

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**CONTROL ESTRUCTURAL CON EL MODELO RIEDEL EN LA SUBCUENCA
CHANCHE Y SU RELACIÓN CON LOS YACIMIENTOS MINERALES,
CELENDÍN, CAJAMARCA-2022.**

**Para Optar el Título Profesional de:
Ingeniero Geólogo**

Autor:

Bach. Julca Llanos Rosmel

Asesor:

Dr. Rodríguez Cruzado Reinaldo

Cajamarca – Perú

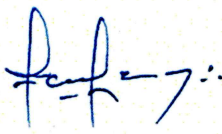

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: ROSMEL JULCA LLANOS
DNI: 70196072
Escuela Profesional: INGENIERÍA GEOLÓGICA
2. Asesor: Dr. SEGUNDO REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO
Facultad: INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
CONTROL ESTRUCTURAL CON EL MODELO RIEDEL EN LA SUBCUENCA CHANCHE Y SU RELACIÓN CON LOS YACIMIENTOS MINERALES, CELENDÍN, CAJAMARCA-2022.
6. Fecha de evaluación: 21 de julio del 2024
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 2%
9. Código Documento: oid: 3117: 369341979
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 31 de julio de 2024

	
<hr/> <p>FIRMA DEL ASESOR</p> <p>Nombres y Apellidos: Dr. SEGUNDO REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO</p> <p>DNI: 26722961</p>	<hr/> <p>UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI</p>

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme guiado todos los días de mi vida, ser mi fortaleza y darme la sabiduría para lograr este objetivo.

A mi Alma Mater, Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica; a todos los docentes que me han proporcionado conocimientos necesarios para mi formación académico y desarrollo profesional.

A mi asesor, Dr. Reinaldo Rodríguez quién me brindó el soporte para la presente tesis profesional.

DEDICATORIA

A mis padres Felipe y Gladys, por su apoyo incondicional y estar allí para darme las fuerzas en seguir adelante y confiar en mi persona.

A mis abuelos Víctor y Aurora, mi hermana Liliana por su amor y ayuda en el transcurso de mi vida.

A toda mi familia y amigos que me ayudaron desinteresadamente para la realización de la tesis.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	3
2.1.1 Internacional	3
2.1.2 Nacionales.....	4
2.1.3 Locales	5
2.2 BASESTEÓRICAS.....	6
2.2.1 Modelo Riedel.....	6
2.2.2 Comportamiento frágil de las rocas	10
2.2.3 Comportamiento dúctil de las rocas.....	20
2.2.4 Esfuerzo.....	22
2.2.5 Yacimientos epitermales.....	23
2.2.6 Yacimientos de tipo pórfido cuprífero	23
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	26

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

	Pág.
3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.1.1 Ubicación Geográfica.....	27
3.1.2 Ubicación Política	27
3.1.3 Accesibilidad.....	27
3.1.3 Unidades Morfogenéticas	29
3.1.4 Geología Local.....	32
3.2 PROCEDIMIENTOS.....	42
3.2.1 Etapa preliminar.....	42
3.2.2 Etapa de campo.....	43
3.2.3 Etapa de gabinete.....	43
3.2.4 Metodología	43
3.2.5 Población de estudio	43
3.2.6 Muestra.....	43
3.2.7 Unidad de análisis.....	44
3.2.5 Técnicas	44
3.2.6 Instrumentos y equipos.....	44
3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	45
3.3.1 Estructuras continuas	45
3.3.2 Estructuras discontinuas.....	48
3.3.3 Fracturas de apertura	51
3.3.4 Fracturas de contracción	53
3.4 YACIMIENTOS MINERALES.....	53
3.4.1 Yacimiento El Galeno (Cu-Au-Mo).....	53
3.4.2 Yacimiento Hilorico (Au-Ag).....	54
3.4.3 Yacimiento Deborah (Au-Ag).....	55

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

	Pág.
4.1 ANÁLISIS DE LA GEOLOGÍA LOCAL.....	56
4.2 ANÁLISIS DE LAS UNIDADES MORFOGENÉTICAS.....	56
4.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	57
4.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON EL MODELO RIEDEL.....	57
4.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON YACIMIENTOS MINERALES.....	58
4.6 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	61

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	62
5.2 RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	64
ANEXOS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fracturas en échelon y fracturas de tensión de un modelo Riedel sinistral (Coelho et al, 2006).	8
Figura 2. Relaciones geométricas entre las distintas estructuras de un modelo Riedel dextral (Valenzuela, 2005).....	8
Figura 3. Block diagrama, vista en sección del fallamiento de rumbo dextral (Asaoka, 2016).	9
Figura 4. Elipsoide de deformación que muestran las diferentes orientaciones de estructuras continuas y discontinuas dentro del modelo de riedel para una falla dextral (rossello, 2009).....	10
Figura 5. Diagramas de bloques que muestran los diferentes tipos de fallas (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).	11
Figura 6. Desplazamiento de bloques para una falla normal (Burg, 2018).....	12
Figura 7. Medición y proyección estereográfica de una estructura (Burg, 2018).....	12
Figura 8. Tectoglifos o indicadores cinemáticos (Macharé, 2001).....	13
Figura 9. Conjuntos de fallas. (a) paralelas, (b) anastomosado, (c) echelon, (d) relay, (e) conjugadas y (f) aleatorias (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).....	15
Figura 10. Estructuras asociadas a la falla de rumbo dextral, vista en planta (Blick, 1985).	16
Figura 11. a. Estructura en flor negativa, fallas transcurrentes extensionales. b. Estructura en flor positiva, fallas transcurrentes compresionales (Rossello, 2009).	16
Figura 12. Orientación de varios tipos de fracturas con respecto a los esfuerzos principales (Fossen, 2010).....	17
Figura 13. Conjuntos de venas. (a) Grupo de venas planas. (b) Grupo de venas en stockwork. El relleno de vena es oscuro. (c) Formación de un grupo simple en echelon. (d) Formación de venas sigmoidales en echelon (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).	18

Figura 14.	Tipos de relleno de venas. a. Relleno de vena en bloque. b. Relleno de vena fibroso (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).	19
Figura 15.	Relación de perpendicularidad de estilolitos vs esfuerzo principal máximo, una vena de tensión, superficie de una junta estilolítica (Martínez, 2003).	19
Figura 16.	Elementos geométricos de estratos plegados. a. pliegue simétrico. b. pliegue volcado (Oyarzún, 2012).	20
Figura 17.	a. Pliegues de anticlinal. b. sinclinal (Oyarzún, 2012).	21
Figura 18.	Pliegues abiertos (a), inclinados (b) y tumbados (c) (Oyarzún, 2012).	21
Figura 19.	Plegamiento de acuerdo al ángulo entre limbos o flancos (Oyarzún, 2012).	22
Figura 20.	Esfuerzos principales y tipo de falla (Burg, 2018).	22
Figura 21.	Modelo conceptual para yacimientos epitermal Au-Ag y pórfido Cu-Au (Corbett, 2009).	25
Figura 22.	Accesibilidad de Cajamarca hacia la Subcuenca Chanche (Google Maps, 2024).	28
Figura 23.	Columna estratigráfica local (Heras, 2017).	60

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1.	Vista al NO; Laguna El Milpo con geoformas de planicies constituidos por depósitos cuaternarios aluviales y fluviales (Q-al/fl) cerca al yacimiento mineral El Galeno. Coordenadas N- 9227987. E-797237.....30
Foto 2.	a. Vista al SE; planicies cercano al cerro Punre Viejo, constituidos por depósitos aluviales (Q-al) y fluviales (Q-fl). N- 9223600. E- 799202. b. Con vista al NE; Planicies afectado por la quebrada El Carbón. Coordenadas N- 9225181. E-797237.....30
Foto 3.	Vista al SO; lomada formada por depósitos aluvial-coluial (Q-al/co) y rocas calcáreas en el sector Santa Rosa de Milpo. Coordenadas N- 9229109. E- 797365.....31
Foto 4.	Vista al SE; laderas en el sector Chim Chim. Coordenadas N- 9222442. E- 799142.....31
Foto 5.	a. Vista al NE; escarpes en la cumbre del cerro Punre Viejo, conformado por estratos de la Formación Farrat. N- 9223624. E- 799695. b. Vista al NO; cerro La Boya con rocas de la Formación Chimú. Coordenadas N- 9224439. E- 801067.32
Foto 6.	Vista al NO; estratos de la Formación Chimú en el flanco Oeste del anticlinal El Galeno. Coordenadas N- 9225483. E- 798412.33
Foto 7.	Vista al NE; Formación Santa (Ki-sa) cubierto por depósitos cuaternarios aluviales y fluviales (Q-al/fl) en el sector El Lago. Coordenadas N- 9225005. E- 800858.....34
Foto 8.	Vista al SO; Formación Carhuaz en el tramo de carretera El Punre-Michiquillay. Coordenadas N- 9222374. E- 799173.34
Foto 9.	Vista al SO; Formación Carhuaz en el tramo de carretera El Punre-Michiquillay. Coordenadas N- 9222537. E- 799090.35
Foto 10.	Vista al SO; Formación Farrat situado al suroeste del centro poblado El Punre. Coordenadas N- 9222007. E- 799466.35
Foto 11.	Vista al SE; Formación Farrat al norte del centro poblado de Chim Chim Coordenadas N- 9223587. E- 799738.....36

Foto 12.	Vista al NO; afloramiento de areniscas e intercalación de limolitas, ubicado hacia el Este del centro poblado Chim Chim. Coordenadas N- 9220550. E- 803829.....	37
Foto 13.	Vista al NO; Formación Chúlec ubicado al suroeste del centro poblado de Chim Chim. N- 9220809. E- 802752.....	37
Foto 14.	Vista al SE; calizas ubicadas al sur del Punre. N- 9220615. E- 803775.	38
Foto 15.	Vista al NO; rocas calcáreas del Grupo Pulluicana en el tramo carretera Hilorico-Sartenes. Coordenadas N- 9229361. E- 797494.	38
Foto 16.	Vista al NO; cerro Condorcana formado por rocas volcánicas que suprayacen a las calizas del Grupo Pulluicana, al sur del centro poblado Quengomayo. Coordenadas N- 9227784. E- 800847.	39
Foto 17.	Vista al SO; Depósitos coluvio-aluviales, quebrada Carbón, carretera Punre. Coordenadas N- 9224493. E- 799342.....	40
Foto 18.	Vista al SE; Formación Farrat, roca hipabisal diorita porfirítica y Formación Chimú al sur de centro poblado El Punre. Coordenadas N- 9224169. E- 799618.....	41
Foto 19.	Vista NO; Formación Farrat en contacto con roca hipabisal en el tramo de carretera Quinuamayo-Michiquillay. Coordenadas N- 9222131. E- 799335.....	41
Foto 20.	Vista al SE; anticlinal El Galeno en el cerro La Boya. A. Proyección estereográfica que se muestra el σ_1 (flechas rojas), con orientación NE-SO y plunge de 18° (punto verde). Coordenadas N- 9225098. E- 799710.....	46
Foto 21.	Anticlinal El Galeno atravesando con orientación NO-SE la Subcuenca Chanche (línea amarilla) además dicha estructura origina los cerros Milpo y La Boya; proyecciones estereográficas de sus flancos derecho e izquierdo.	47
Foto 22.	Vista al SE; pliegue sinclinal afectando la Formación Chimú en el sector Punre. Coordenadas N- 9225607. E- 800111.	48

Foto 23.	Vista al NE; Falla Regional Punre-Canchis-Magistral de comportamiento inverso (línea celeste) entre la Formación Farrat y el Grupo Pulluicana; cerca al yacimiento Hilorico. Coordenadas N- 9228335. E- 797519.....	49
Foto 24.	a. Vista al SE; plano de una falla dextral. b. Vista al NE; falla inversa e indicadores cinemáticos cristalizados en forma de escalones de calcita, las flechas indica el desplazamiento de falla. Coordenadas N- 9228335. E- 797519.....	49
Foto 25.	a. Vista al NO; falla inversa con orientación NO-SE. b. Vista al SE; fallas paralelas a la Falla Regional, en el sector Punre Viejo. Coordenadas N- 9223808. E- 799541.....	50
Foto 26.	Vista al NE; cerro El Lago afectado por una falla dextral de NE-SO y fracturamiento a los estratos de la Formación Chimú; la proyección estereográfica indica que σ_3 tiene orientación N-S y σ_1 es E-O. Coordenadas N- 9225203. E- 799052.	51
Foto 27.	Venas rellenas por minerales sulfurados (pirita y calcopirita) y óxidos de hierro. Coordenadas N- 9226580. E- 797354.	52
Foto 28.	Vista al NE; venas rellenas por calcita del Grupo Pulluicana. b. Esfuerzos compresionales σ_1 (flecha roja). c. Fallamiento dextral (línea verde) y sinistral (línea roja) afecta las venas de calcita; carretera Sartenes. Coordenadas N- 9229329. E- 797484.	52
Foto 29.	a. Vista al NO; estilolitos en rocas calcáreas del grupo pulluicana al norte de santa rosa de milpo. b. sinuosidad de la sutura y óxidos de hierro con arcilla. coordenadas N- 9229328. E- 797321.	53
Foto 30.	Yacimiento El Galeno y las formaciones en donde está emplazado. coordenadas N- 9227911. E- 797199.....	54
Foto 31.	Yacimiento mineral Hilorico y la falla el Punre-Canchis-Magistral. N- 9228326. E- 797416.....	54
Foto 32.	Vista al NO; yacimiento Deborah. a. brechas con óxidos de hierro. b. estratos de areniscas intercaladas con limolitas al sur del centro poblado El Punre. N- 9228326. E- 797416.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.	Acceso al área de investigación.....27
Tabla 2.	Clasificación de Unidades Morfogenéticas.....29
Tabla 3.	Descripción del tipo de roca de la Formación Chimú.33
Tabla 4.	Descripción de minerales de la Formación Farrat.36
Tabla 5.	Descripción de la roca del volcánico San Pablo.....39
Tabla 6.	Descripción del tipo de roca hipabisal.42
Tabla 7.	Descripción del tipo de roca de la Formación Farrat.42

LISTA DE ABREVIATURAS

Pág.	:	Página
Fm	:	Formación.
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
WGS-84	:	World Geodetic System 1984.
GPS	:	Sistema de Posicionamiento Global.
INGEMMET	:	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
MDE	:	Modelo Digital de Elevaciones.
SIG	:	Sistema de Información Geográfica.
SE	:	Sur Este.
NO	:	Nor Oeste.
SO	:	Sur Oeste.
NE	:	Nor Este.
Falla R	:	Falla Riedel.
Falla R´	:	Falla Anti-Riedel.
Falla Y	:	Falla Maestra.
Falla T	:	Falla de Tensión.
Falla P	:	Falla Secundaria.
σ_1	:	Esfuerzo Principal Mayor.
σ_2	:	Esfuerzo Principal Intermedio.
σ_3	:	Esfuerzo Principal Menor.

RESUMEN

La investigación se encuentra delimitada por la Subcuenca Chanche, ubicada entre los distritos de Sorochuco y Sucre, provincia de Celendín, departamento de Cajamarca. Litológicamente presenta rocas silíceo-clásticas del Grupo Goyllarisquizga; rocas calcáreas del Grupo Pulluicana, rocas volcánicas e hipabisales del Cenozoico, y la existencia de yacimientos minerales como El Galeno, Hilorico y Deborah los cuales están controlados por la Falla Punre y fallamiento local; teniendo como objetivo definir el control estructural en las rocas sedimentarias, hipabisales y volcánicas considerando el Modelo Riedel y su asociación con los yacimientos minerales; la investigación se realizó siguiendo una metodología de tipo descriptivo, correlacional y transversal; las geoestructuras se ha determinado mediante la obtención de imágenes satelitales con sensoramiento remoto de Sas Planet y se procesó con los programas ArcGIS, Stereonet y Faultkin lo que ha permitido determinar las unidades litoestratigráficas, cinemática de fallas y fracturas así como la dirección de los esfuerzos. El resultado final de la investigación es cartografiado geológico-estructural, interpretación de secciones, el esfuerzo tectónico principal mayor con dirección NE y N-S generador de la Falla Punre, Fallas T (tensión) y pliegue anticlinal que a su vez permitieron el emplazamiento de intrusiones porfiríticas y yacimientos minerales relacionados de acuerdo con el Modelo Riedel.

Palabras Clave: *Esfuerzo, Geoestructura, Tensión, Riedel.*

ABSTRACT

The investigation is delimited by the Chanche Subbasin, located between the districts of Sorochuco and Sucre, province of Celendín, department of Cajamarca. Lithologically it presents silicic-clastic rocks of the Goyllarisquizga Group; calcareous rocks of the Pulluicana Group, volcanic and hypabyssal rocks from the Cenozoic, and the existence of mineral deposits such as El Galeno, Hilorico and Deborah which are controlled by the Punre Fault and local faulting; aiming to define the structural control in sedimentary, hypabyssal and volcanic rocks considering the Riedel Model and its association with mineral deposits; The research was carried out following a descriptive, correlational and transversal methodology; The geostructures have been determined by obtaining satellite images with remote sensing from Sas Planet and processed with the ArcGIS, Stereonet and Faultkin programs, which has made it possible to determine the lithostratigraphic units, kinematics of faults and fractures as well as the direction of the stresses. The final result of the research is geological-structural mapping, interpretation of sections, the major main tectonic stress with NE and N-S direction generating the Punre Fault, T Faults (tension) and anticline fold that in turn allowed the emplacement of porphyritic intrusions and related mineral deposits according to the Riedel Model.

Keywords: *Stress, Geostructure, Tension, Riedel.*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Subcuenca Chanche está caracterizada litológicamente por rocas sedimentarias silíceo-clásticas del Cretácico inferior y rocas calcáreas del Cretácico superior las cuales están afectadas por fallamiento, fracturamiento y plegamiento, además existe rocas hipabisales y volcánicas del Cenozoico; asimismo existe el emplazamiento de yacimientos minerales siguiendo un control geológico-estructural. La Falla Punre, fallas locales y el anticlinal son las geoestructuras que controlan el comportamiento de toda la Subcuenca de acuerdo con el Modelo Riedel. Es por ello que se origina la pregunta: ¿Cuál es el control estructural en las rocas sedimentarias, hipabisales y volcánicas; asimismo su asociación con los yacimientos minerales en la Subcuenca Chanche?

La hipótesis planteada es la siguiente: en el área de investigación existe geoestructuras de fallas, fracturas y pliegues en unidades litoestratigráficas Cretácicas y Cenozoicas, así como las geoformas de planicies, lomadas, laderas y escarpas que presentan un control estructural debido a la influencia de la Falla Punre con orientación NO y fallas menores, dicho comportamiento geológico-estructural está relacionado con el Modelo Riedel el cual a su vez determina la asociación con los yacimientos minerales El Galeno, Hilorico y Deborah.

Se justifica debido a que se busca evidenciar estas relaciones geomorfológicas, estructurales, litológicas y asociación al Modelo Riedel. Estas consideraciones indican que es importante realizar la investigación para demostrar esta asociación de las rocas, geoestructuras con los yacimientos minerales. Además, los resultados servirán como información para futuros programas de exploración geológica-minera en busca de nuevos posibles yacimientos minerales.

Se tiene como objetivos específicos cartografiar e interpretar secciones de las unidades litológicas y estructurales, determinar direcciones de geoestructuras y

esfuerzos, asimismo relacionar el Modelo Riedel con los yacimientos minerales.

En el segundo capítulo se describe el marco teórico, los antecedentes teóricos locales, nacionales e internacionales; bases teóricas del Modelo Riedel, comportamiento frágil y dúctil de las rocas, esfuerzo, yacimientos minerales epitermales y pórfido. En el tercer capítulo se enfoca los materiales y métodos, se encuentra la ubicación y accesibilidad de la investigación, se describió el procedimiento de la investigación. En el capítulo cuatro se muestra el análisis y discusión de resultados, se analizó los resultados de la investigación y la contrastación de la hipótesis. Finalmente, en el capítulo quinto se muestra las conclusiones y recomendaciones, las cuales se encuentran determinadas de acuerdo a los objetivos planteados, y por último las referencias bibliográficas.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1 Internacional

González (2011), en su estudio: “Fracturas de Cizalla Frágil-Dúctil Jurásicas asociadas al distrito Polimetálico Gonzalito, Patagonia, Río Negro”; determinó el modelo de vetas hidrotermales y además propone que el emplazamiento de las mismas es contemporáneo con fracturas de cizalla frágil-dúctil, cuya distribución geométrica, cinemática y cronología relativa es comparable al modelo teórico propuesto por Riedel (1929); asimismo menciona que las vetas presentan cambios locales en la mineralogía y texturas de las rocas caja.

Mondal y Mamtani (2016), en su estudio: “Análisis de Paleoesfuerzos de Fallas Normales en Granito e Implicaciones para Interpretar el Fracturamiento Riedel Relacionado con la Deformación Regional”; concluye que la dirección de paleoesfuerzos de dos conjuntos de fallas (fallas normales dextrales y sinestrales), ambas se formaron bajo la misma dirección de compresión ENE-OSO. Además, la cinemática de las fallas Riedel R, R', P y X son el resultado del movimiento sinistral consecuencia de la deformación regional.

Valenzuela (2005), en su estudio: “Sistemas Riedel del Cenozoico Tardío en Sonora, México”; mediante imágenes satelitales, información geológica y geofísica, determinó tres familias de fallas Riedel a escala regional las cuales controlan estructuralmente fallamiento, mineralización, afloramientos de diferentes tipos de rocas y drenaje tanto en corrientes mayores y menores como el lineamiento del Río Sonora.

Wernert (2019), en su estudio: “Análisis Estructural del Sistema Vetiforme Farallón Negro-Alto De La Blenda, Catamarca”; de acuerdo con el modelo de fallas Riedel R y R´ para un fallamiento normal dextral determinó que la actividad hidrotermal y los megalineamientos con dirección NE-SO y NO-SE son los causantes del emplazamiento del sistema vetiforme con orientación predominante NO-SE; asimismo la presencia de stockworks y brechas que son estructuras dilatacionales son espacios para la precipitación de minerales preciosos, sílice, carbonatos y sulfuros.

2.1.2 Nacionales

Leiva (2021), en su tesis: “Geología Estructural y su relación con el emplazamiento de Cuerpos Intrusivos aflorantes en el litoral marino al Sur de Lima entre los paralelos S12.33°-S12.47°”, determinó que estructuras relacionadas con el emplazamiento de cuerpos intrusivos son fallas trans-tensionales con tendencias principales de NO-SE, NE-SO y O-E y en ellas existe el emplazamiento de diques con dichas orientaciones.

Torres (2020), en su estudio: “Mega Sistema Estructural Cajamarca, configuración Estructural sugerida en relación con la mineralización de Pórfidos y Epitermales en el Norte del Perú”; determinó que los yacimientos tipo pórfido (Cu-Au y Cu-Mo) y epitermales (Au), presentan relación temporo-estructural asociados a magmatismo del Neógeno con edades desde 24 Ma a 7 Ma; asimismo los mega controles estructurales como Falla Punre-Canchis, sistemas estructural Marañón, fallas al Este de Chongoyape controlaron estructuralmente los yacimientos del Norte del Perú; propone la denominación Mega Sistema Estructural Cajamarca con cinemática sinistral compresivo y de dirección andina.

Torres et al. (2012), en su estudio: “Tectónica Transcurrente Extensiva en el área de Negritos, cuenca Talara, Perú”; concluye que dicha área está caracterizada por sistema de fallas trascurrentes con orientación NO-SE y buzamientos subverticales de edad Eoceno Superior, formando varios sistemas de fracturas de acuerdo al Modelo Riedel.

2.1.3 Locales

Davies (2002), en su tesis doctoral: “Evolución Tectónica, Magmática y Metalogénica del distrito minero de Cajamarca, Norte del Perú” realizó estudios geológico-estructural y geoquímica de diferentes rocas hipabisales y volcánicas de los yacimientos minerales La Carpa, El Galeno y Minas Conga; asimismo concluye que las fallas y fracturas en la región muestran una rotación en sentido antihorario de tendencia NE con movimiento dextral en unidades litológicas más antiguas, mientras que las fallas NO tienen desplazamiento sinistral en las unidades más jóvenes; además determinó que el principal control estructural de los yacimientos minerales a nivel regional fue la Falla Punre-Canchis y todo su sistema de fallas asociados.

Chuquiruna (2009), en su tesis: “Caracterización Estratigráfica y Estructural de la Subcuenca Chonta–Cajamarca; mediante aplicaciones SIG”; con el análisis de imágenes satelitales, información geológica y topográfica concluye que estructuras comprensivas durante el Cretácico afectaron casi la totalidad de la subcuenca existiendo dos fases de deformación, en el Aptiano superior y Cenomaniano medio, asociado a un Modelo Riedel con cinemática sinistral. Además, existe una extensión de la falla La Quinoa NO de Mina Yanacocha y la falla NE que es otra de las fallas regionales identificadas; asimismo los afloramientos rocosos se encuentran afectados por lineamientos estructurales, que están integrados y analizados mediante herramientas SIG.

Heras (2017), en su tesis: “Estudio de las Estructuras de emplazamiento de cuerpos ígneos plutónicos entre la comunidad de Michiquillay y el sector Punre”; realizó cartografiado geológico en el cual se identificaron cinco pórfidos cuarzodiorita intruyendo a secuencias sedimentarias del Cretácico superior e inferior, constituyendo una franja con rumbo NO-SE paralelos a la Falla Punre-Canchis y cuyas fallas asociadas serían el principal control estructural para el emplazamiento magmático; además, determinó que las intrusiones iniciales se emplazarían de manera discordante a modo de dique en aquellas formaciones geológicas cuya litología presenta mayor resistencia como en las Formaciones Chimú y Farrat, cambiando su emplazamiento en capas débiles de rocas en las que

el magma se emplazaría de manera concordante, configurando estructuras tipo sill, en las formaciones geológicas que presentan menor resistencia como las Formaciones Santa, Carhuaz, Inca, Chúlec y Mujarrún.

Requelme (2021), en su tesis: “Caracterización Estructural del Sinclinal de Lullapuquio y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc, Cajamarca”, su objetivo fue conocer las estructuras que controlan el yacimiento mineral tipo pórfido de Au-Cu para lo cual analizó las estructuras mediante los softwares Stereonet, Dips y Faultkin; asimismo determinó la geometría del plegamiento, fracturas y fallas; como la orientación de los paleoesfuerzos principales que provocaron la deformación. Concluye que el Sinclinal Lullapuquio tuvo dos mecanismos de deformación (flexión ortogonal y deslizamiento por flexión); y las fallas con desplazamiento normal-sinistral de rumbo regionales, siendo estas las que controlan la intrusión del pórfido Colpayoc.

Sánchez (2012), en su tesis: “Determinación de los vectores de mineralización y zonamiento de alteraciones hidrotermales del proyecto Shahuindo”, menciona que la mineralización está asociada a zonas de brechas en los contactos entre areniscas y limolitas del Cretácico inferior con intrusivos de composición dacítica de edad Terciaria. La mineralización aurífera tiene dos controles que es el estructural y litológico, siendo el primero los ejes de anticlinales con rumbo andino y la alteración hidrotermal; así mismo determina dos tipos de depósitos polimetálico y pórfido.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Modelo Riedel

La fracturación de las rocas son discontinuidades producidas por esfuerzos tectónicos denominados σ_1 , σ_2 y σ_3 ; asimismo existen modelos de fracturamiento realizados por Cloos (1928) y Riedel (1929) que los obtuvieron por observaciones de diversos experimentos en mecánica de rocas o en zonas geológicas naturales (Riedel, 1929).

En los experimentos realizados determinaron dos tipos de Fallas R_1 y R_2 , las cuales son denominadas como Falla sintética y antitética; asimismo otros autores complementaron dichos estudios determinando que cuando una zona, generalmente en el basamento, se somete a una deformación por cizallamiento, en la superficie se genera comúnmente un patrón estructural de cinco familias de fracturas que constituye un Sistema Riedel como se muestra en la Figura 2. Además, dichas fracturas generadas desde el fallamiento del basamento se muestran hacia la superficie en forma de una “estructura en flor”, ver Figura 3; (Fletcher, 1989).

Las estructuras o familia de fracturas se denominan por las letras correspondiente de acuerdo a la terminología de Riedel; además, se utilizará el término Falla en lugar de cizalla (Figura 2), se muestran a continuación:

➤ **Fallas Tipo R**

Son las primeras Fallas que se generan, también denominadas R_1 , Fallas Riedel o sintéticas. Se desarrollan con ángulos inferiores a 45° con respecto a la zona de desplazamiento principal que los genera, comúnmente entre 10° y 20° ; además el sentido de movimiento es el mismo que el de las fallas maestras (Burg, 2018).

➤ **Fallas Tipo R'**

Son fallas denominadas Anti-Riedel o antitéticas (conjugadas con las fallas Riedel R), fallas R' o R_2 ; se desarrollan en un alto ángulo y con sentido de movimiento opuesto respecto a las fallas maestras.

➤ **Fallas Tipo P**

Son Fallas secundarias o denominadas como Tchalenko-Skempton y el sentido de movimiento es el mismo que de las fallas maestras (Burg, 2018).

➤ **Fallas Tipo Y**

Son denominadas Fallas maestras que ocurren a un ángulo de 45° con respecto a σ_1 y son paralelas al plano de falla de rumbo principal que ha sido generado (Figura 2 a y b) (Burg, 2018).

➤ **Fallas Tipo T o fracturas de tensión**

Son fracturas que ocurren en la bisectriz entre las Fallas R y R' (Figura 1 b); la fractura gira debido al desplazamiento de la falla principal y genera una fractura en forma de S (en échelon o en escalón), ver Figura 1 a (Coelho et al, 2006).

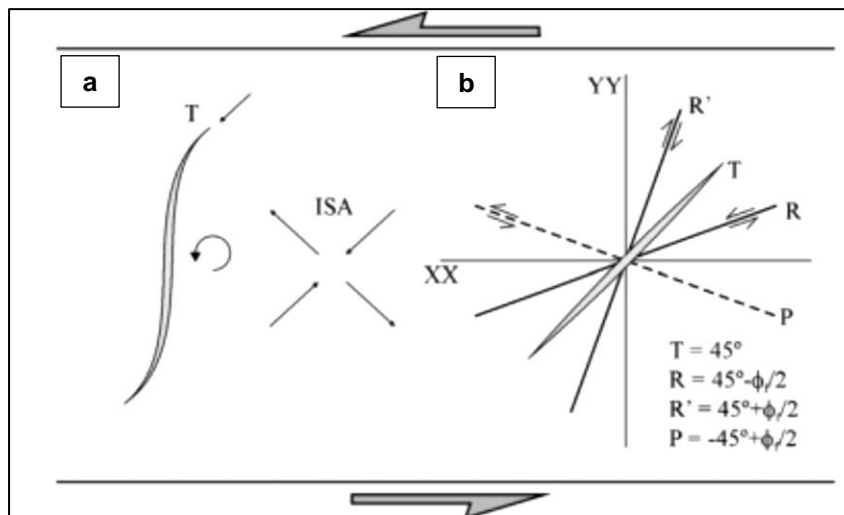


Figura 1. Fracturas en échelon y fracturas de tensión de un modelo Riedel sinistral (Coelho et al, 2006).

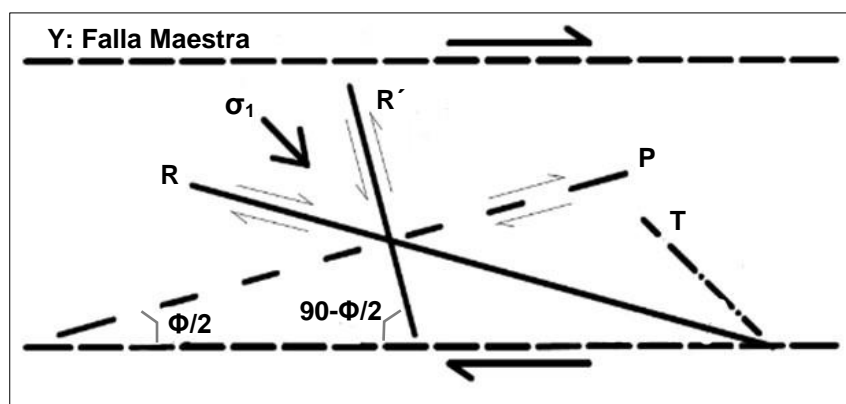


Figura 2. Relaciones geométricas entre las distintas estructuras de un modelo Riedel dextral (Valenzuela, 2005).

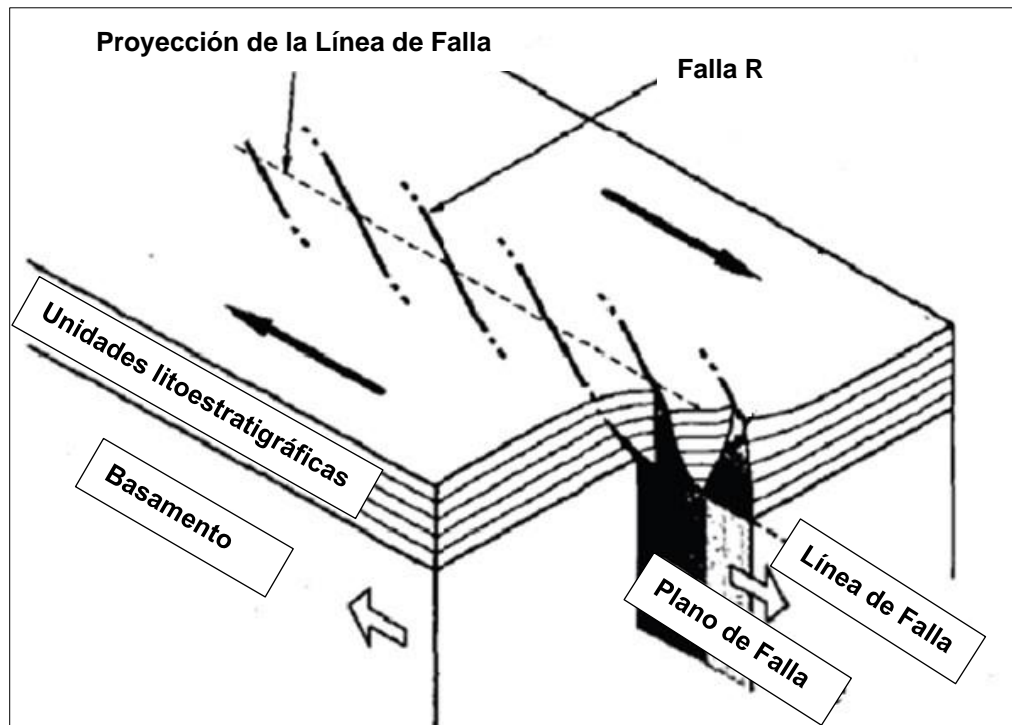


Figura 3. Block diagrama, vista en sección del fallamiento de rumbo dextral (Asaoka, 2016).

➤ Estructuras continuas y discontinuas en el Modelo Riedel

Cuando se conjugan los dos sistemas de fracturamiento, fallas Riedel y Anti-Riedel, la bisectriz entre estas dos fallas da la ubicación del esfuerzo principal máximo (σ_1), el cual es el generador de estructuras continuas y discontinuas, asimismo de la zona transcurrente principal que los contiene. Las estructuras de pliegues (anticlinales y sinclinales), fallas inversas y estilolitos se forman paralelos al eje largo del elipsoide de deformación. Las estructuras extensionales que pueden ser fallas normales, diques o venas; se forman paralelos al eje corto; asimismo están orientadas en un alto ángulo con respecto a la dirección del desplazamiento de la falla de rumbo principal. Los esfuerzos principales máximos σ_1 y σ_3 juntamente con la falla de rumbo generan que el eje largo del elipsoide de deformación gire hacia la dirección de movimiento de la falla, aumentando así el ángulo entre las fracturas extensionales y la línea de la falla, así como se muestra en la Figura 4 (Rossello, 2009).

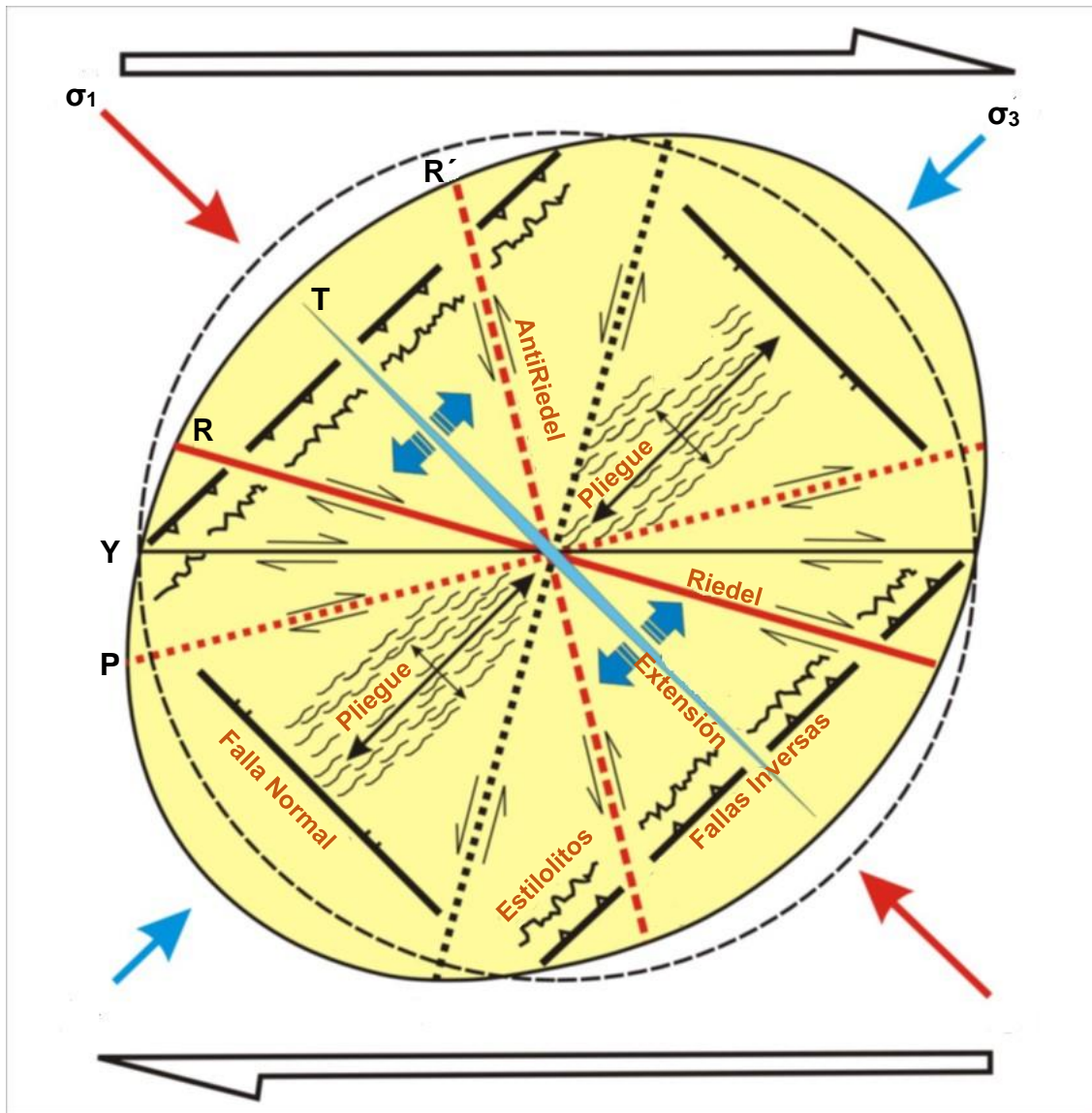


Figura 4. Elipsoide de deformación que muestran las diferentes orientaciones de estructuras continuas y discontinuas dentro del Modelo de Riedel para una falla dextral (Rossello, 2009).

2.2.2 Comportamiento frágil de las rocas

De acuerdo con Martínez (2003), “se da cuando las rocas alcanzan antes la línea de fracturación que la de resistencia plástica, lo que ocurre cuando están frías”.

El comportamiento frágil es una deformación que generan planos sin ninguna o muy poca deformación plástica dadas comúnmente en rocas duras (Oyarzún, 2012).

➤ Falla

Es una discontinuidad entre bloques de roca que se han desplazado uno con respecto a otro, a través de un plano de falla y son el resultado de esfuerzos tectónicos, epirogénesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de rocas en la corteza terrestre (Dávila, 2011).

Una zona de falla es una región que contiene varias fallas paralelas o anastomosadas (es decir, ramificadas y reconectadas).

Existe fallamiento de deslizamiento vertical las cuales son las fallas normales e inversas; de deslizamiento según el rumbo son fallas dextral y sinistral; y de deslizamiento oblicuo que se combinan las de vertical y de rumbo, ver Figura 5.

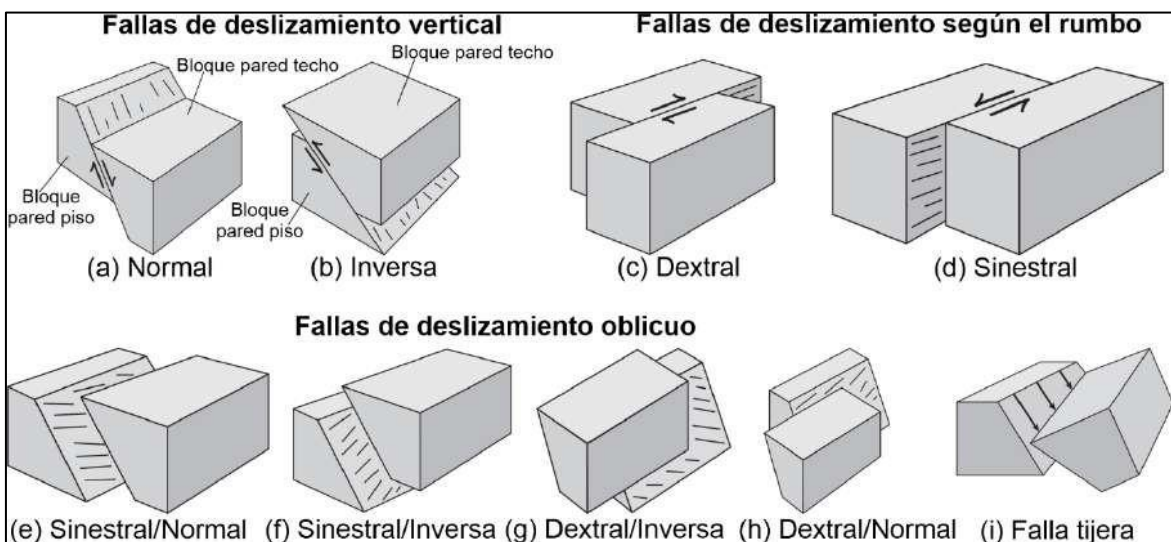


Figura 5. Diagramas de bloques que muestran los diferentes tipos de fallas (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

- **Separación de fallas**

Se denomina como el desplazamiento de bloques a través de un plano de falla, para mayor detalle de dicha estructura, ver Figura 6 (Fossen, 2010).

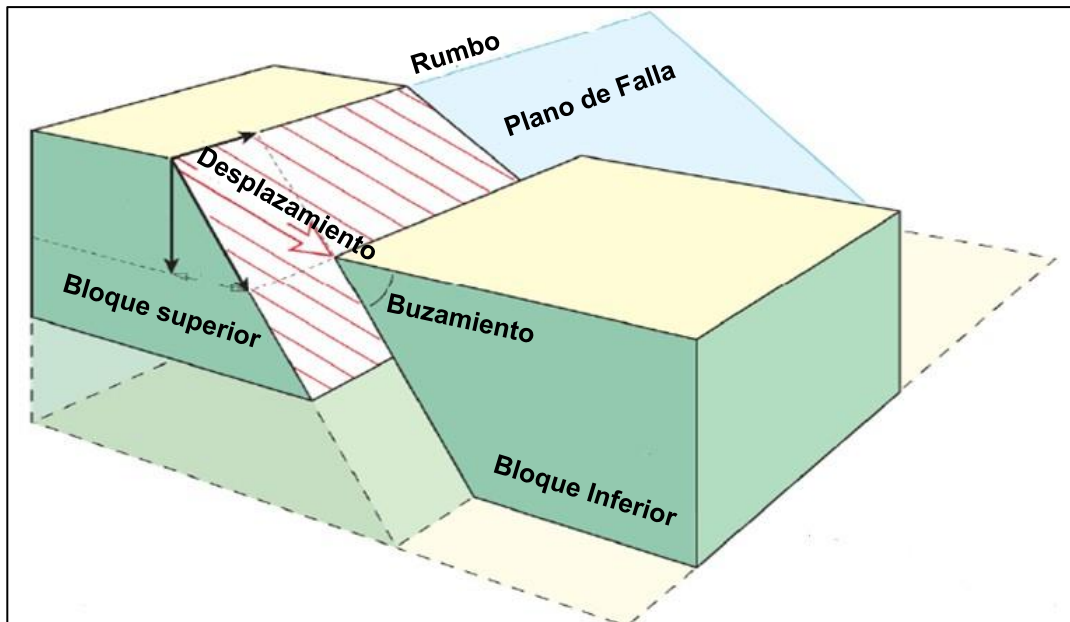


Figura 6. Desplazamiento de bloques para una falla normal (Burg, 2018).

Las rocas en contacto con un plano de falla comúnmente tienen superficies lisas, brillantes o pulidas de material mineralizado conocidas como superficies de deslizamiento. Los lados de los bloques de roca deslizantes se deben a la acción abrasiva, pueden no tener características, pero a veces se sienten más suaves en la dirección del deslizamiento. Asimismo, en dichos planos se encuentran estrías paralelas en toda la superficie del plano de falla. El ángulo medido dentro del plano inclinado de la falla entre la línea horizontal (rumbo de la falla) y la línea marcada por las estrías se denomina rake o pitch; el plunge es el ángulo que forma la estructura lineal con la horizontal en el plano vertical como se observa en la Figura 7 (Burg, 2018).

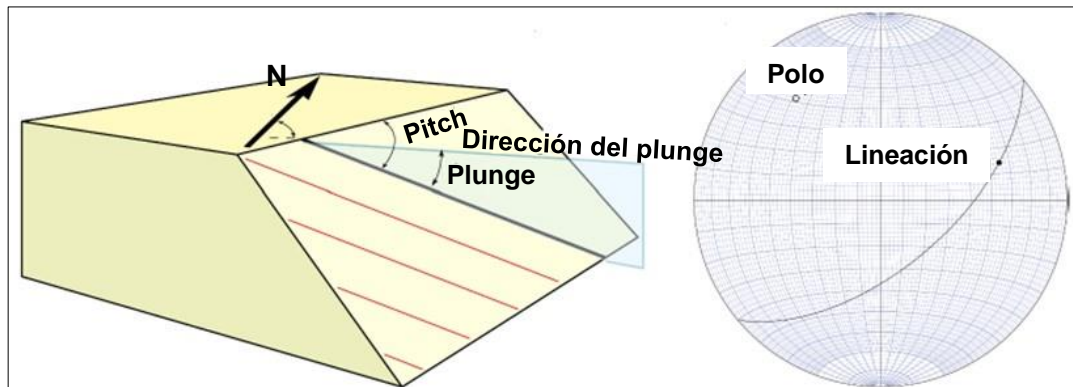


Figura 7. Medición y proyección estereográfica de una estructura (Burg, 2018).

- **Indicadores cinemáticos de fallas**

Los indicadores cinemáticos o tectoglifos son estructuras de tamaño milimétricas a métricas; comúnmente se utilizan para determinar la dirección y sentido de desplazamiento de bloques de roca sobre un plano de falla; en la Figura 8 se muestran los principales tectoglifos.

Cuando existe un fracturamiento en el plano de falla puede existir algunos indicadores cinemáticos como se muestran a continuación:

Elemento estriador al cabo de la estría (A). Este puede ser un fragmento de roca.

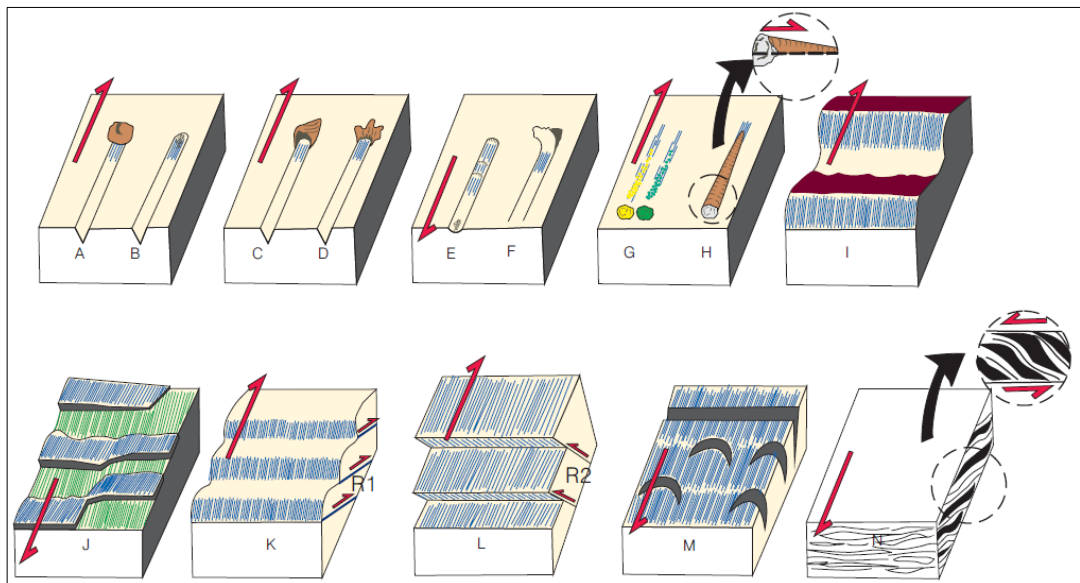


Figura 8. Tectoglifos o indicadores cinemáticos (Macharé, 2001).

Material triturado al cabo de la estría (B). Está constituido por material arrancado del plano de falla y depositado a un extremo de la estría.

Escama de arrastre (C). El material arrancado del plano de falla es depositado al extremo de la estría en forma de una escama.

Nichos de arranque (D). Se manifiestan como microdeslizamientos.

Escama de arranque (E). Cuando se presentan este tipo de tectoglifos, las estrías tienen uno de sus extremos levantados, arrancando material del plano de falla y dejando como resultado una superficie irregular.

Colas de mineral (F). Durante este proceso se tiene presencia de minerales a un extremo de las estrías, mientras que hacia el lado opuesto se tiene polvo de mineral, dispuesto a manera de microbandas.

Lomos al abrigo (G). Para que se genere este tectoglifo se requiere de un elemento estriador en el plano de falla, de tal manera que, durante el desplazamiento relativo de bloques, el material arrancado del plano de falla se deposita a manera de lomas y es protegido por el elemento estriador.

Planos ondulados (H). Según sea el movimiento, los planos de falla ondulados presentan facetas estriadas y lustradas o no estriadas y con presencia de óxidos. El sentido de movimiento, será determinado por la orientación de las facetas estriadas.

Cristalización al abrigo (I). Dentro de las estrías se producen ciertos desniveles y se produce el crecimiento de minerales como el cuarzo y calcita en dirección del movimiento.

Fallas de Riedel (K y L). Se producen por esfuerzos de cizalla en la proximidad del plano de falla. Se generan dos tipos de fallas R_1 y R_2 . Las R_1 forman un ángulo de 15° a 20° con el plano de falla principal y son sintéticas (movimiento en el mismo sentido que la falla mayor). Las fallas R_2 forman un ángulo de 70° a 80° con el plano de falla principal y son antitéticas.

Lúnulas de tracción (M). Son fracturas abiertas en semicírculos. La superficie de fractura es irregular y no presenta estrías. Forman un ángulo entre 30° y 40° con el plano de falla principal. La dirección de buzamiento de las fracturas o la parte cóncava de los semicírculos nos indican el sentido de movimiento.

Lenticulaciones (N). Son estructuras penetrativas con planos curvoplanares que determinan la deformación de las rocas en lentes. La orientación de las lenticulaciones determinan el sentido de movimiento de la falla principal.

- **Conjunto de fallas**

Es producto de la deformación y en respuesta al esfuerzo tectónico aplicado a las rocas, así como se muestra en la Figura 9 los tipos de conjunto de fallas (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

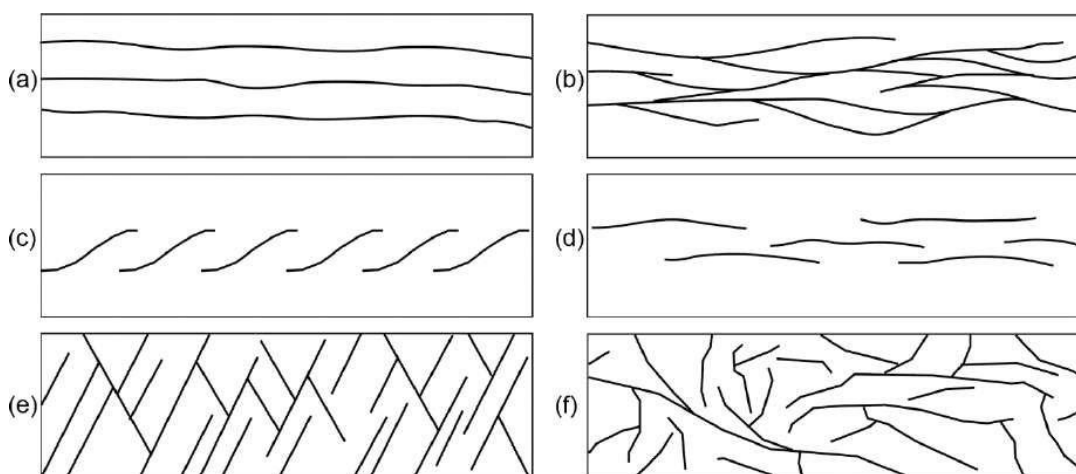


Figura 9. Conjuntos de fallas. (a) paralelas, (b) anastomosado, (c) échelon, (d) relay, (e) conjugadas y (f) aleatorias (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

- **Estructuras asociadas a una zona de falla**

Generalmente las fallas se caracterizan por una zona de desplazamiento principal ya sea lineal o curvilínea; en estas curvaturas existe inflexiones y saltos que aparecen en todo su recorrido; si hay extensión genera espacios para el paso de fluidos hidrotermales y si existe compresión cierra espacios restringiendo el paso de soluciones (Oyarzún, 2012).

Cuando existe un cambio de orientación de la falla pueden generar estructuras y cambios topográficos (Figura 10). Asimismo, vista en sección, este tipo de fallas originan una zona de desplazamiento principal subverticales relativamente estrecha en profundidad y dentro de la corteza sedimentaria las estructuras presentan forma de ramificaciones entrelazadas

que se separan y se juntan tanto hacia arriba como lateralmente a la cual se denominan “estructura en flor”, ver Figura 11.

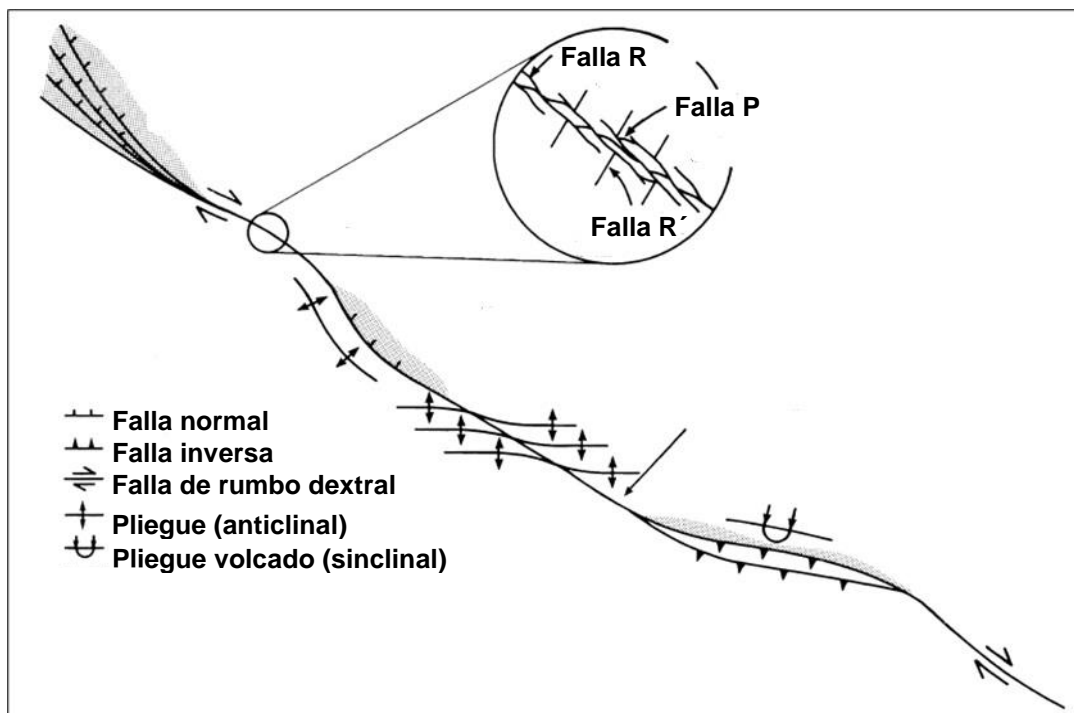


Figura 10. Estructuras asociadas a la falla de rumbo dextral, vista en planta (Blick, 1985).

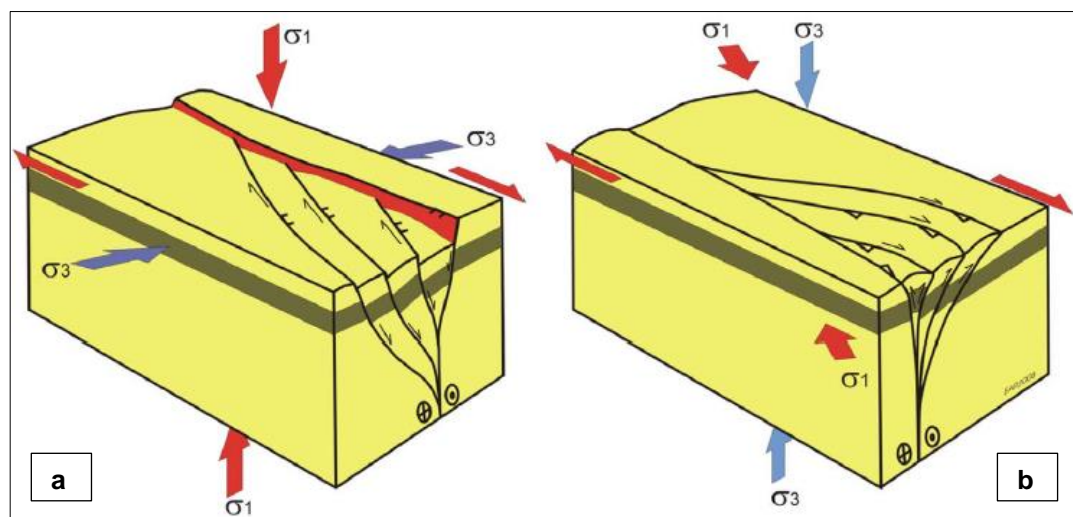


Figura 11. a. Estructura en flor negativa, fallas transcurrentes extensionales. b. Estructura en flor positiva, fallas transcurrentes compresionales (Rossello, 2009).

➤ Fracturas

Una fractura es una discontinuidad en forma plana o subplana y se clasifican en fracturas por cizallamiento (superficies de deslizamiento), fracturas de apertura o extensión (fisuras y venas) y fracturas de cierre o contracción (Fossen, 2010).

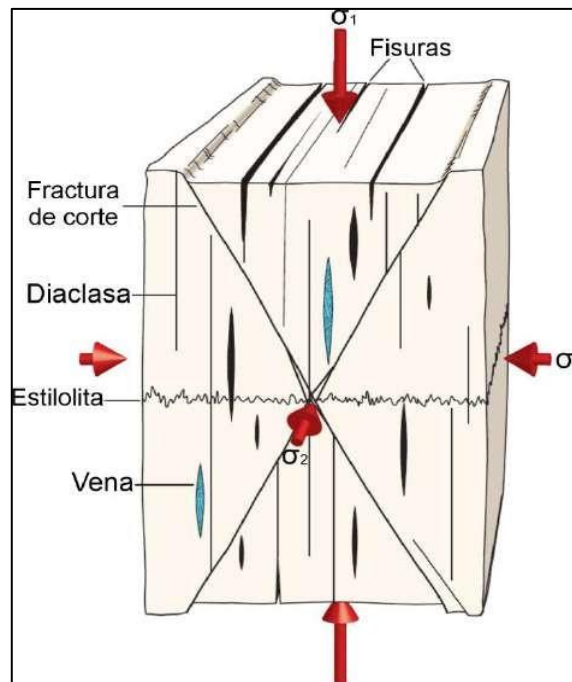


Figura 12. Orientación de varios tipos de fracturas con respecto a los esfuerzos principales (Fossen, 2010).

Una fractura por corte o superficie de deslizamiento es producto del movimiento paralelo a dirección la fractura y con pequeños desplazamientos (Fossen, 2010).

Las fracturas de extensión o tensión son aquellas que separan las paredes de roca en forma perpendicular y comúnmente están rellenas de gas, fluidos, magma o minerales; cuando se rellena con aire o líquido, se define como fisura, cuando es por minerales son venas y cuando es por magma son diques.

Las fracturas de contracción o de cierre son los estilolitos que se caracterizan por presentar superficies irregulares.

- **Venas**

Es una fractura rellenada por minerales que precipitaron de una solución magmática; se originan en forma de fallas o grietas y se presentan en grupos con variedad de formas (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

Existen tres grupos de venas que pueden formarse en el campo, los cuales son:

Las *venas planas* representan la mineralización durante la formación de un conjunto de fracturas.

Las *venas en Stockwork* se forman donde la roca se ha fracturado, ya sea por la existencia de una presión de fluido localmente muy alta, o ya sea como resultado de fracturamiento en asociación con plegamientos.

Las *venas en échelon o escalón* se forman de dos maneras diferentes; rellenando las fracturas en la franja de una fractura más grande, y como consecuencia de la cizalladura dentro de un cuerpo de roca que se asocia con el desplazamiento a través de una zona de falla (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

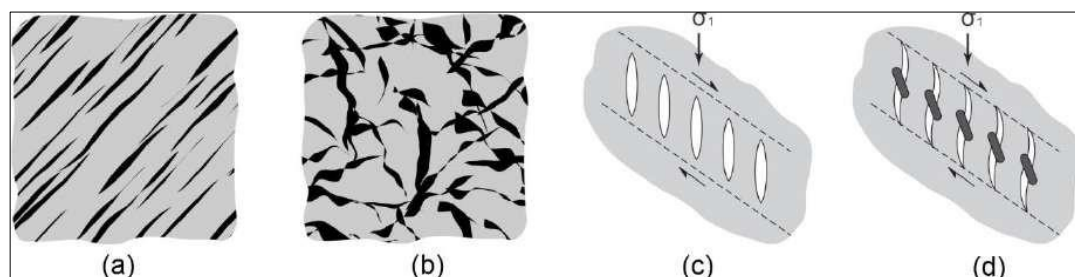


Figura 13. Conjuntos de venas. (a) Grupo de venas planas. (b) Grupo de venas en stockwork. El relleno de vena es oscuro. (c) Formación de un grupo simple en échelon. (d) Formación de venas sigmoidales en échelon (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

El relleno de las venas se da por minerales debido a la precipitación de fluidos magmáticos y se manifiesta en dos formas, la primera es en bloque, consiste que sus cristales son más o menos equivalentes en tamaño y

pueden presentar caras de cristal bien definidos, y las venas fibrosas, los cristales son largos en relación con su ancho.

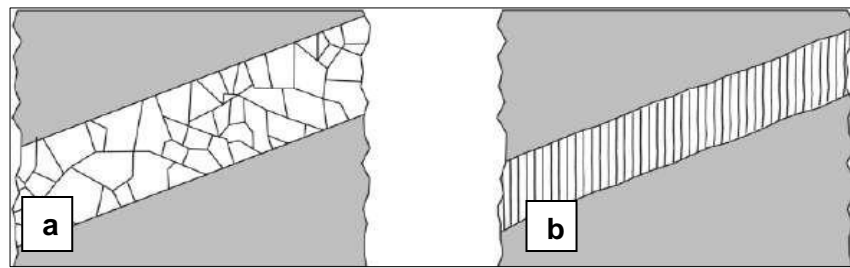


Figura 14. Tipos de relleno de venas. a. Relleno de vena en bloque. b. Relleno de vena fibroso (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

- **Estilolitos**

Son estructuras de contracción con superficies rugosas irregulares más o menos planares que se compone a manera de agujas, picos o pequeñas columnas (escala milimétrica), se desarrollan en rocas sedimentarias por efecto de disolución y esfuerzos tectónicos; generalmente se muestran en forma perpendicular a la dirección del esfuerzo principal máximo; la superficie también se denomina junta estilolítica la cual comúnmente contiene óxidos o arcillas, ver Figura 15 (Martínez, 2003).

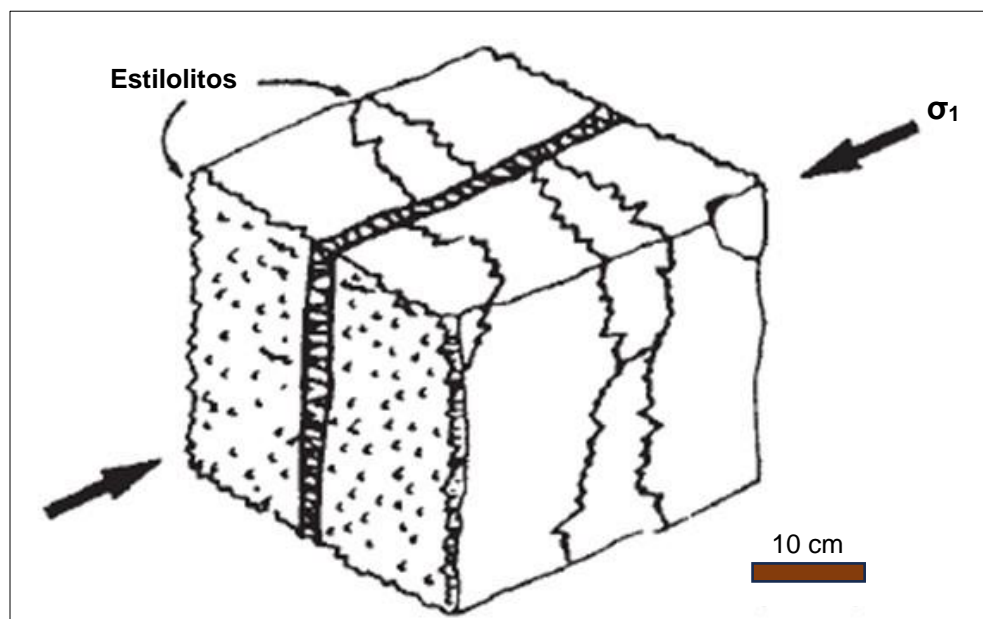


Figura 15. Relación de perpendicularidad de estilolitos vs esfuerzo principal máximo, una vena de tensión, superficie de una junta estilolítica (Martínez, 2003).

2.2.3 Comportamiento dúctil de las rocas

En el libro Geología Estructural, Fossen (2010) menciona que: “material dúctil es aquel que acumula deformaciones permanentes sin fracturarse, al menos hasta cierto punto donde se excede su resistencia última”.

➤ Pliegue

Son estructuras que se forman en cualquier tipo de roca, ambiente tectónico y profundidad. Su geometría (ver Figura 16) y forma de presentarse muestran información sobre el tipo de deformación, cinemática y tectónica. Además, pueden ser de gran importancia económica tanto en la exploración y explotación de recursos minerales (Fossen, 2010).

- **Geometría de un pliegue**

Se compone de elementos geométricos: flanco o limbo, es la superficie curvada; plano axial, que separa el pliegue en dos partes; charnela, es la intersección del plano axial con el flanco y el eje, que es paralelo a la charnela y que lo contiene el plano axial (Oyarzún, 2012).

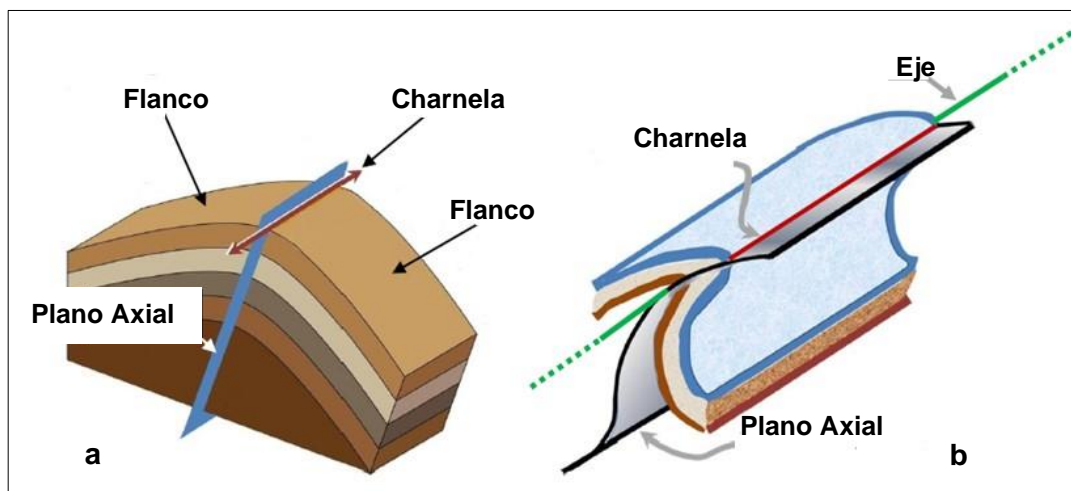


Figura 16. Elementos geométricos de estratos plegados. a. pliegue simétrico. b. pliegue volcado (Oyarzún, 2012).

- **Tipos de pliegues**

Los pliegues se describen de acuerdo a la orientación de su plano axial y línea de charnela, con estos dos parámetros se han asignado nombres a diferentes pliegues como se muestra en la Figura 18; simétricos (plano axial vertical y línea de charnela horizontal) y su forma opuesta; volcados (plano axial y línea de charnela inclinado). La mayoría de los pliegues que se muestran (ver Figura 17 a) son anticlinales el cual se define como una estructura donde los flancos descienden y se alejan de la charnela, mientras que un sinclinal es la forma opuesta (ver Figura 17 b); además charnela presenta inclinación (inmersión).

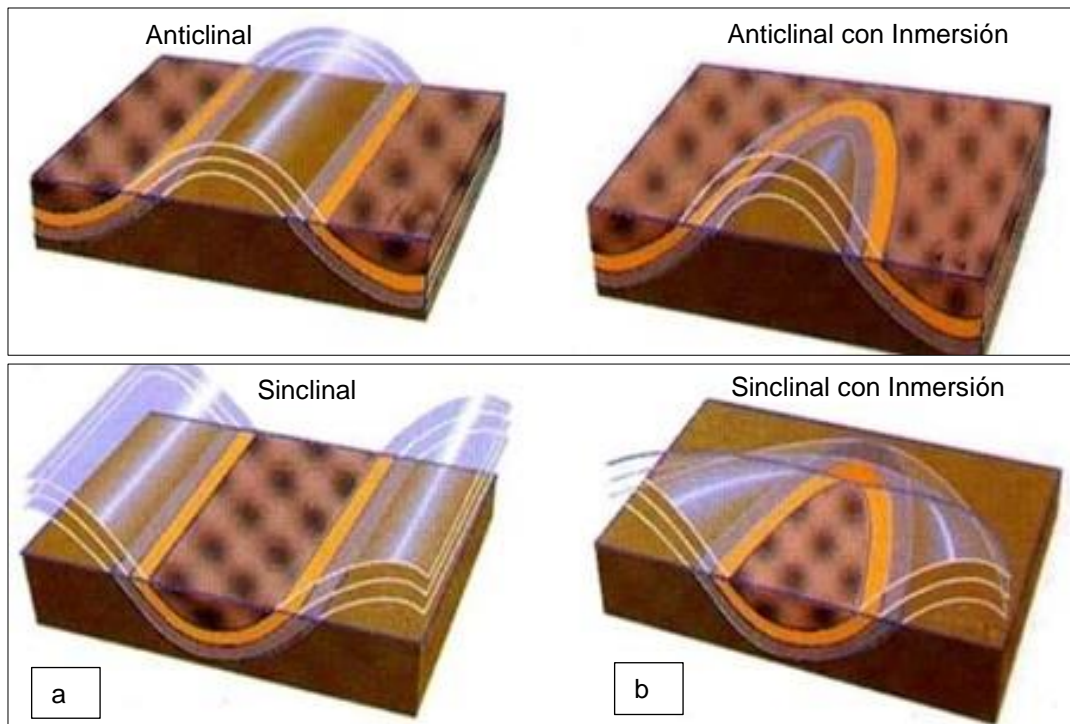


Figura 17. a. Pliegues de anticlinal. b. sinclinal (Oyarzún, 2012).

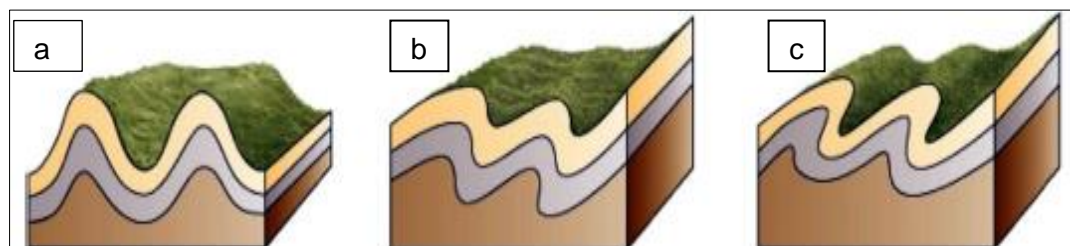


Figura 18. Pliegues abiertos (a), inclinados (b) y tumbados (c) (Oyarzún, 2012).

Una clasificación cualitativa basada en el ángulo entre limbos o flancos presenta cinco tipos de pliegues como se muestra en la Figura 19.

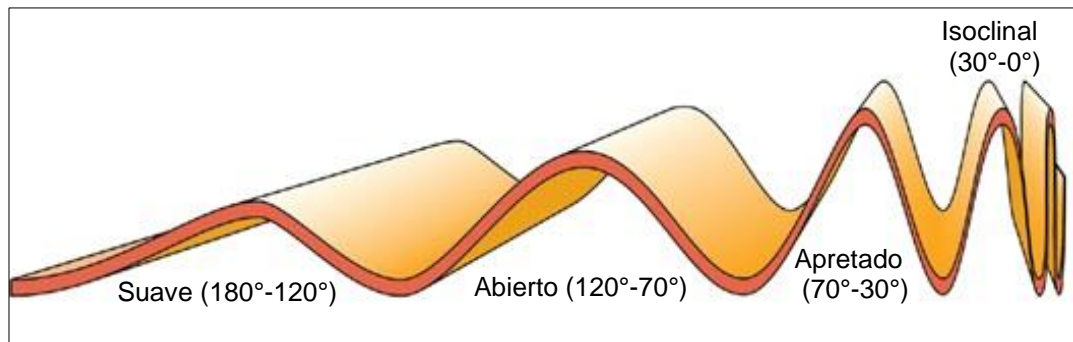


Figura 19. Plegamiento de acuerdo con el ángulo entre limbos o flancos (Oyarzún, 2012).

2.2.4 Esfuerzo

El esfuerzo es un vector (s) que se puede definir como la relación entre una fuerza (F) y el área (A) a través de la cual actúa la fuerza (Fosen, 2010). La clasificación clásica de Anderson del esfuerzo tectónico determina que el régimen de falla normal ocurre donde σ_2 y σ_3 son horizontales y σ_1 es vertical (Figura 20-A); el régimen de falla inversa ocurre donde σ_1 y σ_2 son horizontales y σ_3 es vertical (Figura 20-B); asimismo el régimen de falla de deslizamiento según el rumbo ocurre donde σ_1 y σ_3 son horizontales y σ_2 es vertical como se observa en la Figura 20-C (Van Der Pluijm y Marshak, 2004).

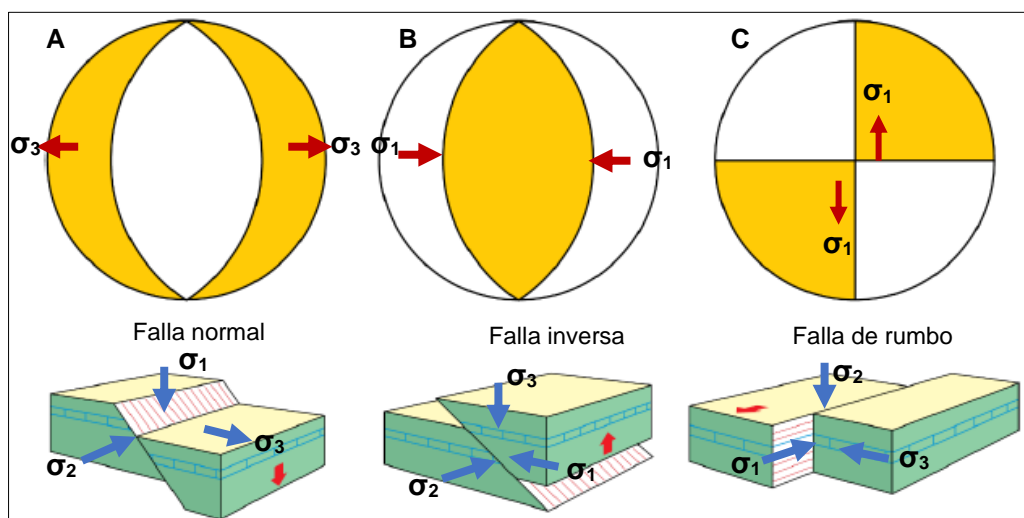


Figura 20. Esfuerzos principales y tipo de falla (Burg, 2018).

2.2.5 Yacimientos epitermales

Aquellos donde la mineralización ocurrió en el margen de 1 a 2 km de profundidad y se depositó a partir de fluidos hidrotermales con temperaturas que varían desde menos de 100 °C hasta 320 °C. A estos yacimientos se asocia mineralización principalmente de oro y plata con presencia mayor o menor de sulfuros de metales base en general cobre, plomo y zinc. La mineralización se da principalmente en vetas, vetillas o diseminaciones asociadas algunas veces a intensas zonas de brechamiento. Se clasifican dos estilos de mineralización como de alta sulfuración y baja sulfuración. El primero se encuentra relacionado con clásicos fenómenos volcánicos tipo aparato central o calderas; sistemas ricos en azufre que dan origen a facies de alteración tipo argílica avanzada, con otras facies que incluyen intensa silicificación y propilitización. El segundo se encuentra relacionado a la alteración principalmente de tipo potásica y clorítica (Sillitoe y Hedenquist, 2003).

2.2.6 Yacimientos de tipo pórfido cuprífero

Los sistemas de pórfidos cupríferos tienen grandes volúmenes (10-100 km³) de roca alterada hidrotermalmente centrada en stocks de pórfidos de Cu que pueden contener skarn, reemplazamientos de carbonatos, sedimentos alojados y epitermales de alta e intermedia sulfuración con mineralización de metales base y preciosos. Están relacionados con los plutones compuestos subyacentes a profundidades de 5 -15 km, que es suministro para los magmas y fluidos que forman los stocks verticales y elongados (>3km) o conjunto de diques y su mineralización asociada (Sillitoe, 2010).

➤ Estructuras asociadas a depósitos porfídicos

Las principales estructuras asociadas con los depósitos porfídicos de Cu-Au-Mo están representadas por vetillas de tipo “stockwork” y “sheeted” de cuarzo-sulfuros que albergan y transportan localmente la mayor parte de la mineralización de Cu-Au-Mo, comúnmente desarrolladas dentro de stocks o intrusiones que recubren las fuentes magmáticas más importantes de metales; las estructuras en las que se localizan las intrusiones porfiríticas influyen en la orientación de las vetillas. Las

vetillas de tipo “stockwork” comprenden conjuntos de vetillas sin una orientación preferencial o de múltiples direcciones desarrolladas en un evento o como resultado de múltiples eventos, debido al emplazamiento del pórfido, así como se muestra en la Figura 21 (Corbett y Leach, 1997).

El análisis de la dirección de las vetillas proporciona características de los esfuerzos que controlan el emplazamiento de los pórfidos ya sea de compresión o extensión, asimismo de la roca huésped (Sillitoe y Hedenquist, 2003).

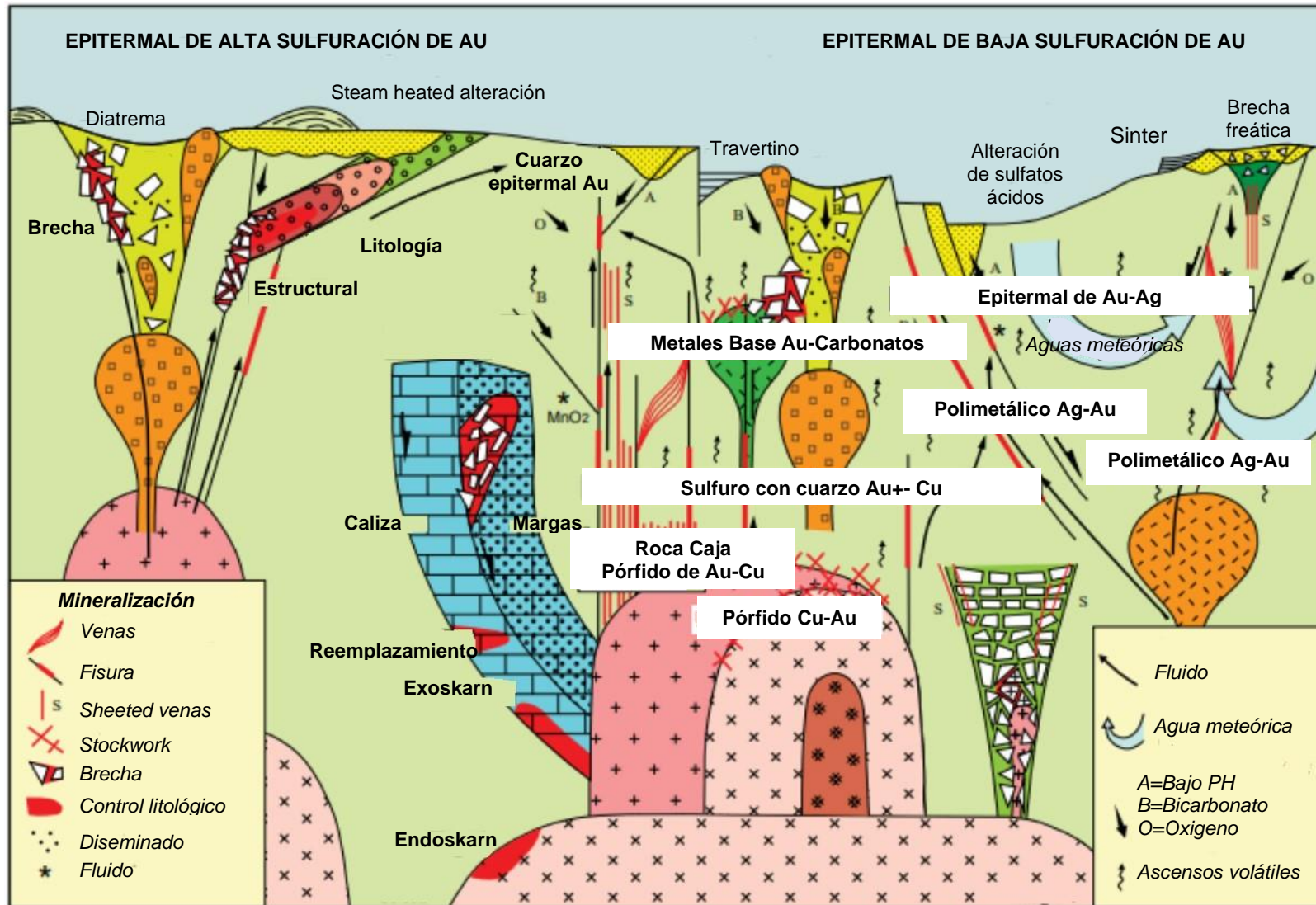


Figura 21. Modelo conceptual para yacimientos epitermal Au-Ag y pórfido Cu-Au (Corbett, 2009).

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Modelo Riedel. Es un modelo de fracturamiento en rocas que constituye cinco familias de fracturas denominadas fallas Riedel o R, Anti-Riedel o R', las T y P; originadas por esfuerzos tectónicos (Valenzuela, 2005).

Tectoglifos o indicadores cinemáticos. Estructuras geológicas utilizadas para determinar la dirección y sentido de desplazamiento de bloques sobre un plano de falla (Macharé, 2001).

Falla. Discontinuidad entre bloques de roca que se han desplazado uno con respecto a otro, a través de un plano de falla debido a esfuerzos tectónicos en la corteza terrestre (Burg, 2018).

Esfuerzo. Es consecuencia de procesos orogénicos que sufre la corteza terrestre, y se miden en unidades de fuerza por unidad de superficie (Fossen, 2010).

Pliegue. Deformación de las rocas estratificadas debido a los esfuerzos de compresión y se clasifican en anticlinales y sinclinales (Oyarzún, 2012).

Fractura. Es una discontinuidad en forma plana o subplanar y se clasifican en fracturas de deslizamiento, apertura y contracción (Fossen, 2010).

Yacimiento mineral. Se clasifican en yacimientos epitermales de alta y baja sulfuración con mineralizaciones de Au-Ag; asimismo existe pórfidos con mineralizaciones de Au-Cu (Corbett, 2009).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Ubicación Geográfica

El área de investigación, se encuentra localizado en el sector occidental de la cordillera de los Andes, donde está la Subcuenca Chanche ubicándose sobre los 3000 m.s.n.m hasta los 4050 m.s.n.m. Presentamos la imagen satelital y la delimitación del área de investigación que se obtuvo de la plataforma SAS Planet y digitalizada en software SIG (ver Anexo N° 01).

3.1.2 Ubicación Política

Ubicado en los distritos de Sorochuco y Sucre de la provincia de Celendín, Departamento y Región de Cajamarca (ver Anexo N° 01).

3.1.3 Accesibilidad

Para acceder al área de investigación, nos dirigimos al cruce de Quinuamayo; a dicho lugar se llega mediante la carretera asfaltada de Cajamarca hacia Celendín, luego la carretera afirmada hacia el sector El Punre. La Tabla 1. Muestra distancias aproximadas hacia la Subcuenca Chanche.

Tabla 1. Acceso al área de investigación.

Tramo	Distancia (km)	Vía	Tiempo (horas)
Cajamarca - Quinuamayo	46.1	Asfaltada	1
Quinuamayo- Subcuenca Chanche (El Punre)	9.1	Afirmada	0.20

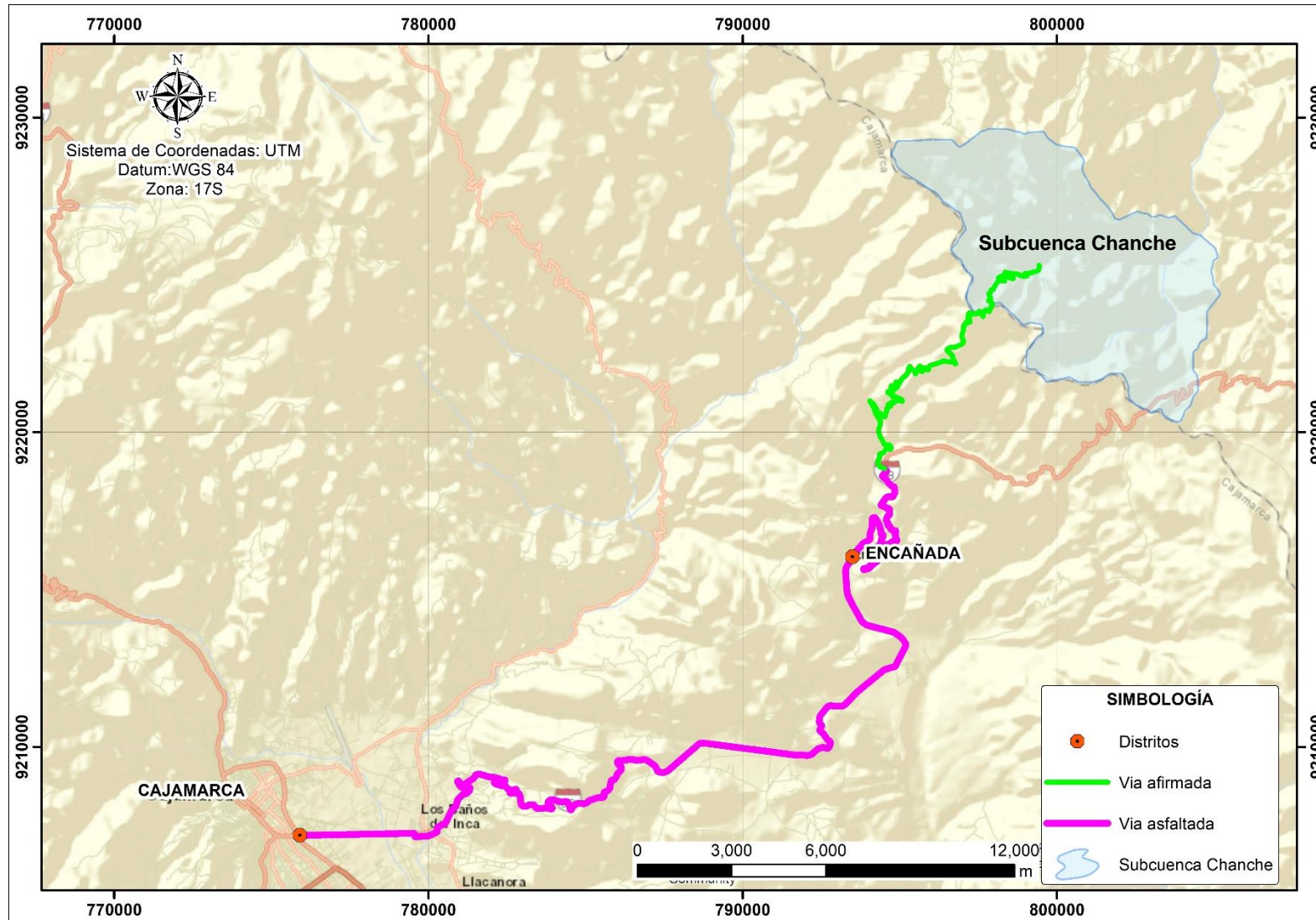


Figura 22. Accesibilidad de Cajamarca hacia la Subcuenca Chanche (Google Maps, 2024).

3.1.3 Unidades Morfogenéticas

El área de investigación se clasificó teniendo en cuenta la Clasificación de Unidades Morfogenéticas de Rodríguez (2016), en la cual propone: planicies, lomadas, laderas y escarpes. Esta clasificación es en base a la pendiente, las cuales se describen en la siguiente Tabla:

Tabla 2. Clasificación de Unidades Morfogenéticas.

Geoforma	Pendiente
Planicie	0° - 8°
Lomada	8° - 20°
Ladera	20° - 50°
Escarpe	> 50°

Fuente: Rodríguez, (2016).

Las Unidades Morfogenéticas se presentan en el Anexo N.º 04; y en el área de investigación (Subcuenca Chanche) se encuentran las siguientes geoformas:

➤ **Planicies**

Son geoformas que se encuentran en las partes más bajas con una topografía de pequeñas elevaciones, homogéneas y pendientes de 0° hasta 8°; en la Subcuenca Chanche se ha identificado alrededor de las lagunas el Milpo, Rinconada, Mullo y en drenajes como las quebradas El Carbón, Uñigan y la parte NO del río Chanche; generalmente se presentan en cotas desde los 3700 m.s.n.m., hasta los 3800 m.s.n.m; dichas geoformas están constituidas por depósitos cuaternarios glaciares, aluviales y fluviales.

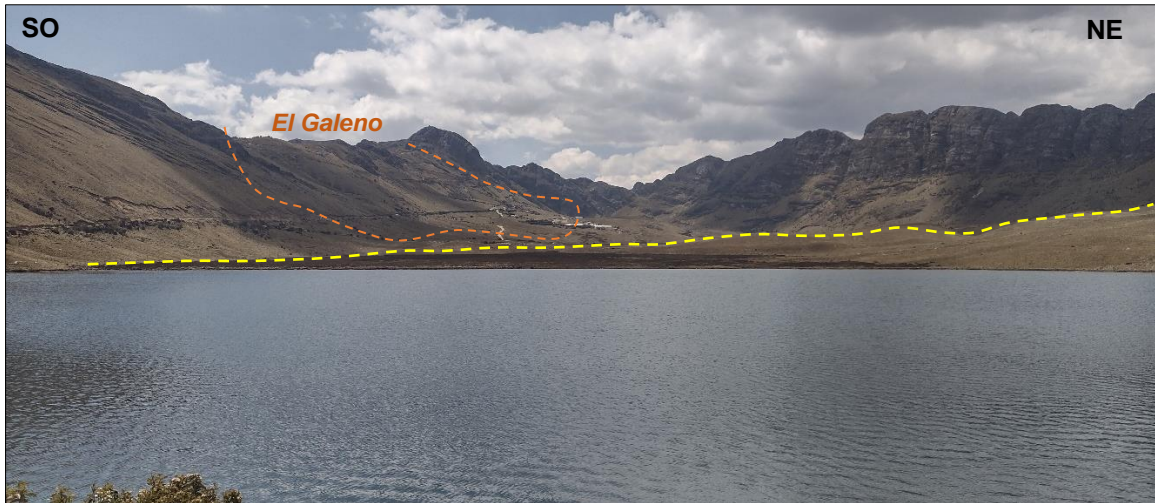


Foto 1. Vista al NO; Laguna El Milpo con geformas de planicies constituidos por depósitos cuaternarios aluviales y fluviales (Q-al/fl) cerca al yacimiento mineral El Galeno. Coordenadas N-9227987. E-797237.

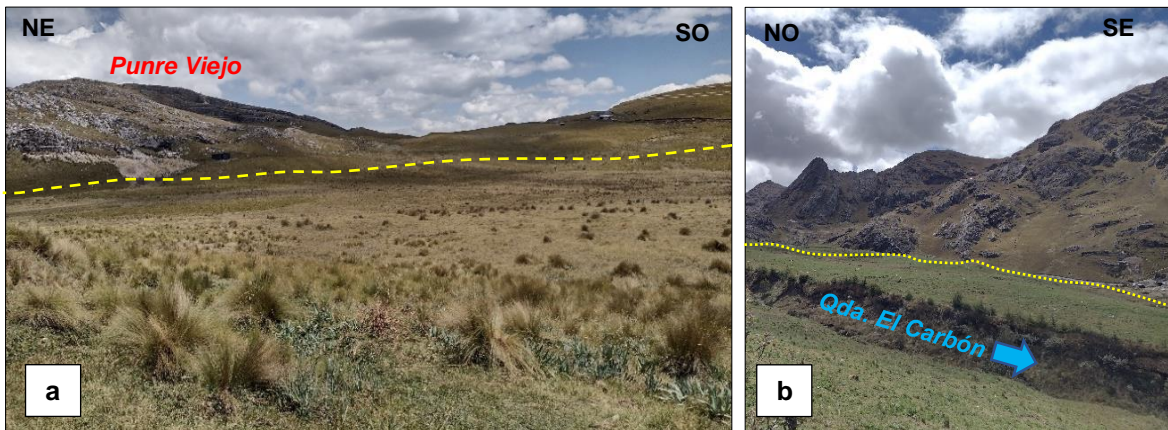


Foto 2. a. Vista al SE; planicies cercano al cerro Punre Viejo, constituidos por depósitos aluviales (Q-al) y fluviales (Q-fl). N- 9223600. E- 799202. b. Con vista al NE; Planicies afectado por la quebrada El Carbón. Coordenadas N- 9225181. E-797237.

➤ **Lomadas**

Estas geformas tienen una pendiente de 8° a 20° siendo así la zona de transición entre planicies y laderas; en la subcuenca Chanche se evidencian en todas las rocas silícico-clásticas y calcáreas como en los centros poblados de Santa Rosa de Milpo, Quengomayo y Chim Chim-Michiquillay.



Foto 3. Vista al SO; lomada formada por depósitos aluvial-coluvial (Q-al/co) y rocas calcáreas en el sector Santa Rosa de Milpo. Coordenadas N- 9229109. E- 797365.

➤ Laderas

Geoformas cuya pendiente oscila entre los 20° y los 50°; estas pueden afectar a cualquier tipo de litología como se puede observar en el sector de Chim Chim.



Foto 4. Vista al SE; laderas en el sector Chim Chim. Coordenadas N- 9222442. E- 799142.

➤ Escarpes

Son geoformas con pendientes mayores a 50°, presentándose en las partes más elevadas de los cerros Punre Viejo, El Lago, La Boya, Milpo e Hilorico que están conformados por las Formaciones Chimú y Farrat; se caracteriza por una litología resistente a la erosión lo que produce una topografía de fuerte pendiente.

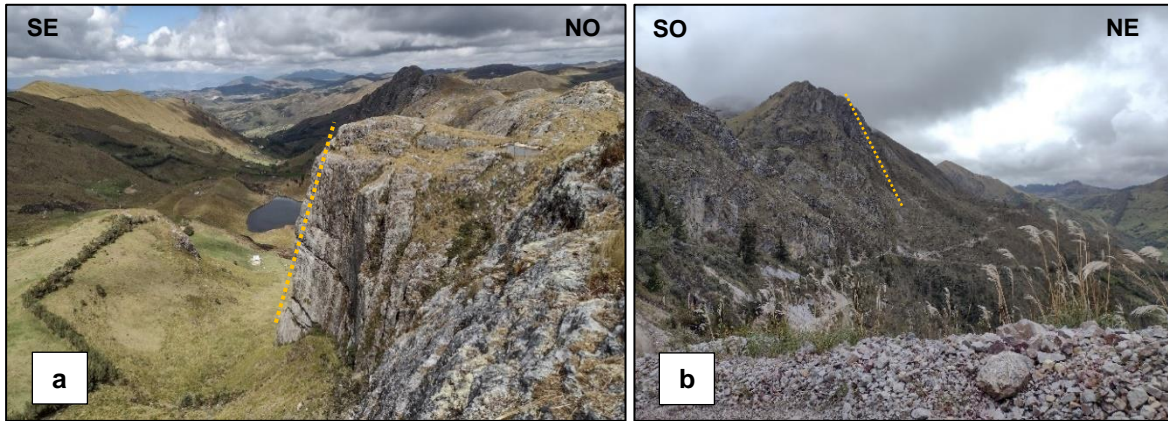


Foto 5. a. Vista al NE; escarpes en la cumbre del cerro Punre Viejo, conformado por estratos de la Formación Farrat. N- 9223624. E- 799695. b. Vista al NO; cerro La Boya con rocas de la Formación Chimú. Coordenadas N- 9224439. E- 801067.

3.1.4 Geología Local

➤ Grupo Goyllarisquizga

- ***Formación Chimú (Ki-chi)***

En la subcuenca Chanche dicha Formación se caracteriza por presentar una litología de areniscas cuarzosas con tonalidades grises blanquecinas y arcillitas gris-oscuro entre los centros poblados El Punre y Santa Rosa de Milpo; su afloramiento se da en estratos con grandes espesores de areniscas compactas fracturadas y formando geoformas de escarpes en las cumbres de los cerros con una resistencia alta a la meteorización, asimismo existe la interstratificación de mantos de carbón con espesores que van de 0.30 m hasta 2.00 m como se puede evidenciar en los cerros El Milpo, El Lago y La Boya, carretera del centro poblado El Punre hacia Santa Rosa de Milpo.



Foto 6. Vista al NO; estratos de la Formación Chimú en el flanco Oeste del anticlinal El Galeno. Coordenadas N- 9225483. E- 798412.

Tabla 3. Descripción del tipo de roca de la Formación Chimú.

Tipo de roca: Arenisca	Descripción
	<p>Roca con tonalidades gris-blanquecina con clastos de tamaño medio a grueso, los minerales principales es cuarzo y óxidos de hierro.</p>

- **Formación Santa (Ki-sa)**

En los sectores La Boya y El Lago sus afloramientos no son observables ya que se hallan completamente cubiertos por depósitos cuaternarios, sin embargo, en el tramo de carretera de Michiquillay hacia El Punre, existe estratos intercalados de arcillitas, limolitas, calizas y areniscas con tonalidad grisácea-marrón y amarillentas.



Foto 7. Vista al NE; Formación Santa (Ki-sa) cubierto por depósitos cuaternarios aluviales y fluviales (Q-al/fl) en el sector El Lago. Coordenadas N- 9225005. E- 800858.

- **Formación Carhuaz (Ki-ca)**

Litológicamente está constituida por la intercalación de areniscas grano medio a fino de coloración rojizas con arcillitas de tonalidades grises, rojizas, amarillentas y violetas de origen fluvio-deltaico bien estratificadas en estratos con espesores delgados y medianos evidenciando en la carretera del centro poblado Quinuamayo hacia Punre Viejo.



Foto 8. Vista al SO; Formación Carhuaz en el tramo de carretera El Punre-Michiquillay. Coordenadas N- 9222374. E- 799173.



Foto 9. Vista al SO; Formación Carhuaz en el tramo de carretera El Punre-Michiquillay. Coordenadas N- 9222537. E- 799090.

- **Formación Farrat (Ki-fa)**

Caracterizada por afloramientos de estratos con mediano y grandes espesores de areniscas cuarzosas con tonalidades blanquecinas de grano medio a fino con delgadas intercalaciones de arcillitas grisáceas ubicado en el tramo de carretera de Quinuamayo hacia centro poblado El Punre.



Foto 10. Vista al SO; Formación Farrat situado al suroeste del centro poblado El Punre. Coordenadas N- 9222007. E- 799466.



Foto 11. Vista al SE; Formación Farrat al norte del centro poblado de Chim Chim
 Coordenadas N- 9223587. E- 799738.

Tabla 4. Descripción de minerales de la Formación Farrat.

Tipo de mineral: cuarzo	Descripción
	<p>Mineral con habito prismático de tamaño menor a 5 cm de sus cristales, asimismo se caracteriza por tener habito radial-prismático.</p>

- **Formación Inca (Ki-in)**

Litológicamente consta de una intercalación de areniscas, rocas calcáreas y arcillitas ferruginosas evidenciando en superficie una coloración amarillento-rojizo; esta Formación mayormente está cubierta por depósitos cuaternarios y existe un pequeño afloramiento en el sector Sur de la Subcuenca Chanche con orientación de estratos de E-O y buzamientos promedio de 25° al S; ubicado al Este del centro poblado Chim Chim.

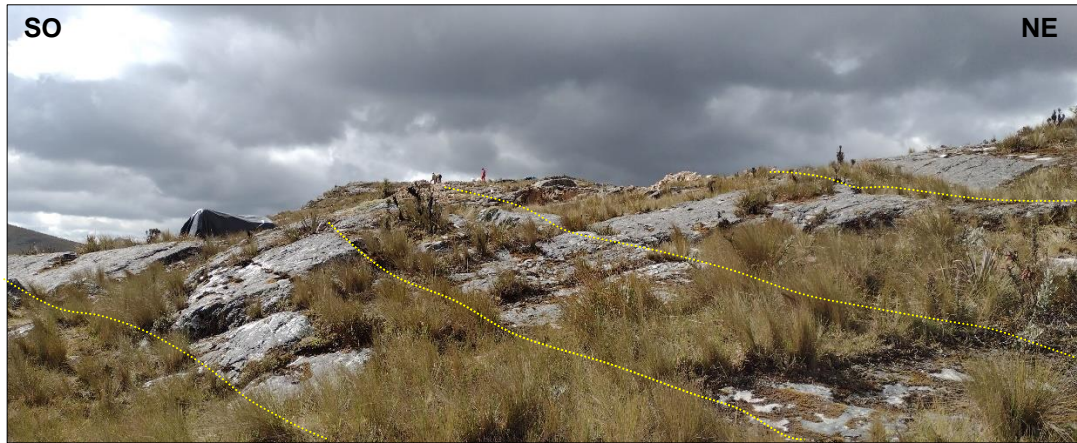


Foto 12. Vista al NO; afloramiento de areniscas e intercalación de limolitas, ubicado hacia el Este del centro poblado Chim Chim. Coordenadas N- 9220550. E- 803829.

➤ **Grupo Crisnejas**

- ***Formación Chúlec (Ki-ch)***

Caracterizada por estratos de calizas arenosas y margas con una coloración crema a gris amarillento fosilíferas de ammonites, con espesores en promedio varían entre 0.30 m hasta 0.80 m afloran en el centro poblado de Micuypampa.



Foto 13. Vista al NO; Formación Chúlec ubicado al suroeste del centro poblado de Chim Chim. N- 9220809. E- 802752.

- **Formación Pariatambo (Ki-pt)**

Caracterizada por calizas y arcillitas oscuras, bituminosas y fosilíferas de ammonites uniformemente estratificadas con espesores promedio de 0.15 m hasta 0.20 m, se ubica hacia el Sur del centro poblado Chim Chim.



Foto 14. Vista al SE; calizas ubicadas al sur del Punre. N- 9220615. E- 803775.

➤ **Cretácico superior**

- **Grupo Pulluicana (Ks-p)**

Su afloramiento se presenta en el sector NE de la Subcuenca Chanche; caracterizada por una intercalación de calizas y margas gris parduzcas en estratos con grandes espesores compactos y con delgadas capas de arcillitas grises fosilíferas en Santa Rosa de Milpo y Quengomayo.



Foto 15. Vista al NO; rocas calcáreas del Grupo Pulluicana en el tramo carretera Hilorico-Sartenes. Coordenadas N- 9229361. E- 797494.

➤ **Paleógeno-Neógeno**

• **Volcánico San Pablo (Ti-vsp)**

Las rocas volcánicas corresponden al volcánico San Pablo que se caracteriza por presentar secuencias de piroclásticos del tipo pómez y cenizas, que muestran una textura porfiríticas de cristales y fragmentos líticos con una coloración gris-oscuro se evidencia en el tramo de carretera del centro poblado El Punre hacia Quengomayo.

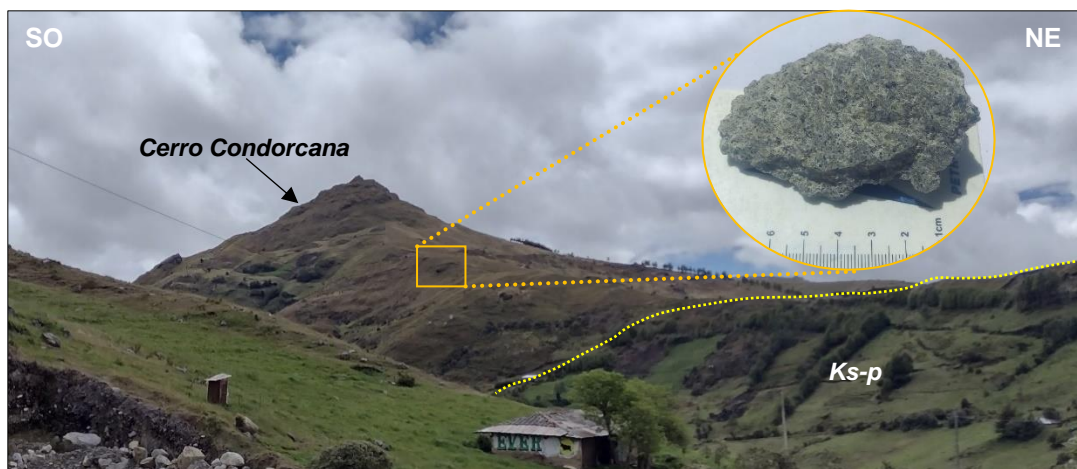


Foto 16. Vista al NO; cerro Condorcana formado por rocas volcánicas que suprayacen a las calizas del Grupo Pulluicana, al sur del centro poblado Quengomayo. Coordenadas N- 9227784. E- 800847.

Tabla 5. Descripción de la roca del volcánico San Pablo.

Tipo de roca: Toba	Descripción
	<p>Roca con tonalidades gris-oscuro con textura hipocristalina, los minerales que constituyen son plagioclasa, biotita (Bt), hornblenda (Hb) y cuarzo (Qz).</p>

➤ Depósitos cuaternarios

Se encuentran en discordancia angular sobre todas las unidades litoestratigráficas del Cretácico Inferior y Superior, asimismo a las rocas hipabisales y volcánicas; dichos depósitos se originan debido a la acción meteórica física y química; se clasifican en depósitos coluviales-aluviales, identificados y delimitados en toda la Subcuenca Chanche.

- ***Depósitos coluvio-aluviales (Q-co/al)***

Se caracterizan por presentarse en forma de terrazas en las quebradas donde predominan bloques de roca, arenas y limos.



Foto 17. Vista al SO; Depósitos coluvio-aluviales, quebrada Carbón, carretera Punre. Coordenadas N- 9224493. E- 799342.

➤ Magmatismo

En el tramo de carretera del centro poblado El Punre hacia Santa Rosa de Milpo afloran rocas hipabisales porfiríticas del Neógeno compuesto por minerales de feldespatos, plagioclasa, cuarzo y hornblenda como se evidencia en la Foto 18; dichas rocas hipabisales han sido emplazados siguiendo la orientación de fallas y fracturas, e intercalados entre los estratos de rocas silíceo-clásticas a manera de sill en las Formaciones Santa y Carhuaz y de diques o stocks en las Formaciones Chimú y Farrat, ver Figura 19.

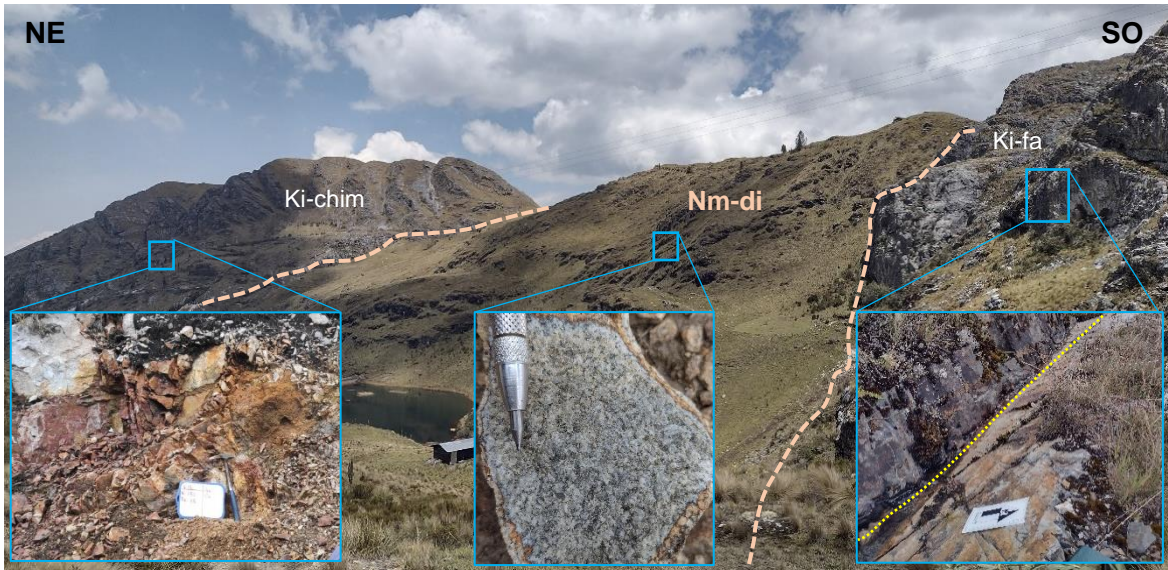


Foto 18. Vista al SE; Formación Farrat, roca hipabisal diorita porfírica y Formación Chimú al sur de centro poblado El Punre. Coordenadas N- 9224169. E- 799618.

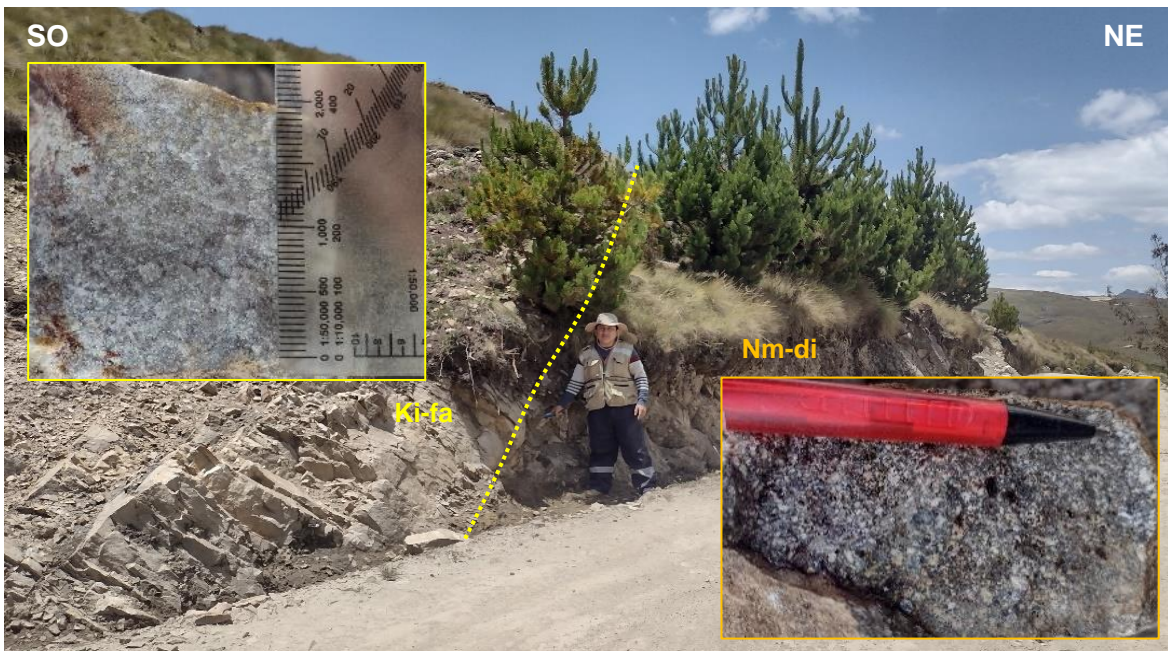


Foto 19. Vista NO; Formación Farrat en contacto con roca hipabisal en el tramo de carretera Quinamayo-Michiquillay. Coordenadas N- 9222131. E- 799335.

Tabla 6. Descripción del tipo de roca hipabisal.


Tipo de roca: Diorita-porfirítica	Descripción
	<p>Roca con tonalidades gris-oscuro con textura porfirítica, los minerales son plagioclasa, biotita, hornblenda y cuarzo.</p>

Tabla 7. Descripción del tipo de roca de la Formación Farrat.

Tipo de roca: Arenisca	Descripción
	<p>Roca con tonalidades gris-blanquecina, de tamaño de grano menor a 1 mm, minerales de cuarzo y óxidos de hierro.</p>

3.2 PROCEDIMIENTOS

3.2.1 Etapa preliminar

En esta etapa se inicia con la recopilación de bibliografía, antecedentes teóricos, análisis regional mediante cartas geológicas del INGEMMET e imágenes satelitales centrándose en la información sobre geoestructuras como fallas, fracturas y plegamientos, asimismo la distribución espacial de yacimientos minerales dentro del área de investigación.

3.2.2 Etapa de campo

Reconocimiento de la Subcuenca Chanche, en la cual se realizó el cartografiado geológico-estructural, así como la identificación y delimitación de los yacimientos minerales. Para las unidades litoestratigráficas se realizó la caracterización como el tipo de roca, mineralización y alteración, para las geoestructuras se realizó la toma de datos de azimuth, buzamiento y pitch, así como sus indicadores cinemáticos.

3.2.3 Etapa de gabinete

El procesamiento de los datos geológico-estructurales obtenidos de campo se analizó mediante los softwares ArcGIS, para la elaboración de planos y secciones geológicas, Stereonet y Faultkin, para la interpretación de proyecciones estereográficas de fallas, fracturas y pliegues; ubicación de yacimientos minerales y relacionar con el Modelo Riedel. Finalmente se hizo el análisis y discusión de resultados obtenidos de la Subcuenca.

3.2.4 Metodología

El tipo de investigación es no experimental porque se realiza tal como se encuentra en la naturaleza sin modificación alguna; y con diseño transversal porque se estudia en un momento determinado de tiempo. El nivel es descriptivo, porque se describe la geometría de fallas, fracturas y pliegues; asimismo el Modelo Riedel.

3.2.5 Población de estudio

Son las Formaciones geológicas, fallas, fracturas y pliegues en la Subcuenca Chanche.

3.2.6 Muestra

Indicadores cinemáticos, rumbo y buzamiento.

3.2.7 Unidad de análisis

Litología.

Fallas, fracturas y pliegues.

Fallas Riedel.

3.2.5 Técnicas

Las técnicas que se emplearon para la recolección de datos geológicos-estructurales son mediciones directas en campo a partir de la observación, descripción, caracterización y análisis de afloramientos de Formaciones y medición de datos estructurales como azimut, buzamiento y pitch de fallas, fracturas y pliegues, así como la identificación de indicadores cinemáticos para su posterior análisis estereográfico con softwares de Stereonet y Faultkin; asimismo se recolectó información de imágenes satelitales e información bibliográfica como planos geológico-estructurales (ArcGIS 10.8); los materiales e instrumentos utilizados en campo como la carta geológica 14-g brindado por INGEMMET, formatos y tablas para la data estructural, brújula, navegador (GPS), lápiz de dureza, picota y lupa de 20x, la toma de fotos es para evidenciar la realidad en campo y finalmente el análisis e interpretación de las geoestructuras con el Modelo Riedel y su asociación con los yacimientos minerales.

3.2.6 Instrumentos y equipos

Para realización de la presente investigación tanto en la etapa preliminar, campo y gabinete, se utilizaron diversos instrumentos y equipos geológicos como se muestra en al siguiente Tabla 8:

Tabla 8. Materiales de campo.

Materiales de Campo	Descripción
Plano satelital, topográfico, geológico.	Escala 1:50 000.
Plano estructural.	Cartografiado de estructuras en campo.
Brújula Brunton	Mediciones de azimuts y buzamientos.
GPS Garmin 64 s	Para toma de coordenadas en UTM, WGS-84
Cámara fotográfica	Toma de fotos.
Protactor multiescala	Plasmar mediciones estructurales en planos.
Picota Estwing	Para obtener muestras.
Lupa metálica 20 X	Observar minerales en una escala mayor.
Lápiz de dureza y magnético	Rayar minerales y ver susceptibilidad magnética.
Ácido clorhídrico diluido al 10%	Efervescencia en muestras.
Tablero de campo	Para soporte y manejo de planos.
Libreta de campo	Registrar datos geológico-estructurales.
Colores, lápiz, lapiceros	Anotaciones en planos y libreta.

3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

3.3.1 Estructuras continuas

Pliegue Anticlinal. El anticlinal denominado El Galeno, atraviesa toda la Subcuenca Chanche con una distancia de 11 km y con orientación NO afectando a las rocas silícico-clásticas del Grupo Goyllarisquizga y demás Formaciones del Cretácico Inferior y Superior.

En los cerros El Lago, La Boya y Milpo se evidencia estratos del Flanco Izquierdo con azimut de N 145° y buzamiento 58° al SO, y el Flanco Derecho con N 305° y 65° al NE; además presenta un plunge de 18° hacia el NO en el sector del cerro denominado Milpo (al Norte de la Subcuenca Chanche) ver Foto 20.

Los estereogramas muestran la dirección del esfuerzo tectónico principal mayor (σ_1) afectando a la Formación Chimú en el cerro La Boya, y genera un pliegue anticlinal con su eje de plano axial inclinado al NE como se muestra en la Foto 21.

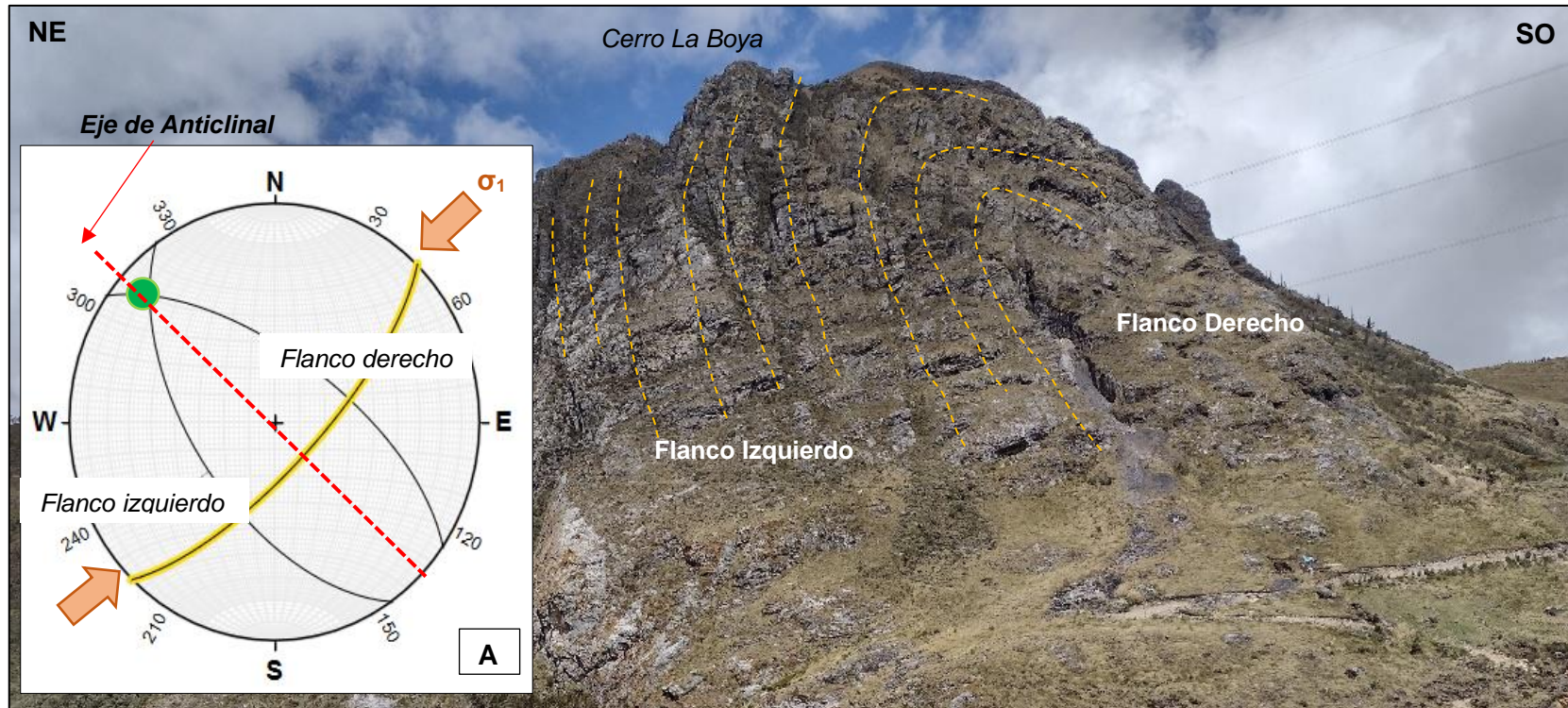


Foto 20. Vista al SE; anticlinal El Galeno en el cerro La Boya. A. Proyección estereográfica que se muestra el σ_1 (flechas rojas), con orientación NE-SO y plunge de 18° (punto verde). Coordenadas N- 9225098. E- 799710.

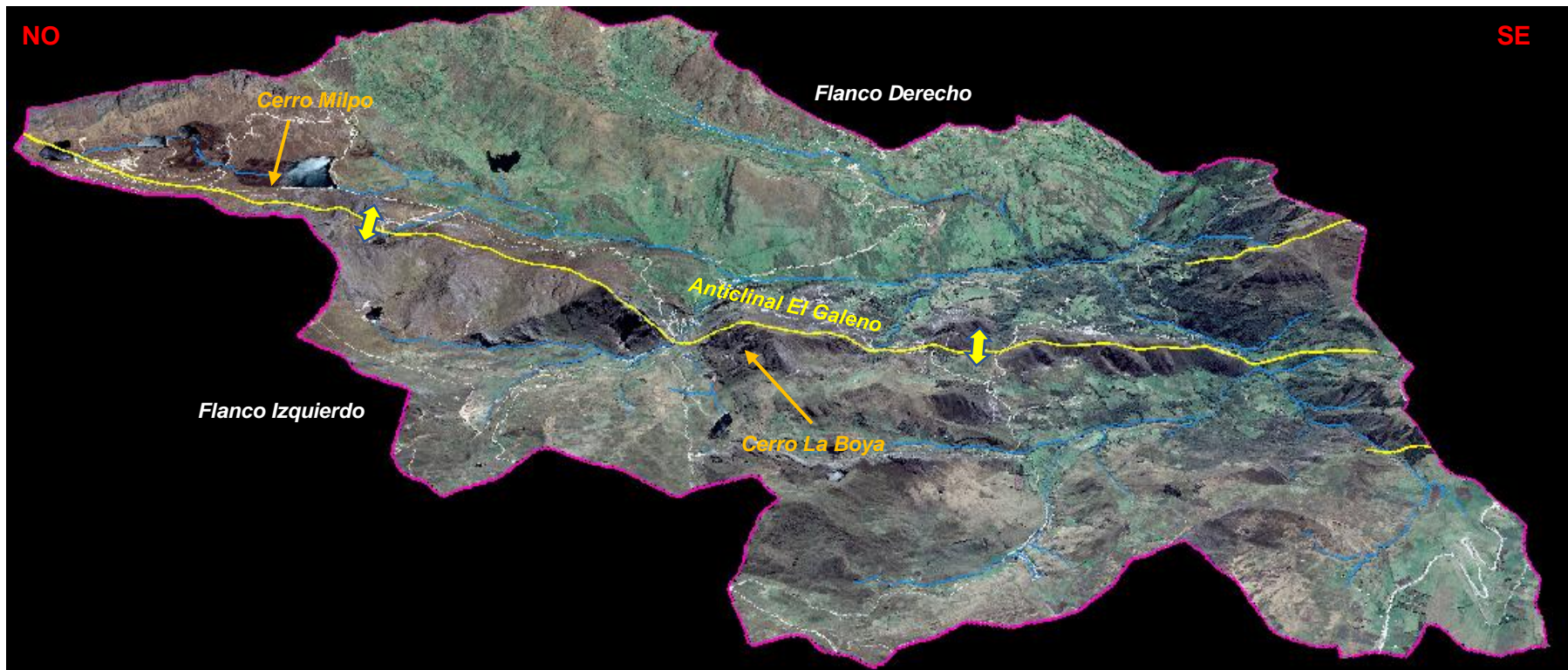


Foto 21. Anticlinal El Galeno atravesando con orientación NO-SE la Subcuenca Chanche (línea amarilla) además dicha estructura origina los cerros Milpo y La Boya; proyecciones estereográficas de sus flancos derecho e izquierdo.

Pliegue Sinclinal. Se ubica al Este de la Subcuenca Chanche cercano al centro poblado Cancha Corral, los estratos presentan un azimut de N110°/ 55° NE para el flanco derecho y N 280°/ 65° SO para el izquierdo, con orientación de su eje de E-O que afecta a las rocas cretácicas de la Formaciones Farrat y Carhuaz producto de esfuerzos compresivos, esfuerzo principal mayor (σ_1), con orientación N-S como se evidencia en el estereograma de la Foto 22 y presenta un plunge de 8° al Oeste.



Foto 22. Vista al SE; pliegue sinclinal afectando la Formación Chimú en el sector Punre. Coordenadas N- 9225607. E- 800111.

3.3.2 Estructuras discontinuas

Falla Punre-Canchis-Magistral. Es una estructura regional que atraviesa la Subcuenca Chanche con una distancia aproximada de 10 km con orientación variable de NO a NE y N-S que coincide con el cauce del río Chanche; presenta un buzamiento que varía de 60° a 80° al sur y suroeste. En la Foto 23 se evidencia la Falla Punre-Canchis-Magistral de comportamiento inverso debido a que pone en contacto a la misma cota las areniscas de la Formación Farrat y rocas calcáreas del Grupo Pulluicana cercano al yacimiento Hilorico, asimismo existen fallas normales e inversas de pequeñas dimensiones con orientación de N-S y NE que afectan las rocas calcáreas con buzamientos subverticales y desplazamientos de unos pocos metros a decenas de metros. En la Foto 24 (a) y (b) se muestra las proyecciones estereográficas con orientación de esfuerzos tectónicos principal

mayor (σ_1) y menor (σ_3), los indicadores cinemáticos que son líneas en forma de surcos y desniveles de tamaño milimétricos formado por recristalización de minerales de calcita e indicando la dirección y sentido de una falla normal-dextral con la flecha naranja en roca caliza y en la (b) es una superficie de falla con recristalización de calcita a modo de escalones, la flecha roja indica el movimiento del bloque techo para una falla inversa-sinistral.

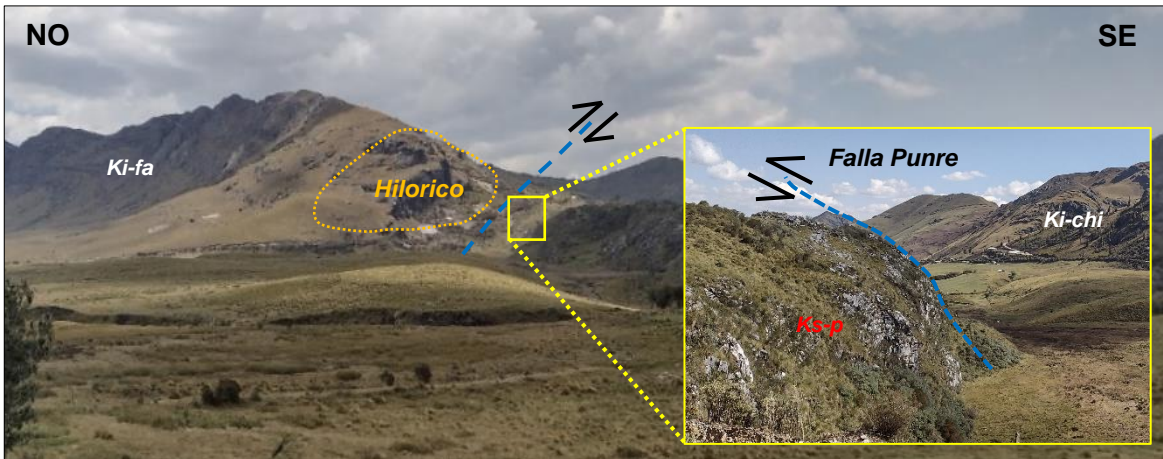


Foto 23. Vista al NE; Falla Regional Punre-Canchis-Magistral de comportamiento inverso (línea celeste) entre la Formación Farrat y el Grupo Pulluicana; cerca al yacimiento Hilorico. Coordenadas N- 9228335. E- 797519.

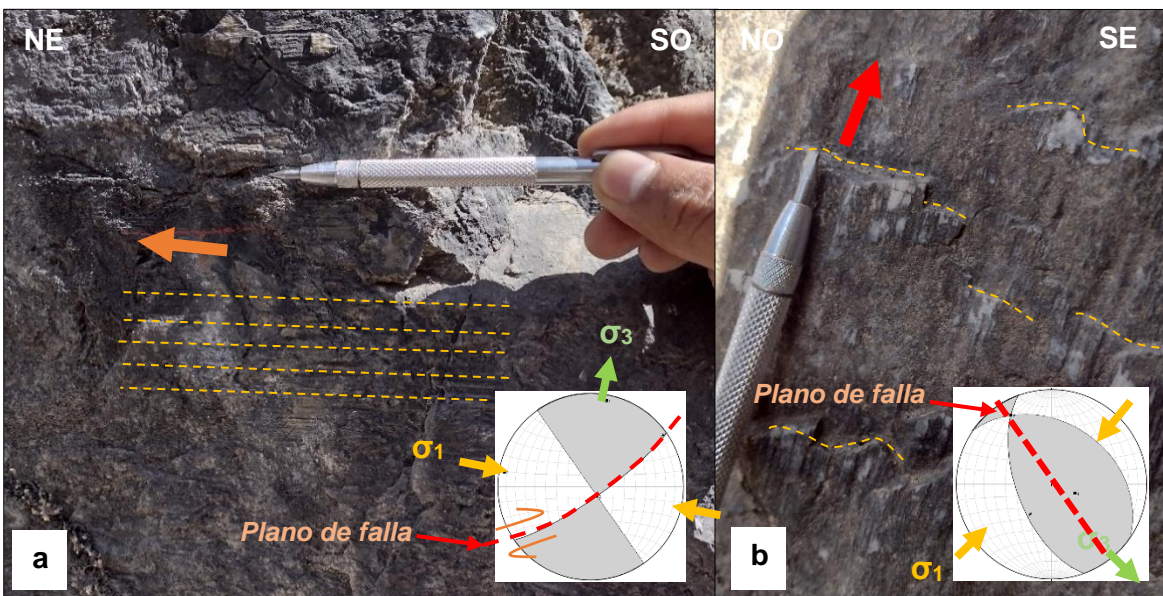


Foto 24. a. Vista al SE; plano de una falla dextral. b. Vista al NE; falla inversa e indicadores cinemáticos cristalizados en forma de escalones de calcita, las flechas indica el desplazamiento de falla. Coordenadas N- 9228335. E- 797519.

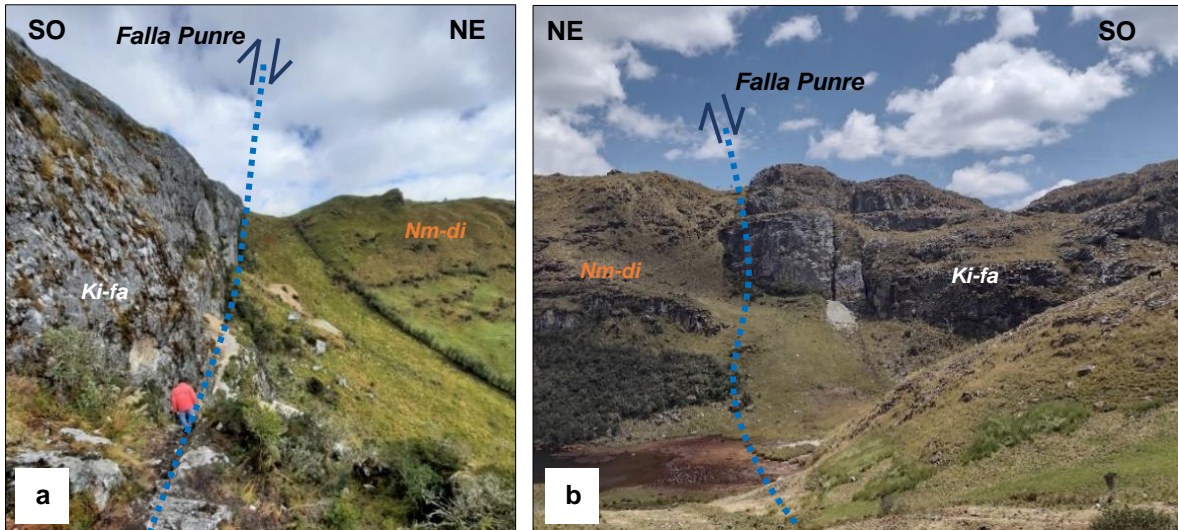


Foto 25. a. Vista al NO; falla inversa con orientación NO-SE. b. Vista al SE; fallas paralelas a la Falla Punre, en el sector Punre Viejo. Coordenadas N- 9223808. E- 799541.

Fallas Locales. En la Subcuenca Chanche existe fallas locales de comportamiento normal o inverso con orientaciones NE-SO y N-S afectando a todas las unidades litoestratigráficas del área de investigación. En los cerros La Boya, El Lago y Punre viejo litológicamente compuesto por areniscas, limolitas y arcillitas están afectadas por fallamiento local que se caracterizan por presentar relleno de óxidos de hierro (jarosita, limonita y goethita) con un espesor promedio de 0.30 m; en algunas zonas, se interceptan con las fallas de orientación andina NO generando zonas favorables para el emplazamiento de minerales económicos como de oro (Au) y plata (Ag). El fallamiento local está afectado por esfuerzos principales mayores (σ_1) con orientación de E-O y el esfuerzo principal menor (σ_3) de N-S como se evidencia en los estereogramas de la Foto 26.

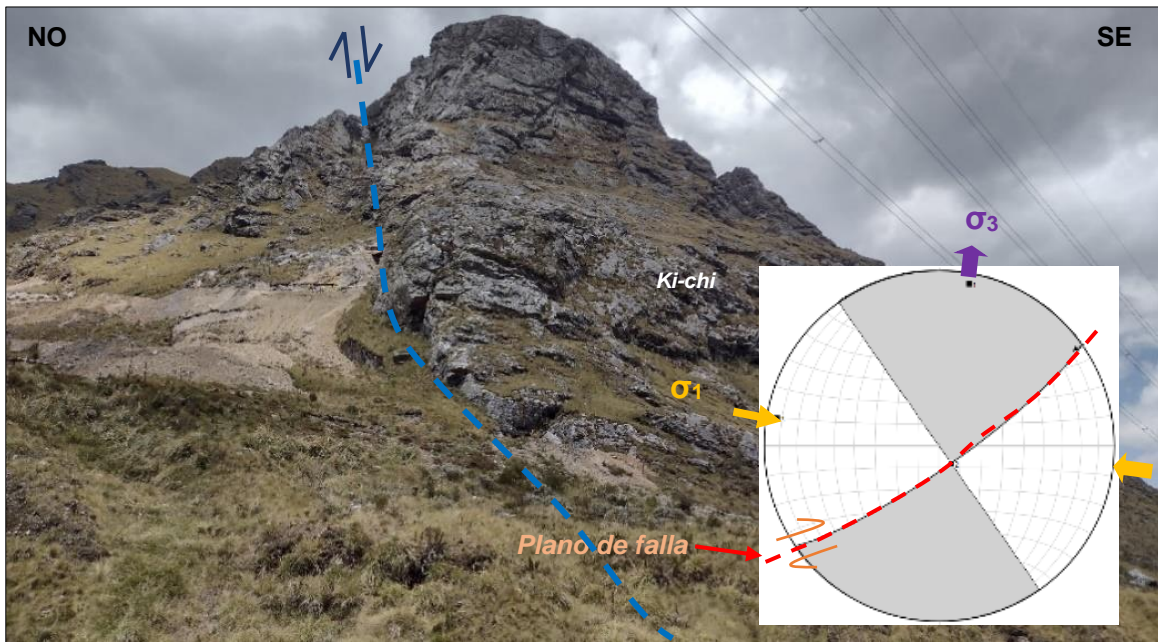


Foto 26. Vista al NE; cerro El Lago afectado por una falla dextral de NE-SO y fracturamiento a los estratos de la Formación Chimú; la proyección estereográfica indica que σ_3 tiene orientación N-S y σ_1 es E-O. Coordenadas N- 9225203. E- 799052.

3.3.3 Fracturas de apertura

Los esfuerzos tectónicos que actuaron en las unidades litoestratigráficas de la Subcuenca Chanche generó fracturas sin relleno y otras con relleno, las primeras se encuentran mayormente en areniscas silíceo-clásticas de la Formación Chimú, Farrat y en rocas calcáreas del Grupo Pulluicana. Las fracturas que se encuentran rellenas de minerales se denominan venas. Por lo general estas venas se encuentran por carbonatos (calcita) que están afectadas por fallamiento y encontrándose en forma sigmoidal determinándose así su análisis cinemático como se muestra en la Foto 28; relleno por arcillas, como se evidencia en la Foto 27 (a), de cuarzo y sulfuros. Además, en algunos puntos específicos dentro del área de investigación se encuentran relleno dichas estructuras por minerales oxidados (jarosita, limonita, goethita) en superficie como producto de la alteración de sulfuros a profundidad como se evidencia en la Foto 27 (b) y (c); todo ello se puede observar en el sector Punre viejo o Minas viejas que la roca es arenisca de la Formación Farrat y en el sector Milpo que está conformado por la Formación Chimú en donde existe venas con espesor promedio de 0.30 m - 0.50 m rellenos de minerales sulfurados de pirita y calcopirita (sulfuro de Cobre) en el tramo de carretera del centro poblado El Punre hacia Santa Rosa de Milpo.

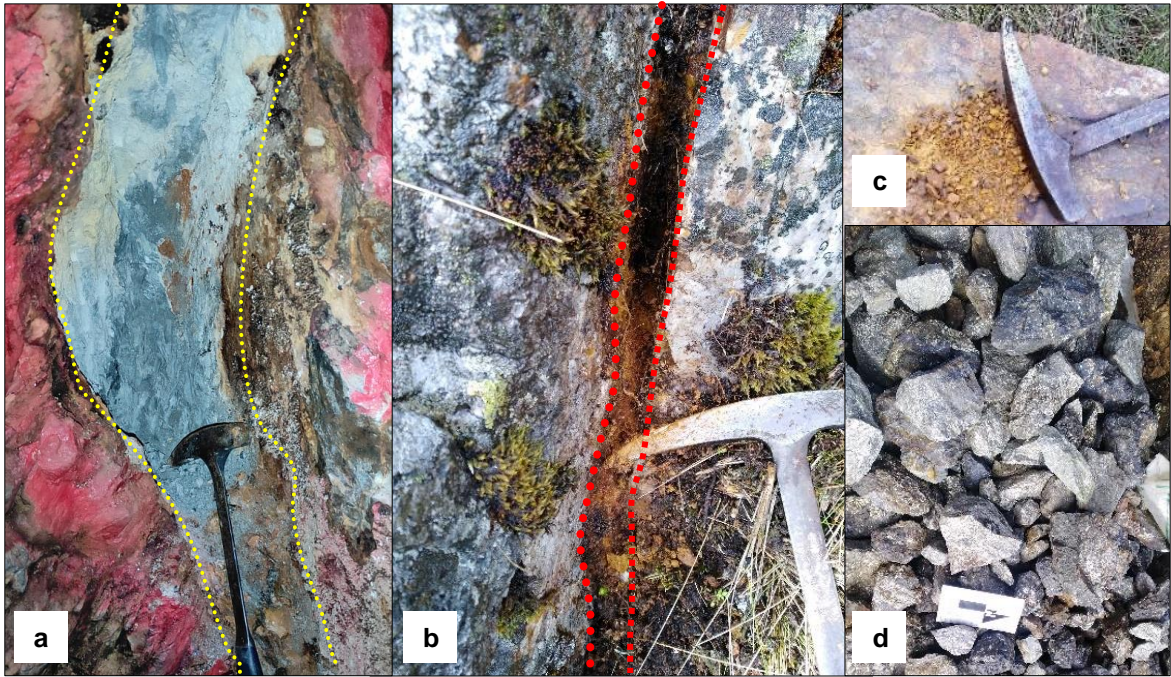


Foto 27. Venas rellenas por minerales sulfurados (pirita y calcopirita) y óxidos de hierro. Coordenadas N- 9226580. E- 797354.

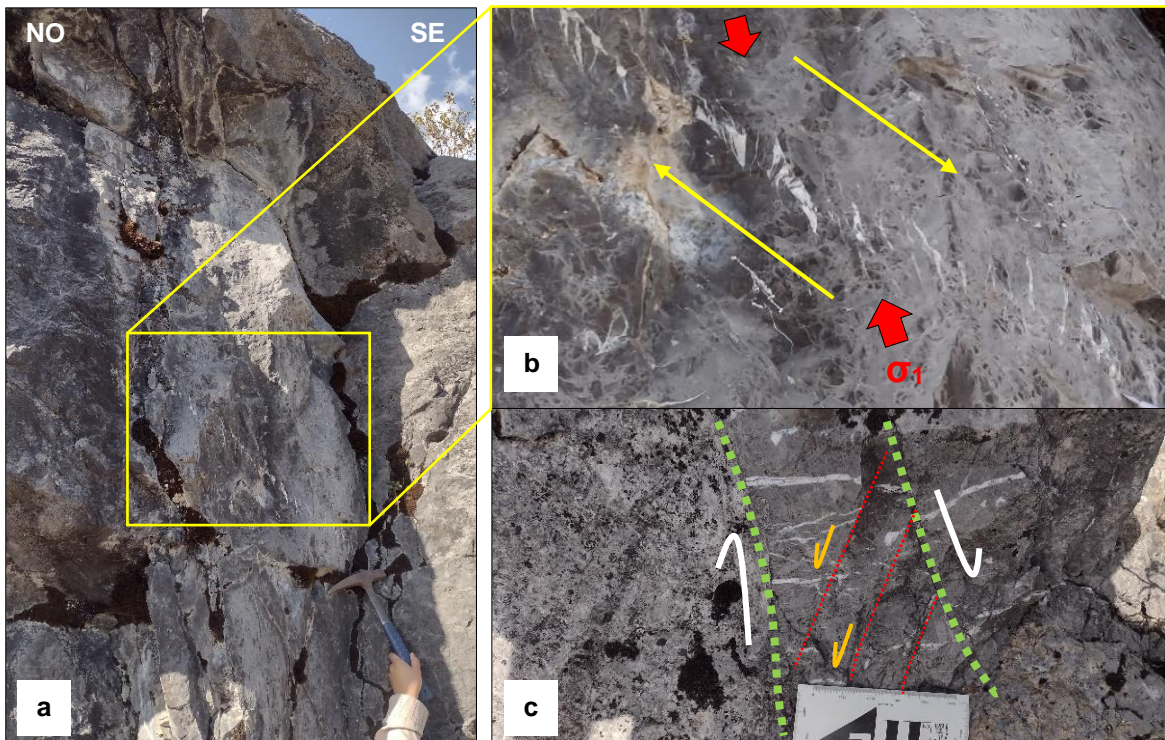


Foto 28. Vista al NE; venas rellenas por calcita del Grupo Pullucana. b. Esfuerzos compresionales σ_1 (flecha roja). c. Fallamiento dextral (línea verde) y sinistral (línea roja) afecta las venas de calcita; carretera Sartenes. Coordenadas N- 9229329. E- 797484.

3.3.4 Fracturas de contracción

Se logró observar fracturas por contracción (perpendicular a σ_1), dichas fracturas se denominan “estilolitos” característico por ser superficies irregulares de disolución en forma de líneas de sutura. La orientación de los estilolitos permite dar una idea de la dirección de acortamiento y reconocer los eventos de esfuerzos (σ_1) a la que ha sido sometida.

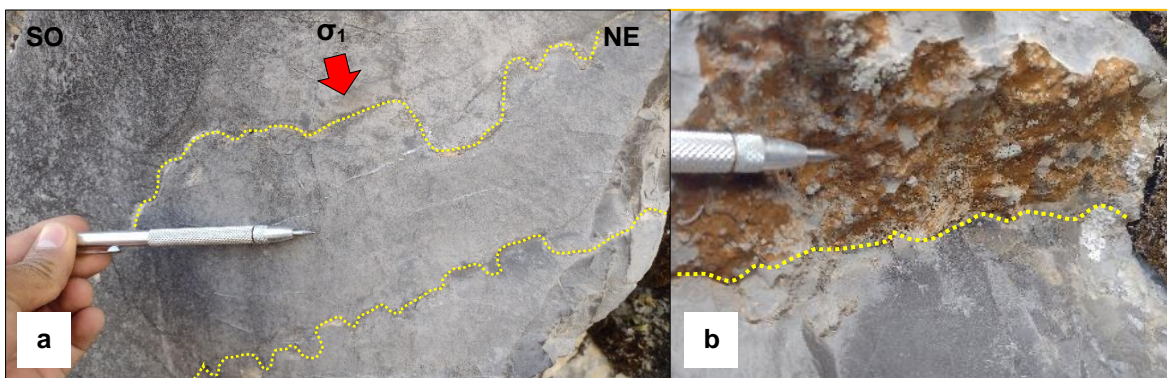


Foto 29. a. Vista al NO; estilolitos en rocas calcáreas del Grupo Pulluicana al norte de Santa Rosa de Milpo. b. sinuosidad de la sutura y óxidos de hierro con arcilla. Coordenadas N- 9229328. E- 797321.

3.4 YACIMIENTOS MINERALES

3.4.1 Yacimiento El Galeno (Cu-Au-Mo)

El Galeno es un stock porfirítico diorítico con mineralizaciones de Cu-Au y Mo con un recurso geológico estimado de 765 Mt con 0.49% Cu, 0.11 g/t Au y 0.014% Mo, emplazado en las unidades sedimentarias litoestratigráficas plegadas del Grupo Goyllarisquizga, vista en planta el pórfido tiene aproximadamente 1.25 km por 0.6 km en forma elíptica con su eje mayor de orientación NO. La alteración y mineralización presenta una edad absoluta de 17.5 y 16.5 Ma (Davies, 2002).

El yacimiento se encuentra a una altitud promedio que varía entre 3850 y 4100 m.s.n.m; la roca caja en donde está emplazado son areniscas de la Formación Chimú y areniscas, limolitas, arcillitas de las Formaciones Santa y Carhuaz; aparentemente el contacto que se observa es en forma vertical y subvertical entre las areniscas, mientras que en limolitas y arcillitas es de manera variable.



Foto 30. Yacimiento El Galeno y las Formaciones en donde está emplazado.
 Coordenadas N- 9227911. E- 797199.

3.4.2 Yacimiento Hilorico (Au-Ag)

Ubicado a 2 km al este del yacimiento El Galeno; es de tipo epitermal de alta sulfuración de oro (Au) con leyes hasta 1 gr/t. Está emplazado en las areniscas fracturadas de la Formación Farrat y estructuralmente se ha identificado muy cercano a la Falla Punre-Canchis-Magistral de cinemática inverso-sinestral y fallas locales con dirección NE. Consta de brechas con clastos angulosos a subangulosos de areniscas de tamaño mm a cm, en una matriz de limos y arcillitas afectado por venas de óxidos de hierro como jarosita, limonita y goethita con mineralización (Rivera 2008).



Foto 31. Yacimiento mineral Hilorico y la Falla Punre-Canchis-Magistral. N- 9228326. E- 797416.

3.4.3 Yacimiento Deborah (Au-Ag)

Es un yacimiento tipo epitermal de alta sulfuración con mineralización de oro (Au) y plata (Ag) que se encuentra ubicado en el cerro La Boya al Sur de los yacimientos El Galeno e Hilorico; la mineralización se presenta en venas, venillas y en zonas de brechamiento que es producto del fallamiento local y regional, así como la influencia del pliegue anticlinal, sus clastos de la brecha son angulosos y subangulosos de areniscas y matriz de arcillas rojizas con óxidos de hierro (limonita) muy similar al comportamiento litológico al yacimiento Hilorico pero se diferencia ya que aquí existe algunos estratos de areniscas que también se encuentran mineralizados en forma de pequeños mantos como se evidencia en la Foto 32 (b), y estructuralmente se encuentra influenciado por un anticlinal El Galeno y la Falla Punre-Canchis-Magistral que está al este del yacimiento Deborah.

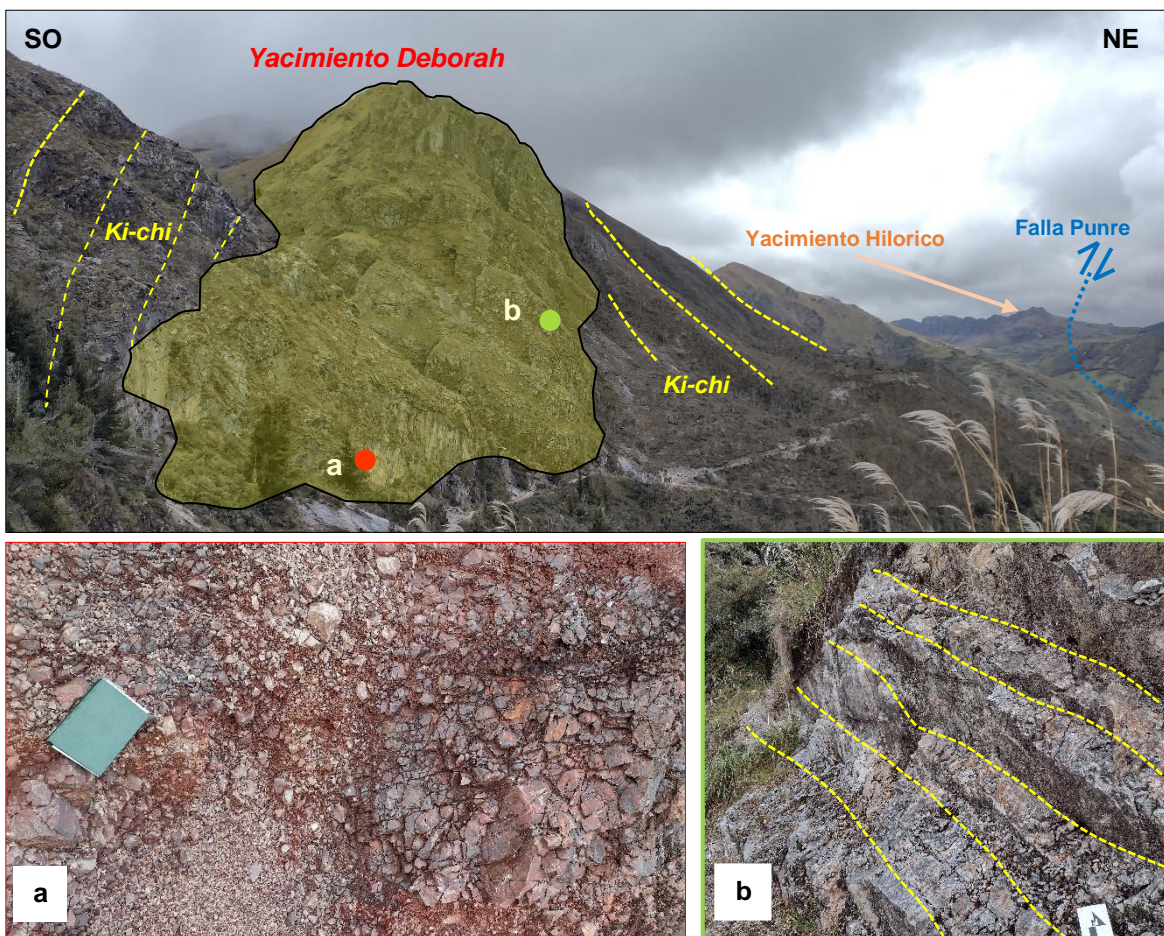


Foto 32. Vista al NO; Yacimiento Deborah. a. Brechas con óxidos de hierro. b. Estratos de areniscas intercaladas con limolitas al sur del centro poblado El Punre. N- 9228326. E- 797416.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LA GEOLOGÍA LOCAL

En la Subcuenca Chanche se determinó los afloramientos de rocas del Grupo Goyllarisquizga, correspondientes al Cretácico Inferior, encontrándose las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz, Farrat e Inca, las cuales se caracterizan por presentar rocas silíceo-clásticas, intercalación de areniscas, limolitas y arcillitas; encontrando en la secuencia estratigráfica de la Formación Chimú la existencia de mantos de carbón tipo bituminoso y antracítico (Rivera, 2008), como se evidencia en los cerros El lago, La Boya y Milpo. Hacia la zona sur se encontró rocas calcáreas que pertenecen a la Formación Chúlec y Pariatambo, ambas con fósiles característicos como los ammonites; y hacia la zona noreste se determinó rocas calcáreas intercaladas con margas y arcillitas fosilíferas pertenecientes al Grupo Pullucana del Cretácico Superior. Toda esta secuencia litoestratigráfica está intruida por rocas hipabisales porfiríticas dioríticas del Neógeno (Nm-di) y suprayaciendo en discordancia angular las rocas volcánicas del Volcánico San Pablo del Mioceno que pertenecen al cenozoico; sobreyace a dichas Formaciones encontramos depósitos cuaternarios coluvio-aluviales que están ubicados en los cauces de la subcuenca como se evidencia en el Anexo N° 05.

4.2 ANÁLISIS DE LAS UNIDADES MORFOGENÉTICAS

En el área de investigación se determinó planicies distribuidas mayormente en los centros poblados Milpo, Santa Rosa de Milpo, además es en este tipo de geofomas se emplazan lagunas como Dos Colores, Mullo y Pungurume; las lomadas se encuentran emplazadas algunos cauces de quebradas y ríos como el Carbón, Uñigan y el río Chanche; las laderas y escarpas afectan toda la Subcuenca como se evidencia en Anexo N° 04.

4.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En el área de investigación, estructuralmente se ha determinado las siguientes geoestructuras: fallas, fracturas y pliegues, la Falla Punre-Canchis-Magistral atraviesa toda la Subcuenca Chanche con una distancia de 10 km y con orientación NE-SO en el sector Cancha Corral / Challuayaco, cambiando a NO-SE en los sectores del Punre hasta Santa Rosa de Milpo, con buzamiento de 60° a 80° al SO. De acuerdo con los indicadores cinemáticos su comportamiento es inverso-sinistral, asimismo existen fallas locales de comportamiento normal e inverso paralelos a la Falla Punre-Canchis-Magistral y otras fallas con orientación de NE-SO a N-S. Las fracturas de extensión o venas son las que tienen relleno de minerales arcillosos, óxidos de hierro (jarosita, limonita y goethita), asimismo de sulfuros (pirita y calcopirita). Existe estructuras de contracción que son los estilolitos, los cuales son generados por esfuerzos compresionales que se evidencian en calizas del Grupo Pulluicana. En el sector Sur de la Subcuenca Chanche existe fallamiento inverso con orientación E-O y orientación de esfuerzo compresivo principal N-S. El pliegue anticlinal El Galeno denominado por Davies (2002) se encuentra atravesando toda el área de investigación con orientación NO paralelo a la Falla Punre-Canchis-Magistral. El pliegue sinclinal que se encuentra en el sector SE, presenta una orientación de E-O y varia a NO. La existencia de lineamientos en toda el área de investigación se encuentra alineados con la Falla Punre-Canchis-Magistral y al anticlinal El Galeno (Ver Anexo N° 06).

4.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON EL MODELO RIEDEL

Las geoestructuras continuas y discontinuas se encuentran relacionadas con el Modelo Riedel; teniendo las fallas y estructuras como las venas que actúan como Fallas Tipo T (tensión) es generado por esfuerzo principal mayor σ_1 con dirección NE-SO, dicho esfuerzo genera pliegues como anticlinal El Galeno y falla inversa regional como Punre-Canchis-Magistral. La Falla P está relacionada con los mantos de carbón y otras venas con orientación NO; el drenaje aparentemente tiene relación con la Falla R y con su conjugada la Falla R'. En el sector El Milpo existe fallas de diferente comportamiento de acuerdo con el Modelo Riedel como se ve en Anexo N° 06.

4.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON YACIMIENTOS MINERALES

El análisis estructural en relación con los yacimientos minerales dentro de la Subcuenca Chanche, fue indispensable para el emplazamiento de estos; el procesamiento de los datos geológico-estructurales tomados en campo se procesó mediante los softwares Stereonet, Faultkin y ArcMap 10.8.

El **yacimiento mineral El Galeno**, es un pórfido con mineralización de Cu-Au-Mo (cobre, oro y molibdeno); ubicado al norte de la Subcuenca Chanche, se encuentra emplazado en la intersección del anticlinal del mismo nombre y una falla local de cinemática dextral con orientación NE y cercano a dichas geoestructuras se encuentra la Falla Punre-Canchis-Magistral con cinemática inversa sinistral y evidenciando en las secciones geológicas-estructurales; esta Falla ha sido la generadora para el emplazamiento del pórfido por lo tanto se infiere que las fallas y los pliegues han sido el principal control estructural para el emplazamiento del yacimiento porfirítico. Además, el control litológico por la parte de la roca caja es muy importante en el emplazamiento del stock porfirítico intruye las areniscas de la Fm. Chimú el contacto es de forma vertical, pero cuando el stock hipabisal corta las Formaciones Santa y Carhuaz el cuerpo porfirítico se expande lateralmente debido que las limolitas y arcillitas que son más dúctiles que las areniscas.

El **yacimiento mineral Hilorico**, a 2km al este del yacimiento El Galeno, es una brecha hidrotermal de alta sulfuración de Au (oro) que se encuentra emplazado sobre la Falla Punre-Canchis-Magistral y fallamiento local con orientación NE-SO. Falla R, Falla Punre y el lineamiento NO-SE han generado zonas favorables para el emplazamiento del yacimiento mineral, ver Anexo N° 06.

El **yacimiento mineral Deborah** es un epitermal de alta sulfuración con mineralización de Au (oro) emplazado en la Formación Chimú y paralelo al anticlinal El Galeno y la Falla Punre-Canchis-Magistral. El fracturamiento tiene orientación NE (Fallas T) e interceptados con NO (Fallas P) generan zonas favorables para la existencia de mineralización como venas, venillas y brechamiento que es producto del fallamiento local y regional, así como la influencia del pliegue anticlinal; sus clastos de la brecha son angulosos y subangulosos de areniscas y matriz de arcillas

rojizas con óxidos de hierro (limonita) muy similar al comportamiento litológico al yacimiento Hilorico pero se diferencia ya que aquí existe algunos estratos de areniscas que también se encuentran mineralizados de pirita diseminada en forma de pequeños mantos.

Existen yacimientos no metálicos, lo cual se logró identificar 2 mantos de carbón de tipo bituminoso y antracítico; emplazados en la intercalación de los estratos de las areniscas cuarzosas y limoarcillitas de la Formación Chimú, dichos estratos fueron afectados por el fallamiento y plegamientos los cuales generaron presión, calor y fracturamiento del carbón mineral, como se evidencia en el Anexo N° 06.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	ESPE. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	
CENOZOICA	CUATERNARIO						Depósitos fluvio-glaciares, aluvial, coluvial y fluvial.
	NEÓGENO	MIOCENO	GPO. VOLC. CALIPUY	FM. HUAMBOS	1500		Depósitos de flujos de lava andesítica, gris verdos porfírica. Depósitos de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, gris blanquecino a amarillento, rico en cristales. Depósitos de flujos piroclásticos, tufos y lavas andesíticas con dacitas.
				FM. PORCULLA			
				FM. SAN PABLO			
PALEÓGENO			CHOTA	250		Conglomerados con rodado de cuarcita. Conglomerado con rodado de calizas y areniscas rojizas.	
MESOZOICA	CRETÁCICO	SUPERIOR		CELENDÍN	350		Dacitas Calizas, margas y lutitas gris amarillentas. Dioritas
				CAJAMARCA	500		Calizas gris azuladas, macizas, con delgados intercalaciones de lutitas y margas.
				QUILQUINÁN (Romirón-Coñor)	250		→ Yacimiento El Perol Horizontes de calizas y margas nodulosas y fosilíferas limolitas y lutitas calcáreas gris claras. Margas y calizas nodulosas en bancos medianos limolitas y lutitas calcáreas. Calizas y margas nodulosas gris oscuras bancos medianos.
			GRUPO PULLUICANA	MUJARRÚN (Choro-Culebra)	480		Calizas gris claras a parduscas, masivas en bancos medianos a gruesos, margas fosilíferas (parte media) y escasos niveles de lutitas. Calizas en bancos delgados y medianos hacia el piso. → Yacimiento Chailhuagón → Tonalitas-dioritas
				YUMAGUAL	880		
			GRUPO CRISNEJAS	PARIATAMBO	240		Calizas delgadas bituminosas gris oscuras y niveles de lutita. → Yacimiento La Carpa
				CHULEC	270		Calizas arenosas, margas y limolitas calcáreas pardo-amarillentas. → Yacimiento Michiquillay
				INCA	150		Lutitas calcáreas y ferruginosas, con niveles de areniscas.
			GRUPO GOYLLARISQUIZGA	FARRAT	400		Cuarcitas y areniscas blancas. → Yacimiento Hilorico
				CARHUAZ	400		Areniscas rojizas y cuarcitas blancas intercaladas con lutitas grises.
				SANTA	90		Lutitas grises y calizas margosas.
				CHIMÚ	600		→ Yacimiento El Galeno Areniscas, cuarcitas, lutitas y mantos de carbón en la parte inferior, cuarcitas en la parte superior.

Figura 23. Columna estratigráfica local (Heras, 2017).

4.6 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El control estructural de las geoestructuras como pliegues, fallas y fracturas en rocas sedimentarias, hipabisales y volcánicas, así como las geoformas determinadas por planicies, lomadas, laderas y escarpas están influenciadas por la Falla Punre-Canchis-Magistral y fallamiento local; asimismo el comportamiento geológico-estructural está relacionado con el Modelo Riedel, el cual a su vez está asociado a los yacimientos minerales de El Galeno, Hilorico y Deborah; con lo cual se contrastó la hipótesis planteada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se cartografió las unidades litoestratigráficas del Cretácico Inferior y Superior, las geoestructuras como pliegues, fallas y fracturas; asimismo las unidades morfogenéticas planicies, lomadas, laderas y escarpas en la Subcuenca Chanche.

En dos secciones geológicas-estructurales las intrusiones dioríticas porfiríticas están emplazadas en rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior, estructuralmente afectadas por la Falla Punre-Canchis-Magistral, fallas locales y plegamiento ubicados en la Subcuenca Chanche.

Las geoestructuras de pliegues presenta orientación NO, las fallas orientación variable NO a NE, las fracturas se presentan en ambas direcciones y el esfuerzo tectónico principal mayor que ha generado las geoestructuras tiene dirección NE y N-S.

Las Fallas T de acuerdo con el Modelo Riedel son perpendiculares a los pliegues y fallas inversas; la Falla R` se relaciona con estructuras de orientación N-S y la Falla R con orientación NE-SO.

Los yacimientos minerales de El Galeno, Hilarico y Deborah se emplazan litológicamente en rocas del Grupo Goyllarisquizga y estructuralmente en las intersecciones de la Falla Punre-Canchis-Magistral, Fallas T, Fallas P y pliegue anticlinal de acuerdo con el Modelo Riedel.

5.2 RECOMENDACIONES

Se sugiere a entidades públicas y privadas realizar estudios a mayor detalle con escala 1:10 000 de la Falla Punre-Canchis-Magistral y fallas locales para comprender con mayor precisión la cinemática de los movimientos geotectónicos y su relación con los yacimientos minerales.

Se sugiere a INGEMMET realizar estudios de prospección geoquímica, cartografiado superficial, muestreo de rocas y suelos a detalle en zonas con presencia de anomalías, que se encuentre fuera de la zona de influencia de la mineralización de los yacimientos El Galeno, Hilorico y Deborah.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asaoka, A. 2016. Riedel shear band formation with flower structures that develop at the surface ground on a Strike Slip fault. Tokyo, Japan, Association for the Development of Earthquake Prediction. 4 págs.
- Blick, N. 1985. Deformation and Basin Formation along Strike-Slip faults. New York, EEUU, The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. 34 págs.
- Burg Pierre, J. 2018. Script to Structural Geology. Zurich, Alemania, ETH Library. 36 págs.
- Chuquiruna, W. 2009. Caracterización Estratigráfica y Estructural de la Subcuenca Chonta – Cajamarca; mediante aplicaciones SIG. Tesis, Cajamarca, Perú, UNC. 50 págs.
- Coelho et al. 2006. Riedel-shear control on the development of pennant veins: Field example and analogue modelling. Germany, University of Mainz. 12 págs.
- Corbett, G. 2009. Anatomy of Porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo Mineralised Systems: Some Exploration implications. Australian Institute of Geoscientists North Queensland Exploration. 13 págs.
- Corbett y Leach, 1997. Southwest Pacific rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. North Sydney, Australia, Corbett Geological Services. 318 págs.
- Davies, R. 2002. Evolución Tectónica, Magmática y Metalogénica del distrito Minero de Cajamarca, Norte del Perú. Tesis, Australia, Universidad James Cook. 10-30 págs.
- Dávila, J. 2011. Diccionario Geológico. Lima, Perú, INGEMMET. 900 págs.

- Eraso, A. 1990. Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje Subterráneo en Macizos Anisotrópicos. España, Universidad Politécnica de Madrid. 29 págs.
- Fletcher, C. 1989. Structural Control and Genesis of Polymetallic Deposits in the Altiplano and Western Cordillera of southern Peru. United Kingdom, British Geological Survey. 11 págs.
- Fossen, H. 2010. Structural Geology. New York, United States of America, Cambridge University Press. 480 págs.
- González, S. 2011. Fracturas de Cizalla Frágil-Dúctil Jurásicas asociadas al distrito Polimetálico Gonzalito, Patagonia, Río Negro. Neuquén, XVIII Congreso Geológico Argentino. 2 págs.
- Heras, K. 2017. Estudio de las Estructuras de Emplazamiento de Cuerpos Ígneos Plutónicos entre la Comunidad de Michiquillay y el Sector Punre. Tesis, Cajamarca, Perú, UNC. 128 págs.
- Leiva, M. 2021. Geología estructural y su Relación con el Emplazamiento de Cuerpos Intrusivos aflorantes en el Litoral Marino al Sur de Lima entre los paralelos S12.33°-S12.47°. Tesis, Cajamarca, Perú, UNC. 174 págs.
- Macharé, J. 2001. Curso de Geología Estructural en la Exploración y Desarrollo de Yacimientos Minerales. Lima, Sociedad Geológica del Perú. 55 págs.
- Martínez, J. 2003. Geología estructural y dinámica global. Madrid, España, Universidad de Salamanca. 432 págs.
- Mondal y Mamtani. 2016. Análisis de Paleoesfuerzos de Fallas Normales en Granito e Implicaciones para interpretar el Fracturamiento Riedel relacionado con la Deformación Regional. Estados Unidos, Universidad de Pensilvania. 12 págs.

- Orche, E. 2001. Manual de Geología y Prospección de Yacimientos Minerales. Madrid, España, E.T.S.I. Minas – U.P.M. 250 págs.
- Oyarzún, R. 2012. Geología Estructural aplicada a la Minería y Exploración Minera: Principios Básicos. Madrid, España, Universidad Complutense. 210 págs.
- Requelme, J. 2021. Caracterización Estructural del Sinclinal de Llullapuquio y su relación en la Intrusión del Pórfido Colpayoc, Cajamarca. Tesis, Cajamarca, Perú, UNC. 20-21 págs.
- Riedel, W. 1929. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Germany. 10 págs.
- Rivera, R. 2008. Geoquímica Isotópica de Plomo en los Pórfidos Miocénicos del Norte del Perú – Región Cajamarca. Tesis. Lima, Perú, INGEMMET. 37-68 págs.
- Rodríguez, R. 2016. Método de Investigación Geológico-Geotécnico para el Análisis de Inestabilidad de Laderas por Deslizamientos zona Ronquillo-Corisorgona. Tesis. Lima, Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 151 págs.
- Rossello, E. 2009. Control Estructural de Mineralizaciones: Determinación Mecánica y Pronósticos Prospectivos. Argentina, CONICET-Universidad de Buenos Aires. 80 págs.
- Sánchez, R. 2012. Determinación de los Vectores de Mineralización y Zonamiento de Alteraciones Hidrotermales del Proyecto Shahuindo. Tesis, Cajamarca, Perú, UNC. 30 págs.
- Sillitoe, R. 2010. Porphyry Copper Systems. London, England, Society of Economic Geologists. 39 págs.

- Sillitoe y Hedenquist, 2003. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. London, England, Society of Economic Geologists. 30 págs.
- Torres, J. 2020. Mega Sistema Estructural Cajamarca, Configuración Estructural sugerida en relación con la Mineralización de Pórfidos y Epitermales en el Norte del Perú. Lima, Perú, UNMSM. 1-10 págs.
- Torres, K. 2012. Tectónica Transcurrente Extensiva en el área de Negritos, cuenca Talara. Piura, Perú, INGEMMET. 14 págs.
- Valenzuela, M. 2005. Sistemas Riedel del Cenozoico tardío en Sonora, México. Universidad de Sonora. 63 págs.
- Van Der Pluijm y Marshak, 2004. Earth structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. New York, United States of America, Norton & Company-Inc. 673 págs.
- Wernert, M. 2019. Análisis Estructural del Sistema Vetiforme Farallón Negro-Alto De La Blenda, Catamarca. Revista de la Asociación Geológica Argentina: Tectónica. 12 págs.

ANEXOS

Anexo N° 01. Plano de Ubicación.

Anexo N° 02. Plano MDE.

Anexo N° 03. Plano Satelital.

Anexo N° 04. Plano de Unidades Morfogenéticas.

Anexo N° 05. Plano Geológico.

Anexo N° 06. Plano Estructural.

Anexo N° 07. Sección Geológica A-A'.

Anexo N° 08. Sección Geológica B-B'.