in Hancock, P.L. (ed), *Continental Deformation: Oxford*, Pergamon Press, p. 53-100.
- Aramendia, B., Turienzo, M., Peralta, F., Lebinson, F., y Sánchez, N. (2019). Las estructuras tectónicas andinas en las nacientes del arroyo Taquimilán (37°35'S), faja plegada y corrida del Agrio, Cuenca Neuquina. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 76 (4), 340-351.
- Audebaud, E. (1973). Geología de los cuadrángulos de Ocongate y Sicuani. *Servicio de Geología y Minería, Boletín* 25, 72 p.
- Babín Vich, R.B. y Gómez, D. (2010). Problemas de geología Estructural. Cap. 8, Fallas. *Serie geología Estructural N° 2*, p. 124-147.
- Bellier, O. y Zoback, M.L. (1995). Recent state of stress change in the Walker Lane zone, western Basin and Range province, United States. *Tectonics* 14, 564–593. <http://dx.doi.org/10.1029/94TC00596>.
- Benavente, C. y Delgado, F. (2011). Evaluación geológica del sector de K'asaccunca distrito y provincia de Anta – Región Cusco. INGEMMET, Informe Técnico N°A6584, 34 p.
- Botero, M., Marín, S. P.; Vinasco, C. J. (2015). Metodología para el estudio de Orientación Preferencial de Forma (OPF) en muestras de mano de roca y afloramiento a través de procesamiento digital de imagen. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, núm. 38, julio-diciembre, 2015, pp. 5-13 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia.
- Boyer, S. E. y Elliott, D. (1982). Thrust systems. In Foster N. H. y Beaumont E. A. (eds) *Structural concepts and techniques 1, Basic concept, folding and structural techniques*, AAPG publicación especial N°9, p: 260-296.

- Burkhard, M. (1993). Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *J. Struct. Geol.* 15, 351-368. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90132-T](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90132-T)
- Cabrera, A. y Petersen, G. (1936). Reconocimiento geológico de los yacimientos petrolíferos del departamento de Puno. *Boletín Cuerpo Ingenieros de Minas Perú*, 115: 9-100.
- Cabrera, J. (1988). Néotectonique et sismotectonique dans la Cordillère Andine au niveau du changement de géométrie de la subduction: la région de Cusco, Pérou. Thèse Docteur 3ème cycle, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, 275 p.
- Cabrera, J. y Sébrier, M. (1998). Surface rupture associated with a 5.3 mb earthquake: the 5 April 1986 Cuzco earthquake and kinematics of the Chincheros-Quoricocha faults of the High Andes, Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1): 242-255.
- Camargo, J. (2015). Fallas y Fallamiento. Universidad Surcolombiana, 94 p.
- Callot, P. (2008). La Formation Ayabacas (limite Turonien-Coniacien, Sud-Pérou): collapse sous-marin en réponse à l'amorce de l'orogénèse andine. Thèse Docteur, Université Paul Sabatier, Toulouse, 251 p.
- Cardozo, N., Bawa-Bhalla, K., Zehnder, A. T., y Allmendinger, R. W. (2003). Mechanical models of fault propagation folds and comparison to the trishear kinematic model: *Journal of Structural Geology*, v. 25, no. 1, p. 1-18.
- Carlotto, V.; Candia, F. y Marocco, R. (1988). Estudio geológico del anticlinal de Vilcanota, Cusco. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (78): 137-147. VI Congreso Peruano de Geología, julio 1987.
- Carlotto, V.; Jaillard, E. y Mascle, G. (1992). Relación entre sedimentación, paleogeografía y tectónica en la región de Cusco (sur del Perú) entre el Jurásico superior - Paleoceno. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (83): 1-20.
- Carlotto, V. (1992). Relations entre sédimentation, paléogéographie et tectonique dans la région de Cuzco (Sud du Pérou) entre le Jurassique supérieur et le Paléocène. Mémoire DEA, Université de Grenoble I, 113 p.
- Carlotto, V.; Cárdenas, J.; Chávez, R. y Gil, W. (1995b). Sedimentología de la Formación Huancané (Neocomiano) de la región de Cusco y su relación con las variaciones del nivel del mar. *Bulletin Institut français d'études Andines*, 24(1): 1-21.
- Carlotto, V.; Gil W.; Cárdenas J. y Chávez, R. (1996). Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 65, 245 p.
- Carlotto, V. (1998). Évolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S), Pérou: enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique. Thèse Docteur, Université de Grenoble I, 159 p.
- Carlotto, V.; Cerpa, L.; Cárdenas, J.; Díaz-Martínez, E. y Bermúdez, O. (2003a). Puesta en evidencia de depósitos glaciomarinós y resedimentados de posible edad Devónico Superior-Carbonífero basal en la Cordillera Oriental del sur del Perú: Región de Cusco. En: Simposio Argentino del Paleozoico Superior, 3, La Plata, 2003. Resúmenes. 1 p.
- Carlotto, V.; Jaillard, E.; Carlier, G.; Cárdenas, J.; Cerpa, L., et al. (2005). Las cuencas terciarias sinorogénicas en el Altiplano y en la Cordillera Occidental del sur del Perú. En: Arce, J., ed. Alberto Giesecke Matto. Lima: Sociedad Geológica del Perú, Volumen Especial 6, p. 103-126.

- Carlotto, V. (2006b). La deformación y el acortamiento andino en el sur del Perú: Cusco-Abancay-Sicuani. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (101): 91-119.
- Carlotto, V., Cardénas, J., Carlier, G. (2011). Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1 : 50,000. INGEMMET. *Boletín, Serie A:138 Carta Geológica Nacional*, 258 p., 6 mapas
- Cerdán, J. (2018). Modelamiento geoestructural del sinclinal Otuzco basado en análisis tenso -deformacional de rocas calcáreas del Cretáceo superior. Universidad de Cajamarca, 88 p.
- Chávez , R. , Gil, W. , Carlotto , V , Cárdenas, J. y Jaillard, E. (1996). The Altiplano-Eastern Cordillera limit in the Urubamba region (Cusco Peru). 3rd Int. Symp. And. Geodyn.-ISAG, St Malo, Orstom ed., 319-322.
- Chiba, T., Kaneta, S.I., Suzuki, Y. (2008). Red relief image map: New visualization method for three dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B2), 1071-1076. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.644.2038&rep=rep1&type=pdf>
- Córdova, E. (1986). Un bassin intramontagneux andin peruvien. Les couches rouges du bassin de Cuzco (MaestrichtienPaleocene). Docteur du 3ème cycle, Université de Pau et des Pays de L'Adour, Laboratoire de Geodynamique des Bassins Sedimentaires, Pau, 272 p.
- Córdova, E.; Escobedo, R. y Gárate, V. (1994). Evolución tectónica-sedimentaria de la cuenca cuaternaria del Cusco: Formación San Sebastián. En: Congreso Peruano de Geología, 8, Lima, 1994. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 225-227.
- Cristallini, E. (1998-2000). "Introducción a las fajas plegadas y Corridas". Curso teórico-práctico. Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. <http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Bibliografia/>
- Cristallini, E.O. (2022). EstereograficaWeb. Stereographic projection and fault kinematics web application. Reyuntec. Available for use in: <https://estereo.reyuntec.ar/>
- Coates, J.S. (1945). The construction of geological sections. *Quarterly Journal of the Geological, Mining and Metallurgical Society of India*, 17, 1 –11.
- Dahlstrom, C. D. A. (1970): Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petroleum Geol.*, 18(3):312-406.
- Declan G., Dwight c. (1988). Balanced sections in thrust belts. Estados Unidos, Geobyte; *Boletín AAPG*, p: 33-37.
- Delvaux, D. y Sperner, B (2003). Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: The TENSOR program. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2003, 212, 75–100. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06>
- Delvaux, D. (2012). Liberación de programa Win-Tensor 4.0 por tectónico estrés inversión: estadístico expresión de estrés parámetros En: Resúmenes de investigación geofísica, 14. UGE General Asamblea Viena.
- Despaigne, A. y Wilde, S. (2020). Uso de la Microtectónica para análisis estructurales [Diapositiva PowerPoint].
- Doubinger, J. y Marocco, R. (1981) - Contenu palynologique du Groupe Copacabana (Permien inférieur et moyen) sur la bordure sud de la Cordillère de Vilcabamba, région de Cuzco (Pérou). *Geologische Rundschau*, 70(3): 1086-1099.
- Dueñas, E. (1907) - Aspecto minero del departamento de Cuzco. *Boletín Cuerpo Ingenieros de Minas Perú*, 53: 1-194.

- Durney, D.W. y Ramsay, J.G. (1973). Incremental strains measured by syntectonic crystal growths. En DeJong K.A. and Scholten, R. (editores), *Gravity and Tectonics*, Wiley, p. 67-96.
- El Atillah, A., El Morjani, ZEA, Souhassou, M. (2019). Uso del Sentinel-2A imagen multiespectral para mapeo litoestructural y de alteración en Al Glo'aHoja de mapa (1/50.000) (Bou Azzer–El Graara Inlier, Central Anti-Atlas, Mo-Rocco). *Satélites artificiales* 54, 73–9. <http://dx.doi.org/10.2478/arsa-2019-0007>
- Elliott, D. (1982). The construction of balanced cross-section in Foster N. H. & Beamont E. A. (eds) *Structural concepts and techniques 1, Basic concept, folding and structural techniques*, AAPG publicación especial N°9, p: 651
- Erslev, E. A. (1991). Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19: 617-620.
- Fail, R.T. (1973). Kink band folding, valley and Ridge Province, Central Pennsylvania. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84, 1289–1314.
- Federico, L., Crispini, L., Capponi, G. (2010). Fault-slip analysis and transpressional tectonics: A study of Paleozoic structures in northern Victoria Land, Antarctica. *J. Struct. Geol.* 32, 667–684. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2010.04.001>
- Ferrill, D. A. (1991). Calcite twin width and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone. *J. Struct. Geol.* 13, 667-675.
- Fleuty, M.J. (1964). The description of folds. London, *Proceedings of the Geologists' Association*. N° 75: 461–492.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. y Lewis, D.W. 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 13: 937-968.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. New York, Cambridge University Press. 480 p.
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology*, second edition. Cambridge University Press.
- Frías Saba, R. del C., Sánchez, NP, Turienzo, MM, y Lebinson, FO. (2021). Análisis geométrico y cinemático del Anticlinal de Chos Malal, provincia de Neuquén. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 78 (4), 594-612.
- Gabelman, J.W. (1967). Estructura y origen de El Rodadero, Cuzco, Perú. *Boletín Sociedad Geológica del Perú*, (40): 55-71.
- Gill, J.E. (1953). Construction of geological sections of folds with steep limb attenuation. *AAPG Bulletin*, 37, 2389-2406.
- Gregory, H.E. (1914b). The Rodadero (Cuzco, Peru): a fault plane of unusual aspect. *American Journal of Sciences*, 37(220): 289-298.
- Gregory, H.E. (1916). A geological reconnaissance of the Cuzco valley, Peru. *American Journal of Sciences*, 41(241): 1-100.
- Grohmann, C. y Campanha, G. (2010). OpenStereo: Open Source, Cross-Platform Software for Structural Geology Analysis. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010*, abstract id. IN31C-06.
- Guiraud. M., Laborde, O., Philip, H. (1989). Characterization of various types of deformation and their corresponding deviatoric stress tensor using microfault analysis. *Tectonophysics* 170,289-316.
- Hancock, P. L. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology* 7(3/4), 437-457.

- Hardy, S. y Ford, M. (1997). Numerical modeling of trishear fault propagation folding. *Tectonics*, 16(5): 841- 854.
- Hardy, S. (1997). A velocity description of constant-thickness fault-propagation folding: *Journal of Structural Geology*, v. 19, no. 6, p. 893-896.
- Hardy, S. y Allmendinger, R. W. (2011). Trishear: A Review of Kinematics, Mechanics, and Applications. 95–119. <https://doi.org/10.1306/13251334M943429>
- Hobbs B., Means, W. y Williams, P. (1981). *Geología estructural*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 518 p.
- Homza, T.X., y Wallace, W.K. (1997). "Detachment folds with fixed hinges and variable detachment depth, northeastern Brooks Range, Alaska". *Journal of Structural Geology* 19, 337-354.
- Jaimés, F. y Romero, D. (1996). Las cuencas sin-orogénicas de la región del Cusco: La cuenca Paruro (Mioceno superior). Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional San Antonio Abad, Cusco, 71 p.
- Jaillard, E. y Sempere, T. (1989). Cretaceous sequence stratigraphy of Peru and Bolivia. En: Spalletti, L.A., ed. *Contribuciones de los simposios sobre el Cretácico de América, Parte A: Eventos y registro sedimentario*. Buenos Aires, [s.e.], p. A1-A27.
- Jaillard, E. (1993). L'évolution tectonique de la marge péruvienne au Sénonien et Paléocène et ses relations avec la géodynamique. *Bulletin Société Géologique de France*, 164(6): 819-830.
- Jaillard, E. (1994). Kimmeridgian to Paleocene tectonic and geodynamic evolution of the Peruvian (and Ecuadorian) margin. En: Salfity, J.A., ed. *Cretaceous tectonics of the Andes*. Wiesbaden: Vieweg Publishing, Earth Evolution Sciences Monograph Series, p. 101-166.
- Jamison, W.R (1987). "Geometric analysis of fold development in overthrust terranes", *Journal of Structural Geology* 9, 207-219.
- Kalafatovich, C. (1955) - El fósil de Gliptodonte hallado en el Cusco. *Revista Universitaria, Univ. Nac. San Antonio Abad del Cusco*, (108): 150-156.
- Laubacher, G. (1978). *Géologie de la Cordillère Orientale et de l'Altiplano au nord et nord-ouest du lac Titicaca (Pérou)*. Paris: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre Mer, 217 p. *Travaux et Documents de l'O.R.S.T.O.M.*, n. 95
- Launeau, P. y Robin, P. (2003a). Shape preferred orientation. [Online]. Available at: <http://www.sciences.univ-nantes.fr/geol/SPO>.
- Launeau, P. y Robin, P. (2003b) Fabric analysis using the intercept method. *Tectonophysics* 267, pp. 91-119. 2003. DOI: [10.1016/S0040-1951\(96\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00091-1)
- Launeau, P. y Robin, P. (2005). Determination of fabric and strain ellipsoids from measured sectional ellipses—implementation and applications". *Journal of Structural Geology*, 27, 2223-2233.
- Lisle, R. y Lesión, P. (2004). *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. Gales: Cambridge University Press.
- Lopez, B. (2019). *Cross-Section Construction and Balancing: Examples From the Spanish Pyrenees*. CASP, Cambridge, United Kingdom. *Developments in Structural Geology and Tectonics*, Volume 5, p 3-23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814048-2.00001-6>
- Macharé, J. (2006). Análisis Estructural aplicado a la Interpretación Geológica y a la Investigación de Depósitos Minerales, R-6 Copias de curso. Maestría Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales.

- Macharé, J. (2018). Análisis estructural aplicado a la exploración de recursos minerales, IAPG PERÚ. 50 P.
- Machuca, P. M. (2022). Control estructural en los procesos de mineralización del sistema de vetas Santa Rosa, compañía minera Sotrami S.A. Ayacucho. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 103 p.
- Marocco, R. (1975). Geología de los cuadrángulos de Andahuaylas, Abancay y Cotabambas. Instituto de Geología y Minería, Boletín, 27, 54 p.
- Marocco, R. (1978). Estudio geológico de la Cordillera de Vilcabamba. Instituto de Geología y Minería, Boletín. Serie D: Estudios Especiales, 4, 157 p.
- Martínez, J. (2003). Geología Estructural y Dinámica Global. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca. 431 p.
- Marrett, R.A. y Allmendinger, R.W. (1990). Kinematic Analysis of Fault-Slip Data. *Journal of Structural Geology*, 12, 973-986. [http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141\(90\)90093-E](http://dx.doi.org/10.1016/0191-8141(90)90093-E)
- Mattauer, M. (1976). Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre. Barcelona. 524 p.
- Medwedeff, D. A. (1989). Growth fault-bend folding at southeast Lost Hills, San Joaquin Valley, California: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 73, no. 1, p. 54-67.
- Mendivil, S. y Dávila, D. (1994). Geología de los cuadrángulos de Cuzco y Livitaca. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 52, 115 p.
- Mulchrone, K. F. and Choudhury, R. (2004). Fitting an ellipse to an arbitrary shape: implications for strain analysis. *Journal of Structural Geology* 26:143–153.
- Muñoz Martín, A. (1997). Evolución geodinámica del borde oriental de la cuenca del Tajo desde el Oligoceno hasta la actualidad. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 500p.
- Mamani, T. (2017). Aplicación de imágenes ASTER en la detección de zonas de alteraciones hidrotermales, sector Titire, Carumas, Moquegua. Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano. Puno. 181p. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4231>
- Mwaniki, M. W., Moeller, M. S., y Schellmann, G. (2015). A comparison of Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) in mapping geology and visualising lineaments: A case study of central region Kenya. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 897–903. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-897-2015>
- Nabavi, S.T. y Fossen, H. (2021). Fold geometry and folding a review. *Earth-Sci. Rev.* 222, 103812.
- Newell, N.D. (1949). *Geology of the Lake Titicaca region, Perú and Bolivia*. New York: Geological Society of America, 111 p. Memoir 36.
- Newell, N.D.; Chronic, J. y Roberts, T.G. (1953). *Upper Paleozoic of Peru*. New York: Geological Society of America, 276 p. Memoir 58.
- Otsubo, M., Sato, K., Yamaji, A. (2006). Computerized identification of stress tensors determined from heterogeneous fault-slip data by combining the multiple inverse method and k-means clustering. *J. Struct. Geol.* 28, 991–997. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2006.03.008>.
- Palomino, A. (2020). Caracterización morfo-tectónica y paleo sismológica- El sistema de fallas Pachatusan-Cusco. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. 152 p.

- Passchier, C.W. (1990b). A Mohr circle construction to plot the stretch history of material lines. *J Struct Geol* 12:513–515
- Passchier, C. W. y Trouw, R. A. J. (2005). *Microtectonics*. Springer, Sturtz, Wurzburg, Germany. Second Edition. 372 p.
- Pegoraro, O. (1972). Application de la microtectonique á un étude de neotectonique. Le golfe Maliaque (Grece centrale). These Illeme cycle. U.S.T.L. Montpellier: 41p.
- Petit, J.P.; Proust, F.; Tapponier, P. (1983). Critères de sens de mouvement sur les miroirs de failles en roches non calcaires. *Bulletin de la Societé Géologique de France*, Vol. 25, No. 4, p. 589-608.
- Poblet, J. (2004). "Geometría y Cinemática de Pliegues relacionados con Cabalgamientos. Trabajo de Geología, Universidad de Oviedo, p. 127-146.
- Ramírez, J. (1958). Mamíferos fósiles del Departamento del Cusco. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, 87 p.
- Ramsay, J. y Huber, M. (1984). *The techniques of modern structural geology*, London.
- Ritz, J.-F. (1994). Determining the slip vector by graphical construction: use of a simplified representation of the stress tensor. *J. Struct. Geol.* 16, 737–741.
- Rowland, M., Duebendofer, E. y Schiefelbein, I. (2007). *Structural Analysis & Synthesis A Laboratory course in Structural Geology*. Third Edition. 322 p.
- Sébrier, M.; Huamán, D.; Blanc, J.L.; Macharé, J. Bonnot, D. y Cabrera, J. (1982). Observaciones acerca de la neotectónica del Perú. Lima: Instituto Geofísico del Perú, 107 p.
- Sébrier, M.; Lavenu, A.; Fornari, M. & Soulas, J.P. (1988). Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and northern Chile) from Eocene to present. *Géodynamique*, 3(1-2): 85-106.
- Siame, L.L. y Bellier, O. (2005). Deformation Partitioning in Flat Subduction Setting: Case of the Andean Foreland of Western Argentina 28° S–24, 1–24. <http://dx.doi.org/10.1029/2005TC001787>.
- Sibson, R.H. (1996). Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *J. Struct. Geol.* 18 (8), 1031–1042. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00032-6)
- Sitter, L. (1976). *Geología Estructural*. Barcelona, Editorial Omega S.A., Cuarta edición, 522 p.
- Soler, P. (1991). Contribution a l'étude du magmatisme associé aux marges actives: pétrographie, géochimie et géochimie isotopique du magmatisme Crétacé a Pliocène le long d'une transversale des Andes du Pérou central. Implications géodynamiques et metallogéniques. Thèse Docteur, Académie de Paris, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 950 p.
- Sperner, B., Ratschbacher, L., Ott, R. (1993). "Fault-striae analysis: a turbo pascal program package for graphical presentation and reduced stress tensor calculation." *Computers & Geosciences*, 19, 1361-1388.
- Stearns, D. (1968). Ciertos aspectos de la fractura en rocas naturalmente deformadas. En: Riecker, RE, Ed., NSF Advanced Science Seminar in Rock Mechanics, Air Force Cambridge Research Laboratories Special Report, Bedford, MA, 97-118.
- Steger, C (1996). On the calculation of moments of polygons. Technical Report FGBV–96–05, Technische Universitat Munchen.
- Suppe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault bend folding. *Am. J. Sci.*, 283:684-721.
- Suppe J. (1985). *Principles of structural geology*. New Jersey, Prentice Hall, p: 537
- Suppe, J., Medwedeff, D.A. (1990). Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 83, 409-454.

- Takorabt, M., Toubal, A.C, Haddoum, H., Zerrouk, S. (2018). Determining the role of lineaments in underground hydrodynamics using Landsat 7 ETM+ data, case of the chott El Gharbi Basin (western Algeria). *Arabian J. Geosci.*, 1-19. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-018-3412-y>
- Twiss, R. Moores, E. (2007). *Structural Geology*. Second edition. W.H. Freedman and Company. New York, 742 p.
- Turner, F.J. (1953). Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. *American Journal of Sciences* 251 (4), 276-298.
- Tzvetkov, J. (2018). "Relief visualization techniques using free and open source GIS tools": *Polish Cartographical Review*, 50(2), 61-71. <https://doi.org/10.2478/pcr-2018-0004>
- Velandia, F. (2017). *Cinámica de las fallas mayores del Macizo de Santander – énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. PhD Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Veloso, E.E., Anma, R., Yamaji, A. (2009). Ophiolite emplacement and the effects of the subduction of the active Chile Ridge System: heterogeneous paleostress regimes recorded in the Taitao Ophiolite (Southern Chile). *Andean Geol.* 36, 3–16
- Veloso, E., Gomila, R., González, R., Cembrano, J., Jensen, E., Arancibia, G. (2015). Stress fields recorded on large-scale strike-slip fault systems: effects on the tectonic evolution of crustal slivers during oblique subduction. *Tectonophysics* 664, 244–255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.09.022>
- Vollmer, F.W. (2015). Orient 3: a new integrated software program for orientation data analysis, kinematic analysis, spherical projections, and Schmidt plots *Geolog. Soc. Am. Abstr. Progr.*, 47 (7) (2015), p. 49.
- Vollmer, F.W. (2022). *Manual de usuario de Ellipsefit 3*. p.103. Disponible en línea: <https://www.frederickvollmer.com/ellipsefit/>.
- Weiss, L. E. (1954). A study of tectonic style: Structural investigation of a marble quartzite complex in southern California. *Univ. Calif. Publ. Geol. Sci.* 30, 1-102.
- Woodward, N. B., Boyer, S. E., y Suppe, J. (1989). *Balanced geological cross sections: An essential technique in geological research and exploration*: Washington, D.C., American Geophysical Union Short Course in Geology 6, 170 p.
- Yamaji, A. (2000). The Multiple Inverse Method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *J. Struct. Geol.* 22, 441–452. [http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00163-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00163-7)
- Yamaji, A., Tomita, S., Otsubo, M. (2005). Bedding tilt test for palaeostress analysis. *J. Struct. Geol.* 27, 161–170.
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., Pike, R.J. (2002). Visualizing topography by Openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(3), 257-265. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.451.9798&rep=rep1&type=pdf>
- Zehnder, A.T. y Allmendinger, R.W. (2000). Velocity field for the trishear model. *Journal of Structural Geology*. 22: 1009-1014.

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1. 1: Accesibilidad a las zonas dentro del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.	3
Tabla 1. 2: Elementos geométricos de un pliegue. Fuente: Nabavi y Fossen (2021).....	7
Tabla 1. 3: Técnicas e instrumentos de recolección de datos. Fuente: Cerdán (2018).....	37

CAPÍTULO IV

Tabla 4. 1: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 1 de régimen transpresivo. Fuente: Elaboración propia.	166
Tabla 4. 2: Tipo de régimen de esfuerzo. Fuente: Guiraud et al. (1989).....	167
Tabla 4. 3: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 2 de régimen transtensivo. Fuente: Elaboración propia.	171
Tabla 4. 4: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 3 de régimen de rumbo puro. Fuente: Elaboración propia.	176
Tabla 4. 5: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 4 de régimen de extensión pura. Fuente: Elaboración propia.	181
Tabla 4. 6: Toma de datos de las fallas con cinemática del Grupo 5 de régimen de extensión pura. Fuente: Elaboración propia.	186
Tabla 4. 7: Resumen de los paleoesfuerzos principales σ_1 y σ_3 por diferentes métodos y usando softwares como Win-Tensor y MIM. Fuente: Elaboración propia.	189
Tabla 4. 8: Datos estructurales y planos de corte óptimos de las muestras orientadas. Fuente: Elaboración propia.	194
Tabla 4. 9: Parámetros obtenidos del software SPO2003, realizados con el software Ellipsoid2003 para determinar el elipsoide. Fuente: Elaboración propia.	216
Tabla 4. 10: Parámetros de la elipse y parámetros para el gráfico de Flinn. Fuente: Elaboración propia.	217
Tabla 4. 11: Secuencia paragenética a partir de las secciones delgadas orientadas. Fuente: Elaboración propia.	218

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. 1: Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	4
Figura 1. 2: a) Parámetros geométricos de pliegues cilíndricos y no cilíndricos (basado en Fossen, 2016). b) La relación entre el plano de ruptura, la superficie axial y superficie envolvente en pliegues con clivaje transecto y pliegue transecto. Fuente: Nabavi y Fossen (2021).....	8
Figura 1. 3: Clasificación de pliegues basada en la orientación de la línea de charnela y el plano axial. Fuente: Fleuty (1964) y modificado por Fossen (2010).....	9
Figura 1. 4: Clasificación de pliegues por el ángulo de interflanco. Fuente: Fleuty (1964).	9
Figura 1. 5: Modelo de pliegue de flexión de falla. Fuente: Suppe (1983).	10
Figura 1. 6: Modelo por propagación de falla. Fuente: Suppe y Medwedeff (1990).	11
Figura 1. 7: Modelo de Pliegue por despegue. Fuente: Suppe y Medwedeff (1990).	11
Figura 1. 8: Método de kink para dos lecturas de buzamiento en la misma capa. Si las capas tuvieran una edad relativa desconocida, la ubicación del eje de torcedura podría estar en cualquier parte del espacio de exposición. Fuente: Declan y Dwight (1988).....	12
Figura 1. 9: Geometría simplificada de cizalla triangular (Trishear). Fuente: Erslev (1991).	13
Figura 1. 10: La deformación dentro de la zona triangular definiendo círculos en el modelo original que se deforman a pseudo-elipses. Se pueden obtener los ejes principales y las líneas de no deformación finita de dichas pseudo-elipses. Fuente: Allmendinger (1998).	14
Figura 1. 11: Ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas de alto ángulo, corrimientos y fallas directas. Fuente: Erslev (1991).....	15
Figura 1. 12: Parámetros para el trishear. Fuente: Hardy y Allmendinger (2011).....	15
Figura 1. 13: Ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas. Fuente: Allmendinger (1998); Allmendinger y Shaw (2000).....	16
Figura 1. 14: Ejemplo de una secuencia complicada de fallas simuladas con Fault Fold Forward. La falla activa está en negro y las fallas inactivas en rojo. Varias generaciones de estratos de crecimiento están en naranja. Las elipses están sombreadas por la magnitud de la deformación. El diagrama no está retocado. Fuente: Allmendinger (2012).....	16
Figura 1. 15: Las distinciones entre los principales tipos de fracturas basados en el desplazamiento relativo del material en lados opuestos de la fractura. Fuente: Twiss y Moores (2007).....	18
Figura 1. 16: Fracturas asociadas con pliegues. Fuente: Modificado de Sibson (1996); Twiss y Moores (2007).....	19
Figura 1. 17: Las vetillas escalonadas y su relación con los bordes de la zona de cizalla. Nótese la formación de distintas generaciones durante la deformación progresiva. Fuente: Durney y Ramsay (1973).....	20
Figura 1. 18: Tectoglifos – criterios de sentido de movimiento de fallas. A) Elemento estriador al cabo de la estría, B) Material triturado al cabo de estría, C) Banqueta al cano de estría, D) escama de arrastre, E) Nichos de arranque, F) Escama de arranque, G) Colas de mineral. H) Lomos de abrigo, I) Planos ondulados: Faceta estriada VS, J) cristalización al abrigo, K) Riedel R, L) Riedel R2, M) Lúnulas de tracción y N) Lenticulaciones. Fuente: Modificado de Macharé (2006).....	21
Figura 1. 19: Tipos de fallas. Fuente: Camargo (2015).....	21

- Figura 1. 20:** Modelos de transpresión y transtensión conectados por estilos de compresión, strike slip (rumbo) y extension. Fuente: Fossen (2010). 22
- Figura 1. 21:** Modelo de Anderson para clasificar fallas. Fuente: Modificado de Rowland (2007). 23
- Figura 1. 22:** Bloque diagrama derivado del modelo Andersoniano y su relación con la representación estereográfica en FaultKin. Fuente: Modificado de Fossen (2010). 23
- Figura 1. 23:** Se muestra la relación entre el ángulo de buzamiento y pitch, para la clasificación cinemática de las fallas. Fuente: Angelier (1994). 24
- Figura 1. 24:** Dos tipos de proyecciones estereográficas: (a) la red de igual ángulo o Wulff y (b) la de área iguales o Schmidt. Fuente: Allmendinger (2015). 25
- Figura 1. 25:** Proyección del hemisferio inferior (a) vista oblicua y (b) vista superior. Fuente: Allmendinger (2015). 25
- Figura 1. 26:** A) Diedros rectos y mecanismo focal de una falla en perspectiva; donde: F, plano de falla; A, plano auxiliar; n, vector unitario normal al plano de falla; s, vector unitario de deslizamiento; B, intersección de los planos F y A; P, diedro compresivo; T, diedro extensivo. B) Procedimiento gráfico del Método de los Diedros Rectos (Angelier y Mechler, 1977) para dos fallas, en negro compresión y en blanco extension. Fuente: Modificado de Muñoz (1997). 26
- Figura 1. 27:** (a) El esquema muestra los datos de deslizamiento de fallas utilizados para el análisis de deformación y esfuerzo (Velooso et al., 2015). El diagrama (b) y la proyección estereográfica de igual área del hemisferio inferior (c) muestran el plano de falla perpendicular a un plano común (plano de movimiento) que contiene ejes cinemáticos, dirección de deslizamiento y polo de falla con ejes P y T formando ángulos de 45° con la dirección de deslizamiento, el polo de falla (P) y el polo del plano de movimiento. Fuente: Marrett y Allmendinger (1990). 27
- Figura 1. 28:** a) deformación homogénea. b) deformación heterogénea. Ejes P (Azul) y ejes T (rojo). Fuente: Machuca (2022). 28
- Figura 1. 29:** Los ejes P y T presentan dos clusters (Azul y morado). Fuente: Machuca (2022). 28
- Figura 1. 30:** Los estereogramas muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 , el valor ϕ representado por un código de colores (de 0 a 1) y la caída de los ejes de estrés denotada por la longitud de las colas de los símbolos de renacuajo. Fuente: Machuca (2022). 30
- Figura 1. 31:** Clasificación de los diferentes tipos de régimen tectónico. Cada cubo representa un tensor de tensión que se simboliza por flechas y un diagrama de Mohr en el que se indica σ_2 . Fuente: Ritz (1994). 30
- Figura 1. 32:** Relación entre los procesos y el ambiente. Fuente: Hancock (1985). 32
- Figura 1. 33:** Método para obtener una muestra orientada de un afloramiento y una sección delgada orientada de una muestra. Una muestra para estudios estructurales debe orientarse, por ejemplo, como se muestra en a y b un símbolo de rumbo-buzamiento (aquí 160-35) en la superficie superior plana de la muestra y una cruz (marcando la parte superior) fijar la orientación de la muestra en el espacio. Cuando una sección delgada se va a cortar paralela a la lineación (aquí 200/15), una viruta se corta de la muestra con una sierra de diamante. Para orientar el chip, una flecha con una sola púa que apunta en la dirección de la parte superior. La superficie se puede utilizar y se dibuja tanto en la muestra como en el chip. c Se debe tener cuidado de que esta flecha se copie correctamente en la sección delgada. d Como alternativa, se puede hacer una pequeña cicatriz con un corte de sierra en la superficie superior del chip, que se puede encontrar en la

sección delgada. e Sentido de corte determinado en la sección delgada, por bandas de corte puede estar directamente relacionado con la muestra, y a través de la muestra con el afloramiento original. Aquí, el resultado está empujando hacia el NE. Fuente: Passchier y Trouw (2005). 34

CAPÍTULO II

Figura 2. 1: Mapa de geoformas regional y ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 2. 2: Mapa geomorfológico regional. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 2. 3: Montaña de roca intrusiva, tomada en el cerro Senja.	45
Figura 2. 4: Montaña en roca sedimentaria, tomada al sur del poblado Huasampata.	46
Figura 2. 5: Montaña en roca sedimentaria. (2.5a) ubicado en parte central del área de estudio en el poblado de Jaquira y (2.5b) ubicado al norte del área de estudio y al sureste del cerro Senja.	46
Figura 2. 6: Ubicación de toma de fotografías de las unidades geomorfológicas locales. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 2. 7: Montaña en roca sedimentaria. (2.7a) Ubicado al noroeste del área de estudio y al sureste del cerro Cuchicancha y (2.7b) Ubicado al noroeste del área de estudio y al noroeste del poblado Kello Kaka.	48
Figura 2. 8: Montaña en roca sedimentaria. (2.8a) Ubicado en la parte central del área de estudio y al sur del poblado de Jaquira y (2.8b) Ubicado al suroeste del área de estudio y al suroeste del cerro Pumahuasin.	49
Figura 2. 9: Montaña en roca volcánica. (2.9a) ubicado al noroeste del poblado de Huayllay y (2.9b) ubicado al suroeste del poblado Huayllay.	50
Figura 2. 10: Montaña en roca volcánica. (2.10a) ubicado al noreste del poblado de Huayllay y (2.10b) ubicado al este del poblado de Huayllay.	51
Figura 2. 11: Colina en roca intrusiva, tomada al noroeste de Cusco.	52
Figura 2. 12: Colina en roca sedimentaria, tomada al oeste de Cusco.	52
Figura 2. 13: Colina en roca sedimentaria, tomada al noroeste del poblado Matero.	53
Figura 2. 14: Colina en roca sedimentaria, tomada al oeste del poblado de Poroy.	53
Figura 2. 15: Colina en roca sedimentaria, tomada al noroeste del poblado de Puquín.	54
Figura 2. 16: Vertiente en roca sedimentaria, tomado al noroeste del poblado de Ccoyac.	54
Figura 2. 17: Vertiente en roca volcánica. (2. 17 a) ubicado al noroeste del poblado de Ccoyac y (2.17 b) ubicado al suroeste del poblado de Ccorca.	55
Figura 2. 18: Piedemonte en roca sedimentaria, tomado al sureste del cerro Senja.	55
Figura 2. 19: Piedemonte en roca sedimentaria, tomado al sureste del cerro Senja.	56
Figura 2. 20: Peneplanicie en roca sedimentaria, tomado al sureste del poblado Batampata.	56
Figura 2. 21: Terraza en depósito aluvial, tomado al suroeste del poblado Huayllay.	57
Figura 2. 22: Cauce de río en depósito fluvial, tomado al noroeste del poblado de Chocco.	57
Figura 2. 23: Mapa geomorfológico local. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 2. 24: Columna estratigráfica regional. Fuente: Basado en Carlotto et al. (2011); Carlotto et al. (1996) y Marocco et al. (1999).	62
Figura 2. 25: Mapa geológico regional. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011); Carlotto et al. (1996) y Marocco et al. (1999).	68
Figura 2. 26: Ubicación del levantamiento de las columnas estratigráficas A, B, C, D y E. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).	69

Figura 2. 27: Formación Maras. (a) Afloramiento de lutitas rojas en la base y calizas en la parte superior, (b) bloque de calizas con textura kárstica, (c) capa de margas en contacto con lutitas rojas, (d) lutitas rojas alteradas, (e) margas alteradas, (f) capa de yesos; todas estas mencionadas aflorando al suroeste de Batampata, (g) bloque de yeso, (h) cristales de yeso con macla en punta de flecha o en rosa del desierto y (i) bloque de yeso con deformación y alteración; aflorando en la zona sureste del área de estudio o al norte del poblado de Ancaschaca. Fuente: Elaboración propia.

..... 70

Figura 2. 28: Columna estratigráfica de la Formación Puquín (A) (Figura 2. 26), levantada en el Poblado Chaconayoc. (a) Afloramiento de calizas y margas, (b) afloramiento de areniscas de grano medio, (c) afloramiento de areniscas de grano medio intercalado con fino con cizallamiento y presencia de fallas, (d) afloramiento de calizas y margas, (e) afloramiento de calizas alteradas y (f) afloramiento de areniscas de grano fino a medio con cizallamiento. Fuente: Elaboración propia.

..... 71

Figura 2. 29: Afloramiento de calizas, margas y lutitas de la Formación Puquín; vista tomada al noreste del poblado de Puquín. 72

Figura 2. 30: Columna estratigráfica de la Formación Quilque (B) (Figura 2. 26), levantada al oeste del poblado de Jaquira. (a) Afloramiento de areniscas de grano medio, alteradas e intercaladas con areniscas de grano fino, (b) afloramiento de areniscas de grano medio, (c) afloramiento de areniscas de grano medio y (d) afloramiento de areniscas de grano grueso a medio con clastos volcánicos. Fuente: Elaboración propia. 73

Figura 2. 31: Estructuras sedimentarias de la Formación Quilque. (a) Laminación cruzada lenticular en el poblado Jaquira, (b) tool marks al sureste del poblado de Poroy, (c) rizaduras de corriente y (d) laminación paralela en el poblado Jaquira. Fuente: Elaboración propia..... 74

Figura 2. 32: Estructuras sedimentarias de la Formación Quilque. (a) Flute mark al sureste del poblado de Poroy, (b) rizaduras de corriente en el poblado Jaquira, (c) nódulos o concreciones en el poblado de Huasampata, (d) sísmicas en el poblado Jaquira, (e) y (f) clastos blandos al sureste del poblado de Poroy. Fuente: Elaboración propia. 75

Figura 2. 33: Afloramiento de la Formación Chilca; tomada al sureste del poblado de Poroy. (a) Afloramiento de areniscas de grano fino a medio, (b) margas alteradas, (c) afloramiento de margas y areniscas medias y (d) afloramiento de areniscas de grano medio en la parte superior y margas en la inferior. Fuente: Elaboración propia. 75

Figura 2. 34: Columna estratigráfica de la Formación Chilca (C) (Figura 2. 26), levantada al noreste del cerro Huenacucha. (a) Afloramiento de areniscas de grano medio y grueso con laminación cruzada y paralela, (b) areniscas de grano medio con laminación paralela y (c) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación cruzada y estructuras sedimentarias como flute marks en el tope. Fuente: Elaboración propia. 76

Figura 2. 35: Estructuras sedimentarias de la Formación Chilca. (a) Laminación cruzada planar de bajo ángulo al este del poblado Matero, (b) laminación cruzada lenticular al este del poblado Matero, (c) rizaduras de corriente al oeste del poblado de Jaquira, (d) y (e) laminación paralela al este del poblado Matero, (f) flute mark al oeste del poblado de Jaquira, (g) y (h) grietas de desecación al norte del poblado Kello Kaka e (i) icnofósiles al oeste del poblado de Jaquira. Fuente: Elaboración propia. 77

- Figura 2. 36:** Columna estratigráfica de la Formación Kayra (D) (Figura 2. 26), levantada al este del cerro Cruz Jasa. (a) Afloramiento de areniscas de grano fino con estructuras sedimentarias flute mark, (b) areniscas de grano medio con laminación cruzada, (c) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación cruzada, (d) afloramiento de areniscas de grano medio, (e) afloramiento de areniscas de grano fino con estructuras sedimentarias flute mark y (f) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación cruzada. Fuente: Elaboración propia. 78
- Figura 2. 37:** Estructuras sedimentarias de la Formación Kayra. (a) laminación paralela en el cerro Quinsa Cruz, (b) estratificación cruzada al norte del poblado Kello Kaka y (c) rizaduras de corriente al oeste del poblado de Jaquira. Fuente: Elaboración propia. 79
- Figura 2. 38:** Afloramiento de areniscas, presenta una textura particular debido al proceso de diagénesis diferencial. Vista tomada al oeste del cerro Rocacancha. 79
- Figura 2. 39:** Columna estratigráfica de la Formación Soncco (E) (Figura 2. 26), levantada al noreste del poblado de Ccorca. (a) Afloramiento de areniscas de grano medio con laminación paralela, (b) areniscas de grano grueso con clastos volcánicos y laminación paralela y (c) afloramiento de areniscas de grano medio con laminación paralela. Fuente: Elaboración propia. 80
- Figura 2. 40:** Afloramientos de la Formación Soncco, vista tomada al sureste del cerro Cuchicancha. 81
- Figura 2. 41:** Grupo Tacaza: (a) afloramiento de volcanoclasticos visto en dirección O-E, (b) afloramiento de volcanoclasticos visto en dirección N-S, (c) bloque de brecha, (d) afloramiento de tobas líticas y lahares al noroeste del poblado de Huayllay, (e) y (f) afloramiento de volcanoclasticos al este del poblado de Huayllay, (g) afloramiento de lahares y tobas líticas brechadas tomado al noroeste del poblado de Huayllay y (h) afloramiento de volcanoclasticos mostrando estratificación en las capas tomada al noreste del poblado de Huayllay. Fuente: Elaboración propia. 82
- Figura 2. 42:** Formación Chinchero. (a) afloramiento de brechas, margas y lutitas al noreste en el cerro Senja, (b) afloramiento de brechas, (c) erosión diferencial por efecto del agua, y (d) brechas. Fuente: Elaboración propia. 83
- Figura 2. 43:** Unidad Senja-cuarzomonzodiorita. a) Afloramiento de intrusivos, (b) bloque de material volcánico, (c) afloramiento de intrusivos con patinas de epidota y (d) bloques rodados de materiales volcánicos al este del cerro Senja. Fuente: Elaboración propia. 84
- Figura 2. 44:** Mapa geológico del área de estudio con datos de estratificación de campo propios en rojo. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011). 85
- Figura 2. 45:** Tabla de correlación de las edades de las unidades estratigráficas del Altiplano para el cuadrángulo de Cusco y su régimen tectónico. Fuente: Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005). 89
- Figura 2. 46:** Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras “Combinado 1” (0°, 30°, 60°, 90°, 120° y 150°). Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 113°, T2: 153°, T3: 035°, T4: 010°. Fuente: Puma et al. (2021). 90
- Figura 2. 47:** Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras “Combinado 2” (180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°). Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 000°, T2: 147°, T3: 113°, T4: 035°. Fuente: Puma et al. (2021). 91

Figura 2. 48: Fallas inferidas determinadas a partir de un Mapa de Imagen en Relieve Rojo. Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 148°, T2: 122°, T3: 094°, T4: 055°. Fuente: Puma et al. (2021).	92
Figura 2. 49: Sección estructural X-X' Totorá-Calca-Poroy y restitución al estado no deformado. Fuente: Carlotto (1998, 2006b).....	93
Figura 2. 50: Secciones geológicas regionales A-A' en dirección SO-NE, B-B' en dirección O-E y C-C' en dirección SO-NE. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).	97

CAPÍTULO III

Figura 3. 1: Pasos de producción de Red Relief Image Map (RRIM) propuestos por Chiba et al. (2008). Fuente: Puma et al. (2021)	98
Figura 3. 2: Flujograma del procesamiento de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI, Aster L1T y Sentinel 2A en este estudio. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 3. 3: (a) Imagen satelital del anticlinal de Puquín, (b) modelo de elevación del anticlinal de Puquín, (c) RRIM del área de estudio, (d) Landsat 8 OLI la combinación RGB 4/3-6/2-7/4 delimitando las unidades geológicas, (e) Aster la combinación RGB 9-4-3 delimitando las unidades geológicas, (f) Sentinel 2A la combinación RGB 11/12-11/2-11/8 delimitando las unidades geológicas, (g) Landsat 8 OLI la combinación RGB 6+4-(6-4/6+4)-5/4 delimitando las estructuras geológicas, (h) Aster la combinación RGB 3-2-1 delimitando las estructuras geológicas y (i) Sentinel 2A la combinación RGB 4/3-4/2-11/12 delimitando las estructuras geológicas. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 3. 4: Mapa geológico con los puntos cartográficos (estrellas de color fucsia), en los cuales se tomó datos estructurales y litológicos. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011).	102
Figura 3. 5: Cartografía geológica zona norte. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011). .	103
Figura 3. 6: Vista panorámica en dirección SE-NO, al sur del poblado de Batampata, donde se encuentra el contacto inferido entre las formaciones Maras como un bloque caótico y Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste.	104
Figura 3. 7: vista panorámica en dirección SE-NO, al suroeste del cerro Cuchicancha, donde se encuentra el contacto entre las formaciones Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 45° al suroeste y Soncco con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 42° al suroeste.	104
Figura 3. 8: Vista panorámica en dirección O-E, al sureste del poblado de Poroy, donde se encuentra la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste, hacia el fondo en el cerro de Senja el afloramiento caótico de la Formación Maras en contacto con la Formación Chinchero y la Unidad Senja.	105
Figura 3. 9: Vista panorámica en dirección O-E, al sureste del poblado de Poroy, donde se encuentra la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 50° al suroeste, hacia el oeste se observa la Formación San Sebastián, en contacto con la Formación Maras en el cerro de Senja.....	105
Figura 3. 10: Vista panorámica en dirección SE-NO, tomada desde el cerro Senja, en el cual aflora la Unidad Senja en contacto con el bloque caótico de la Formación Maras; la Formación Maras en contacto con la Formación San Sebastián, por donde pasa la falla Cusco de cinemática normal; la Formación San Sebastián está en contacto con las formaciones Quilque con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 32° a 52° al suroeste, Chilca con capas en dirección NO-SE con	

- buzamiento de 50° al suroeste y Maras; en la parte alta se observa el contacto entre las formaciones Chilca y Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 40° al suroeste. 106
- Figura 3. 11:** Vista panorámica en dirección NO-SE, tomada desde el Poblado Matero, en el cual aflora la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 42° al suroeste en contacto con la Formación Quilque con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 32° al suroeste. 106
- Figura 3. 12:** Vista panorámica en dirección NE-SO, tomada desde el noroeste del poblado Matero, en el cual aflora la Formación Chilca con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 42° al suroeste, en contacto con la Formación Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 75° al suroeste y en contacto con la Formación Soncco con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 72° al suroeste. 107
- Figura 3. 13:** Vista panorámica en dirección O-E, tomada desde el noroeste del poblado Puquín, en el cual aflora la Formación Puquín con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 40° al suroeste en contacto con la Formación Maras. 107
- Figura 3. 14:** Cartografía geológica zona sur. Fuente: Modificado de Carlotto et al. (2011). .. 108
- Figura 3. 15:** Vista panorámica en dirección O-E, tomada desde el poblado Jaquira, en el cual afloran unidades como la Formación Puquín siendo parte del núcleo del anticlinal de Puquín, Quilque aflorando en ambos flancos este y oeste; y Chilca del mismo modo aflorando en ambos flancos, también se observa una falla de cinemática normal que es paralela al eje del anticlinal de Puquín con un núcleo amplio el cual se encuentra bastante deformado. 109
- Figura 3. 16:** Vista panorámica en dirección S-N, tomada desde el poblado Jaquira, se observa la Formación Chilca con capas en dirección N-S con buzamiento de 80° al oeste en contacto con la Formación Kayra con capas en dirección N-S con buzamiento de 70° al oeste. 109
- Figura 3. 17:** Contacto concordante entre las formaciones Puquín y Quilque, vista tomada en dirección SO-NE al sureste del poblado de Jaquira. 110
- Figura 3. 18:** Contacto concordante entre las formaciones Kayra y Soncco, vista tomada en dirección SE-NO al sureste del poblado de Mayrasco. 110
- Figura 3. 19:** Vista panorámica en dirección O-E, tomada desde el oeste del poblado Ancaschaca, en el cual afloran las formaciones Maras, Puquín, Quilque y Chilca; entre las formaciones Maras y Puquín se tiene la falla que corta dichas unidades al este se observa como falla de contacto y al oeste corta la unidad Puquín. 110
- Figura 3. 20:** Vista panorámica en dirección NO-SE, tomada desde el este del poblado San Isidro de Ccarhuis, en el cual afloran las formaciones Kayra con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 55° al suroeste, Quilque con capas en dirección O-E con buzamiento de 25° al norte y Chilca con capas en dirección O-E con buzamiento de 30° al norte; entre las formaciones Quilque y Kayra se observa una falla de contacto que va en dirección O-E. 111
- Figura 3. 21:** Vista panorámica en dirección SE-NO, tomada desde el noroeste del poblado de Ccorca, se observa los contactos de las formaciones Kayra, Soncco, el Grupo Tacaza y depósitos aluviales. 111
- Figura 3. 22:** Contacto entre la Formación Soncco y el Grupo Tacaza, vista tomada en dirección E-O al este del poblado de Huayllay. 112
- Figura 3. 23:** Vista panorámica en dirección E-O, tomada desde el norte del poblado de Huayllay, se observa la Formación Soncco con capas en dirección N-S con buzamiento de 40° al oeste, en

contacto con el Grupo Tacaza con capas en dirección NO-SE con buzamiento de 18° al suroeste. 112

Figura 3. 24: Secciones geológicas locales D-D' al norte, E-E' al centro y F-F' al sur del área de estudio en dirección O-E y construidas con la metodología de kink. Fuente: Elaboración propia. 114

Figura 3. 25: Secciones geológicas locales D-D' al norte, E-E' al centro y F-F' al sur del área de estudio en dirección O-E y construidas con la metodología trishear. Fuente: Elaboración propia. 115

Figura 3. 26: Bloque diagrama 2.5D geológico del área de estudio construida a base de las secciones geológicas O-E con la metodología de kink y la metodología trishear. Fuente: Elaboración propia. 116

CAPÍTULO IV

Figura 4. 1: Mapa de fotointerpretación estructural mostrado en una imagen Aster L1T. El diagrama de roseta (arriba a la derecha) de la frecuencia azimutal de las estructuras geológicas realizadas con el procesamiento de imágenes satelitales muestra las cuatro tendencias estructurales del área de estudio, debajo de la roseta se vé un histograma, del mismo modo refleja las tendencias. Fuente: Elaboración propia. 118

Figura 4. 2: Resultados del ajuste gaussiano polimodal del total de estructuras fotointerpretadas mediante el software Daisy3. Fuente: Elaboración propia. 119

Figura 4. 3: Mapa de ubicación de las estaciones estructurales y muestras orientadas. Fuente: Elaboración propia. 120

Figura 4. 4: Estación estructural E1. (a) y (b) muestran la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fracturas (color amarillo con línea discontinua) y (c) Intrusión de un material más fino sobre areniscas de grano medio a grueso. Fuente: Elaboración propia. ... 121

Figura 4. 5: Estación estructural E2. (a), (b), (c) y (d) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fallas (color azul con línea continua y flechas de color rojo que indican el movimiento). Fuente: Elaboración propia. 122

Figura 4. 6: Estación estructural E3. (a), (b), (c) y (d) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fracturas (color amarillo con línea discontinua). Fuente: Elaboración propia. 123

Figura 4. 7: Estación estructural E4. Esta es una estación en donde se observa la deformación antes del plegamiento y se realiza un pequeño diagrama conceptual del pliegue y la zona que se estaría observando (rectángulo verde) según las estructuras geológicas encontradas como son foliaciones, estratificación casi paralela y las estructuras tipo Z en este flanco. La delimitación de la estratificación (color negro), la foliación (color blanco), estructuras tipo Z (color rojo) y las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia. 124

Figura 4. 8: Estación estructural E4. (a), (b) y (c) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua) y las fracturas (color amarillo con línea discontinua). Fuente: Elaboración propia. 124

Figura 4. 9: Estación estructural E5. (a) y (b) muestra la delimitación de la estratificación, (c) delimita la estratificación (color negro), las fracturas (color amarillo) y las fallas (color azul) acompañadas con flechas (color rojo) que indican el movimiento, (d) delimitan las fracturas en una dirección (color amarillo) y la estratificación (color negro), (e) con flechas de color celeste

muestra el movimiento de las fallas, (f) y (h) algunos indicadores cinemáticos que presentan las fallas: estas fibras de recristalización nos indican el movimiento hacia abajo, (g) algunos indicadores cinemáticos que presentan las fallas: estas estructuras tipo riedel e (i) muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas en diferentes direcciones (color amarillo). Fuente: Elaboración propia. 125

Figura 4. 10: Estación estructural E6. (a) muestra la delimitación de la estratificación (color negro con línea continua), (b) y (c) muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia. 126

Figura 4. 11: Estación estructural E7. (a) muestra la delimitación de las fracturas (color amarillo), (b) muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia. 127

Figura 4. 12: Estación estructural E8. (a) muestra la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), (b) en la imagen izquierda muestra la delimitación de la estratificación (color negro) y las fracturas (color amarillo) al lado derecho. Fuente: Elaboración propia. 128

Figura 4. 13: Estación estructural E9. (a), (b), (c), (d) y (e) muestra la delimitación de las fracturas en varias direcciones (color amarillo) y estratificación (color negro), en la imagen b se observa algunos paleocanales. Fuente: Elaboración propia. 128

Figura 4. 14: Estación estructural E9. (a), (b), y (c) muestra la delimitación de las fracturas en varias direcciones (color amarillo) y estratificación (color negro), en la imagen (b) se observa algunos paleocanales con materiales más finos. Fuente: Elaboración propia. 129

Figura 4. 15: Estación estructural E10. Fuente: Elaboración propia. 130

Figura 4. 16: Estación estructural E10. Muestra un conjunto de fallas normales que se reactivaron a inversas en litologías de la Formación Puquín. Fuente: Elaboración propia. 130

Figura 4. 17: Estación estructural E10. (a) muestra cuatro niveles de fallas inversas (color azul discontinuo) que están acompañadas en todo el trayecto por vetillas extensionales (color blanco), en la proyección estereográfica que se presenta se plotean los 12 planos de las vetillas extensionales teniendo una dirección NE-SO, (b) (c) y (d) muestra la ampliación de la imagen del rectángulo negro en la imagen (a) en la cual se puede diferenciar a mayor detalle las vetillas extensionales. Fuente: Elaboración propia. 131

Figura 4. 18: Estación estructural E11. A la izquierda se observa una falla normal y a la parte derecha un conjunto de fallas inversas y una de ellas con un núcleo de falla mayor respecto a las otras del conjunto, también se delimitan las fracturas (color amarillo) y las vetillas extensionales (color blanco) que también indican relación de corte. Fuente: Elaboración propia. 132

Figura 4. 19: Estación estructural E11. (a) Muestra la delimitación de las vetillas conjugadas (color blanco) con inclinación similar, (b) indicador cinemático: fibras de crecimiento indicando el movimiento de la falla y (c) vetillas conjugadas. Fuente: Elaboración propia. 132

Figura 4. 20: Estación estructural E11. Muestra la delimitación de las vetillas conjugadas (color amarillo) con las vetillas extensionales (color blanco) a la parte izquierda tenemos la proyección estereográfica de estas estructuras y a la derecha un modelo esquemático de las vetillas conjugadas y vetillas extensionales con la dirección de paleoesfuerzos. Fuente: Elaboración propia. 133

- Figura 4. 21:** Estación estructural E12. (a) Muestra las fallas normales (color azul), teniendo en cuenta que la estratificación se encuentra paralela al corte de carretera y (b) delimitan las fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia. 134
- Figura 4. 22:** Estación estructural E12. (a) Muestra la estratificación (color negro), falla inversa (color azul) y las fracturas (color amarillo) y (b) delimitan algunas fallas de similar inclinación (color azul) con movimiento inverso. Fuente: Elaboración propia. 134
- Figura 4. 23:** Estación estructural E13. (a) Espejo de falla con estrías que muestran la cinemática de la falla y (b) Muestran las fracturas (color amarillo) en diferente dirección. Fuente: Elaboración propia. 135
- Figura 4. 24:** Estación estructural E14. Toma de datos de fracturas y estratificación. Fuente: Elaboración propia. 136
- Figura 4. 25:** Estación estructural E15. Se delimita las fallas (color azul), fracturas (color amarillo), estratificación (color negro) y las estrías de falla (color celeste) que indican la cinemática, a la derecha se observa dos imágenes ampliadas, una dejando ver la harina de falla y la otra un indicador cinemático tipo riedel. Fuente: Elaboración propia. 137
- Figura 4. 26:** Estación estructural E16. (a) Se observa todo el espejo de falla con estrías y ampliaciones de imagen con indicadores cinemáticos de la falla y (b) se delimita la estratificación (color negro) y fracturas (color amarillo). Fuente: Elaboración propia. 138
- Figura 4. 27:** Estación estructural E17. Se observa todo el espejo de falla con estrías y ampliaciones de imagen con indicadores cinemáticos de la falla. Fuente: Elaboración propia. 139
- Figura 4. 28:** Estación estructural E18. (a) Se observa todo el espejo de falla con estrías (color celeste) y estratificación (color negro) y (b) se observan algunas fallas normales (color azul), fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro). Fuente: Elaboración propia. 139
- Figura 4. 29:** Estación estructural E19. Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), también las estructuras tipo Z (indicando el movimiento con la flecha de color rojo). Fuente: Elaboración propia. 140
- Figura 4. 30:** Estación estructural E20. Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro). Fuente: Elaboración propia. 141
- Figura 4. 31:** Estación estructural E21. (a) Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), (b) aparte de la delimitación de tanto la estratificación y las fracturas, con color blanco se delimita la intrusión de un material más fino (f) que va desde una arenisca muy fina a fina de color rojizo en una arenisca feldespática de grano medio, (c) en la delimitación de la estratificación de color negro se puede observar una variación de la inclinación haciendo una curva (e) y variando las capas aflorantes y (d) Espejo de falla con estrías indicando movimiento. Fuente: Elaboración propia. 141
- Figura 4. 32:** Estación estructural E22. (a) y (b) Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro), (c), (d), (e), (f) y (g) vetillas extensionales de calcita. Fuente: Elaboración propia. 142
- Figura 4. 33:** Estación estructural E23. Fracturas con costra de calcita alterada. Fuente: Elaboración propia. 143
- Figura 4. 34:** Estación estructural E23. (a) y (b) Se observa la delimitación de las fracturas (color amarillo) y estratificación (color negro). Fuente: Elaboración propia. 143

- Figura 4. 35:** Proyección estereográfica de todos los datos de estratificación, se puede apreciar dos tendencias definidas T1 y T2. Fuente: Elaboración propia. 145
- Figura 4. 36:** Proyección estereográfica de la zona norte. Fuente: Elaboración propia. 145
- Figura 4. 37:** Proyección estereográfica de la zona sur. (a) Datos de la zona sur con tres familias de estratificaciones T1, T2 y T3, (b) familia principal mostrando el flanco oeste, E2 datos que pertenecen al flanco este, E8 y E9 datos del Grupo Tacaza y (c) flanco este (línea verde discontinua) y flanco oeste (línea verde continua), esta proyección varía a la anterior debido a que se sacaron algunos datos aleatorios para mostrar una proyección estereográfica representativa del anticlinal de Puquín. Fuente: Elaboración propia. 146
- Figura 4. 38:** Representación estereográfica de datos de estratificación de las secciones D-D', E-E' y F-F'. Fuente: Elaboración propia. 147
- Figura 4. 39:** Representación estereográfica de datos de estratificación de la estación estructural E9 y datos obtenidos de INGEMMET. Fuente: Elaboración propia. 148
- Figura 4. 40:** Vetillas extensionales con una orientación de NE-SO. Fuente: Elaboración propia. 149
- Figura 4. 41:** Vetillas conjugadas (color azul) y extensionales (color morado). Estereograma mostrando la orientación promedio de cada juego de vetillas identificado. De acuerdo a su orientación respecto al pliegue, es posible interpretar juegos conjugado tipo m' (NE-SO) y uno tipo m (NO-SE) y un juego extensional al límite de la proyección estereográfica que es horizontal o paralelo al paleoesfuerzo principal. Fuente: Elaboración propia. 150
- Figura 4. 42:** Vetillas extensionales (color azul). Estereograma mostrando la orientación promedio del juego m de vetillas extensionales identificado geoméricamente con orientación NO-SE. Fuente: Elaboración propia. 151
- Figura 4. 43:** Vetillas extensionales (color azul). Estereograma mostrando la orientación promedio del juego m' de vetillas extensionales identificado geoméricamente con orientación NO-SE. Fuente: Elaboración propia. 152
- Figura 4. 44:** Vetillas extensionales con una orientación de NO-SE. Fuente: Elaboración propia. 152
- Figura 4. 45:** Representación estereográfica de la estratificación (izquierda) y Foliación (derecha). Fuente: Elaboración propia. 153
- Figura 4. 46:** Restauración de la estratificación (S0) y foliación. Primera restauración (izquierda) y segunda restauración (derecha). Fuente: Elaboración propia. 154
- Figura 4. 47:** Representación estereográfica que muestra la dirección del paleoesfuerzo principal (sigma 1). Fuente: Elaboración propia. 154
- Figura 4. 48:** Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fracturas de la zona norte, determinando dos conjuntos de fracturas oblicuas de tipo m (color azul) y n' (color mostaza). Fuente: Elaboración propia. 156
- Figura 4. 49:** Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fracturas de la zona sur, determinando dos conjuntos de fracturas inclinadas de tipo bb' (color verde claro y oscuro) y ac (color rojo). Fuente: Elaboración propia. 156
- Figura 4. 50:** Flujograma de procesamiento de datos utilizando los softwares para el análisis de fallas. Fuente: Elaboración propia. 157

- Figura 4. 51:** Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fallas sin cinemática, determinando los conjuntos de fallas sin cinemática asociadas a fracturas inclinadas de tipo bb' (color verde claro y oscuro). Fuente: Elaboración propia..... 158
- Figura 4. 52:** Representación estereográfica y diagrama de rosetas de fallas sin cinemática, determinando los conjuntos de fallas sin cinemática asociado a fracturas oblicuas denominadas tipo m de color azul y tipo m' de color celeste, así como fallas sin cinemática asociada a fracturas inclinadas de tipo bb' de color verde oscuro. Fuente: Elaboración propia. 159
- Figura 4. 53:** Vetillas, fracturas y fallas asociadas a pliegues. Fuente: Modificado de Sibson (1996); Twiss y Moores (2007). 160
- Figura 4. 54:** Análisis total de fallas. (a) Estereograma de planos de falla con sus vectores cinemáticos (rake) (izquierda); los datos se proyectan en Schmidt Net (hemisferio inferior) mediante el software Faultkin y hacia la derecha la clasificación de Angelier (1994), clasifica a las fallas en cuatro grupos: fallas de desgarre, fallas de deslizamiento oblicuo (dextrales o sinestrales), fallas de deslizamiento oblicuo (normales o inversas), fallas normales o inversas, (b) triángulo de Frohlich que nos indica el régimen tectónico local por estructura y la proyección de las fallas en el Círculo de Mohr (derecha) mediante el software Win-Tensor 5.9.2. Fuente: Elaboración propia. 162
- Figura 4. 55:** Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 1, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia..... 164
- Figura 4. 56:** Representación de todos los planos de falla del Grupo 1 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal σ_1 NO-SE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen transpresivo, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia. 168
- Figura 4. 57:** Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 2, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia..... 169
- Figura 4. 58:** Representación de todos los planos de falla del Grupo 2 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal (σ_3) OSO-ENE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen transtensivo, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia. 173
- Figura 4. 59:** Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 3, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia..... 174
- Figura 4. 60:** Representación de todos los planos de falla del Grupo 3 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal (σ_3) NO-SE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen de rumbo puro, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia. 178

Figura 4. 61: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 4, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia.....	179
Figura 4. 62: Representación de todos los planos de falla del Grupo 4 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal (σ_3) ONO-ESE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen de extensión pura, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia..	183
Figura 4. 63: Mapa geológico del área de estudio con datos de la población del Grupo 5, incluyendo proyecciones estereográficas al hemisferio inferior con los planos de falla indicando la estación al que corresponde. Fuente: Elaboración propia.....	184
Figura 4. 64: Representación de todos los planos de falla del Grupo 5 con el software FaultKin que indica una orientación del esfuerzo principal σ_3 NNO-SSE, representación por los métodos de diedros rectos y PBT axes que indican un régimen de extensión pura, diagrama ternario de Frohlich, proyección de las fallas en el Círculo de Mohr y estereogramas por el método inverso múltiple MIM que muestran subsoluciones de ejes σ_1 y ejes σ_3 . Fuente: Elaboración propia..	188
Figura 4. 65: Flujo de trabajo de las muestras destinadas al análisis petrográfico y microestructural en secciones delgadas, en el Laboratorio de Microscopía-Ingeniería Geológica (UNSAAC). Fuente: Elaboración propia.	190
Figura 4. 66: Clasificación de Folk et al. (1970) de las rocas silisiclásticas. Fuente: Elaboración propia.	192
Figura 4. 67: Proyección estereográfica de los planos de corte óptimos de las muestras orientadas (SO: Estratificación PC: Plano de corte F1: Falla VE: Vetilla extensional T: Tope). Fuente: Elaboración propia.	195
Figura 4. 68: Proyección estereográfica de los planos de corte óptimos de las muestras orientadas (SO: Estratificación PC: Plano de corte F1: Falla VE: Vetilla extensional T: Tope). Fuente: Elaboración propia.	196
Figura 4. 69: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra la fractura paralela a las estratificaciones (So) (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. ...	197
Figura 4. 70: Microfotografía en nicoles cruzados y orientada al norte (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.	197
Figura 4. 71: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra vetilla que presenta un pliegue asimétrico que nos indica movimiento relativo dextral (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.	198
Figura 4. 72: Microfotografía en nicoles cruzados y orientada al norte (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.	198
Figura 4. 73: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra las estructuras con deformación progresiva (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.	200
Figura 4. 74: Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. Muestra la vetilla sintaxial (V2n), la fractura (negra) y vetillas (4n) (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia.	200

- Figura 4. 75:** Microfotografía en nicoles cruzados orientada al norte, mostrando los paleoesfuerzos y la elipse de deformación a partir de los cristales ataxiales de calcita (rojo) realizado en el software EllipseFit 3.9.0. Fuente: Elaboración propia. 201
- Figura 4. 76:** Microfotografía en nicoles cruzados (objetivo 10x/0.25). (A) Strain Map a partir de los clastos y (B) elipse de deformación realizado en el software EllipseFit 3.9.0. Fuente: Elaboración propia. 202
- Figura 4. 77:** Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) vetillas (V4n) y (B) vetillas (V4n) cortadas por un conjunto de fallas dextrales paralelas (F4n). Fuente: Elaboración propia. 203
- Figura 4. 78:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Fuente: Elaboración propia. 204
- Figura 4. 79:** Microfotografía en nicoles cruzados. Las barras de escala varían de 0.25 mm (objetivo 10x/0.25) y 0.5 mm (objetivo 4x/0.10). (A) vetilla (V3n), (B) vetilla (V3n) cortada por una falla dextral (F3n) y (C) vetillas (V3n) con movimiento de falla sinistral. Fuente: Elaboración propia. 205
- Figura 4. 80:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte con un evento de deformación D3n. Fuente: Elaboración propia. 206
- Figura 4. 81:** Microfotografía en nicoles cruzados (objetivo 10x/0.25). (A) Strain Map a partir de los clastos y (B) elipse de deformación realizado en el software EllipseFit 3.9.0. Fuente: Elaboración propia. 207
- Figura 4. 82:** Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) falla (FV2n) que corta una vetilla (objetivo 4x/0.10) y (B) falla (FV2n) que presenta foliaciones y estilolitos (S2n) (objetivo 10x/0.25). Fuente: Elaboración propia. 208
- Figura 4. 83:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte con orientación del sigma 1 NE-SO. Fuente: Elaboración propia. 209
- Figura 4. 84:** Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) y (B) foliaciones S2n y C2n con vetilla que presenta un pliegue asimétrico que indica el movimiento de una falla dextral y (C) vetillas (V3n) que presenta la forma de un pliegue asimétrico con movimiento dextral (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. 210
- Figura 4. 85:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Se reconocieron dos eventos de deformación D2n y D3n (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. 211
- Figura 4. 86:** Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) presenta una falla (F3n) dextral que corta las vetrillas y (B) se presenta las vetillas (V3n) con un movimiento de falla dextral (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. 212
- Figura 4. 87:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Se reconocieron dos eventos de deformación D2n? y D3n (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. 213
- Figura 4. 88:** Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.5 mm. (A) presenta una vetilla (V3n) y un boudinage (B4n) y (B) se presenta una vetilla (V3n) (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. 214
- Figura 4. 89:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Se reconoce dos eventos de deformación D3n? y D4n (objetivo 4x/0.10). Fuente: Elaboración propia. 215

- Figura 4. 90:** Microfotografía en nicoles cruzados. La barra de escala es 0.25 mm. Muestra las estructuras con deformación progresiva en los carbonatos (objetivo 10x/0.25). Fuente: Elaboración propia. 215
- Figura 4. 91:** Microfotografía en nicoles cruzados, orientado al norte. Se reconocieron dos eventos de deformación D2n, D3n? y D3n (objetivo 10x/0.25). Fuente: Elaboración propia..... 216
- Figura 4. 92:** Microfotografías en nicoles paralelos (objetivo 10x/0.25), Strain Maps a partir de los clastos y elipses de deformación realizado en el software EllipseFit 3.9.0 de las muestras MO-E22-AP-01 (A), MO-E22-AP-02 (B) y MO-E22-AP-03 (C). Fuente: Elaboración propia..... 217
- Figura 4. 93:** Elipsoide de deformación y Diagrama de Flinn. Fuente: Elaboración propia. 218
- Figura 4. 94:** Clasificaciones de pliegue por Fleuty (1964) tomando en cuenta la inclinación del plano axial y el plunge de la línea de charnela o del eje de pliegue; así como el ángulo de interflanco para el sector norte (D-D'), centro (E-E') y sur (F-F'). Fuente: Elaboración propia. 220
- Figura 4. 95:** Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector norte (D-D') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. A-a) Estadio inicial previo a la deformación; b) Superposición de la capa de crecimiento de la Formación Kayra; c) Formación de un pliegue por propagación de falla sobre una rampa buzante de 45° con un porcentaje de acortamiento de 1.3% respecto a la longitud inicial de la sección; d) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance tiene un porcentaje de acortamiento de 8.3%; e) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance, pero no llega a corta la Formación Kayra, ya que este es de un espesor muy grande y tiene un porcentaje de acortamiento final de 15.1 %; f) El conjunto de formaciones es rotado en 7° y B) Modelo del anticlinal de Puquín sector norte. Fuente: Elaboración propia. 223
- Figura 4. 96:** Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector centro (E-E') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. A-a) Estadio inicial previo a la deformación; b) Superposición de la capa de crecimiento de la Formación Kayra; c) Formación de un pliegue por propagación de falla sobre una rampa buzante de 49° con un porcentaje de acortamiento de 0.9% respecto a la longitud inicial de la sección; d) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance tiene un porcentaje de acortamiento de 7.8%; e) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance, pero no llega a corta la Formación Kayra, ya que este es de un espesor muy grande y tiene un porcentaje de acortamiento final de 12.1 %; f) El conjunto de formaciones es rotado en 7° y B) Modelo del anticlinal de Puquín sector centro. Fuente: Elaboración propia. 225
- Figura 4. 97:** Modelo de evolución cinemático propuesto para el anticlinal de Puquín en el sector sur (F-F') con el porcentaje (%) de acortamiento en cada etapa. A-a) Estadio inicial previo a la deformación; b) Superposición de la capa de crecimiento de la Formación Kayra; c) Formación de un pliegue por propagación de falla sobre una rampa buzante de 44° con un porcentaje de acortamiento de 1.0% respecto a la longitud inicial de la sección; d) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance tiene un porcentaje de acortamiento de 8.5%; e) El pliegue es cortado en algunas formaciones por la falla de avance, pero no llega a corta la Formación Kayra, ya que este es de un espesor muy grande y tiene un porcentaje de acortamiento final de 12.0 %; f) El conjunto de formaciones es rotado en 7° y B) Modelo del anticlinal de Puquín sector sur. Fuente: Elaboración propia. 227

- Figura 4. 98:** Formación Puquín con un conjunto de fallas normales formando estructuras de tipo horst con reactivación inversa. Tomado en el poblado Chaconayoc. 228
- Figura 4. 99:** Formación Puquín con estructuras de fallas normales con reactivación inversa. Tomado en el poblado Chaconayoc. 228
- Figura 4. 100:** Modelos cinemáticos que intentan explicar la distribución y cantidad de rotaciones en sistemas de fallas de rumbo. (A) Modelo continuo de cizallamiento simple, (B) modelo de la configuración de las estructuras con una deformación Dúctil-frágil, (C) modelo cuasi continuo de cizallamiento simple, (D) modelo de la configuración de las estructuras con una deformación Frágil-dúctil y (E) mapa geológico con la configuración estructural actual. Fuente: Elaboración propia. 230
- Figura 4. 101:** Estación 10 con cuatro niveles de vetillas extensionales que pertenecen a un régimen de rumbo puro, posterior a la génesis del anticlinal de Puquín. Fuente: Elaboración propia. 230
- Figura 4. 102:** Estación 22, muestra de vetillas extensionales con relleno de calcita. Fuente: Elaboración propia. 231
- Figura 4. 103:** Tabla de correlación de las edades de las unidades estratigráficas del Altiplano y el régimen tectónico en comparación con el modelo de evolución del anticlinal de Puquín y la configuración estructural. Fuente: Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005). 232

CAPÍTULO V

- Figura 5. 1:** Tabla de correlación del régimen tectónico regional con el régimen tectónico del área de estudio a partir del análisis estructural macroscópico y microtectónico. Fuente: Modificado de Carlotto (1998) y Carlotto et al. (2005). 239

ANEXOS

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA - MUESTRA UNIDAD SENJA

Código de la Muestra	Cuadrángulo	Sistema de Coordenadas			Unidad
		Norte	Este	Zona	
M-USenja	28s-IV	8506526	821926	18	Senja

INFORMACIÓN PETROGRÁFICA:

1. CLASIFICACIÓN DE LA ROCA:

CUARZODIORITA

2. DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA:

Roca ígnea, intrusiva de color gris claro con tonalidades verdes. Presenta textura fanerítica de grano medio y compuesta por feldespatos alterados, cuarzo, epidota y clorita.



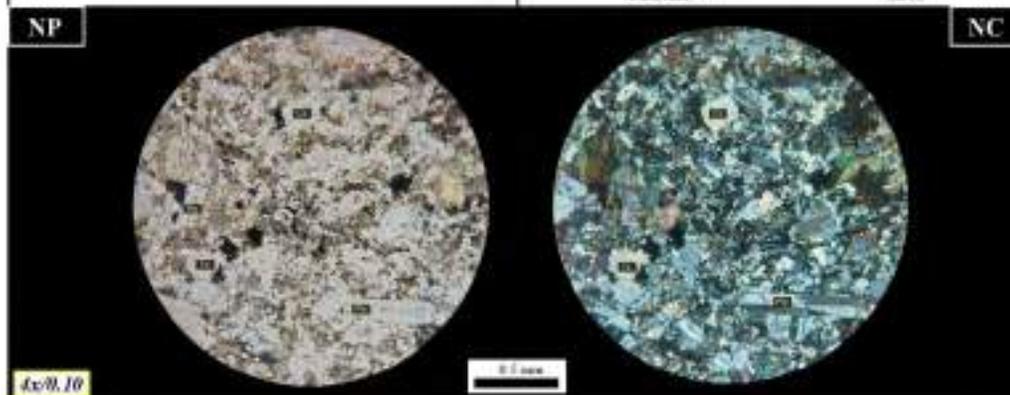
3. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA:

Roca ígnea, intrusiva con textura granular - porfírica; compuesta por plagioclasas, cuarzo y feldespatos potásicos, olivinos, piroxénos, anfíboles, biotita, esfena y minerales opacos. Asimismo, presenta minerales secundarios como epidotas, cloritas y óxidos de hierro.

-Moderada alteración (epidotización-cloritización).

Minerales:	%
Cristales:	
Esenciales:	
Plagioclasas	55%
Cuarzo	10%
Feldespato potásico	5%
Accesorios:	
Anfíboles	03%
Olivinos	07%
Piroxenos	03%
Biotita	01%
Minerales Opacos	05%
Esfena	03%
Secundarios:	
Epidotas	03%
Óxido de Hierro	01%
Cloritas	02%

DESCRIPCIÓN MINERALÓGICA:



NP: Nicles paralelos NC: Nicles cruzados

ANEXO 2
TABLA DE DATOS ESTRUCTURALES

ESTACIÓN 1- E1

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	825354	8496355	Estratificación	233	74					-
2	825354	8496355	Estratificación	249	80					-
3	825354	8496355	Estratificación	262	65					-
4	825354	8496355	Estratificación	241	68					-
5	825354	8496355	Estratificación	259	38					-
6	825056	8495300	Estratificación	329	60					-
7	825488	8497178	Estratificación	359	45					-
8	825354	8496355	Vetilla	254	61					Relleno de calcita de 5 cm
9	825354	8496355	Vetilla	2	19					Relleno de calcita 4mm
10	825354	8496355	Vetilla	218	89					Relleno de calcita de 2mm
11	825354	8496355	Vetilla	322	54					Relleno de calcita 5mm
12	825354	8496355	Fractura	84	61					-
13	825354	8496355	Fractura	346	50					-
14	825354	8496355	Fractura	127	40					-
15	825354	8496355	Fractura	182	87					-
16	825354	8496355	Fractura	97	28					-
17	825354	8496355	Fractura	152	34					-
18	825354	8496355	Fractura	276	18					-
19	825354	8496355	Fractura	106	50					-
20	825354	8496355	Fractura	154	70					-
21	825354	8496355	Fractura	209	72					-
22	825056	8495300	Fractura	309	67					-

23	825056	8495300	Fractura	214	40					-
24	825488	8497178	Fractura	204	85					-
25	825488	8497178	Fractura	114	50					-
26	825488	8497178	Fractura	14	70					-
27	825488	8497178	Fractura	104	85					-
28	825488	8497178	Fractura	274	40					-
29	825488	8497178	Fractura	254	89					-
30	825488	8497178	Fractura	227	81					-
31	825488	8497178	Fractura	219	85					-
32	825488	8497178	Fractura	209	80					-
33	825488	8497178	Fractura	158	40					-
34	825488	8497178	Fractura	354	54					-
35	825488	8497178	Fractura	99	32					-
36	825488	8497178	Fractura	344	40					-
37	825354	8496355	Falla	167	74	70	S	1	NxDx	Espejo de falla
38	825354	8496355	Falla	144	71	65	S	1	NxDx	Espejo de falla
39	825354	8496355	Falla	148	61	32	P	1	NxSx	Fibras de recristalización de calcita y estrías
40	825354	8496355	Falla	172	18		P	0	Dx	Movimiento de capas
41	825354	8496355	Falla	152	52	88	S	1	NxDx	-
42	825354	8496355	Falla	88	76		S			Fibras de recristalización de calcita y estrías
43	825354	8496355	Falla	51	47		S			Fibras de recristalización de calcita y estrías
44	825354	8496355	Falla	164	70	70	S	1	NxDx	-
45	825354	8496355	Falla	67	72				Nx	-
46	825354	8496355	Falla	49	69				Nx	-
47	825354	8496355	Falla	234	75		P		Nx	Movimiento de capas
48	825354	8496355	Falla	54	64		P		Nx	Movimiento de capas
49	825056	8495300	Falla	24	60	55	P	2	NxSx	Fibras de recristalización de calcita
50	825056	8495300	Falla	314	40	5	P	2	Nx	-

51	825056	8495300	Falla	64	50	85	P	2	Nx	Fibras de recristalización de calcita
52	825488	8497178	Falla	194	65	30	S	1	IxSx	-
53	825488	8497178	Falla	194	72	5	S	1	IxSx	-
54	825488	8497178	Falla	194	75	20	S	1	IxSx	-
55	825488	8497178	Falla	199	70	25	S	1	IxSx	-
56	825488	8497178	Falla	206	88	29	S	1	IxSx	-

ESTACIÓN 2- E2

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	824155	8495188	Estratificación	344	50					-
2	824155	8495188	Estratificación	334	40					-
3	824155	8495188	Estratificación	349	62					-
4	824155	8495188	Estratificación	354	40					-
5	824155	8495188	Estratificación	346	70					-
6	824155	8495188	Estratificación	348	74					-
7	824155	8495188	Estratificación	4	70					-
8	824062	8495090	Estratificación	134	75					-
9	824062	8495090	Estratificación	149	65					-
10	824155	8495188	Fractura	69	65					-
11	824062	8495090	Fractura	142	83					-
12	824062	8495090	Fractura	8	88					-
13	824062	8495090	Fractura	24	60					-
14	824062	8495090	Fractura	9	50					-
15	824062	8495090	Fractura	26	46					-
16	824062	8495090	Fractura	119	75					-
17	824062	8495090	Fractura	214	70					-
18	824062	8495090	Fractura	274	70					-
19	824062	8495090	Fractura	28	54					-

20	824155	8495188	Falla	62	52		P		Nx	-
21	824155	8495188	Falla	34	35		P		Nx	-
22	824155	8495188	Falla	68	80		P		Nx	-
23	824155	8495188	Falla	54	75		P		Nx	-
24	824155	8495188	Falla	94	75		P		Nx	-
25	824155	8495188	Falla	76	80		P		Nx	-
26	824155	8495188	Falla	81	66		P		Nx	-
27	824155	8495188	Falla	69	72		S		Ix	-
28	824155	8495188	Falla	54	50		S		Nx	-
29	824062	8495090	Falla	4	35		S			-

ESTACIÓN 3- E3

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	823208	8501788	Estratificación	209	61					-
2	823208	8501788	Estratificación	9	80					-
3	822159	8496153	Estratificación	184	55					-
4	822159	8496153	Estratificación	1993	49					-
5	822159	8496153	Estratificación	189	51					-
6	822159	8496153	Estratificación	172	60					-
7	822159	8496153	Estratificación	169	51					-
8	822159	8496153	Estratificación	167	68					-
9	822159	8496153	Estratificación	164	60					-
10	822376	8497207	Estratificación	184	77					-
11	822376	8497207	Estratificación	184	77					-
12	822376	8497207	Estratificación	183	70					-
13	821385	8495196	Estratificación	219	75					-
14	821385	8495196	Estratificación	224	85					-
15	821385	8495196	Estratificación	199	85					-
16	821385	8495196	Estratificación	248	79					-

17	821385	8495196	Estratificación	219	86					-
18	822159	8496153	Vetilla	24	20					Relleno de calcita
19	822159	8496153	Vetilla	144	45					Relleno de calcita
20	822159	8496153	Vetilla	89	70					Relleno de calcita de 1 mm
21	822159	8496153	Vetilla	59	50					Relleno de calcita
22	823208	8501788	Fractura	229	85					-
23	823208	8501788	Fractura	294	52					-
24	823208	8501788	Fractura	214	63					-
25	823208	8501788	Fractura	207	30					-
26	822159	8496153	Fractura	62	29					-
27	822159	8496153	Fractura	234	30					-
28	822159	8496153	Fractura	99	25					-
29	822159	8496153	Fractura	258	59					-
30	822159	8496153	Fractura	4	50					-
31	822159	8496153	Fractura	41	51					-
32	822159	8496153	Fractura	9	45					-
33	822159	8496153	Fractura	168	68					-
34	822159	8496153	Fractura	84	80					-
35	822159	8496153	Fractura	14	55					-
36	822159	8496153	Fractura	174	75					-
37	822159	8496153	Fractura	84	75					-
38	821385	8495196	Fractura	264	35					-
39	821385	8495196	Fractura	324	59					-
40	821385	8495196	Fractura	30	60					Costras de 2 a 3 mm de calcita
41	821385	8495196	Fractura	19	70					-
42	821385	8495196	Fractura	209	79					-
43	823208	8501788	Falla	259	40	70	C	3	NxDx	-
44	822376	8497207	Falla	151	68	50	S		NxSx	-
45	822376	8497207	Falla	109	74	17	S		NxSx	-
46	821385	8495196	Falla	226	79	38	S	1	NxSx	-
47	821385	8495196	Falla	84	35	55	S	1	IxSx	-
48	821385	8495196	Falla	226	64	40	S	1	NxDx	-

49	821385	8495196	Falla	249	70	40	S	1	NxSx	-
----	--------	---------	-------	-----	----	----	---	---	------	---

ESTACIÓN 4- E4

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	821916	8498087	Estratificación	208	71					-
2	821916	8498087	Estratificación	156	59					-
3	821916	8498087	Estratificación	222	56					-
4	821916	8498087	Estratificación	99	69					-
5	821916	8498087	Estratificación	188	81					-
6	821916	8498087	Estratificación	168	76					-
7	822054	8498333	Estratificación	172	71					-
8	822054	8498333	Estratificación	174	71	-			-	-
9	822054	8498333	Estratificación	174	78					-
10	822054	8498333	Estratificación	171	85					-
11	822054	8498333	Estratificación	159	70					-
12	822054	8498333	Estratificación	349	85					-
13	822054	8498333	Estratificación	262	80					-
14	822054	8498333	Estratificación	254	65					-
15	822054	8498333	Estratificación	177	73					-
16	822054	8498333	Estratificación	188	82					-
17	822054	8498333	Estratificación	347	80					-
18	822054	8498333	Estratificación	341	88					-
19	822054	8498333	Estratificación	159	74					-
20	822054	8498333	Estratificación	80	60					-
21	822054	8498333	Estratificación	176	85					-
22	822054	8498333	Estratificación	174	76					-
23	822054	8498333	Estratificación	180	83					-
24	822054	8498333	Estratificación	257	78					-
25	822054	8498333	Estratificación	139	68					-
26	822025	8498329	Estratificación	166	82					-

27	822025	8498329	Estratificación	176	75					-
28	822025	8498329	Estratificación	176	74					-
29	821916	8498087	Vetilla	40	85					Relleno de calcita
30	821916	8498087	Vetilla	24	82					Relleno de calcita
31	822025	8498329	Foliación	262	39					-
32	822025	8498329	Foliación	239	26					-
33	822025	8498329	Foliación	246	37					-
34	822025	8498329	Foliación	244	39					-
35	821916	8498087	Fractura	181	69					-
36	821916	8498087	Fractura	77	53					-
37	821916	8498087	Fractura	226	33					-
38	821916	8498087	Fractura	216	60					-
39	821916	8498087	Fractura	198	63					-
40	821916	8498087	Fractura	77	33					-
41	821916	8498087	Fractura	184	71					-
42	821916	8498087	Fractura	183	52					-
43	821916	8498087	Fractura	74	61					-
44	821916	8498087	Fractura	294	75					-
45	821916	8498087	Fractura	208	54					-
46	821916	8498087	Fractura	216	60					-
47	821916	8498087	Fractura	208	71					-
48	822054	8498333	Fractura	274	90					-
49	822054	8498333	Fractura	279	86					-
50	822054	8498333	Fractura	109	76					-
51	822054	8498333	Fractura	169	60					-
52	822054	8498333	Fractura	94	57					-
53	822054	8498333	Fractura	197	66					-
54	822054	8498333	Fractura	54	15					-
55	822054	8498333	Fractura	149	50					-
56	822054	8498333	Fractura	182	33					-
57	822054	8498333	Fractura	275	88					-
58	821916	8498087	Falla	194	47	20	P	1	SxNx	-
59	821916	8498087	Falla	197	60	26	P	1	NxSx	-

60	821916	8498087	Falla	220	38	64	P	1	NxSx	-
61	821916	8498087	Falla	214	57	5	P	1	Sx	-
62	821916	8498087	Falla	183	74	23	P	1	NxSx	-
63	821916	8498087	Falla	204	71	69	P	1	NxSx	-
64	821916	8498087	Falla	224	53	5	P	1	Dx	-
65	821916	8498087	Falla	216	63	10	C	1	Sx	Fibras de recristalización de calcita
66	822054	8498333	Falla	104	80	15	S	1	NxDx	-
67	822054	8498333	Falla	185	39	73	S	1	NxDx	-
68	822054	8498333	Falla	267	69	39	S	1	NxDx	-
69	822054	8498333	Falla	162	81	60	S	1	IxDx	-
70	822054	8498333	Falla	79	88	90	S	1	IxDx	-
71	822054	8498333	Falla	82	81	38	S	1	NxDx	-
72	822054	8498333	Falla	100	74	70	S	1	IxDx	-
73	822054	8498333	Falla	100	74	65	S	1	IxDx	-
74	822054	8498333	Falla	273	78	38	S	1	NxDx	-
75	822054	8498333	Falla	264	41	35	S	1	NxDx	-
76	822054	8498333	Falla	276	67	77	S	1	NxDx	-
77	822054	8498333	Falla	174	78	85	S	1	NxDx	-
78	822054	8498333	Falla	278	74	24	S	1	NxDx	-
79	822054	8498333	Falla	89	78	13	S	1	NxDx	-
80	822054	8498333	Falla	212	50	45	S	1	IxSx	-
81	822054	8498333	Falla	192	51	60	S	1	IxSx	-
82	822054	8498333	Falla	316	56	60	S	1	NxSx	-
83	822054	8498333	Falla	264	26		S	0	NxDx	-
84	822054	8498333	Falla	169	71		S	0	IxDx	-

ESTACIÓN 5- E5

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	821269	8499107	Estratificación	176	75					-
2	821269	8499107	Estratificación	129	84					-

3	821269	8499107	Estratificación	254	87						-
4	821269	8499107	Estratificación	159	78						-
5	821269	8499107	Estratificación	160	88						-
6	821269	8499107	Estratificación	156	78						-
7	821269	8499107	Estratificación	164	10						-
8	821269	8499107	Estratificación	189	58						-
9	821506	8498191	Estratificación	180	75						-
10	821506	8498191	Estratificación	174	60						-
11	821506	8498191	Estratificación	176	86						-
12	821269	8499107	Vetilla	27	13						Relleno de calcita
13	821269	8499107	Vetilla	114	5						Relleno de calcita de 5 cm
14	821269	8499107	Fractura	102	70						-
15	821269	8499107	Fractura	289	62						Fibras de recristalización de calcita
16	821269	8499107	Fractura	112	81						-
17	821269	8499107	Fractura	345	77						-
18	821269	8499107	Fractura	130	65						-
19	821269	8499107	Fractura	279	65						-
20	821269	8499107	Fractura	174	78						-
21	821269	8499107	Fractura	144	57						-
22	821269	8499107	Fractura	89	73						-
23	821269	8499107	Fractura	159	35						-
24	821269	8499107	Fractura	297	81						-
25	821269	8499107	Fractura	139	19						-
26	821269	8499107	Fractura	149	80						-
27	821269	8499107	Fractura	256	50						-
28	821269	8499107	Fractura	280	86						-
29	821269	8499107	Fractura	324	90						-
30	821269	8499107	Fractura	118	86						-
31	821269	8499107	Fractura	197	38						-
32	821269	8499107	Fractura	127	86						-
33	821269	8499107	Fractura	69	30						Recristalización de calcita
34	821269	8499107	Fractura	112	86						-
35	821269	8499107	Fractura	99	85						-

36	821269	8499107	Fractura	239	62					-
37	821269	8499107	Fractura	155	59					-
38	821269	8499107	Fractura	286	85					Recristalización de calcita
39	821269	8499107	Fractura	122	78					Recristalización de calcita
40	821269	8499107	Fractura	279	65					-
41	821269	8499107	Fractura	259	16					-
42	821269	8499107	Fractura	44	72					Cristales de calcita
43	821269	8499107	Fractura	97	76					-
44	821506	8498191	Fractura	170	85					-
45	821269	8499107	Falla	166	76	87	P	1	Nx	Estrías
46	821269	8499107	Falla	241	78	24	S	1	SxNx	Escalones
47	821269	8499107	Falla	191	20		S	0	DxNx	Movimiento de capas
48	821269	8499107	Falla	194	30		S	0	DxNx	Movimiento de capas
49	821506	8498191	Falla	188	88	65	S	1	IxDx	-
50	821506	8498191	Falla	113	71	54	S	1	IxSx	-
51	821506	8498191	Falla	131	69	7	S	1	Sx	-
52	821506	8498191	Falla	131	69	88	S	1	Ix	-
53	821506	8498191	Falla	182	82	33	S	1	DxNx	-
54	821506	8498191	Falla	85	78	15	S	1	SxIx	-
55	821506	8498191	Falla	85	78	48	S	1	IxDx	Fibras de recristalización
56	821506	8498191	Falla	178	69	75	S	1	NxSx	-

ESTACIÓN 6- E6

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	819831	8497081	Estratificación	124	50					-
2	819831	8497081	Estratificación	139	50					-
3	819413	8497237	Estratificación	183	47					-
4	819831	8497081	Vetilla	169	38					Relleno de calcita
5	819831	8497081	Vetilla	47	42					Relleno de calcita
6	819831	8497081	Fractura	189	88					-
7	819831	8497081	Fractura	142	77					-

8	819831	8497081	Fractura	329	35						-
9	819831	8497081	Fractura	132	63						-
10	819831	8497081	Fractura	164	28						-
11	819831	8497081	Fractura	139	57						-
12	819831	8497081	Fractura	119	33						-
13	819831	8497081	Fractura	239	70						-
14	819831	8497081	Fractura	267	76						-
15	819831	8497081	Fractura	39	40						-
16	819413	8497237	Fractura	44	80						-
17	819413	8497237	Fractura	186	48						-
18	819413	8497237	Fractura	125	77						-
19	819413	8497237	Fractura	36	70						-
20	819413	8497237	Fractura	264	75						-
21	819413	8497237	Fractura	174	44						-
22	819413	8497237	Fractura	51	54						-
23	819413	8497237	Fractura	73	51						-
24	819413	8497237	Fractura	45	83						-
25	819413	8497237	Fractura	174	43						-
26	819413	8497237	Fractura	19	55						-
27	819413	8497237	Fractura	265	76						-
28	819413	8497237	Fractura	18	71						-
29	819831	8497081	Falla	137	68	50	P	1	IxSx		-
30	819831	8497081	Falla	119	82	18	P	1	IxSx		-
31	819831	8497081	Falla	317	42	0	P	3	Sx		-
32	819831	8497081	Falla	128	72	5	P	2	Sx		-

ESTACIÓN 7- E7

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación	
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática		
1	819679	8499460	Estratificación	184	78						-
2	819679	8499460	Estratificación	164	88						-
3	819679	8499460	Estratificación	169	83						-
4	819679	8499460	Estratificación	154	87						-
5	819679	8499460	Estratificación	174	72						-

6	819679	8499460	Estratificación	174	72					-
7	819679	8499460	Estratificación	172	56					-
8	819679	8499460	Estratificación	175	68					-
9	819679	8499460	Estratificación	161	80					-
10	819679	8499460	Estratificación	188	78					-
11	819679	8499460	Estratificación	172	52					-
12	819679	8499460	Estratificación	169	70					-
13	819734	8499292	Estratificación	344	80					-
14	819734	8499292	Estratificación	119	65					-
15	819734	8499292	Estratificación	159	72					-
16	819734	8499292	Estratificación	159	68					-
17	819734	8499292	Vetilla	80	58					Relleno de calcita
18	819734	8499292	Vetilla	59	55					Relleno de calcita de 2 mm
19	819679	8499460	Fractura	169	74					-
20	819679	8499460	Fractura	339	37					-
21	819679	8499460	Fractura	68	83					-
22	819679	8499460	Fractura	4	75					-
23	819734	8499292	Fractura	164	51					-
24	819734	8499292	Fractura	154	54					-
25	819734	8499292	Fractura	350	15					-
26	819734	8499292	Fractura	85	44					-
27	819734	8499292	Fractura	259	60					-
28	819734	8499292	Fractura	150	78					-
29	819734	8499292	Fractura	162	69					-
30	819734	8499292	Falla	162	63	68	P	1	NxDx	Estrías
31	819734	8499292	Falla	166	45	86	P	1	Nx	Estrías
32	819734	8499292	Falla	184	82	78	P	1	Ix	-
33	819734	8499292	Falla	166	67	73	P	1	Nx	Fibras de recristalización de calcita
34	819734	8499292	Falla	157	82	88	P	1	Ix	Costras de calcita
35	819734	8499292	Falla	158	57	66	P	1	IxSx	-
36	819734	8499292	Falla	149	51	78	P	1	Nx	-
37	819734	8499292	Falla	99	86	78	P	1	Ix	-
38	819734	8499292	Falla	168	60	75	P	1	Ix	Fibras de recristalización de calcita
39	819734	8499292	Falla	134	30	67	P	1	NxDx	-
40	819734	8499292	Falla	148	27	57	P	1	NxDx	-
41	819734	8499292	Falla	129	25	55	P	1	Nx	-

42	819734	8499292	Falla	168	77	75	P	1	Sx	Costras de calcita
----	--------	---------	-------	-----	----	----	---	---	----	--------------------

ESTACIÓN 8- E8

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	819012	8497970	Estratificación	283	90					-
2	819012	8497970	Estratificación	281	85					-
3	819012	8497970	Estratificación	280	75					-
4	819012	8497970	Estratificación	281	67					-
5	819012	8497970	Estratificación	271	70					-
6	819012	8497970	Estratificación	281	87					-
7	819012	8497970	Fractura	223	10					-
8	819012	8497970	Fractura	12	50					-
9	819012	8497970	Fractura	219	25					-
10	819012	8497970	Fractura	169	30					-
11	819012	8497970	Falla	278	80	-	S	0		Costras de calcita

ESTACIÓN 9- E9

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	817986	8496711	Estratificación	211	28					-
2	817986	8496711	Estratificación	344	30					-
3	817986	8496711	Estratificación	195	13					-
4	817986	8496711	Estratificación	202	15					-
5	817986	8496711	Estratificación	342	30					-
6	817986	8496711	Estratificación	349	20					-
7	817986	8496711	Estratificación	344	25					-
8	817986	8496711	Vetilla	88	83					Relleno de calcita de 2 mm
9	817986	8496711	Vetilla	296	83					Relleno de calcita de 4 mm
10	817986	8496711	Fractura	344	75					-
11	817986	8496711	Fractura	284	87					-
12	817986	8496711	Fractura	51	20					-

13	817986	8496711	Fractura	349	85					Fibras de recristalización de calcita
14	817986	8496711	Fractura	284	20					-
15	817986	8496711	Fractura	9	79					-
16	817986	8496711	Fractura	259	87					-
17	817986	8496711	Fractura	304	87					-
18	817986	8496711	Fractura	19	68					-
19	817986	8496711	Fractura	254	80					-
20	817986	8496711	Fractura	297	79					-
21	817986	8496711	Fractura	139	35					-
22	817986	8496711	Falla	279	70	10	P	1	IxDx	-
23	817986	8496711	Falla	264	77	5	P	1	IxDx	-
24	817986	8496711	Falla	286	77	0	C	1	Ix	Movimiento de capas
25	817986	8496711	Falla	319	50		C	0	Nx	-
26	817986	8496711	Falla	69	88		S	0		-
27	817986	8496711	Falla	244	88		S	0		-
28	817986	8496711	Falla	54	76	15	P	1	NxDx	Fibras de recristalización

ESTACIÓN 10- E10

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	823251	8501407	Estratificación	174	70					-
2	823251	8501407	Estratificación	194	85					-
3	823251	8501407	Vetilla	239	40					Vetilla Extensional: Relleno de 1 cm de calcita
4	823251	8501407	Vetilla	259	30					Vetilla Extensional: Relleno de 1 a 2 cm de calcita
5	823251	8501407	Vetilla	84	25					Vetilla Extensional
6	823251	8501407	Vetilla	259	10					Vetilla Extensional
7	823251	8501407	Vetilla	344	40					Vetilla Extensional: Relleno de 6 mm
8	823267	8501420	Vetilla	238	39					Vetilla Extensional
9	823267	8501420	Vetilla	242	80					Vetilla Extensional
10	823267	8501420	Vetilla	244	42					Vetilla Extensional
11	823267	8501420	Vetilla	244	32					Vetilla Extensional
12	823267	8501420	Vetilla	260	30					Vetilla Extensional
13	823267	8501420	Vetilla	250	40					Vetilla Extensional
14	823267	8501420	Vetilla	239	36					Vetilla Extensional

15	823267	8501420	Vetilla	249	36					Vetilla Extensional
16	823267	8501420	Vetilla	249	10					Vetilla Extensional
17	823251	8501407	Fractura	204	73					-
18	823251	8501407	Fractura	181	64					-
19	823251	8501407	Fractura	204	55					-
20	823251	8501407	Fractura	289	29					-
21	823251	8501407	Fractura	4	30					-
22	823251	8501407	Falla	184	60	65	S	1	NxDx	-
23	823251	8501407	Falla	183	59	78	S	1	NxDx	-
24	823251	8501407	Falla	174	60	70	S	1	NxDx	-
25	823251	8501407	Falla	176	35	65	S	1	NxDx	-
26	823251	8501407	Falla	176	35	70	S	1	NxDx	-
27	823267	8501420	Falla	334	25	40	C	1	NxSx	-
28	823267	8501420	Falla	29	30		S	0	IxSx	-

ESTACIÓN 11- E11

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	823025	8500382	Estratificación	179	75					-
2	823025	8500382	Estratificación	174	70					-
3	823025	8500382	Estratificación	194	85					-
4	823025	8500382	Estratificación	179	67					-
5	822860	8499453	Estratificación	174	71					-
6	823025	8500382	Vetilla	294	40					Vetilla Conjugada: Relleno de calcita de 5 mm
7	823025	8500382	Vetilla	294	34					Vetilla Conjugada: Relleno de calcita de 3 mm
8	823025	8500382	Vetilla	298	55					Vetilla Conjugada
9	823025	8500382	Vetilla	39	40					Relleno de calcita
10	823025	8500382	Vetilla	299	46					Vetilla Conjugada: Relleno de calcita de 2 mm
11	823025	8500382	Vetilla	14	15					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 3 mm
12	823163	8500550	Vetilla	18	12					Vetilla Extensional

13	823163	8500550	Vetilla	14	4					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 2 mm
14	823163	8500550	Vetilla	16	5					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 3 mm
15	823163	8500550	Vetilla	40	45					Vetilla Conjugada
16	823163	8500550	Vetilla	36	53					Vetilla Conjugada
17	823163	8500550	Vetilla	37	50					Vetilla Conjugada
18	823163	8500550	Vetilla	40	53					Vetilla Conjugada
19	823163	8500550	Vetilla	299	52					Vetilla Extensional
20	823025	8500382	Fractura	175	73					-
21	823025	8500382	Fractura	202	59					-
22	823025	8500382	Fractura	304	34					-
23	823025	8500382	Fractura	104	80					-
24	823025	8500382	Fractura	174	65					-
25	823025	8500382	Fractura	195	75					-
26	823025	8500382	Fractura	184	50					-
27	823163	8500550	Fractura	301	46					-
28	823163	8500550	Fractura	65	77					-
29	823163	8500550	Fractura	104	75					-
30	822881	8500105	Fractura	179	62					-
31	822881	8500105	Fractura	294	8					-
32	822881	8500105	Fractura	29	18					-
33	823025	8500382	Falla	184	70	70	S	2	NxDx	-
34	823025	8500382	Falla	281	78	80	S	1	Nx	Fibras de recristalización de 3.5 cm
35	823025	8500382	Falla	276	78	82	S	1	Nx	-
36	823025	8500382	Falla	149	83	77	S	1	NxSx	-
37	823025	8500382	Falla	252	35	23	P	1	Sx	Fibras de recristalización de 4 mm
38	823025	8500382	Falla	207	87	87	P	1	Nx	-
39	823025	8500382	Falla	179	87	30	P	1	Sx	-
40	823025	8500382	Falla	186	75	53	S	1	NxDx	-
41	823025	8500382	Falla	194	65	85	P	1	Nx	-
42	823025	8500382	Falla	185	69	70	S	1	NxDx	-
43	823025	8500382	Falla	189	75	55	P	1	NxDx	-
44	823025	8500382	Falla	235	53	83	S	1	Nx	-
45	823025	8500382	Falla	206	41	87	S	1	Ix	-

46	823025	8500382	Falla	114	35		S	0	Nx	Movimiento de capas
47	823025	8500382	Falla	189	60	85	S	1	Nx	-
48	823025	8500382	Falla	89	20		S	0	Nx	Movimiento de capas
49	822860	8499453	Falla	344	5	30	S	1	NxSx	Relleno de calcita
50	822860	8499453	Falla	179	69	47	S	1	NxDx	-
51	822860	8499453	Falla	309	21	30	S	1	IxSx	Relleno de calcita de 1mm
52	822860	8499453	Falla	262	45	30	S	1	IxSx	-
53	822860	8499453	Falla	126	73	30	S	1	IxSx	-
54	822860	8499453	Falla	164	48	40	S	1	NxDx	-
55	822860	8499453	Falla	189	30	60	S	1	NxDx	-
56	822860	8499453	Falla	179	12	26	S	1	NxDx	Relleno de calcita
57	822860	8499453	Falla	170	84	70	S	1	IxDx	-
58	822860	8499453	Falla	183	76	85	S	1	NxDx	-
59	822860	8499453	Falla	183	76	80	S	1	NxDx	-
60	822860	8499453	Falla	174	87	80	S	1	NxDx	-
61	822860	8499453	Falla	139	81	10	S	1	IxDx	-
62	822860	8499453	Falla	187	82	80	S	1	NxDx	-
63	822860	8499453	Falla	137	76	60	S	1	NxDx	-
64	822860	8499453	Falla	179	44	80	S	1	NxDx	-
65	822860	8499453	Falla	184	75	75	S	1	NxDx	-
66	822860	8499453	Falla	119	13		S	0	NxDx	Relleno de calcita de 1cm
67	822860	8499453	Falla	169	82	80	S	1	IxSx	-
68	823163	8500550	Falla	78	81	24	C	1	DxNx	-
69	822881	8500105	Falla	174	59	60	C	1	NxSx	-
70	822881	8500105	Falla	164	49	58	C	1	IxSx	-
71	822881	8500105	Falla	164	49	25	C	1	SxIx	-
72	822881	8500105	Falla	301	77	10	C	1	Sx	-
73	822881	8500105	Falla	189	62	90	C	1	Ix	-

ESTACIÓN 12- E12

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	

1	822619	8500864	Estratificación	169	70						-
2	822619	8500864	Estratificación	199	80						-
3	822619	8500864	Estratificación	184	70						-
4	822619	8500864	Estratificación	201	75						-
5	822619	8500864	Estratificación	184	70						-
6	822619	8500864	Estratificación	189	70						-
7	822516	8500332	Estratificación	189	83						-
8	822516	8500332	Estratificación	193	76						-
9	822446	8500093	Estratificación	189	64						-
10	822320	8499497	Estratificación	176	55						-
11	822320	8499497	Estratificación	169	56						-
12	822320	8499497	Estratificación	175	52						-
13	822320	8499497	Estratificación	188	60						-
14	822320	8499497	Estratificación	173	62						-
15	822320	8499497	Estratificación	170	58						-
16	822320	8499497	Estratificación	172	60						-
17	822320	8499497	Estratificación	169	57						-
18	822320	8499497	Estratificación	183	54						-
19	822320	8499497	Estratificación	187	89						-
20	822320	8499497	Estratificación	12	80						-
21	822320	8499497	Estratificación	179	64						-
22	822320	8499497	Estratificación	181	85						-
23	822320	8499497	Estratificación	181	75						-
24	822320	8499497	Estratificación	184	60						-
25	822320	8499497	Estratificación	180	60						-
26	822619	8500864	Vetilla	299	20						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
27	822619	8500864	Vetilla	284	20						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
28	822619	8500864	Vetilla	294	25						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
29	822619	8500864	Vetilla	284	15						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
30	822619	8500864	Vetilla	269	25						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
31	822619	8500864	Vetilla	284	15						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
32	822619	8500864	Vetilla	289	20						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
33	822446	8500093	Vetilla	262	24						Vetilla Extensional: Relleno de calcita
34	822619	8500864	Fractura	203	80						-
35	822619	8500864	Fractura	194	85						-
36	822619	8500864	Fractura	79	64						-
37	822619	8500864	Fractura	189	75						-

38	822619	8500864	Fractura	194	85					-
39	822619	8500864	Fractura	274	60					-
40	822619	8500864	Fractura	264	30					-
41	822619	8500864	Fractura	249	60					-
42	822619	8500864	Fractura	193	77					-
43	822619	8500864	Fractura	304	25					-
44	822619	8500864	Fractura	99	70					-
45	822619	8500864	Fractura	186	80					-
46	822516	8500332	Fractura	288	34					-
47	822516	8500332	Fractura	239	40					-
48	822516	8500332	Vetilla	14	25					-
49	822516	8500332	Vetilla	16	89					-
50	822516	8500332	Fractura	18	10					-
51	822516	8500332	Fractura	302	27					-
52	822516	8500332	Fractura	354	16					-
53	822516	8500332	Fractura	352	13					-
54	822446	8500093	Fractura	334	12					-
55	822446	8500093	Fractura	222	24					-
56	822619	8500864	Falla	189	90	86	S	1	Nx	Costras de calcita
57	822619	8500864	Falla	182	90	72	S	1	Nx	Fibras de recristalización
58	822619	8500864	Falla	176	73	88	S	1	Nx	Espejo de falla
59	822619	8500864	Falla	2	79	75	P	1	Nx	Fibras de recristalización
60	822619	8500864	Falla	17	83	85	S	1	Nx	-
61	822619	8500864	Falla	199	85	70	P	2	NxSx	-
62	822619	8500864	Falla	109	47	42	S	1	SxIx	-
63	822619	8500864	Falla	17	80	54	P	2	NxSx	Fibras de recristalización
64	822619	8500864	Falla	194	80	65	P	1	NxSx	Fibras de recristalización
65	822619	8500864	Falla	15	83	60	S	1	NxSx	-
66	822516	8500332	Falla	217	76	84	C	1	Nx	-
67	822516	8500332	Falla	190	88	84	C	1	Nx	-
68	822446	8500093	Falla	282	7	0	C	1	Sx	-
69	822446	8500093	Falla	294	74	59	C	1	NxSx	-
70	822446	8500093	Falla	222	89	40	C	1	IxDx	-
71	822446	8500093	Falla	188	54	80	C	1	Ix	-
72	822320	8499497	Falla	151	56	66	C	1	NxDx	-
73	822320	8499497	Falla	192	78	84	C	1	Nx	-

ESTACIÓN 13- E13

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	821960	8501108	Estratificación	167	85					-
2	821960	8501108	Estratificación	189	70					-
3	821960	8501108	Estratificación	184	70					-
4	821960	8501108	Estratificación	184	80					-
5	821960	8501108	Vetilla	184	10					Relleno de calcita de 1 mm
6	821960	8501108	Fractura	182	80					-
7	821960	8501108	Fractura	301	85					-
8	821960	8501108	Falla	180	55	85	C	3	Nx	-
9	821960	8501108	Falla	184	67	89	C	3	Nx	-
10	821960	8501108	Falla	179	45	80	C	3	Ix	Fibras de recristalización
11	821960	8501108	Falla	207	87	70	P	2	Ix	-
12	821960	8501108	Falla	174	45	70	P	2	Ix	-

ESTACIÓN 14- E14

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	821511	8501264	Estratificación	179	70					-
2	821511	8501264	Estratificación	174	75					-
3	821511	8501264	Estratificación	174	60					-
4	821511	8501264	Estratificación	189	80					-
5	821511	8501264	Estratificación	234	70					-
6	821511	8501264	Estratificación	214	85					-
7	821511	8501264	Estratificación	2	61					-
8	821511	8501264	Vetilla	234	50					Relleno de calcita de 1 mm
9	821511	8501264	Vetilla	244	80					Relleno de calcita de 4 mm
10	821511	8501264	Fractura	174	85					-
11	821511	8501264	Fractura	269	45					-
12	821511	8501264	Fractura	273	77					-
13	821511	8501264	Fractura	189	50					-
14	821511	8501264	Fractura	299	75					-

15	821511	8501264	Fractura	191	71						-
16	821511	8501264	Fractura	269	80						-
17	821511	8501264	Fractura	284	25						-
18	821511	8501264	Fractura	112	23						-
19	821511	8501264	Fractura	186	78						-
20	821511	8501264	Fractura	267	90						-
21	821511	8501264	Falla	111	73	30	P	2	DxNx	Fibras de recristalización	
22	821511	8501264	Falla	74	42		C	0	Ix	Fibras de recristalización	
23	821511	8501264	Falla	41	27		S	0	Ix	-	
24	821511	8501264	Falla	184	65	85	S	1	Nx	-	
25	821511	8501264	Falla	188	78	80	P	2	Ix	Fibras de recristalización	
26	821511	8501264	Falla	259	89	60	P	1	NxSx	-	
27	821511	8501264	Falla	259	89	25	P	1	SxNx	-	
28	821511	8501264	Falla	179	80	55	C	2	NxSx	-	

ESTACIÓN 15- E15

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	819903	8505424	Estratificación	67	38					-
2	819903	8505424	Estratificación	69	36					-
3	819899	8505407	Estratificación	73	31					-
4	819903	8505424	Fractura	162	76					-
5	819903	8505424	Fractura	162	76					-
6	819903	8505424	Fractura	184	90					-
7	819903	8505424	Fractura	139	62					-
8	819903	8505424	Fractura	226	79					-
9	819903	8505424	Fractura	306	56					-
10	819903	8505424	Fractura	174	61					-
11	819903	8505424	Fractura	242	27					-
12	819903	8505424	Fractura	190	76					-
13	819903	8505424	Fractura	78	58					-
14	819903	8505424	Fractura	173	59					-
15	819903	8505424	Fractura	257	54					-
16	819903	8505424	Fractura	309	67					-
17	819903	8505424	Fractura	242	40					-
18	819903	8505424	Fractura	194	88					-

19	819903	8505424	Fractura	189	62					-
20	819903	8505424	Fractura	269	56					-
21	819903	8505424	Fractura	169	70					-
22	819903	8505424	Fractura	108	80					-
23	819903	8505424	Fractura	32	50					-
24	819884	8505409	Fractura	138	87					-
25	819884	8505409	Fractura	242	76					-
26	819884	8505409	Fractura	207	88					-
27	819884	8505409	Fractura	267	79					-
28	819884	8505409	Fractura	226	63					-
29	819884	8505409	Fractura	178	69					-
30	819884	8505409	Fractura	184	89					-
31	819884	8505409	Fractura	193	79					-
32	819884	8505409	Fractura	152	89					-
33	819884	8505409	Fractura	149	83					-
34	819884	8505409	Fractura	243	83					-
35	819884	8505409	Fractura	188	71					-
36	819884	8505409	Fractura	160	83					-
37	819884	8505409	Fractura	201	87					-
38	819899	8505407	Fractura	304	64					-
39	819899	8505407	Fractura	69	31					-
40	819903	8505424	Falla	229	85	67	S	1	IxDx	Fibras de recristalización
41	819903	8505424	Falla	172	77	76	S	1	NxDx	Estrías moderadamente alterada
42	819903	8505424	Falla	138	50	12	S	1	IxSx	Fibras de recristalización
43	819903	8505424	Falla	304	51	20	S	1	IxDx	Fibras de recristalización
44	819903	8505424	Falla	224	60	68	S	1	IxSx	-
45	819903	8505424	Falla	296	56		S	0	NxSx	No se observa la estría
46	819903	8505424	Falla	161	58	10	S	1	NxDx	-
47	819903	8505424	Falla	158	62	23	S	1	NxDx	-
48	819903	8505424	Falla	192	76	58	S	1	NxDx	Fibras de recristalización
49	819903	8505424	Falla	214	62	76	S	1	NxSx	-
50	819903	8505424	Falla	189	13	90	S	1	Nx	-
51	819903	8505424	Falla	152	60	65	S	1	NxDx	-
52	819903	8505424	Falla	177	86	55	S	1	IxSx	Fibras de recristalización
53	819903	8505424	Falla	161	34	42	S	1	IxSx	-
54	819903	8505424	Falla	228	87	40	S	1	IxSx	-
55	819903	8505424	Falla	137	82	25	S	1	NxSx	-
56	819903	8505424	Falla	204	80	72	S	1	IxSx	-
57	819903	8505424	Falla	209	78	52	S	1	NxSx	-

58	819903	8505424	Falla	45	68	77	S	1	IxDx	-
59	819903	8505424	Falla	161	60		S	0		Fibras de recristalización de 1mm
60	819903	8505424	Falla	140	49	14	S	1	NxSx	-
61	819903	8505424	Falla	234	53	85	S	1	IxSx	-
62	819903	8505424	Falla	194	75	70	S	1	NxDx	-
63	819903	8505424	Falla	194	67	58	S	1	NxDx	-
64	819903	8505424	Falla	208	74	48	S	1	NxDx	-
65	819903	8505424	Falla	148	42	7	S	1	NxSx	-
66	819903	8505424	Falla	185	84	70	S	1	NxDx	-
67	819903	8505424	Falla	212	65	63	S	1	NxDx	-
68	819903	8505424	Falla	214	76	64	S	1	NxDx	-
69	819903	8505424	Falla	194	74	67	S	1	NxDx	-
70	819903	8505424	Falla	192	75	58	S	1	NxDx	-
71	819903	8505424	Falla	163	52	35	S	1	NxSx	-
72	819903	8505424	Falla	211	67	67	S	1	NxDx	-
73	819903	8505424	Falla	54	62	70	S	1	IxDx	-
74	819903	8505424	Falla	174	81	65	S	1	NxSx	-
75	819903	8505424	Falla	196	48	75	S	1	NxDx	-
76	819903	8505424	Falla	209	55	79	S	1	NxDx	-
77	819903	8505424	Falla	209	80	34	S	1	NxDx	-
78	819903	8505424	Falla	123	65		S	0		-
79	819903	8505424	Falla	173	40	57	S	1	NxDx	-
80	819903	8505424	Falla	309	65		S	0	IxDx	Harina de falla (caolinita)
81	819903	8505424	Falla	186	54	72	S	1	NxDx	-
82	819903	8505424	Falla	181	70	58	S	1	NxDx	-
83	819903	8505424	Falla	204	75	59	S	1	NxDx	-
84	819903	8505424	Falla	187	70	56	S	1	NxDx	-
85	819903	8505424	Falla	174	70	54	S	1	NxDx	-
86	819903	8505424	Falla	177	47		S	0		-
87	819884	8505409	Falla	141	78		S	0		-
88	819884	8505409	Falla	112	84		S	0		-
89	819884	8505409	Falla	140	79		S	0		-
90	819884	8505409	Falla	195	60		S	0		-
91	819884	8505409	Falla	156	69		S	0		-
92	819884	8505409	Falla	201	82		S	0		-
93	819899	8505407	Falla	317	66		C	0	Nx	-
94	819899	8505407	Falla	192	53	20	C	1	Ix	-
95	819899	8505407	Falla	192	53	83	C	1	Nx	-
96	819899	8505407	Falla	194	45	66	C	1	IxSx	-

97	819899	8505407	Falla	159	53	56	C	2	NxDx	-
----	--------	---------	-------	-----	----	----	---	---	------	---

ESTACIÓN 16- E16

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Cinemática	
1	822742	8504389	Estratificación	84	60					-
2	822742	8504389	Estratificación	139	60					-
3	822742	8504389	Estratificación	102	26					-
4	822742	8504389	Estratificación	104	50					-
5	822742	8504389	Estratificación	114	50					-
6	822831	8504142	Estratificación	121	47					-
7	822831	8504142	Estratificación	92	58					-
8	822831	8504142	Estratificación	79	75					-
9	822831	8504142	Estratificación	149	39					-
10	822815	8503948	Estratificación	216	29					-
11	822815	8503948	Estratificación	114	24					-
12	822824	8503195	Estratificación	125	47					-
13	822824	8503195	Estratificación	97	73					-
14	822824	8503195	Estratificación	149	38					-
15	822824	8503195	Estratificación	135	41					-
16	822824	8503195	Estratificación	147	39					-
17	822824	8503195	Estratificación	157	40					-
18	822824	8503195	Estratificación	156	40					-
19	822824	8503195	Estratificación	130	48					-
20	822784	8503106	Estratificación	144	42					-
21	822784	8503106	Estratificación	149	36					-
22	822784	8503106	Estratificación	135	42					-
23	822815	8503948	Vetilla	57	83					Vetilla Extensional: Relleno de calcita
24	822784	8503106	Vetilla	75	70					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 4mm
25	822784	8503106	Vetilla	62	79					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 1mm

26	822784	8503106	Vetilla	84	78					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 1mm
27	822784	8503106	Vetilla	84	75					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 1mm
28	822742	8504389	Fractura	14	50					-
29	822742	8504389	Fractura	24	50					-
30	822742	8504389	Fractura	4	59					-
31	822742	8504389	Fractura	259	57					-
32	822742	8504389	Fractura	197	89					-
33	822742	8504389	Fractura	199	84					-
34	822742	8504389	Fractura	199	85					-
35	822742	8504389	Fractura	259	74					-
36	822742	8504389	Fractura	294	63					-
37	822742	8504389	Fractura	299	69					-
38	822742	8504389	Fractura	167	44					-
39	822742	8504389	Fractura	170	76					-
40	822742	8504389	Fractura	174	52					-
41	822742	8504389	Fractura	104	80					-
42	822742	8504389	Fractura	339	46					-
43	822742	8504389	Fractura	343	63					-
44	822742	8504389	Fractura	324	58					-
45	822831	8504142	Fractura	300	45					-
46	822831	8504142	Fractura	286	40					-
47	822831	8504142	Fractura	296	45					-
48	822831	8504142	Fractura	296	47					-
49	822831	8504142	Fractura	286	55					-
50	822831	8504142	Fractura	221	54					-
51	822831	8504142	Fractura	116	34					-
52	822831	8504142	Fractura	276	40					-
53	822831	8504142	Fractura	246	26					-
54	822815	8503948	Fractura	202	74					-
55	822815	8503948	Fractura	219	79					-
56	822815	8503948	Fractura	244	50					-
57	822815	8503948	Fractura	215	73					-

58	822815	8503948	Fractura	209	60					-
59	822815	8503948	Fractura	13	86					-
60	822815	8503948	Fractura	215	73					-
61	822815	8503948	Fractura	88	42					-
62	822824	8503195	Fractura	183	41					-
63	822824	8503195	Fractura	139	43					-
64	822824	8503195	Fractura	314	44					-
65	822824	8503195	Fractura	22	68					-
66	822824	8503195	Fractura	216	47					-
67	822824	8503195	Fractura	264	75					-
68	822824	8503195	Fractura	289	51					-
69	822824	8503195	Fractura	239	53					-
70	822824	8503195	Fractura	224	51					-
71	822824	8503195	Fractura	224	79					-
72	822824	8503195	Fractura	34	79					-
73	822824	8503195	Fractura	8	32					-
74	822824	8503195	Fractura	317	62					-
75	822824	8503195	Fractura	9	20					-
76	822824	8503195	Fractura	290	51					-
77	822784	8503106	Fractura	199	79					-
78	822784	8503106	Fractura	17	27					-
79	822784	8503106	Fractura	7	28					-
80	822784	8503106	Fractura	298	49					-
81	822784	8503106	Fractura	124	41					-
82	822784	8503106	Fractura	18	80					-
83	822784	8503106	Fractura	290	71					-
84	822784	8503106	Fractura	202	79					-
85	822742	8504389	Falla	204	65	S	0			-
86	822742	8504389	Falla	109	46	S	0			-
87	822742	8504389	Falla	219	50	S	0			-
88	822742	8504389	Falla	64	46	S	0			-
89	822742	8504389	Falla	246	60	S	0			-
90	822742	8504389	Falla	203	33	S	0			-

91	822742	8504389	Falla	224	75		S	0		-
92	822831	8504142	Falla	5	57	25	S	1		-
93	822831	8504142	Falla	18	64	30	S	1		-
94	822831	8504142	Falla	5	63	18	S	1		-
95	822831	8504142	Falla	189	43	20	S	1	NxSx	-
96	822831	8504142	Falla	315	16	88	S	1	NxSx	-
97	822831	8504142	Falla	216	77	75	S	1	IxDx	-
98	822831	8504142	Falla	191	70	20	S	1	NxSx	-
99	822831	8504142	Falla	199	47	18	S	1	NxDx	-
100	822831	8504142	Falla	199	47	55	S	1	NxDx	-
101	822831	8504142	Falla	217	75	65	S	1	NxDx	-
102	822831	8504142	Falla	217	52	70	S	1	NxDx	-
103	822831	8504142	Falla	204	51	75	S	1	NxDx	-
104	822831	8504142	Falla	166	83	58	S	1	NxDx	-
105	822831	8504142	Falla	228	58	47	S	1	NxDx	-
106	822831	8504142	Falla	143	45	88	S	1	NxDx	-
107	822831	8504142	Falla	159	50	32	S	1	NxSx	-
108	822831	8504142	Falla	222	55	65	S	1	NxDx	-
109	822831	8504142	Falla	222	75	55	S	1	NxDx	-
110	822831	8504142	Falla	44	75	87	S	1	NxDx	-
111	822831	8504142	Falla	349	62	80	S	1	NxDx	-
112	822815	8503948	Falla	218	79	75	S	1	IxSx	-
113	822815	8503948	Falla	226	76		S	0		Espejo de falla
114	822815	8503948	Falla	216	70	40	S	1	IxDx	-
115	822815	8503948	Falla	228	62	30	S	1	IxSx	Fibras de recristalización de calcita
116	822815	8503948	Falla	216	34	58	S	1	NxDx	-
117	822815	8503948	Falla	219	82	87	S	1	Ix	-
118	822815	8503948	Falla	202	72	28	P	1	NxSx	Fibras de recristalización de calcita
119	822815	8503948	Falla	219	78	48	S	1		-
120	822815	8503948	Falla	223	65	40	S	1		-
121	822815	8503948	Falla	209	75	45	S	1		-
122	822815	8503948	Falla	216	48	86	S	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
123	822815	8503948	Falla	184	54	50	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita

124	822815	8503948	Falla	174	47	50	P	2	NxDx	-
125	822824	8503195	Falla	339	75	5	S	1	NxDx	-
126	822824	8503195	Falla	26	80	20	S	2	NxDx	-
127	822824	8503195	Falla	26	54	17	S	2	IxSx	-
128	822824	8503195	Falla	197	88	50	P	1	NxSx	Fibras de recristalización de calcita
129	822824	8503195	Falla	197	88	40	P	1	SxIx	-
130	822824	8503195	Falla	326	59	30	P	1	IxSx	-
131	822824	8503195	Falla	42	58	47	P	1	NxSx	-
132	822784	8503106	Falla	217	79	35	S	1	NxSx	-
133	822784	8503106	Falla	121	40	40	S	1	IxSx	-
134	822784	8503106	Falla	121	42	21	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita

ESTACIÓN 17- E17

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	821597	8505024	Estratificación	50	58					-
2	821597	8505024	Estratificación	64	47					-
3	821597	8505024	Estratificación	44	25					-
4	821939	8505127	Estratificación	124	55					-
5	821597	8505024	Fractura	162	72					-
6	821597	8505024	Fractura	214	58					-
7	821597	8505024	Fractura	89	67					-
8	821597	8505024	Fractura	204	69					-
9	821597	8505024	Fractura	168	43					-
10	821597	8505024	Fractura	177	66					-
11	821939	8505127	Fractura	334	65					-
12	821939	8505127	Fractura	280	69					-
13	821939	8505127	Fractura	14	67					-
14	821939	8505127	Fractura	351	85					-
15	821939	8505127	Fractura	134	43					-
16	821939	8505127	Fractura	164	62					-
17	821939	8505127	Fractura	320	40					-
18	821939	8505127	Fractura	260	44					-
19	821939	8505127	Fractura	211	65					-

20	821939	8505127	Fractura	286	66						-
21	821939	8505127	Fractura	105	42						-
22	821939	8505127	Fractura	288	51						-
23	821939	8505127	Fractura	318	29						-
24	821939	8505127	Fractura	349	32						-
25	821597	8505024	Falla	157	59	20	S	1	NxSx		-
26	821597	8505024	Falla	145	65	18	S	1	NxSx		-
27	821597	8505024	Falla	192	70	18	S	1	IxDx		-
28	821597	8505024	Falla	186	65	65	S	1	NxSx		-
29	821597	8505024	Falla	189	70	25	S	1	NxSx		-
30	821597	8505024	Falla	165	58	33	S	1	NxSx		-
31	821597	8505024	Falla	200	69	36	S	1	NxSx		-
32	821597	8505024	Falla	197	61	30	S	1	NxSx		-
33	821939	8505127	Falla	151	73	20	S	1	NxDx		-
34	821939	8505127	Falla	338	54	57	S	1	IxSx		-
35	821939	8505127	Falla	164	77	45	S	1	IxSx		-
36	821939	8505127	Falla	304	57	50	P	3			-
37	821939	8505127	Falla	84	83		S	0	Nx		Movimiento de capas
38	821939	8505127	Falla	204	38		S	0	Nx		Movimiento de capas
39	821939	8505127	Falla	234	84	50	S	1	NxDx		-
40	821939	8505127	Falla	212	45		S	0	Nx		Movimiento de capas

ESTACIÓN 18- E18

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación	
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática		
1	821351	8503541	Estratificación	124	60						-
2	821351	8503541	Estratificación	120	42						-
3	821351	8503541	Estratificación	158	54						-
4	821351	8503541	Estratificación	116	54						-
5	821326	8503539	Estratificación	133	45						-
6	821326	8503539	Estratificación	119	60						-
7	821326	8503539	Estratificación	126	50						-
8	821351	8503541	Vetilla	288	42						Relleno de calcita de 2mm
9	821351	8503541	Vetilla	312	40						Relleno de calcita de 1mm
10	821351	8503541	Vetilla	312	35						Relleno de calcita de 1mm

11	821591	8503851	Vetilla	340	72					Relleno de calcita
12	821591	8503851	Vetilla	203	56					Relleno de calcita
13	821351	8503541	Fractura	29	68					-
14	821351	8503541	Fractura	11	64					-
15	821351	8503541	Fractura	230	58					-
16	821351	8503541	Fractura	181	56					-
17	821351	8503541	Fractura	259	50					-
18	821351	8503541	Fractura	268	74					-
19	821351	8503541	Fractura	218	60					-
20	821351	8503541	Fractura	196	83					-
21	821351	8503541	Fractura	261	66					-
22	821591	8503851	Fractura	132	43					-
23	821591	8503851	Fractura	284	23					-
24	821591	8503851	Fractura	18	50					-
25	821591	8503851	Fractura	203	55					-
26	821591	8503851	Fractura	2	90					-
27	821591	8503851	Fractura	179	50					-
28	821591	8503851	Fractura	82	51					-
29	821591	8503851	Fractura	334	85					-
30	821591	8503851	Fractura	5	65					-
31	821591	8503851	Fractura	114	45					-
32	821591	8503851	Fractura	350	80					-
33	821591	8503851	Fractura	0	60					-
34	821591	8503851	Fractura	87	68					-
35	821591	8503851	Fractura	10	40					-
36	821591	8503851	Fractura	109	64					-
37	821591	8503851	Fractura	279	41					-
38	821591	8503851	Fractura	204	70					-
39	821326	8503539	Fractura	19	65					-
40	821326	8503539	Fractura	281	42					-
41	821326	8503539	Fractura	20	86					-
42	821326	8503539	Fractura	216	49					-
43	821351	8503541	Falla	12	60	38	P	2	NxSx	-
44	821351	8503541	Falla	22	56	48	S	1	NxSx	-
45	821351	8503541	Falla	34	69	50	P	1	NxSx	-
46	821351	8503541	Falla	24	63	18	P	1	Sx	-

47	821351	8503541	Falla	36	78	40	P	3	NxSx	-
48	821351	8503541	Falla	4	78	22	P	4	NxSx	-
49	821351	8503541	Falla	33	65	40	S	1	NxDx	-
50	821591	8503851	Falla	176	40	45	S	1	NxDx	-
51	821591	8503851	Falla	184	81	37	S	1	IxSx	-
52	821591	8503851	Falla	225	80	75	P	2	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
53	821591	8503851	Falla	225	80	75	P	2	IxSx	-
54	821591	8503851	Falla	168	60	40	P	2	IxDx	-
55	821591	8503851	Falla	202	27		S	0		No presenta estrías
56	821326	8503539	Falla	24	68	15	C	1	IxDx	-
57	821326	8503539	Falla	24	68	30	C	1	NxDx	-
58	821326	8503539	Falla	14	62	29	C	1	IxDx	-

ESTACIÓN 19- E19

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Cinemática	
1	820181	8503945	Estratificación	99	30					-
2	820181	8503945	Estratificación	164	31					-
3	820181	8503945	Estratificación	89	27					-
4	820181	8503945	Estratificación	64	37					-
5	820612	8504430	Estratificación	99	28					-
6	820612	8504430	Estratificación	177	78					-
7	820612	8504430	Estratificación	129	28					-
8	820612	8504430	Estratificación	107	12					-
9	820612	8504430	Estratificación	104	29					-
10	820612	8504430	Estratificación	69	46					-
11	820612	8504430	Estratificación	103	44					-
12	820612	8504430	Estratificación	105	19					-
13	820181	8503945	Fractura	4	90					-
14	820181	8503945	Fractura	260	84					-
15	820181	8503945	Fractura	134	34					-
16	820181	8503945	Fractura	65	72					-
17	820181	8503945	Fractura	22	90					-
18	820181	8503945	Fractura	257	73					-

19	820181	8503945	Fractura	102	32						-
20	820181	8503945	Fractura	97	84						-
21	820181	8503945	Fractura	259	84						-
22	820181	8503945	Fractura	29	80						-
23	820181	8503945	Fractura	74	57						-
24	820181	8503945	Fractura	269	64						-
25	820181	8503945	Fractura	179	45						-
26	820612	8504430	Fractura	184	34						-
27	820612	8504430	Fractura	115	78						-
28	820612	8504430	Fractura	343	73						-
29	820612	8504430	Fractura	244	70						-
30	820612	8504430	Fractura	189	83						-
31	820612	8504430	Fractura	32	83						-
32	820612	8504430	Fractura	251	83						-
33	820612	8504430	Fractura	129	52						-
34	820612	8504430	Fractura	194	80						-
35	820612	8504430	Fractura	299	59						-
36	820181	8503945	Falla	207	65	34	P	1	NxDx		-
37	820181	8503945	Falla	187	74	60	P	1	NxDx		-
38	820181	8503945	Falla	137	41	68	P	1	NxSx		-

ESTACIÓN 20- E20

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación	
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática		
1	818619	8503616	Estratificación	135	45						-
2	818619	8503616	Estratificación	83	73						-
3	818619	8503616	Estratificación	119	38						-
4	818619	8503616	Estratificación	94	15						-
5	818619	8503616	Estratificación	124	24						-
6	818619	8503616	Estratificación	114	32						-
7	818619	8503616	Estratificación	17	46						-
8	818619	8503616	Fractura	277	70						-
9	818619	8503616	Fractura	276	72						-
10	818619	8503616	Fractura	284	68						-

11	818619	8503616	Fractura	264	77					-
12	818619	8503616	Fractura	48	84					-
13	818619	8503616	Fractura	278	48					-
14	818619	8503616	Fractura	290	70					-
15	818619	8503616	Fractura	323	74					-
16	818619	8503616	Fractura	6	74					-
17	818619	8503616	Fractura	54	90					-
18	818619	8503616	Fractura	294	62					-
19	818619	8503616	Fractura	272	68					-
20	818619	8503616	Fractura	172	86					-
21	818619	8503616	Fractura	128	42					-
22	818619	8503616	Fractura	119	59					-
23	818619	8503616	Fractura	1	70					-
24	818619	8503616	Fractura	122	75					-
25	818619	8503616	Fractura	15	65					-
26	818619	8503616	Fractura	24	70					-
27	818619	8503616	Fractura	314	66					-
28	818619	8503616	Fractura	98	28					-
29	818619	8503616	Fractura	276	60					-
30	818619	8503616	Fractura	344	65					-
31	818619	8503616	Fractura	104	40					-
32	818619	8503616	Fractura	44	31					-
33	818619	8503616	Fractura	314	68					-
34	818619	8503616	Fractura	300	64					-
35	818619	8503616	Falla	114	38		P	0	IxDx	Fibras de recristalización
36	818619	8503616	Falla	13	74	8	P	1	NxDx	Fibras de recristalización
37	818619	8503616	Falla	51	71	20	C	1	NxDx	-
38	818619	8503616	Falla	206	81	20	C	1	NxDx	-
39	818619	8503616	Falla	19	74	24	P	1	NxDx	Fibras de recristalización
40	818619	8503616	Falla	214	54	20	P	1	NxDx	-
41	818619	8503616	Falla	248	47		C	0		Fibras de recristalización
42	818619	8503616	Falla	286	73		C	0		Fibras de recristalización
43	818619	8503616	Falla	18	66	58	C	1	IxDx	Fibras de recristalización de 3mm calcita
44	818619	8503616	Falla	266	85		P	0		-

45	818619	8503616	Falla	313	55	18	P	1	NxSx	Fibras de recristalización calcita
46	818619	8503616	Falla	16	66	40	P	1	Nx	Movimiento de capas
47	818619	8503616	Falla	193	78		C	0	IxSx	Movimiento de capas
48	818619	8503616	Falla	344	77	28	C	1	IxSx	-
49	818619	8503616	Falla	258	66	47	C	1	NxSx	-
50	818619	8503616	Falla	178	85		P	0	Ix	Movimiento de capas
51	818619	8503616	Falla	192	63	74	C	2	NxSx	Fibras de recristalización
52	818619	8503616	Falla	8	66	43	P	1	NxDx	Fibras de recristalización
53	818619	8503616	Falla	4	62	60	P	1	NxSx	Fibras de recristalización
54	818619	8503616	Falla	178	63	10	P	1	SxNx	Fibras de recristalización
55	818619	8503616	Falla	185	86	41	P	1	NxSx	Fibras de recristalización
56	818619	8503616	Falla	14	83		P	0	IxSx	-
57	818619	8503616	Falla	259	83		S	0		-
58	818619	8503616	Falla	349	79	18	P	1	NxDx	-
59	818619	8503616	Falla	118	24	7	P	1	NxDx	-
60	818619	8503616	Falla	29	87		P	1	NxSx	-

ESTACIÓN 21- E21

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiability	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	818622	8505064	Estratificación	114	38					-
2	818622	8505064	Estratificación	124	45					-
3	818622	8505064	Estratificación	290	58					-
4	818622	8505064	Estratificación	92	68					-
5	818622	8505064	Estratificación	264	85					-
6	818622	8505064	Estratificación	120	90					-
7	818622	8505064	Estratificación	79	76					-
8	818622	8505064	Estratificación	99	75					-
9	818622	8505064	Estratificación	112	56					-
10	818622	8505064	Estratificación	112	47					-
11	818622	8505064	Estratificación	104	70					-
12	818622	8505064	Estratificación	105	56					-

13	818622	8505064	Estratificación	114	66						-
14	818622	8505064	Estratificación	89	69						-
15	818622	8505064	Estratificación	114	77						-
16	818622	8505064	Estratificación	94	62						-
17	818622	8505064	Estratificación	94	66						-
18	818622	8505064	Estratificación	104	55						-
19	818622	8505064	Estratificación	92	68						-
20	818622	8505064	Estratificación	105	82						-
21	818622	8505064	Estratificación	96	62						-
22	818622	8505064	Estratificación	111	65						-
23	818622	8505064	Fractura	142	62						-
24	818622	8505064	Fractura	284	69						-
25	818622	8505064	Fractura	230	86						-
26	818622	8505064	Fractura	294	69						-
27	818622	8505064	Fractura	89	78						-
28	818622	8505064	Fractura	148	81						-
29	818622	8505064	Fractura	186	73						-
30	818622	8505064	Fractura	302	73						-
31	818622	8505064	Fractura	303	70						-
32	818622	8505064	Fractura	282	46						-
33	818622	8505064	Fractura	277	78						-
34	818622	8505064	Fractura	29	70						-
35	818622	8505064	Fractura	314	57						-
36	818622	8505064	Fractura	34	87						-
37	818622	8505064	Fractura	126	83						-
38	818622	8505064	Fractura	279	85						-
39	818622	8505064	Fractura	290	25						-
40	818622	8505064	Fractura	204	90						-
41	818622	8505064	Fractura	166	70						-
42	818622	8505064	Fractura	304	46						-
43	818622	8505064	Fractura	161	69						-
44	818622	8505064	Fractura	4	34						-
45	818622	8505064	Fractura	4	52						-

46	818622	8505064	Fractura	88	60						-
47	818622	8505064	Fractura	36	44						-
48	818622	8505064	Fractura	285	43						-
49	818622	8505064	Fractura	305	39						-
50	818622	8505064	Fractura	94	61						-
51	818622	8505064	Fractura	216	81						-
52	818622	8505064	Fractura	148	66						-
53	818622	8505064	Fractura	114	78						-
54	818622	8505064	Fractura	177	76						-
55	818622	8505064	Fractura	299	42						-
56	818622	8505064	Fractura	247	85						-
57	818622	8505064	Fractura	107	68						-
58	818622	8505064	Fractura	84	83						-
59	818622	8505064	Fractura	322	50						-
60	818622	8505064	Fractura	206	88						-
61	818622	8505064	Fractura	4	43						-
62	818622	8505064	Fractura	144	86						-
63	818622	8505064	Fractura	340	85						-
64	818622	8505064	Fractura	279	79						-
65	818622	8505064	Fractura	114	80						-
66	818622	8505064	Fractura	89	64						-
67	818622	8505064	Fractura	34	30						-
68	818622	8505064	Fractura	239	36						-
69	818622	8505064	Fractura	111	80						-
70	818622	8505064	Fractura	266	46						-
71	818622	8505064	Fractura	108	73						-
72	818622	8505064	Fractura	5	40						-
73	818622	8505064	Fractura	344	65						-
74	818622	8505064	Fractura	14	39						-
75	818622	8505064	Fractura	169	36						-
76	818622	8505064	Fractura	104	70						-
77	818622	8505064	Fractura	178	34						-
78	818622	8505064	Fractura	304	45						-

79	818622	8505064	Fractura	34	85						-
80	818622	8505064	Fractura	228	33						-
81	818622	8505064	Fractura	114	48						-
82	818622	8505064	Fractura	135	41						-
83	818622	8505064	Fractura	123	67						-
84	818622	8505064	Fractura	258	50						-
85	818622	8505064	Falla	285	74	55	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
86	818622	8505064	Falla	199	90	15	S	1	DxIx	-	
87	818622	8505064	Falla	176	74	10	C	1	DxIx	Fibras de recristalización de calcita	
88	818622	8505064	Falla	323	78	52	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
89	818622	8505064	Falla	190	90	10	C	2	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
90	818622	8505064	Falla	172	74	10	C	2	DxNx	-	
91	818622	8505064	Falla	179	63	8	P	1	NxDx	-	
92	818622	8505064	Falla	179	83	18	P	1	NxDx	-	
93	818622	8505064	Falla	153	86	10	P	2	SxIx	-	
94	818622	8505064	Falla	172	79	10	P	1	DxNx	Fibras de recristalización de calcita	
95	818622	8505064	Falla	17	29		I	0	Nx	Fibras de recristalización de calcita	
96	818622	8505064	Falla	23	58	74	P	0	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
97	818622	8505064	Falla	4	51		C	0	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
98	818622	8505064	Falla	22	33	58	C	1	NxDx	Relleno de calcita de 2mm	
99	818622	8505064	Falla	28	44	80	P	0	NxDx	-	
100	818622	8505064	Falla	8	44	36	P	1	NxDx	-	
101	818622	8505064	Falla	6	47	81	P	1	NxDx	-	
102	818622	8505064	Falla	47	45		C	0		-	
103	818622	8505064	Falla	9	76	20	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
104	818622	8505064	Falla	94	76	65	P	1	IxSx	Fibras de recristalización de calcita	
105	818622	8505064	Falla	94	76	65	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
106	818622	8505064	Falla	94	76	65	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
107	818622	8505064	Falla	256	32	48	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
108	818622	8505064	Falla	146	64	40	C	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
109	818622	8505064	Falla	222	68		P		NxDx	Fibras de recristalización de calcita	
110	818622	8505064	Falla	334	48		P	0	IxSx	Fibras de recristalización de calcita	
111	818622	8505064	Falla	89	58	50	P	1	IxSx	-	

112	818622	8505064	Falla	144	66	35	P	1	SxIx	Fibras de recristalización de calcita
113	818622	8505064	Falla	169	65	79	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
114	818622	8505064	Falla	352	75	72	P	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
115	818622	8505064	Falla	11	52		C	0	Ix	Fibras de recristalización de calcita
116	818622	8505064	Falla	346	64		C	0		-
117	818622	8505064	Falla	39	44		C	0		-
118	818622	8505064	Falla	99	68	69	P	1	NxDx	-
119	818622	8505064	Falla	34	64	34	P	1	IxSx	-
120	818622	8505064	Falla	94	80	74	P	1	NxDx	-
121	818622	8505064	Falla	111	76		P	0	NxDx	-

ESTACIÓN 22- E22

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabledad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	818843	8506317	Estratificación	94	81					-
2	818843	8506317	Vetilla	333	85					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 2cm a 5 cm
3	818843	8506317	Vetilla	340	65					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 2cm a 5 cm
4	818843	8506317	Vetilla	330	85					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 2cm a 5 cm
5	818843	8506317	Vetilla	317	84					Vetilla Extensional: Relleno de calcita de 2cm a 5 cm
6	818843	8506317	Fractura	278	36					-
7	818843	8506317	Fractura	240	39					-
8	818843	8506317	Fractura	249	72					-
9	818843	8506317	Falla	224	27	87	S	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
10	818843	8506317	Falla	281	34	64	S	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
11	818843	8506317	Falla	286	30	68	S	1	NxDx	-
12	818843	8506317	Falla	244	34	72	S	1	NxDx	-
13	818843	8506317	Falla	234	49	90	S	1	Nx	-
14	818843	8506317	Falla	229	58	59	S	1	NxDx	-
15	818843	8506317	Falla	279	45	78	S	1	NxDx	-
16	818843	8506317	Falla	255	33	80	S	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita

17	818843	8506317	Falla	214	25	76	S	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
18	818843	8506317	Falla	169	27	85	S	1	IxSx	Fibras de recristalización de calcita
19	818843	8506317	Falla	254	36	85	S	1	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
20	818843	8506317	Falla	177	70		S	0	NxDx	Capa de yeso
21	818843	8506317	Falla	244	26	80	S	1	IxSx	-
22	818843	8506317	Falla	324	83		S	0	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
23	818843	8506317	Falla	185	78		S	0	NxDx	Fibras de recristalización de calcita
24	818843	8506317	Falla	165	79		S	0		-
25	818843	8506317	Falla	150	79		S	0	IxSx	-
26	818843	8506317	Falla	317	84		S	0		-
27	818843	8506317	Falla	257	27	85	S	1	NxDx	-
28	818843	8506317	Falla	319	79		S	0		-
29	818843	8506317	Falla	341	42	16	S	1	NxDx	-
30	818843	8506317	Falla	156	84		S	0		-
31	818843	8506317	Falla	340	85		S	0		-
32	818843	8506317	Falla	228	79	78	S	1		-
33	818843	8506317	Falla	238	78		S	0	IxSx	-
34	818843	8506317	Falla	217	75		S	0	IxSx	-

ESTACIÓN 23- E23

ID	Coordenada		Estructura Geológica	Planar		Estructura Geológica: Falla				Observación
	Este	Norte		Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estría	Cinemática	
1	823239	8504196	Estratificación	139	50					-
2	823239	8504196	Estratificación	66	43					-
3	823239	8504196	Fractura	245	52					-
4	823239	8504196	Fractura	166	42					-
5	823239	8504196	Fractura	206	82					-
6	823239	8504196	Fractura	239	63					-
7	823239	8504196	Fractura	352	82					-
8	823239	8504196	Fractura	340	39					-
9	823239	8504196	Falla	204	88	20	S	2	NxDx	-
10	823239	8504196	Falla	95	55		S	0		Presencia de 1 cm de calcita
11	823239	8504196	Falla	216	88		S	0		-

Nota: Abreviatura de cinemática de falla (Nx: Normal, Ix: Inverso, Sx: Sinistral y Dx: Dextral)

ANEXO 3
TABLA DE DATOS ESTRUCTURALES DE FALLAS CON CINEMÁTICA

ID	Coordenada		Estación estructural	Unidad Geológica	Datos estructurales										Círculo de Mohr	R'	Regimen
	Este	Norte			Estructura	Strike	Dip	Pitch	Confiabilidad	Intensidad de la estria	Movimiento	Trend	Plunge	Rake			
1	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	167	74	70	S	1	NxDx	310	65	-110	Reactivada	0.5	NF
2	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	144	71	65	S	1	NxDx	289	59	-115	Reactivada	0.5	NF
3	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	148	61	32	P	1	NxSx	165	28	-32	Reactivada	1	NS
4	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	152	52	88	S	1	NxDx	245	52	-92	Reactivada	0.5	NF
5	825354	8496355	E1	Fm. Kayra	Falla	164	70	70	S	1	NxDx	301	62	-110	Reactivada	0.5	NF
6	825056	8495300	E1	Fm. Kayra	Falla	24	60	55	P	2	NxSx	60	45	-55	Reactivada	0.5	NF
7	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	194	65	30	S	1	IxSx	0	27	30	Reactivada	2	TS
8	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	194	72	5	S	1	IxSx	12	5	5	Reactivada	1.5	SS
9	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	194	75	20	S	1	IxSx	9	19	20	Reactivada	1.5	SS
10	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	199	70	25	S	1	IxSx	10	23	25	Reactivada	1.5	SS
11	825488	8497178	E1	Fm. Kayra	Falla	206	88	29	S	1	IxSx	25	29	29	Reactivada	1.5	SS
12	823208	8501788	E3	Fm. Chilca	Falla	259	40	70	C	3	NxDx	14	37	-110	Estable	0.5	NF
13	822376	8497207	E3	Fm. Chilca	Falla	151	68	50	S	1	NxSx	175	45	-50	Reactivada	1	NS
14	822376	8497207	E3	Fm. Chilca	Falla	109	74	17	S	1	NxSx	114	16	-17	Reactivada	1.5	SS
15	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	226	79	38	S	1	NxSx	234	37	-38	Reactivada	1	NS
16	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	84	35	55	S	1	IxSx	215	28	55	Estable	2.5	TF
17	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	226	64	40	S	1	NxDx	26	35	-140	Reactivada	1	NS
18	821385	8495196	E3	Fm. Chilca	Falla	249	70	40	S	1	NxSx	265	37	-40	Reactivada	1	NS
19	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	194	47	20	P	1	SxNx	208	14	-20	Reactivada	1	NS
20	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	197	60	26	P	1	NxSx	211	22	-26	Reactivada	1	NS
21	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	220	38	64	P	1	NxSx	278	34	-64	Reactivada	0.5	NF
22	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	183	74	23	P	1	NxSx	190	22	-23	Neoformada	1.5	SS
23	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	204	71	69	P	1	NxSx	244	62	-69	Reactivada	0.5	NF
24	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	104	80	15	S	1	NxDx	281	15	-165	Estable	1.5	SS
25	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	185	39	73	S	1	NxDx	296	37	-107	Neoformada	0.5	NF
26	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	267	69	39	S	1	NxDx	71	36	-141	Estable	1	NS
27	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	162	81	60	S	1	IxDx	177	59	120	Reactivada	1	UF
28	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	79	88	90	S	1	IxDx	169	88	90	Estable	1	UF
29	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	82	81	38	S	1	NxDx	255	37	-142	Estable	1	NS
30	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	100	74	70	S	1	IxDx	137	65	110	Estable	2.5	TF
31	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	100	74	65	S	1	IxDx	131	61	115	Estable	1	UF
32	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	273	78	38	S	1	NxDx	84	37	-142	Estable	1	NS
33	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	264	41	35	S	1	NxDx	56	22	-145	Estable	1	NS
34	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	276	67	77	S	1	NxDx	37	64	-103	Estable	0.5	NF
35	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	174	78	85	S	1	NxDx	287	77	-95	Neoformada	0.5	NF

36	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	278	74	24	S	1	NxDx	91	23	-156	Estable	1.5	SS
37	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	89	78	13	S	1	NxDx	266	13	-167	Estable	1.5	SS
38	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	212	50	45	S	1	IxSx	359	33	45	Reactivada	2.5	TF
39	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	192	51	60	S	1	IxSx	325	42	60	Reactivada	2.5	TF
40	822054	8498333	E4	Fm. Chilca	Falla	316	56	60	S	1	NxSx	0	46	-60	Reactivada	0.5	NF
41	821269	8499107	E5	Fm. Kayra	Falla	241	78	24	S	1	SxNx	246	23	-24	Reactivada	1.5	SS
42	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	188	88	65	S	1	IxDx	192	65	115	Neoformada	1	UF
43	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	113	71	54	S	1	IxSx	269	50	54	Reactivada	2	TS
44	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	182	82	33	S	1	DxNx	357	33	-147	Neoformada	1.5	SS
45	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	85	78	15	S	1	SxIx	262	15	15	Estable	1.5	SS
46	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	85	78	48	S	1	IxDx	98	47	132	Estable	2	TS
47	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	178	69	75	S	1	NxSx	231	64	-75	Neoformada	0.5	NF
48	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	137	68	50	P	1	IxSx	293	45	50	Reactivada	2	TS
49	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	119	82	18	P	1	IxSx	296	18	18	Reactivada	1.5	SS
50	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	162	63	68	P	1	NxDx	294	56	-112	Neoformada	0.5	NF
51	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	158	57	66	P	1	IxSx	287	50	66	Reactivada	2.5	TF
52	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	134	30	67	P	1	NxDx	250	27	-113	Reactivada	0.5	NF
53	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	148	27	57	P	1	NxDx	274	22	-123	Reactivada	0.5	NF
54	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	279	70	10	P	1	IxDx	282	9	170	Reactivada	1.5	SS
55	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	264	77	5	P	1	IxDx	265	5	175	Estable	1.5	SS
56	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	54	76	15	P	1	NxDx	230	15	-165	Reactivada	1.5	SS
57	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	184	60	65	S	1	NxDx	317	52	-115	Neoformada	0.5	NF
58	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	183	59	78	S	1	NxDx	295	57	-102	Neoformada	0.5	NF
59	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	174	60	70	S	1	NxDx	300	54	-110	Neoformada	0.5	NF
60	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	176	35	65	S	1	NxDx	296	31	-115	Neoformada	0.5	NF
61	823251	8501407	E10	Fm. Quilque	Falla	176	35	70	S	1	NxDx	290	33	-110	Neoformada	0.5	NF
62	823267	8501420	E10	Fm. Quilque	Falla	334	25	40	C	1	NxSx	11	16	-40	Neoformada	0.5	NF
63	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	184	70	70	S	2	NxDx	321	62	-110	Neoformada	0.5	NF
64	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	149	83	77	S	1	NxSx	177	75	-77	Reactivada	1	UF
65	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	186	75	53	S	1	NxDx	347	50	-127	Neoformada	1	NS
66	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	185	69	70	S	1	NxDx	320	61	-110	Neoformada	0.5	NF
67	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	189	75	55	P	1	NxDx	349	52	-125	Neoformada	1	NS
68	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	344	5	30	S	1	NxSx	14	2	-30	Estable	1	UF
69	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	179	69	47	S	1	NxDx	338	43	-133	Neoformada	1	NS
70	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	309	21	30	S	1	IxSx	101	10	30	Reactivada	1	UF
71	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	262	45	30	S	1	IxSx	60	21	30	Estable	2	TS
72	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	126	73	30	S	1	IxSx	296	29	30	Reactivada	1.5	SS
73	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	164	48	40	S	1	NxDx	315	29	-140	Neoformada	0.5	NF
74	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	189	30	60	S	1	NxDx	313	26	-120	Neoformada	0.5	NF
75	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	179	12	26	S	1	NxDx	333	5	-154	Estable	1	UF
76	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	170	84	70	S	1	IxDx	186	69	110	Neoformada	1	UF
77	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	183	76	85	S	1	NxDx	293	75	-95	Neoformada	0.5	NF

78	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	183	76	80	S	1	NxDx	309	73	-100	Neoformada	0.5	NF
79	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	174	87	80	S	1	NxDx	337	80	-100	Neoformada	1	UF
80	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	139	81	10	S	1	IxDx	141	10	170	Reactivada	1.5	SS
81	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	187	82	80	S	1	NxDx	329	77	-100	Reactivada	1	UF
82	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	137	76	60	S	1	NxDx	294	57	-120	Reactivada	1	NS
83	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	179	44	80	S	1	NxDx	283	43	-100	Neoformada	0.5	NF
84	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	184	75	75	S	1	NxDx	320	69	-105	Neoformada	0.5	NF
85	822860	8499453	E11	Fm. Quilque	Falla	169	82	80	S	1	IxSx	311	77	80	Neoformada	1	UF
86	823163	8500550	E11	Fm. Quilque	Falla	78	81	24	C	1	DxNx	254	24	-156	Estable	1.5	SS
87	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	174	59	60	C	1	NxSx	216	48	-60	Neoformada	0.5	NF
88	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	164	49	58	C	1	IxSx	298	40	58	Neoformada	2.5	TF
89	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	164	49	25	C	1	SxIx	327	19	25	Neoformada	2	TS
90	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	199	85	70	P	2	NxSx	212	69	-70	Reactivada	1	UF
91	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	109	47	42	S	1	SxIx	257	29	42	Reactivada	2.5	TF
92	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	17	80	54	P	2	NxSx	30	53	-54	Reactivada	1	NS
93	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	194	80	65	P	1	NxSx	214	63	-65	Reactivada	1	UF
94	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	15	83	60	S	1	NxSx	27	59	-60	Reactivada	1	UF
95	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	294	74	59	C	1	NxSx	319	55	-59	Reactivada	1	NS
96	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	222	89	40	C	1	IxDx	223	40	140	Reactivada	2	TS
97	822320	8499497	E12	Fm. Quilque	Falla	151	56	66	C	1	NxDx	280	49	-114	Reactivada	0.5	NF
98	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	111	73	30	P	2	DxNx	281	29	-150	Reactivada	1.5	SS
99	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	259	89	60	P	1	NxSx	261	60	-60	Estable	1	UF
100	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	259	89	25	P	1	SxNx	259	25	-25	Estable	1.5	SS
101	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	179	80	55	C	2	NxSx	193	54	-55	Neoformada	1	NS
102	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	229	85	67	S	1	IxDx	241	66	113	Reactivada	1	UF
103	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	172	77	76	S	1	NxDx	310	71	-104	Neoformada	0.5	NF
104	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	138	50	12	S	1	IxSx	310	9	12	Reactivada	2	TS
105	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	304	51	20	S	1	IxDx	317	15	160	Reactivada	2	TS
106	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	224	60	68	S	1	IxSx	353	53	68	Reactivada	2.5	TF
107	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	161	58	10	S	1	NxDx	336	8	-170	Reactivada	1.5	SS
108	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	158	62	23	S	1	NxDx	327	20	-157	Reactivada	1.5	SS
109	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	192	76	58	S	1	NxDx	351	55	-122	Reactivada	1	NS
110	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	214	62	76	S	1	NxSx	276	59	-76	Reactivada	0.5	NF
111	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	152	60	65	S	1	NxDx	285	52	-115	Reactivada	0.5	NF
112	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	177	86	55	S	1	IxSx	351	55	55	Neoformada		XF
113	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	161	34	42	S	1	IxSx	304	22	42	Neoformada	2.5	TF
114	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	228	87	40	S	1	IxSx	45	40	40	Reactivada	2	TS
115	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	137	82	25	S	1	NxSx	141	25	-25	Reactivada	1.5	SS
116	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	204	80	72	S	1	IxSx	356	69	72	Reactivada	1	UF
117	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	209	78	52	S	1	NxSx	224	50	-52	Reactivada	1	NS
118	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	45	68	77	S	1	IxDx	103	65	103	Reactivada	2.5	TF
119	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	140	49	14	S	1	NxSx	149	11	-14	Reactivada	1	NS
120	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	234	53	85	S	1	IxSx	332	53	85	Reactivada	2.5	TF

121	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	194	75	70	S	1	NxDx	339	65	-110	Reactivada	0.5	NF
122	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	194	67	58	S	1	NxDx	342	51	-122	Reactivada	0.5	NF
123	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	208	74	48	S	1	NxDx	11	46	-132	Reactivada	1	NS
124	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	148	42	7	S	1	NxSx	153	5	-7	Reactivada	1	NS
125	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	185	84	70	S	1	NxDx	349	69	-110	Neoformada	1	UF
126	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	212	65	63	S	1	NxDx	352	54	-117	Reactivada	0.5	NF
127	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	214	76	64	S	1	NxDx	8	61	-116	Reactivada	1	UF
128	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	194	74	67	S	1	NxDx	341	62	-113	Reactivada	0.5	NF
129	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	192	75	58	S	1	NxDx	350	55	-122	Reactivada	1	NS
130	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	163	52	35	S	1	NxSx	186	27	-35	Reactivada	1	NS
131	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	211	67	67	S	1	NxDx	348	58	-113	Reactivada	0.5	NF
132	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	54	62	70	S	1	IxDx	106	56	110	Reactivada	2.5	TF
133	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	174	81	65	S	1	NxSx	193	64	-65	Neoformada	1	UF
134	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	196	48	75	S	1	NxDx	308	46	-105	Reactivada	0.5	NF
135	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	209	55	79	S	1	NxDx	318	54	-101	Reactivada	0.5	NF
136	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	209	80	34	S	1	NxDx	22	33	-146	Reactivada	1.5	SS
137	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	173	40	57	S	1	NxDx	303	33	-123	Neoformada	0.5	NF
138	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	186	54	72	S	1	NxDx	305	50	-108	Neoformada	0.5	NF
139	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	181	70	58	S	1	NxDx	332	53	-122	Neoformada	1	NS
140	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	204	75	59	S	1	NxDx	1	56	-121	Reactivada	1	NS
141	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	187	70	56	S	1	NxDx	340	51	-124	Neoformada	1	NS
142	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	174	70	54	S	1	NxDx	329	49	-126	Neoformada	1	NS
143	819899	8505407	E15	Fm. Quilque	Falla	194	45	66	C	1	IxSx	316	40	66	Neoformada	2.5	TF
144	819899	8505407	E15	Fm. Quilque	Falla	159	53	56	C	2	NxDx	297	41	-124	Reactivada	0.5	NF
145	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	189	43	20	S	1	NxSx	204	13	-20	Neoformada	1	NS
146	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	315	16	88	S	1	NxSx	43	16	-88	Estable	0.5	NF
147	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	216	77	75	S	1	IxDx	256	70	105	Reactivada	2.5	TF
148	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	191	70	20	S	1	NxSx	198	19	-20	Reactivada	1.5	SS
149	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	199	47	18	S	1	NxDx	7	13	-162	Reactivada	1	NS
150	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	199	47	55	S	1	NxDx	335	37	-125	Reactivada	0.5	NF
151	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	217	75	65	S	1	NxDx	8	61	-115	Reactivada	1	UF
152	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	217	52	70	S	1	NxDx	338	48	-110	Reactivada	0.5	NF
153	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	204	51	75	S	1	NxDx	317	49	-105	Reactivada	0.5	NF
154	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	166	83	58	S	1	NxDx	335	57	-122	Reactivada		XF
155	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	228	58	47	S	1	NxDx	18	38	-133	Reactivada	1	NS
156	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	143	45	88	S	1	NxDx	236	45	-92	Reactivada	0.5	NF
157	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	159	50	32	S	1	NxSx	181	24	-32	Reactivada	1	NS
158	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	222	55	65	S	1	NxDx	351	48	-115	Reactivada	0.5	NF
159	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	222	75	55	S	1	NxDx	22	52	-125	Reactivada	1	NS
160	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	44	75	87	S	1	NxDx	145	75	-93	Reactivada	0.5	NF
161	822831	8504142	E16	Fm. Chilca	Falla	349	62	80	S	1	NxDx	100	60	-100	Neoformada	0.5	NF
162	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	218	79	75	S	1	IxSx	3	71	75	Reactivada	1	UF

163	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	216	70	40	S	1	IxDx	232	37	140	Reactivada	2	TS
164	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	228	62	30	S	1	IxSx	33	26	30	Reactivada	2	TS
165	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	216	34	58	S	1	NxDx	343	28	-122	Reactivada	0.5	NF
166	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	202	72	28	P	1	NxSx	211	27	-28	Reactivada	1.5	SS
167	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	216	48	86	S	1	NxDx	312	48	-94	Reactivada	0.5	NF
168	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	184	54	50	P	1	NxDx	329	38	-130	Neoformada	0.5	NF
169	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	174	47	50	P	2	NxDx	315	34	-130	Neoformada	0.5	NF
170	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	339	75	5	S	1	NxDx	158	5	-175	Reactivada	1.5	SS
171	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	26	80	20	S	2	NxDx	202	20	-160	Reactivada	1.5	SS
172	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	26	54	17	S	2	IxSx	196	14	17	Reactivada	2	TS
173	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	197	88	50	P	1	NxSx	199	50	-50	Reactivada		XF
174	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	197	88	40	P	1	SxIx	15	40	40	Reactivada	2	TS
175	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	326	59	30	P	1	IxSx	129	25	30	Reactivada	2	TS
176	822824	8503195	E16	Fm. Chilca	Falla	42	58	47	P	1	NxSx	72	38	-47	Reactivada	1	NS
177	822784	8503106	E16	Fm. Chilca	Falla	217	79	35	S	1	NxSx	225	34	-35	Reactivada	1	NS
178	822784	8503106	E16	Fm. Chilca	Falla	121	40	40	S	1	IxSx	268	24	40	Reactivada	2.5	TF
179	822784	8503106	E16	Fm. Chilca	Falla	121	42	21	P	1	NxDx	285	14	-159	Reactivada	1	NS
180	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	157	59	20	S	1	NxSx	168	17	-20	Reactivada	1	NS
181	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	145	65	18	S	1	NxSx	153	16	-18	Reactivada	1.5	SS
182	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	192	70	18	S	1	IxDx	198	17	162	Reactivada	1.5	SS
183	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	186	65	65	S	1	NxSx	228	55	-65	Neoformada	0.5	NF
184	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	189	70	25	S	1	NxSx	198	23	-25	Reactivada	1.5	SS
185	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	165	58	33	S	1	NxSx	184	28	-33	Neoformada	1	NS
186	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	200	69	336	S	1	NxSx	11	158	-336	Reactivada	1.5	SS
187	821597	8505024	E17	Fm. Chilca	Falla	197	61	30	S	1	NxSx	213	26	-30	Reactivada	1	NS
188	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	151	73	20	S	1	NxDx	325	19	-160	Reactivada	1.5	SS
189	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	338	54	57	S	1	IxSx	116	43	57	Reactivada	2.5	TF
190	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	164	77	45	S	1	IxSx	331	44	45	Reactivada	2	TS
191	821939	8505127	E17	Fm. Chilca	Falla	234	84	50	S	1	NxDx	47	50	-130	Reactivada	1	NS
192	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	12	60	38	P	2	NxSx	33	32	-38	Reactivada	1	NS
193	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	22	56	48	S	1	NxSx	54	38	-48	Reactivada	0.5	NF
194	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	34	69	50	P	1	NxSx	57	46	-50	Reactivada	1	NS
195	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	36	78	40	P	3	NxSx	46	39	-40	Reactivada	1	NS
196	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	4	78	22	P	4	NxSx	9	21	-22	Neoformada	1.5	SS
197	821351	8503541	E18	Fm. Chilca	Falla	33	65	40	S	1	NxDx	193	36	-140	Reactivada	1	NS
198	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	176	40	45	S	1	NxDx	319	27	-135	Neoformada	0.5	NF
199	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	184	81	37	S	1	IxSx	357	36	37	Neoformada	2	TS
200	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	225	80	75	P	2	NxDx	12	72	-105	Reactivada	1	UF
201	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	225	80	75	P	2	IxSx	12	72	75	Reactivada	1	UF
202	821591	8503851	E18	Fm. Chilca	Falla	168	60	40	P	2	IxDx	191	34	140	Reactivada	2	TS
203	821326	8503539	E18	Fm. Chilca	Falla	24	68	15	C	1	IxDx	30	14	165	Reactivada	1.5	SS
204	821326	8503539	E18	Fm. Chilca	Falla	24	68	30	C	1	NxDx	192	28	-150	Reactivada	1	NS

205	821326	8503539	E18	Fm. Chilca	Falla	14	62	29	C	1	IxDx	29	25	151	Reactivada	2	TS
206	820181	8503945	E19	Fm. Chilca	Falla	207	65	34	P	1	NxDx	11	30	-146	Reactivada	1	NS
207	820181	8503945	E19	Fm. Chilca	Falla	187	74	60	P	1	NxDx	341	56	-120	Neoformada	1	NS
208	820181	8503945	E19	Fm. Chilca	Falla	137	41	68	P	1	NxSx	199	37	-68	Reactivada	0.5	NF
209	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	13	74	8	P	1	NxDx	191	8	-172	Reactivada	1.5	SS
210	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	51	71	20	C	1	NxDx	224	19	-160	Reactivada	1.5	SS
211	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	206	81	20	C	1	NxDx	23	20	-160	Reactivada	1.5	SS
212	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	19	74	24	P	1	NxDx	192	23	-156	Reactivada	1.5	SS
213	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	214	54	20	P	1	NxDx	22	16	-160	Reactivada	1	NS
214	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	18	66	58	C	1	IxDx	51	51	122	Reactivada	2.5	TF
215	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	313	55	18	P	1	NxSx	324	15	-18	Reactivada	1	NS
216	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	344	77	28	C	1	IxSx	157	27	28	Reactivada	1.5	SS
217	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	258	66	47	C	1	NxSx	282	42	-47	Estable	1	NS
218	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	192	63	74	C	2	NxSx	250	59	-74	Neoformada	0.5	NF
219	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	8	66	43	P	1	NxDx	167	39	-137	Neoformada	1	NS
220	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	4	62	60	P	1	NxSx	43	50	-60	Neoformada	0.5	NF
221	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	178	63	10	P	1	SxNx	183	9	-10	Neoformada	1.5	SS
222	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	185	86	41	P	1	NxSx	188	41	-41	Neoformada	1	NS
223	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	349	79	18	P	1	NxDx	165	18	-162	Neoformada	1.5	SS
224	818619	8503616	E20	Fm. Kayra	Falla	118	24	7	P	1	NxDx	292	3	-173	Estable	1	UF
225	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	285	74	55	P	1	NxDx	84	52	-125	Reactivada	1	NS
226	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	199	90	15	S	1	DxIx	199	15	165	Reactivada	1.5	SS
227	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	176	74	10	C	1	DxIx	179	10	170	Neoformada	1.5	SS
228	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	323	78	52	P	1	NxDx	128	50	-128	Reactivada	1	NS
229	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	190	90	10	C	2	NxDx	10	10	-170	Reactivada	1.5	SS
230	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	172	74	10	C	2	DxNx	349	10	-170	Neoformada	1.5	SS
231	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	179	63	8	P	1	NxDx	355	7	-172	Neoformada	1.5	SS
232	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	179	83	18	P	1	NxDx	357	18	-162	Neoformada	1.5	SS
233	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	153	86	10	P	2	SxIx	332	10	10	Reactivada	1.5	SS
234	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	172	79	10	P	1	DxNx	350	10	-170	Neoformada	1.5	SS
235	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	23	58	74	P	0	NxDx	141	55	-106	Reactivada	0.5	NF
236	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	22	33	58	C	1	NxDx	149	28	-122	Reactivada	0.5	NF
237	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	28	44	80	P	0	NxDx	132	43	-100	Reactivada	0.5	NF
238	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	8	44	36	P	1	NxDx	160	24	-144	Neoformada	1	NS
239	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	6	47	81	P	1	NxDx	109	46	-99	Neoformada	0.5	NF
240	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	9	76	20	P	1	NxDx	184	19	-160	Neoformada	1.5	SS
241	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	76	65	P	1	IxSx	247	62	65	Estable	1	UF
242	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	76	65	P	1	NxDx	247	62	-115	Estable	1	UF
243	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	76	65	P	1	NxDx	247	62	-115	Estable	1	UF
244	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	256	32	48	P	1	NxDx	33	23	-132	Estable	0.5	NF
245	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	146	64	40	C	1	NxDx	306	35	-140	Reactivada	1	NS
246	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	89	58	50	P	1	IxSx	237	41	50	Estable	2.5	TF

247	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	144	66	35	P	1	SxIx	308	32	35	Reactivada	2	TS
248	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	169	65	79	P	1	NxDx	284	63	-101	Neoformada	0.5	NF
249	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	352	75	72	P	1	NxDx	133	67	-108	Neoformada	0.5	NF
250	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	99	68	69	P	1	NxDx	235	60	-111	Estable	0.5	NF
251	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	34	64	34	P	1	IxSx	198	30	34	Reactivada	2	TS
252	818622	8505064	E21	Fm. Chilca	Falla	94	80	74	P	1	NxDx	243	71	-106	Estable	1	UF
253	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	224	27	87	S	1	NxDx	317	27	-93	Estable	0.5	NF
254	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	281	34	64	S	1	NxDx	41	30	-116	Reactivada	0.5	NF
255	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	286	30	68	S	1	NxDx	41	28	-112	Reactivada	0.5	NF
256	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	244	34	72	S	1	NxDx	355	32	-108	Estable	0.5	NF
257	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	229	58	59	S	1	NxDx	8	47	-121	Reactivada	0.5	NF
258	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	279	45	78	S	1	NxDx	26	44	-102	Reactivada	0.5	NF
259	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	255	33	80	S	1	NxDx	357	32	-100	Estable	0.5	NF
260	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	214	25	76	S	1	NxDx	319	24	-104	Estable	0.5	NF
261	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	169	27	85	S	1	IxSx	265	27	85	Reactivada	2.5	TF
262	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	254	36	85	S	1	NxDx	350	36	-95	Estable	0.5	NF
263	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	244	26	80	S	1	IxSx	345	26	80	Estable	2.5	TF
264	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	257	27	85	S	1	NxDx	353	27	-95	Estable	0.5	NF
265	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	341	42	16	S	1	NxDx	149	11	-164	Neoformada	1	NS
266	823239	8504196	E23	Fm. Quilque	Falla	204	88	20	S	2	NxDx	23	20	-160	Reactivada	1.5	SS
267	825056	8495300	E1	Fm. Kayra	Falla	64	50	85	P	2	Nx	146	50	-85	Reactivada	0.5	NF
268	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	214	57	5	P	1	Sx	31	4	5	Reactivada	1.5	SS
269	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	224	53	5	P	1	Dx	227	4	175	Reactivada	2	TS
270	821916	8498087	E4	Fm. Chilca	Falla	216	63	10	C	1	Sx	31	9	10	Reactivada	1.5	SS
271	821269	8499107	E5	Fm. Kayra	Falla	166	76	87	P	1	Nx	244	76	-87	Reactivada	0.5	NF
272	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	131	69	7	S	1	Sx	308	7	7	Reactivada	1.5	SS
273	821506	8498191	E5	Fm. Kayra	Falla	131	69	88	S	1	Ix	227	69	88	Reactivada	2.5	TF
274	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	317	42	0	P	3	Sx	317	0	0	Reactivada		XF
275	819831	8497081	E6	Fm. Soncco	Falla	128	72	5	P	2	Sx	306	5	5	Reactivada	1.5	SS
276	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	166	45	86	P	1	Nx	250	45	-86	Neoformada	0.5	NF
277	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	184	82	78	P	1	Ix	331	76	78	Neoformada	1	UF
278	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	157	82	88	P	1	Ix	261	82	88	Reactivada	1	UF
279	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	149	51	78	P	1	Nx	220	49	-78	Reactivada	0.5	NF
280	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	99	86	78	P	1	Ix	261	77	78	Estable	1	UF
281	819734	8499292	E7	Fm. Soncco	Falla	168	60	75	P	1	Ix	286	57	75	Neoformada	2.5	TF
282	817986	8496711	E9	Gpo. Tacaza	Falla	286	77	0	C	1	Ix	286	0	0	Estable	1.5	SS
283	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	281	78	80	S	1	Nx	331	74	-80	Estable	0.5	NF
284	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	276	78	82	S	1	Nx	332	76	-82	Estable	0.5	NF
285	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	207	87	87	P	1	Nx	252	86	-87	Reactivada	1	UF
286	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	194	65	85	P	1	Nx	272	65	-85	Reactivada	0.5	NF
287	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	235	53	83	S	1	Nx	313	52	-83	Reactivada	0.5	NF
288	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	206	41	87	S	1	Ix	300	41	87	Reactivada	2.5	TF

289	823025	8500382	E11	Fm. Quilque	Falla	189	60	85	S	1	Nx	269	60	-85	Neoformada	0.5	NF
290	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	301	77	10	C	1	Sx	119	10	10	Reactivada	1.5	SS
291	822881	8500105	E11	Fm. Quilque	Falla	189	62	90	C	1	Ix	279	62	90	Neoformada	2.5	TF
292	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	189	90	86	S	1	Nx	189	86	-86	Neoformada	1	UF
293	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	176	73	88	S	1	Nx	259	73	-88	Neoformada	0.5	NF
294	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	2	79	75	P	1	Nx	37	71	-75	Neoformada	1	UF
295	822619	8500864	E12	Fm. Quilque	Falla	17	83	85	S	1	Nx	71	81	-85	Reactivada	1	UF
296	822516	8500332	E12	Fm. Quilque	Falla	217	76	84	C	1	Nx	284	75	-84	Reactivada	0.5	NF
297	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	282	7	0	C	1	Sx	282	0	0	Estable	1	UF
298	822446	8500093	E12	Fm. Quilque	Falla	188	54	80	C	1	Ix	295	53	80	Neoformada	2.5	TF
299	822320	8499497	E12	Fm. Quilque	Falla	192	78	84	C	1	Nx	255	77	-84	Reactivada	0.5	NF
300	822516	8500332	E12	Fm. Quilque	Falla	190	88	84	C	1	Nx	208	84	-84	Neoformada	1	UF
301	821960	8501108	E13	Fm. Chilca	Falla	180	55	85	C	3	Nx	261	55	-85	Neoformada	0.5	NF
302	821960	8501108	E13	Fm. Chilca	Falla	184	67	89	C	3	Nx	271	67	-89	Neoformada	0.5	NF
303	821960	8501108	E13	Fm. Chilca	Falla	179	45	80	C	3	Ix	283	44	80	Neoformada	2.5	TF
304	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	184	65	85	S	1	Nx	262	65	-85	Neoformada	0.5	NF
305	821511	8501264	E14	Fm. Kayra	Falla	188	78	80	P	2	Ix	318	74	80	Neoformada	2.5	TF
306	819903	8505424	E15	Fm. Quilque	Falla	189	13	90	S	1	Nx	279	13	-90	Estable	0.5	NF
307	819899	8505407	E15	Fm. Quilque	Falla	192	53	83	C	1	Nx	270	52	-83	Neoformada	0.5	NF
308	822815	8503948	E16	Fm. Chilca	Falla	219	82	87	S	1	Ix	330	81	87	Reactivada	1	UF
309	818843	8506317	E22	Fm. Chilca	Falla	234	49	90	S	1	Nx	324	49	-90	Reactivada	0.5	NF

Nota: Abreviatura de cinemática de falla (Nx: Normal, Ix: Inverso, Sx: Sinestral y Dx: Dextral)

ANEXO 4 PUBLICACIONES EN REVISTAS

Puma Enriquez, Y., López Abanto, W., Mamani Laura, Y., Lozano Flores, D., & Nuñez Muñoz, J. A. (2021). Uso de software libre y de código abierto para la identificación de lineamientos estructurales y realce de estructuras geológicas. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 253–264. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.20414>

USO DE SOFTWARE LIBRE Y DE CÓDIGO ABIERTO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES Y REALCE DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

USE OF FREE AND OPEN SOURCE SOFTWARE TO IDENTIFY STRUCTURAL LINEAMENTS AND ENHANCEMENT OF GEOLOGICAL STRUCTURES

Yessenia Puma Enriquez¹, Wilson López Abanto², Yennifer Mamani Laura³, Diana Lozano Flores⁴, Johan Angel Nuñez Muñoz¹

RESUMEN

El objetivo principal de este estudio consiste en el uso de software libre y de código abierto para identificar lineamientos estructurales y el realce de estructuras geológicas, sin la necesidad de usar softwares comerciales. En este estudio se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m ALOS PALSAR, sobre el cual se aplicaron distintas técnicas de visualización de relieve obteniendo lineamientos estructurales y realce de estructuras geológicas (posibles fallas), además se realizaron gráficos de rosetas e histogramas, con ayuda de software libre y de código abierto como son QGIS 3.4.12, SAGA GIS, Stereonet y OpenStereonet. Los lineamientos se analizaron mediante la frecuencia de azimut, usando diferentes métodos; Sombramiento multidireccional, Sombramiento con variación de luz cada 30°, Sombras combinadas, Mapa de Imagen de Relieve Rojo, y finalmente se realizó la obtención y procesamiento de lineamientos estructurales con cada técnica de visualización, se obtuvieron 745 con la técnica de sombramiento multidireccional, 1173 por sombramiento con variación de luz cada 30°, 736 y 749 por las sombras combinadas 1 y 2 respectivamente y 139 estructuras geológicas que representan fallas inferidas con la técnica de Mapa de Imagen de Relieve Rojo (RRIM); los cuales indican una tendencia en dirección andina NW-SE. Para complementar la interpretación se generaron gráficos de rosetas e histogramas para cada tipo de método, que al compararlos se encontraron 6 tendencias generales; se observa que las tendencias obtenidas en los diferentes procesos presentan similitud con la dirección de las fallas regionales presentes en la zona de estudio. Se concluye que las técnicas utilizadas son fiables, útiles y complementarias entre sí, para reconocer, analizar, determinar e interpretar lineamientos estructurales en una etapa de pre-campo con ayuda de Software libre y de código abierto.

Palabras clave: estructuras, lineamientos, sombramiento, fallas, rosetas, histogramas.

ABSTRACT

This main objective of this study is the use of free and open source software to identify structural lineaments and enhancement of geological structures, without the need to use commercial software. In this study, a digital elevation model (DEM) with a resolution of 12.5 m ALOS PALSAR was used on which the different relief visualization techniques were performed, obtaining structural guidelines and enhancement of geological structures (possible faults), in

¹ Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú. E-mail: 170401@unmsac.edu.pe - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3522-4157>

² Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, Brasil. E-mail: wilsonlopez@geo@unb.br - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1673-671X>

³ ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2348-1965>

⁴ ORCID <https://orcid.org/0000-0001-0763-1292>

In addition graphs were made of rosettes and histograms, with the help of free and open source software such as SAGA GIS, QGIS 3.4.12, Stereonet and OpenStereo. The lineaments were analyzed by azimuth frequency, using different methods; Multidirectional shading, Shading with light variation every 30°, Combined shadows, Red Relief Image Map (RRIM); and finally the obtaining and processing of structural guidelines was carried out with each visualization technique, 745 were obtained with the multidirectional shading technique, 1173 by shading with light variation every 30°, 736 and 749 by the combined shadows 1 and 2 respectively and 139 geological structures representing faults inferred with the Red Relief Image Map (RRIM) technique; which indicate a trend in an Andean NW-SE direction. To complement the interpretation, rosette graphs and histograms were generated for each type of method, which when comparing them, 6 general trends were found; it is observed that the tendencies obtained in the different processes present similarity with the direction of the regional faults present in the study area. It is concluded that the techniques used are reliable, useful and complementary to each other to recognize, analyze, determine and interpret structural guidelines in a pre-field stage with the help of free and open source software.

Keywords: structures, guidelines, shading, faults, rosettes, histograms.

1. INTRODUCCIÓN

Existen varias técnicas de visualización de relieve mediante el uso de herramientas SIG de código abierto, a partir de un modelo de elevación digital (DEM), que son rápidos de implementar y que se pueden usar para múltiples propósitos; y en este trabajo nos hemos basado en las técnicas propuestas por Tzvetkov (2018) para determinar lineamientos estructurales y realce de estructuras geológicas (posibles fallas). Además, para trabajar con los datos de las direcciones obtenidos en estos procesos hemos hecho uso de los softwares Stereonet (Allmendinger et al., 2012) y OpenStereo (Grohmann et al., 2011). Mader y Schenk (2017) resaltan el uso de los softwares libres y de código abierto; y el motivo principal de usar estos softwares (Tabla 1) se basa en que no genera ningún costo y se pueden realizar los mismos procesos que los softwares comerciales.

Un lineamiento estructural es definido por O'Leary et al. (1976) como un elemento lineal, cartografiable, simple o compuesto de una superficie, cuyas partes están alineadas en una relación rectilínea o ligeramente curvilínea, la cual difiere distintivamente de patrones de elementos adyacentes y presumiblemente refleja un fenómeno bajo la superficie. Teniendo en cuenta la definición de los lineamientos estructurales y las técnicas usadas en este artículo, son trabajos que se realizan en una etapa de pre-campo para generar posibles interpretaciones estructurales y luego comprobarlos en campo (Olivera et al., 2009). En la zona de estudio (Figura 1) se tiene fallas reconocidas por el Servicio Geológico de Perú, INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), las cuales nos servirán como control de calidad.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, el objetivo de este artículo es fomentar el uso de software libre y de código abierto para replicar estas técnicas en la identificación de lineamientos estructurales y realce de estructuras geológicas, así como hacer una correlación de las diferentes técnicas de realce de relieve con los datos obtenidos de INGEMMET (Carlotto et al., 1996; Carlotto et al., 2011) para su validación.

Tabla 1. Softwares usados (sí: S y no: N)

SOFTWARE	LIBRE	CÓDIGO ABIERTO
QGIS	S	S
SAGA GIS	S	S
STEREONET	S	N
OPENSTEREO	S	S

1.1. Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se ubica al sur del Perú en el departamento de Cusco y abarca las provincias de Cusco, Urubamba, Anta, Paruro y Calca (Figura 1).



Figura 1. Mapa de Ubicación de la zona de estudio en el departamento de Cusco.

1.2. Configuración Geológica

En la zona de estudio, el sistema estructural sigue una dirección preferente, de este modo presenta fallas con dirección andina NW-SE de tipo normal, inversa y de rumbo, algunas de estas son reconocidas como fallas regionales (Carlotto et al., 2011). Así también se tienen fallas activas como Tambomachay, Tamboray, Qoricocha, Pachatusan y Cusco, que han sido controladas por la evolución tectónica y sedimentaria pliocuaternaria (Cabrera, 1988; Benavente et al., 2013).

Las fallas regionales importantes (Figura 2) en nuestra zona de estudio son Qoricocha (Qc), Tambomachay (Tbc), Cusco (Cc), Casacurca (Csc), San Juan de Quihuas (SJQ) y Paruro (Pr). Estas fallas se han agrupado por sus orientaciones preferenciales Csc, SJQ y Pr (150°), Tbc y Qc (122°) y Cc (112°).

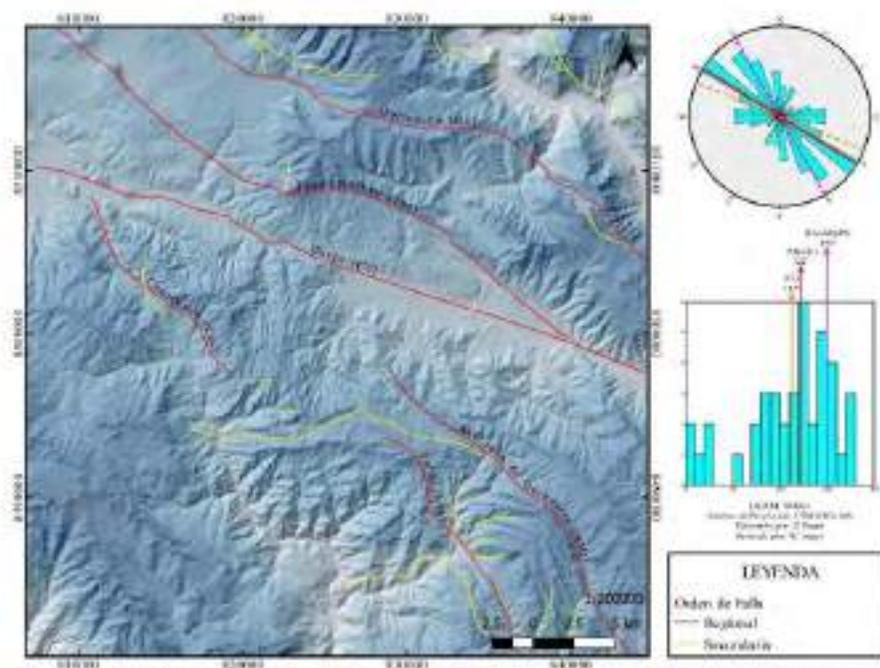


Figura 2. Mapa de Fallas cartografiadas por INGEMMET (Carlotto et al., 1996; Carlotto et al., 2011)

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Adquisición de datos:

Se utilizó un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m ALOS PALSAR (Figura 3A) obtenido de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), la cual se descargó de manera gratuita del sitio web de la NASA, para realizar los distintos procesos e identificar lineamientos estructurales digitales y estructuras geológicas (Fallas), así también la imagen RASTER se proyectó en el Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator WGS-84 UTM Zona 18S.

2.2 Sombreamiento multidireccional:

Para determinar los lineamientos usando el sombreado multidireccional, se toma como base el modelo de elevación digital (DEM) y la metodología de Marck (1992). Se genera una iluminación en diferentes posiciones para obtener una imagen con una iluminación homogénea, para realizar este mapa de sombreado multidireccional (Figura 3B) se usó el software QGIS 3.4.12. El procedimiento es detallado en la tabla 2.

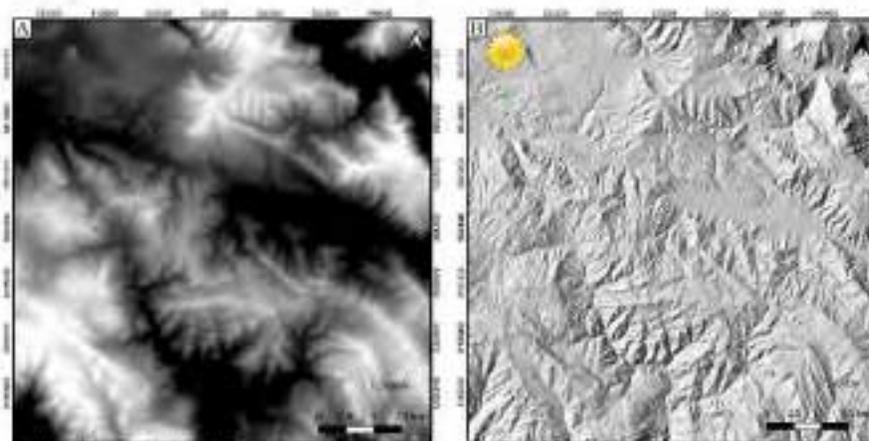


Figura 3. Modelo de elevación digital (A) y mapa de sombreado multidireccional (B).

2.3 Sombreado con variación de la luz cada 30° de 0° a 330°:

Para determinar lineamientos, a partir del DEM se simula un efecto de iluminación desde un punto base con valores de azimut y altitud de iluminación, es por ello que se hacen cambios en el azimut solar cada 30 grados generándose así 12 imágenes con diferentes ángulos (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°). Para generar estas imágenes de sombreado (Figura 4A) se usó el software QGIS 3.4.12. El procedimiento es detallado en la tabla 2.

2.4 Sombras combinadas:

Para extraer lineamientos con diferentes orientaciones, a partir del DEM, se crearon doce imágenes ráster sombreadas para cada DEM usando la herramienta de Mapa de sombras (Hillsshade) en QGIS 3.4.12. La primera imagen en relieve sombreada se iluminó desde el norte (es decir, azimut solar 0°), con una inclinación solar de 45° (QGIS predeterminado); para las otras once imágenes en relieve, se utilizó una inclinación solar idéntica junto con otras once direcciones de iluminación, que incluyen: 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°. Los valores de iluminación e inclinación del azimut tienden a ocultar o resaltar las características morfológicas en una imagen sombreada, dependiendo de su orientación con respecto a la fuente de luz simulada (Solano et al., 2020; Radaideh et al., 2016). Estas imágenes combinadas resaltan lineamientos y características topográficas con una variedad de direcciones, que no sería visible si solo se usara una imagen sombreada. Las primeras seis imágenes en relieve sombreadas fueron superpuestas y combinadas en el software QGIS 3.4.12, para producir una imagen con direcciones de iluminación múltiple (0°, 30°, 60°, 90°, 120° y 150°-Combinación 1), y las seis imágenes restantes (180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°-Combinación 2) se procesaron de la misma manera (Figura 4B y 4C). El procedimiento es detallado en la tabla 2.

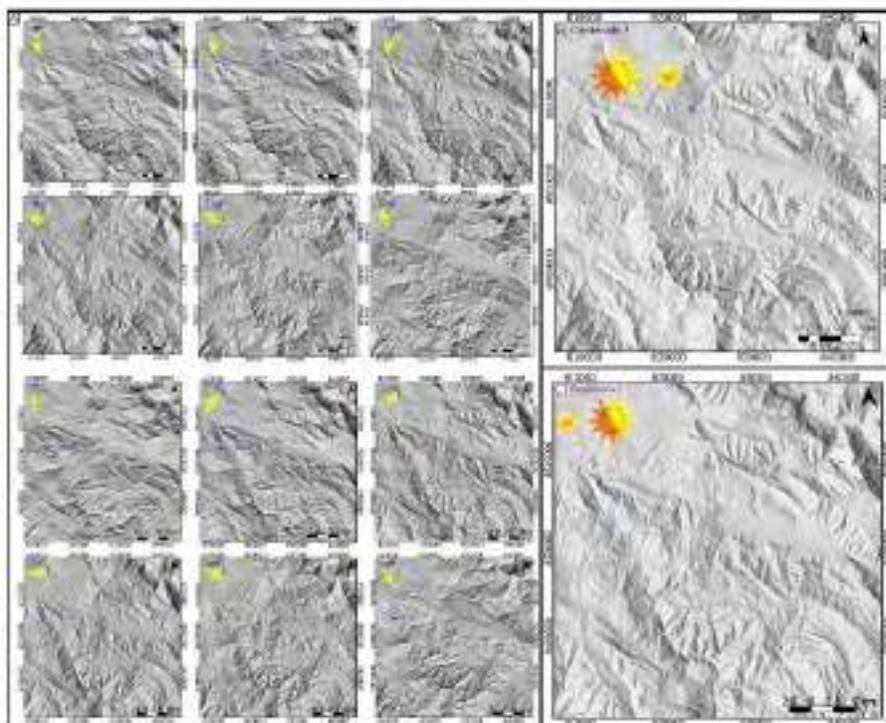


Figura 4. Las doce imágenes ráster sombreadas con una caída de luz constante de 45° y variación de azimut de luz cada 30° (A). Imágenes con iluminación múltiple que resultó de la combinación de imágenes sombreadas: la combinación 1 incluye imágenes sombreadas de $0^\circ - 150^\circ$ (B) y la combinación 2 incluye imágenes sombreadas de 180° a 330° (C).

2.5 Mapa de Imagen de Relieve Rojo (RRIM):

Utilizamos un DEM como mapa base para los mapas derivados que se realizan con el fin de identificar posibles fallas.

El RRIM es una multiplicación de tres capas de elementos de relieve, pendiente topográfica, apertura positiva y apertura negativa. La apertura positiva y negativa fue definida por Yokoyama (2002). La apertura negativa representa la concavidad de la superficie como valles y la apertura positiva representa la convexidad de la superficie como crestas, para generar estas imágenes de apertura positiva y negativa se usó el software SAGA GIS 7.9.0.

La parte principal de RRIM es la definición de un nuevo parámetro calculado a partir de dos parámetros de apertura como a continuación: $I = (O_p - O_n)/2$

Donde O_p es apertura positiva, O_n es apertura negativa. O_p y O_n son esquemáticamente para valores menores de 90 grados. I es un límite radial de cálculo para puntos elegidos en un DEM y generado en el software SAGA GIS 7.9.0. El parámetro anterior elimina de manera eficiente la dependencia de la dirección de la luz incidente, que expresa convexidad y concavidad al mismo tiempo.

En este método de visualización, la fusión de la pendiente topográfica generada en el software SAGA GIS 7.9.0 y la tasa de apertura crea el RRIM, esta superposición de imágenes para crear dicha visualización se genera en el software QGIS 3.4.12. Según Chiba et

al. (2008) el color rojo tiene el tono más rico para los ojos humanos, especialmente en el espacio de color orientado a la computadora. Cabe señalar que RRIM representa de manera efectiva una característica terrestre a gran escala, así como una estructura fina al mismo tiempo, en una amplia variedad de situaciones topográficas, pero no incluye información sobre la elevación y dirección de la pendiente. Pero se puede hacer uso de un mapa de contornos que complementaría esta información y la haría más eficiente (Ózpolat et al., 2020) como se observa en la Figura 5, donde muestra el procedimiento de producción de RRIM y sus elementos de relieve.

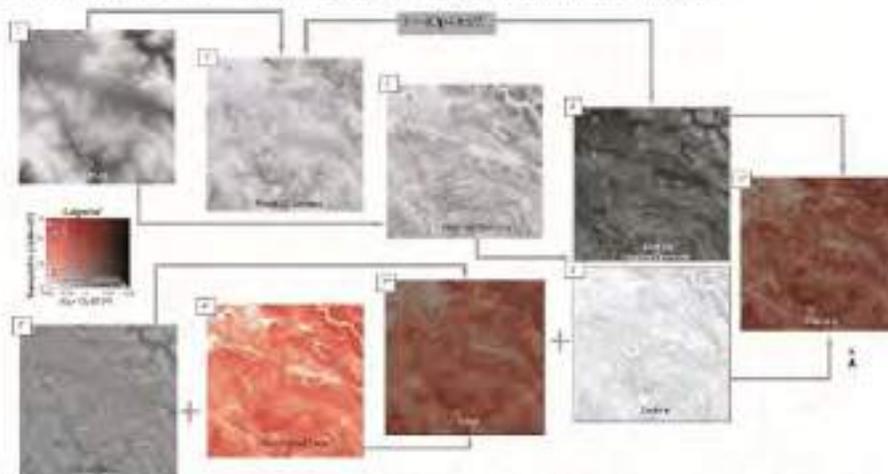


Figura 5. Pasos de producción de Red Relief Image Map (RRIM) propuestos por Chiba et al. (2008).

Así también esta Figura 5 aparte de dar a conocer los pasos de producción del Mapa de imagen de Relieve Rojo (RRIM), muestra de manera puntual un diagrama de color del método RRIM. En donde la pendiente topográfica tendrá el valor cromático de rojo (eje y) y $(O_p - O_n)/2$ se muestra como brillo (eje x). Como resultado, la parte superior de las crestas están de color blanco, la parte inferior de los valles de color negro, las pendientes pronunciadas tienen un rojo brillante y las superficies planas se muestran en gris en RRIM, el RRIM representa eficazmente la estructura topográfica fina incluso en la superficie plana (Chiba et al., 2008; Chiba & Hasi, 2016). El procedimiento es detallado en la tabla 2.

2.6 OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LINEAMIENTOS ESTRUCTURALES:

Los lineamientos estructurales se generaron de forma manual y la dirección de los lineamientos estructurales se determinan usando la calculadora de campo en el software QGIS 3.4.12 con la siguiente fórmula:

```
"degrees(azimuth(start_point($geometry), end_point($geometry)))"
```

Con las direcciones de los lineamientos estructurales se realizaron gráficos de rosetas, haciendo uso del software Stereonet 11.3.0 (Allmendinger et al., 2012) y gráficos de histogramas, haciendo uso del software OpenStereo 0.1 (Grohmann et al., 2011); y a partir de estos gráficos se determinaron las tendencias generales de los lineamientos.

Tabla 2. Procedimientos para realizar las técnicas de realce de relieve en este estudio.

MÉTODO	DETERMINAR	PROCEDIMIENTO
Sombreado multidireccional	Mapa de sombras Multidireccional (Hillshade)	QGIS: Raster—Análisis—MDT (Modelos de Terreno)-Hilidade (Multidireccional).
Sombreado con variación de la luz cada 30° de 0° a 330°	Mapa de Sombras (Hilidade)	QGIS: Raster—Análisis—MDT (Modelos de Terreno)-Hilidade (Cada 30°).
Sombras combinadas	Combinado 1 (0°-30°-60°-90°-120°-150°)	QGIS: (Caja de herramientas—SAGA—Raster tools—Mosaic raster layers)
	Combinado 2 (180°-210°-240°-270°-300°-330°)	
Mapa de Imagen de Relieve Bajo (BRDB)	Apostas Positivas y Negativas	SAGA GIS: (Terrain Analysis—Lighting Visibility—Topographic Operations)
		SAGA GIS: (Mapa de valores (Grid—Calculos—Grid Calculator).
	Pendientes	SAGA GIS: (Terrain Analysis—Morphometry—Slope, Aspect, Curvature).
	Curvas de Nivel	SAGA GIS: Fuente de Datos (Grid—Filter—Resampling Filter).
	Curvas de Nivel	QGIS (Raster—extracción—curvas de nivel).

III. RESULTADOS

3.1 Sombreado Multidireccional:

Se lograron determinar 745 lineamientos estructurales y 4 tendencias (Figura 6). Estas tendencias son las siguientes:

- Tendencia 1 (T1) es 024°.
- Tendencia 2 (T2) es 137°.
- Tendencia 3 (T3) es 174°.
- Tendencia 4 (T4) es 062°.

3.2 Sombreado con variación de la luz cada 30° de 0° a 360°:

Se lograron determinar 1173 lineamientos estructurales y 3 tendencias (Figura 7). Estas tendencias son las siguientes:

- Tendencia 1 (T1) es 005°.
- Tendencia 2 (T2) es 133°.
- Tendencia 3 (T3) es 050°.

3.3 Sombreado Combinado 1 (0°, 30°, 60°, 90°, 120° y 150°) y Combinado 2 (180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°).

Del combinado 1 (C1) se logró determinar 736 lineamientos estructurales y 4 tendencias (Figura 8). Estas tendencias son las siguientes:

- Tendencia 1 (T1) es 113°.
- Tendencia 2 (T2) es 153°.
- Tendencia 3 (T3) es 035°.
- Tendencia 4 (T4) es 010°.

Del combinado 2 (C2) se logró determinar 749 lineamientos estructurales y 4 tendencias (Figura 9). Estas tendencias son las siguientes:

- Tendencia 1 (T1) es 000°.
- Tendencia 2 (T2) es 147°.
- Tendencia 3 (T3) es 113°.
- Tendencia 4 (T4) es 035°.

3.4 Mapa de Imagen en Relieve Rojo (RRIM):

En la zona de estudio el INGEMMET (Instituto Geológico, Mínero y Metalúrgico), ha cartografiado 42 fallas y usando esta metodología se reconocieron 97 posibles fallas, siendo en total 139 estructuras geológicas, se determinaron 4 tendencias (Figura 10):

- Tendencia 1 (T1) es 148°.
- Tendencia 2 (T2) es 122°.
- Tendencia 3 (T3) es 094°.
- Tendencia 4 (T4) es 055°.

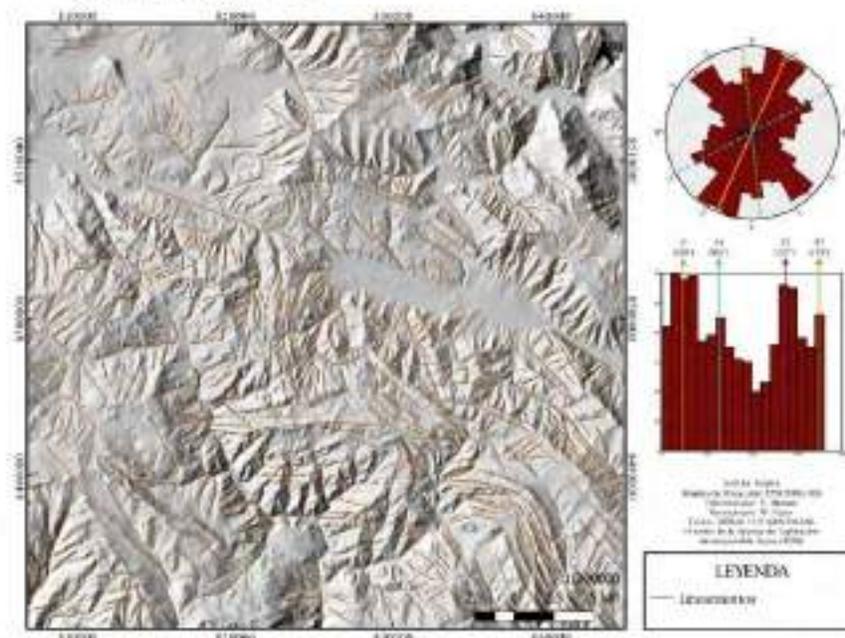


Figura 6. Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras Multidireccional. Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 024°, T2: 137°, T3: 174°, T4: 062°.

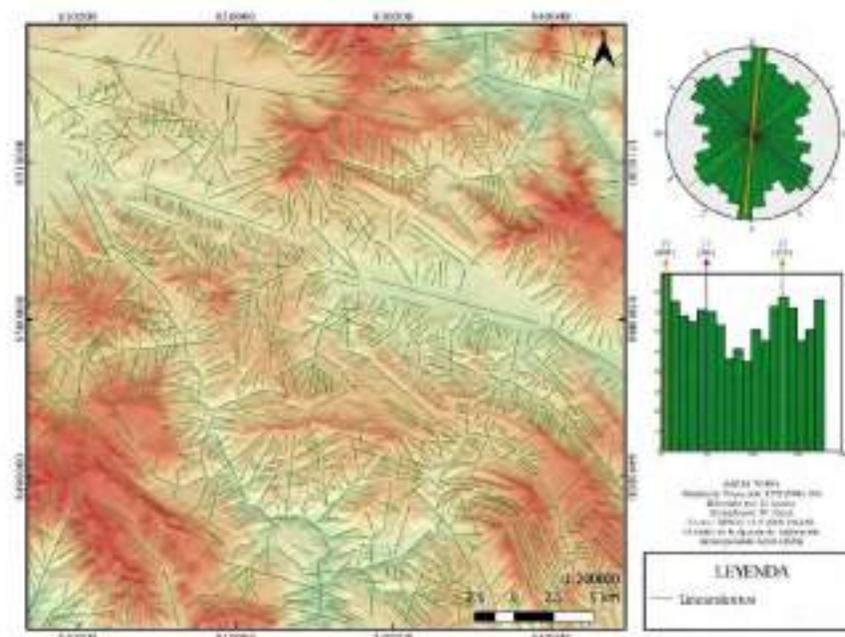


Figura 7. Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras con variación de la luz cada 30° de 0° a 360°. Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 005°, T2: 133°, T3: 050°.

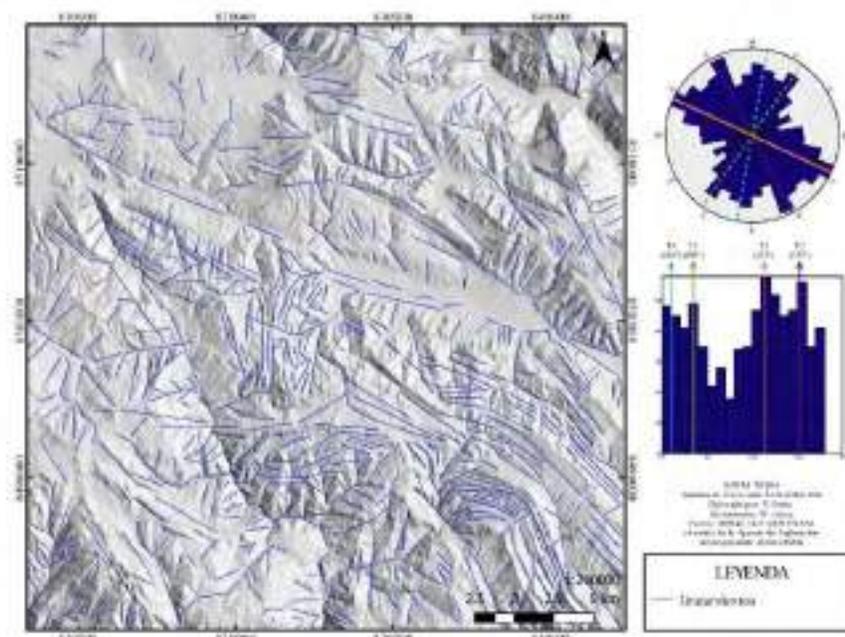


Figura 8. Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras "Combinado 1" (0°, 30°, 60°, 90°, 120° y 150°). Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 113°, T2: 153°, T3: 035°, T4: 010°.

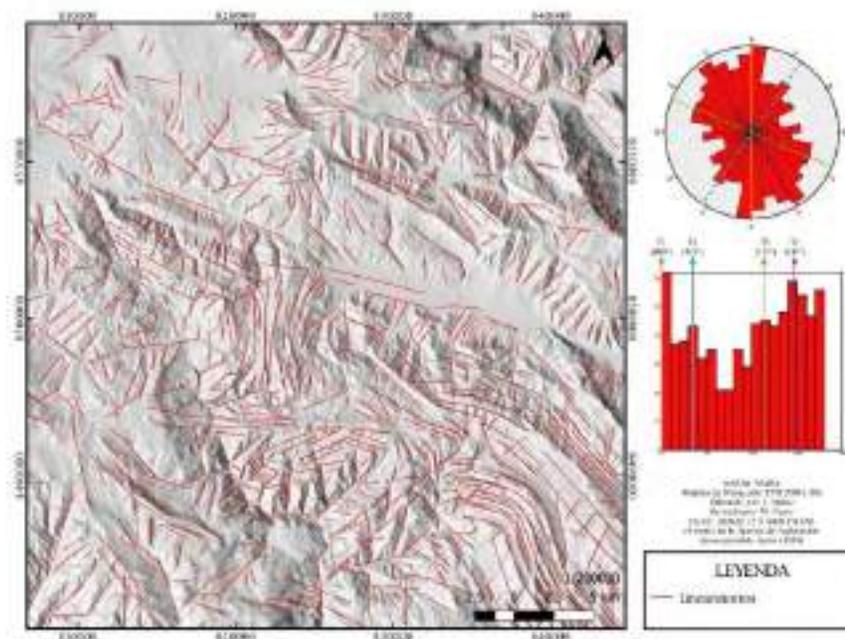


Figura 9. Lineamientos determinados a partir de un Mapa de sombras "Combinado 2" (180°, 210°, 240°, 270°, 300° y 330°). Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 000°, T2: 147°, T3: 113°, T4: 035°.

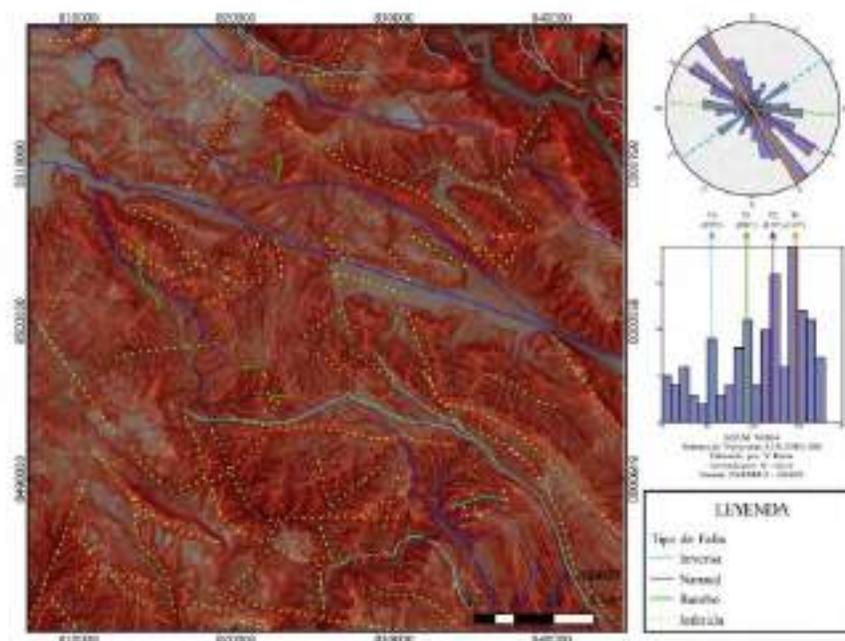


Figura 10. Fallas inferidas determinadas a partir de un Mapa de Imagen en Relieve Rojo. Los gráficos de la derecha muestran las tendencias T1: 148°, T2: 122°, T3: 094°, T4: 055°.

IV. DISCUSIONES

En la figura 11A se muestra el gráfico de rosetas e histograma de las fallas cartografiadas por INGEMMET, donde se resalta las tendencias de las estructuras regionales principales y es la información base sobre el cual parte nuestro trabajo.

La obtención de los lineamientos estructurales por la técnica del sombreado multidireccional (Figura 11C) refleja una tendencia promedio de estructuras regionales en la zona de estudio como son: T2 (137°) respecto a las fallas regionales Cusco (112°), Tambomachay y Qoricocha (122°), y Casacunca, San Juan de Quilhuas y Paruro (150°). Se lograron también reconocer tres tendencias adicionales T1 (024°), T3 (062°) y T4 (174°), las cuales indican que nos resalta el promedio de las estructuras regionales y se determinan otras estructuras que posiblemente son secundarias en nuestra zona de estudio.

La obtención de los lineamientos estructurales por la técnica de sombreado por variación de la luz cada 30° de 0° a 330° (Figura 11D) refleja una tendencia promedio de estructuras regionales en la zona de estudio como son: T2 (133°) respecto a las fallas regionales Cusco (112°), Tambomachay y Qoricocha (122°), y Casacunca, San Juan de Quilhuas y Paruro (150°). Se lograron también reconocer dos tendencias adicionales T1 (005°) y T3 (050°), las cuales indican que nos resalta el promedio de las estructuras regionales y se determinan otras estructuras que posiblemente son secundarias en nuestra zona de estudio.

La obtención de los lineamientos estructurales por la técnica de sombras combinadas C1 (Figura 11E) y C2 (Figura 11F) son muy similares en tendencias, pero no en la cantidad de datos por tendencia, T1 (113°) de C1 es equivalente a T3 (113°) de C2, T2 (153°) de C1 es equivalente a T2 (147°) de C2, T3 (035°) de C1 es equivalente a T4 (035°) de C2 y T4 (010°) de C1 es equivalente a T1 (001°). Además, T1 (113°) de C1 y T3 (113°) de C2 es equivalente a la falla regional Cusco (112°), T2 (153°) de C1 y T2 (147°) de C2 es equivalente a las fallas regionales Casacunca, San Juan de Quilhuas y Paruro (150°), lo que nos resalta de una manera confiable las estructuras regionales y se determinan otras estructuras que posiblemente son secundarias en nuestra zona de estudio.

El realce de estructuras geológicas por el método RRIM (Figura 11B) resalta tanto en cantidad y tendencia las fallas regionales, T1 (148°) es equivalente a las fallas regionales Casacunca, San Juan de Quilhuas y Paruro (150°); T2 (122°) es equivalente a las fallas regionales Tambomachay y Qoricocha (122°). Además, se reconocieron dos posibles tendencias de fallas T3 (094°) y T4 (055°).

Se lograron encontrar 6 tendencias generales (Tabla 3 y Figura 12), de las cuales las fallas regionales son las que se pueden observar en todas las tendencias obtenidas en los diferentes procesos en TG1 (100°-130°) y TG2 (130°-160°). La tendencia general TG3 (080°-100°) solo se observa en el RRIM y es importante porque nos resalta posibles fallas. La tendencia general TG4 (170°-180°/ 000°-020°) que es norte-sur se presenta en todos los métodos donde se obtuvieron los lineamientos estructurales. La tendencia TG5 (020°-040°) se resalta en los métodos de lineamientos obtenidos como son: sombreado múltiple y sombras combinadas (C1 y C2). La tendencia TG6 (050°-070°) resalta las posibles fallas obtenidas de RRIM y estas a su vez se encuentran representadas en los lineamientos obtenidos por sombreado multidireccional y sombreado cada 30° de 0° a 330°.

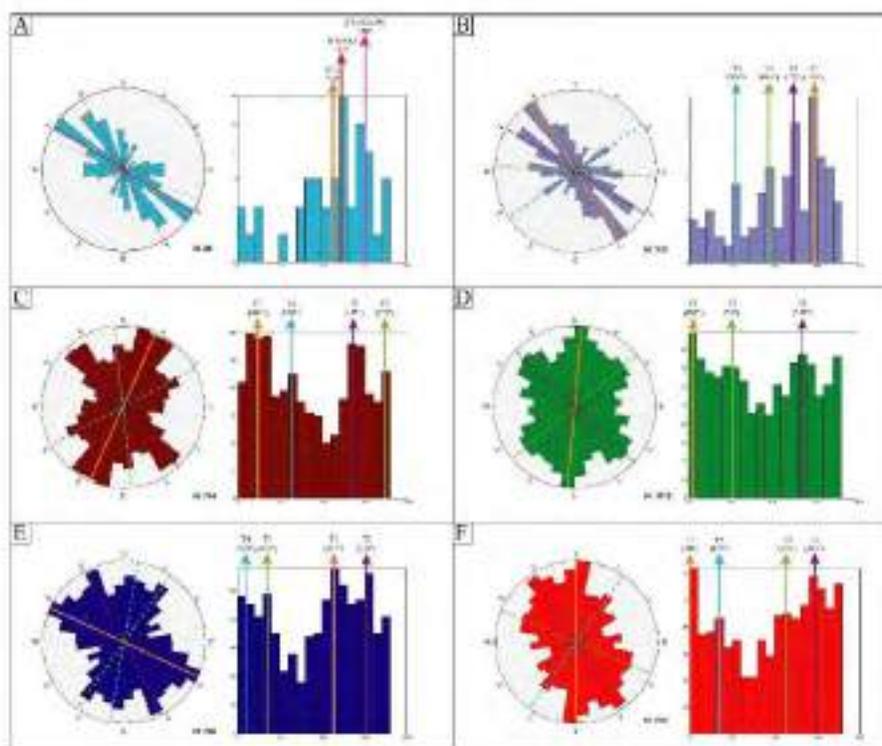


Figura 11. Gráficos de rosetas e histogramas obtenido de las fallas cartografiadas por INGEMMET (A); RRIM (B); sombreado multidireccional (C); sombreado cada 30° de 0° a 330° (D); sombreado combinado 1 (E) y combinado 2 (F).

Tabla 3. Tendencias generales y sus intervalos

TENDENCIAS GENERALES	INTERVALOS
TG1	110°-130°
TG2	130°-160°
TG3	080°-100°
TG4	170°-180° / 000°-020°
TG5	020°-040°
TG6	050°-070°

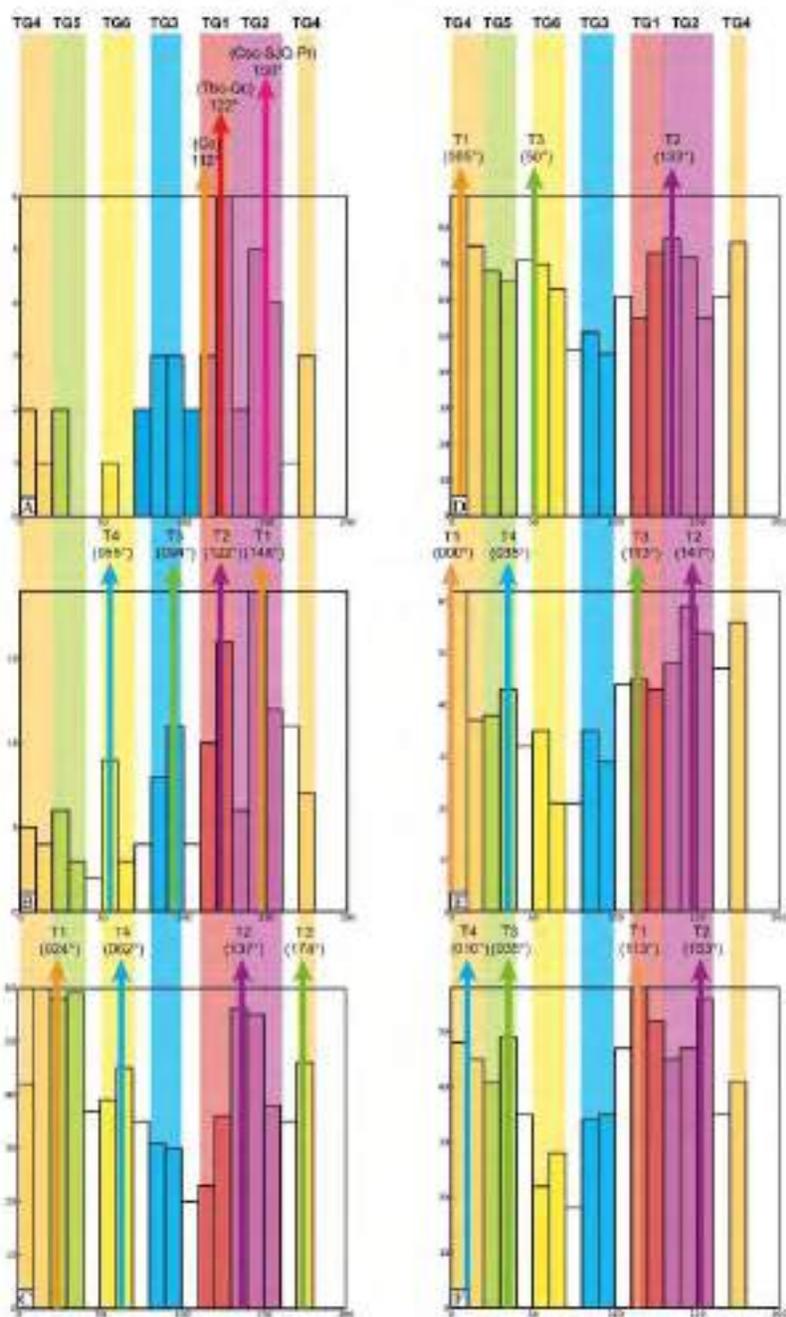


Figura 12. Histogramas de los diferentes métodos y su relación con las tendencias generales. INGEMMET (A); RRIM (B); sombreado multidireccional (C); sombreado cada 30° de 0° a 330° (D); sombreado combinado 2 (E) y combinado 1 (F).

V. CONCLUSIONES

- Se utilizaron tres técnicas para identificar lineamientos estructurales: Sombreamiento multidireccional, sombreado con variación de la luz cada 30° y sombras combinadas (C1 y C2); mediante el uso de software libres y de código.
- Con el método RRIM, se han definido con mayor precisión fallas regionales y locales que identificó INGENMET; así mismo se identificaron otras estructuras geológicas que posiblemente son fallas con tendencia TG3 (130°-160°).
- En la zona de estudio se determinaron 6 tendencias generales: TG1 (110°-130°), TG2 (130°-160°), TG3 (80°-100°), TG4 (170°-180°/0°-20°), TG5 (20°-40°) y TG6 (50°-70°).
- Los resultados obtenidos mediante los métodos utilizados se complementan y en todas las técnicas realizadas se pueden apreciar la tendencia de las fallas regionales (TG1 y TG2), pero donde mejor se representa las estructuras regionales es por el método de sombras combinadas (C1 y C2).

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. Ann Ibis Despaigne y al Dr. Willy Gil Rodríguez por sus comentarios, recomendaciones y correcciones al manuscrito.

VII. REFERENCIAS

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C., Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 289 págs.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511920202>
- Benavente, C.; Delgado, F.; Taipe, E.; Andin, L. & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región del Cusco, INGENMET. *Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico*, 55, 245 p.
<https://repositorio.ingenmet.gob.pe/handle/20.500.12544/296>
- Cabrera, J. (1988) - *Neotectonique et sismotectonique dans la Cordillère Andine au niveau du changement de géométrie de la subduction: la région de Cusco, Pérou*. Thèse Docteur 3ème cycle, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, 275 p.
<http://www.theses.fr/1988PA112234>
- Carlotto, V.; Gil, W.; Cárdenas, J. & Chávez, R. (1996). Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 65, 245 p.
<https://repositorio.ingenmet.gob.pe/handle/20.500.12544/187>
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Carlier, G. (2011). Geología del cuadrángulo de Cusco, hoja 28-s, escala 1:50,000. *INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional*, 138, 255 p. 6 mapas. <https://repositorio.ingenmet.gob.pe/handle/20.500.12544/99>
- Chiba, T., Kaneta, S.I., Suzuki, Y. (2008). Red relief image map: New visualization method for three dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B2), 1071-1076.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.644.2038&rep=rep1&type=pdf>
- Chiba, T., Hasi, B. (2016). Ground surface visualization using red relief image map for a variety of map scales. "The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences": Vol. XLI-B2, 393-397.
<https://pdfs.semanticscholar.org/8417/965b7eea4ef15e9890488453b3e7150d461a.pdf>

- Grohmann, C.H., Campanha, G.A.C., Soares, J.A.V. (2011). Openstereo: um programa livre e multiplata forma para análise de dados estruturais. In: Simp. Nac. Est. Tectônicos, 13, Campinas, 2011 e Intern. Simp. on Tectonics, 7, Campinas, 2011. Anais VIII SNET, Campinas: SBG/NE, 26-28. http://igc.usp.br/openstereo/wp-content/uploads/sites/18/2018/11/Grohmann_etal_2011_13SNET_openstereo.pdf
- Mader, D., Schenk, B. (2017). Using Free/Libre and Open Source Software in the Geological Sciences: *Austrian Journal of Earth sciences*, 110(1), 142-161. https://www.univie.ac.at/ajes/archive/volume_110_1/mader_schenk_ajes_110_1.pdf
- Mark, R.K. (1992). A multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island of Hawaii: EE.UU., U.S. Geological Survey Open-file Report, 92-422. <https://doi.org/10.3133/ofr92422>
- Oliveira, D.B., Moreno, R.S., Miranda, D.J., Ribeiro, C.S., Seoane, J.C.S., Melo, C.L. (2009). Elaboração de um mapa de lineamento estrutural e densidade de lineamento através de imagem SRTM, em uma área ao norte do rio Doce, ES. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14. (SBSR), Natal. Anais. São José dos Campos: INPE, 4157-4163. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.23.12/doc/4157-4163.pdf?languagebutton-pt-BR>
- O'Leary, D.W., Friedman, J.D., Pohn, H.A. (1976). Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms: *GSA Bulletin*, 87, 1463-1469. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLSPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLSPN>2.0.CO;2)
- Özpoat, E., Yıldırım, C., Görüm, T. (2020). The Quaternary landforms of the Büyük Menderes Graben System: the southern Menderes Massif, western Anatolia, Turkey, *Journal of Maps*, 16(2), 405-419. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1764874>
- Radaideh, O.M., Grasmann, B., Melichar, R., Mosar, J. (2016). Detection and analysis of morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and gis: An example in sw Jordan, *Geomorphology*, 275:58-79 págs. https://doc.rero.ch/record/277730/files/mos_dmf.pdf
- Solano, J.D., Despaigne, A.L., Pearse, J. (2020). Morphotectonic Analysis of the Upper Guajira, Colombia. *A GIS and Remote Sensing Approach: Preprints*, 1, 01-32. <https://www.preprints.org/manuscript/202010.0476/v1>
- Tzvetkov, J. (2018) "Relief visualization techniques using free and open source GIS tools": *Polish Cartographical Review*, 50(2), 61-71. <https://doi.org/10.2478/pcr-2018-0004>
- Yokoyama, R., Shitasawa, M., Pike, R.J. (2002). Visualizing topography by Openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(3), 257-265. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.451.9798&rep=rep1&type=pdf>