UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

‘‘ESTUDIO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LAS UNIDADES DEL CRETÁCICO DEL SECTOR NOROESTE DEL ÁREA URBANA DE LA COMUNA DE TIERRA AMARILLA.’’

EN EL MARCO DEL PROYECTO DIAGNÓSTICO DE PROSPECCIÓN DEL SUBSUELO DE TIERRA AMARILLA.

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Geólogo.

Profesor guía: Dr. Gonzalo Galaz Escanilla

Fabián Ignacio Zambra

Copiapó, Chile, 2026.

AGRADECIMIENTOS

Por y para ellas... mi familia.

Quiero comenzar agradeciendo a todas las personas que me brindaron su ayuda y apoyo durante este largo proceso para convertirme en profesional. En especial, a mi pequeña familia, proveniente de mi pequeño “pueblo hundido”: a mis madres, Nadia y Ana; a mi tía Marlies; y a mi prima Amalia, quienes han sido mi principal motivación para seguir adelante y esforzarme por ser una persona de buenos valores, esfuerzo y trabajo. También quiero agradecer y recordar especialmente a mi papá, que en paz descanse, cuya entrega, dedicación y valores contribuyeron a formar la persona que soy hoy. Gracias, familia, por acompañarme durante todo este camino y por estar siempre presentes. Gracias por todo.

A mis amigos y a mis colegas de la Universidad de Atacama, gracias por el compañerismo, el apoyo constante y por acompañarme en cada etapa de este camino universitario. Ha sido un privilegio compartir con ustedes experiencias, desafíos y aprendizajes que recordaré con mucho cariño.

A mi profesor guía, Gonzalo Galaz, por sus enriquecedoras discusiones técnicas, su disposición y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, y especialmente por haber confiado en mí para formar parte del proyecto de cavidades. Muchas gracias, profesor, por los conocimientos y experiencias compartidas. Expreso también mi más profunda admiración por su trayectoria y carrera como geólogo.

En memoria de mi padre Miguel Zambra.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 CAPÍTULO. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Problema de investigación 1

1.2 Hipótesis 3

1.3 Objetivos 3

1.3.1 Objetivo general 3

1.3.2 Objetivos específicos 3

1.4 Relación entre objetivos específicos y la metodología empleada. 4

1.5 Ubicación y acceso al área de estudio. 5

1.6 Trabajos previos 6

2 CAPÍTULO. MARCO TEÓRICO 8

2.1 Geología estructural 8

2.1.1 Partición de la deformación en márgenes de subducción oblicua 8

2.2 Esfuerzos principales y tipos de fallas 8

2.2.1 Fallas con desplazamiento oblicuo 9

2.2.2 Estructuras secundarias 10

2.2.3 Indicadores cinemáticos 12

2.2.4 Reactivación de fallas y cambios en el sentido de movimiento 13

2.3 Subsidencia y manifestaciones superficiales 14

2.3.1 Subsidencias asociadas a estructuras geológicas 15

2.3.2 Zonas de daño asociadas a fallas 15

3 CAPÍTULO. MARCO GEOLÓGICO 17

3.1 Geología Regional 17

3.2 Geología local del área de estudio 18

3.2.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior – Valanginiano inferior) 18

3.2.2 Grupo Chañarcillo (Cretácico Inferior) 18

3.2.3 Gravas de Atacama (Mioceno medio) 18

3.2.4 Depósitos aluviales, coluviales y fluviales (Cuaternario) 18

3.3 Mineralización y alteración en Tierra Amarilla 19

3.4 Geología estructural 19

3.5 Neotectónica 22

3.6 Geomorfología 23

4 CAPÍTULO. DISEÑO METODOLÓGICO 24

4.1 Recopilación de antecedentes estructurales 24

4.2 Instrumentación y recursos 24

4.3 Análisis de antecedentes y planificación del terreno 25

4.4 Trabajo en terreno 25

4.5 Procesamiento y modelamiento de datos 27

4.6 Integración de datos estructurales del proyecto 28

5 CAPÍTULO. RESULTADOS 30

5.1 Mapa geológico-estructural del sector NW del área urbana de Tierra Amarilla 30

5.2 Unidades litológicas del sector NW. 31

5.2.1 Formación Punta del Cobre (JKpc) 31

5.2.2 Formación Abundancia (Kia) 33

5.2.3 Formación Nantoco (Kin) 34

5.2.4 Unidad Intrusiva Subvolcánica – Diques (Kihd) 35

5.2.5 Gravas (Mga) 36

5.2.6 Depósitos aluviales y coluviales 37

5.3 Mineralogía y alteraciones 37

5.4 Geología estructural 40

5.4.1 Análisis estructural 41

5.5 Modelo estructural 49

5.5.1 Modelo estructural del sector NW del área urbana de Tierra Amarilla 49

6 CAPÍTULO. DISCUSIÓN 52

6.1 Modelo estructural de las unidades cretácicas del sector NW del área urbana de Tierra Amarilla. 52

6.2 Régimen tectónico 53

6.3 Integración de datos del proyecto 55

6.4 Evidencias de deformación reciente y posible reactivación neotectónica 58

7 CAPÍTULO. CONCLUSIONES 61

8 RECOMENDACIONES 63

9 REFERENCIAS 66

10 ANEXOS 71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. 5

Figura 2. Clasificación de los regímenes de esfuerzos y su relación con los principales tipos de fallas según el modelo de Anderson (1905). Se ilustran las orientaciones de los esfuerzos principales (σv= esfuerzo vertical, σh= esfuerzo horizontal mínimo, σH= esfuerzo horizontal máximo) y sus correspondientes campos de tensión (T) y compresión (P) mediante proyecciones esféricas de igual área. Extraída y modificada de Fossen (2016). 9

Figura 3. Falla de rumbo oblicua de cinemática sinistral-normal, donde se reconocen componentes de desplazamiento lateral y vertical respecto al plano de falla. Modificada de Fossen (2016). 9

Figura 4. Estructuras resultantes del cizalle transcurrente. (a) El esquema ilustra las características desarrolladas en el experimento de Riedel con una capa de arcilla húmeda (1) sobre dos bloques rígidos (2) que se deslizan paralelamente. (b) Pliegues. (c) Fallas R y R'. (d) Fracturas de extensión. (e) Fallas P. Las flechas negras indican la dirección de acortamiento máximo (eje compresivo) y las flechas blancas señalan la dirección de extensión máxima (eje tensional). Extraído de Niemeyer (1999). 10

Figura 5. Modelo de cizalle de Riedel aplicado a estructuras secundarias asociadas a fallas de rumbo. Modificación basada en Petit (1987) y Dresen (1991). 11

Figura 6. Fotografía de estrías de falla desarrolladas sobre un plano de falla y su respectivo esquema interpretativo. A la izquierda se observan estrías de fallas indicando una dirección de movimiento subhorizontal; a la derecha se presenta un esquema simplificado de la orientación de estrías sobre el plano de falla. Elaboración propia. 12

Figura 7. Criterios cinemáticos T, R y P. (a) Fracturas secundarias asociadas a un plano de falla en roca maciza homogénea. (b) Relación geométrica entre fracturas R, R', T y P respecto a la zona de desplazamiento principal. (c) Principales criterios morfológicos utilizados para inferir el sentido de movimiento en superficies de falla: criterios T, R y P. Modificada de Petit (1987).....13

Figura 8. Criterios cinemáticos adicionales en fallas frágiles. (a) Fibras de relleno. (b) Fábrica sigmoidal en salbanda. (c) Clivaje en rocas carbonatadas. (d) Saltos rellenos con

material fibroso. (e) Marcas de arrastre de clastos (tool marks). Extraída de Niemeyer (1999). 13

Figura 9. Desarrollo esquemático de fracturas de punta en una falla de rumbo reactivada. (a) Primera etapa de deslizamiento. (b) Segunda etapa con cinemática opuesta, generando fracturas en el lado contrario de la falla y una geometría tipo ‘‘estructura de árbol’’. Extraída y modificada de Kim et al. (2001). 14

Figura 10. Tipos principales de zonas de daño asociadas a fallas. (a) Zonas de daños de punta, incluyendo fracturas en ala, fracturas tipo cola de caballo, fallas de rama sintéticas y fallas antitéticas. (b) Zonas de daños de enlace o transferencia desarrolladas en escalones extensionales, donde pueden generarse fracturas de extensión, estructuras tipo pull-apart, bloques rotados y lentes aisladas. Modificada de Kim et al. (2004). 16

Figura 11. Diferentes tipos de zonas de daño, incluyendo los términos de zona de daño de aproximación y zona de daño de intersección. Modificada de Peacock et al. (2016). 16

Figura 12. Configuración de placas del margen occidental de Sudamérica para distintos intervalos temporales. (a) >90 Ma. (b) 75-10 Ma. (c) <10 Ma, con la configuración actual dominada por la placa de Nazca. La variación en la oblicuidad de convergencia entre (a) y (b) permite explicar cambios en el sentido de movimiento a lo largo de la Zona de Falla de Atacama. Extraído de Scheuber et al. (1994). 17

Figura 13. Evolución estructural esquemática del depósito Candelaria en relación con el emplazamiento de los plutones La Brea y San Gregorio (a) Depositación del Grupo Chañarcillo y desarrollo de fallas de crecimiento durante el Valanginiano–Aptiano. (b) Emplazamiento del plutón La Brea (~119 Ma). (c) Emplazamiento del complejo plutónico San Gregorio (~111 Ma), asociado a levantamiento de techo, plegamiento, dilatación de las rocas de caja y migración de fluidos mineralizantes. (d) Contracción tardía (~90–80 Ma), que retrabaja estructuras previas y pliega las unidades estratificadas y el cuerpo mineralizado. Extraída de Arévalo et al. (2006). 21

Figura 14. Modelo estructural transpresivo propuesto para el distrito Candelaria-Punta del Cobre. (A) Distribución esquemática de las principales litologías, estructuras y mineralización del distrito. (B) Configuración estructural asociada a un eje principal de acortamiento NW-SE (σ_1), que favorece el desarrollo de estructuras compresivas NE, extensión NW y fallas de rumbo sinistrales NNW. Extraída de Del Real et al. (2023). .22

Figura 15. Mapa geológico-estructural del sector NW del área urbana de la ciudad de Tierra Amarilla, escala 1:10.000, región de Atacama, Chile. 31

Figura 16. Muestra de andesita con textura porfídica. (a) Vista general de la muestra de mano, donde se indica la zona ampliada. (b) Detalle de la textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y minerales máficos parcialmente alterados, inmersos en una masa fundamental fina. Se observa alteración verdosa atribuida principalmente a epidota. Muestra extraída en coordenada UTM: 374.067 m E; 6.959.666 m N. 32

Figura 17. Muestra de lutita rojiza. (a) Vista general de la muestra de mano con indicación de la zona ampliada. (b) Detalle de la textura clástica muy fina de aspecto pelítico, con fractura irregular y coloración rojiza atribuida probablemente a óxidos de Fe. Muestra extraída en coordenada UTM: 373.481 m E; 6.962.199 m N. 33

Figura 18. Muestra de grauvaca. (a) Vista general de la muestra de mano, donde se indica la zona ampliada. (b) Detalle de la textura clástica fina, con coloración gris verdosa, matriz fina dominante y fractura irregular. Muestra extraída en coordenada UTM: 373.341 m E; 6.962.250 m N. 34

Figura 19. Muestra de calcilutita. (a) Vista general de la muestra de mano, donde se indica la zona ampliada. (b) Detalle de la textura muy fina de aspecto micrítica, con coloración grisácea a beige y presencia de fracturas finas discontinuas. Muestra extraída de coordenada UTM: 374.058 m E; 6.962.183 m N. 35

Figura 20. Dique diorítico porfídico con orientación 320/78° y cuerpos tabulares tipo sill de orientación 190/43°, reconocidos en el mismo sector. Ubicación UTM: 374.160 m E, 6.962.320 m N. 36

Figura 21. Gravas miocenas dispuestas como terrazas remanentes de distribución local en las laderas del sector de estudio. Ubicación UTM: 374.335 m E, 6.962.090 m N. 36

Figura 22. Vista panorámica desde el sector de antenas satelitales hacia el valle de Tierra Amarilla, donde se reconocen depósitos sedimentarios asociados al valle principal y laderas adyacentes. Además, se observa la proximidad de la ciudad de Tierra Amarilla y el área de la mina Alcaparrosa. 37

Figura 23. Mineralización de crisocola reconocida en el área de estudio. (a) Crisocola alojada en plano escalonado. Punto de control NW-1 de mapa. (b) Crisocola distribuida a lo largo de un plano estratificado. Ubicación UTM: 374.209 m E, 6.962.288 m N. 38

Figura 24. Mineralización y alteración en rocas de la Fm. Nantoco. (a) Plano de falla 310/81° con estructura sigmoidal asociada. (b) Detalle de sigmoide de composiciones principalmente de cristales de granates y epidota. (c) Vetilla de magnetita. Ubicación UTM: 374.192 m E, 6.962.297 m N. (d) Muestra de mano con presencia de cristales de granates y epidota. (a)(b)(d) Ubicadas en punto de control NW-6 de mapa.....39

Figura 25. Zona de alteración de óxidos denominada limonítica-jarosítica en rocas de la Formación Abundancia. (a) Vista general de la zona de alteración cortada por plano de falla con orientación de rumbo de 200/70°. (b) Vista en detalle desde otro ángulo. Punto de control NW-1 de mapa. 40

Figura 26. (a) Falla descrita por Arévalo (2005a), con una orientación de 355/87°, consistente con una estructura principal (ZDP: 355°). (b) Dique en el borde de la falla en el cual se observa su borde mineralizado, en este borde se encontró el plano de falla 355/87° con lineamientos de estrías. (c) Estrías con un trend y plunge de orientación 155/22° respecto al plano principal. Puntos de control NW-3 y NW-5 de mapa. 41

Figura 27. (a) Conjuntos de fallas con la misma orientación de 340/85°. (b) Plano de falla sintética (R) con orientación de rumbo de 345/85° y caída de bloque colgante izquierdo. Puntos de control NW-16 a NW-19 de mapa. 42

Figura 28. (a) Plano de falla con orientación de rumbo de 300/85° con estrías con un trend y plunge 236/45°. Punto de control NW-8 de mapa. (b) Plano de falla con orientación 300/70°. Punto de control NW-20 de mapa. (c) Plano de falla con orientación 300/80°, estructura ubicada en propiedad minera sin acceso. Punto de control NW-25 de mapa. 43

Figura 29. (a) Plano de falla con orientación de rumbo de 200/70° cortando alteración hidrotermal, también se observa un plano de falla 355/75° semivertical intersectado por falla 'P'. (b) Plano de falla P en otro sector. (c) Indicadores cinemáticos de criterio R-R' (Petit, 1987), evidenciando cinemática oblicua caracterizada por componentes de desplazamiento sinistral y normal. (d) Plano de falla P cortando a estructuras T y R'. (a)(c) Puntos de control NW-1 de mapa. (b)(d) Punto de control NW-24 de mapa. 44

Figura 30. Plano de falla secundaria antitética P' con conjuntos de fallas con orientación de rumbo 270/85°. Punto de control NW-14 de mapa. 45

Figura 31. (a) Plano de falla de orientación 310/81°, geométricamente compatible con la posición T del modelo estructural, asociado a un escarpe e indicadores de movimiento

oblicuo con componentes sinistral y normal; se observa además un sigmoide con mineralización de granate y epidota. (b-c) Lineamientos de estrías con trend/plunge de 224/67° y 254/65°, respectivamente. (d) Tool marks (marcas de arrastre) desarrollados sobre la superficie de falla. Punto de control NW-6 del mapa.....46

Figura 32. (a) Conjuntos de fallas con orientaciones ~240/79°. Punto de control NW-9 a NW-12 de mapa. (b) Conjuntos de fallas con orientación ~240/83°. Punto de control NW-22 de mapa. 47

Figura 33. Relación de corte observada, plano de falla P cortando a plano de falla R' y plano de falla T. Punto de control NW-24 de mapa.....49

Figura 34. Modelo estructural interpretativo del sector NW, compatible con un modelo de cizalle de Riedel (1929), elaborado a partir de las orientaciones, relaciones geométricas e indicadores cinemáticos reconocidos. 50

Figura 35. Diagramas elaborados en Dips 7.0 a partir de las mediciones estructurales obtenidas en el sector NW del área urbana de Tierra Amarilla. (a) Diagrama de roseta de orientaciones de falla. (b) Diagrama de concentración de polos, mostrando los principales máximos de densidad del conjunto de datos. 51

Figura 36. Modelo estructural de cizalle integrado a partir de las estructuras reconocidas en unidades cretácicas de los sectores NW y SW. Elaboración propia. 56

Figura 37. Modelo de cizalle de las estructuras geológicas que afectan las unidades miocénicas y cuaternarias. Extraído de Rodríguez (2026).....57

Figura 38. (a) Diagrama de roseta para las estructuras que afectan a los depósitos del Cretácico. (b) Diagrama de roseta para las estructuras que afectan a los depósitos del Mioceno, (c) Diagrama de roseta para las estructuras que afectan los depósitos del Cuaternario. Elaborado con el programa Dips 7. Fuente: Minería & Servicios Spa. (2025). 58

Figura 39. Sector Minera Alcaparrosa en el cual se dispone una estructura que será de recomendación para la instalación de extensómetro de hilo o de cable. (a) Mapa geológico-estructural escala 1:10.000 que presenta principalmente estructuras cretácicas (lineamientos de color azul), la elipse de color negro, indica la Falla Isabel Sur, en la cual se recomienda instalación del extensómetro, La prolongación cartográfica interpretada de la Falla Isabel Sur presenta una superposición espacial con el sector del socavón

Alcaparrosa, sin que dicha coincidencia permita establecer una relación causal entre ambas características (círculo de color rojo). (b) Imagen satelital (Google Earth) para evidenciar la traza de la estructura de recomendación denominada Falla Isabel Sur, a su vez, se agrega que existe una estructura extraída desde el mapa distrital, que es una estructura subterránea denominada Falla Viviana (Con orientación NS), la cual, en el círculo de color rosado, marca un sector de intersección proyectada con la estructura recomendada (Falla Isabel Sur) para el extensómetro. (c) Imagen satelital (Google Earth), con las mismas características de figura b, pero a una mayor escala para evidenciar la proyección de la falla Isabel sur hasta el sector NE del casco urbano, específicamente al socavón de la minera Santos. (d) Diferentes tipos de zonas de daño, indicando la zona de intersección de daños. Modificada de Kim et al. (2004) y Peacock et al. (2016).....65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre objetivos específicos y la metodología empleada. 4

Tabla 2. Datos estructurales recopilados en terreno en el sector NW del área urbana de Tierra Amarilla.....48

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa geológico estructural integral de área urbana de Tierra Amarilla escala 1:10.000.....71

Anexo 2. Tablas de datos de proyecto. Puntos de control y datos estructurales del levantamiento estructural de superficie.....72

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio geológico-estructural de las unidades cretácicas del sector noroeste (NW) del área urbana de Tierra Amarilla, región de Atacama, en el marco del proyecto "*Diagnóstico de prospección del subsuelo de Tierra Amarilla para la detección de cavidades o fracturas*". El objetivo fue desarrollar un modelo geológico-estructural del sector NW mediante el análisis de la geometría, cinemática y relaciones temporales de las estructuras.

Para ello, se integraron antecedentes geológicos y estructurales, cartografía e imágenes satelitales con un levantamiento geológico-estructural de superficie a escala 1:10.000. En terreno se registraron litologías, orientaciones, indicadores cinemáticos y relaciones de corte, cuyos datos fueron procesados e integrados para construir el modelo estructural.

Los resultados permitieron reconocer una estructura principal de orientación aproximada N-S y familias secundarias NNW-NW, E-W y NE, cuya disposición geométrica es compatible con un *modelo de cizalle de Riedel*. Dentro de esta organización se reconocieron estructuras antitéticas R', fracturas coincidentes geométricamente con T y estructuras sintéticas P; las relaciones de corte establecieron que P es posterior a R' y T. Los indicadores cinemáticos reconocidos en las estructuras donde fue posible interpretar el sentido de movimiento evidenciaron movimientos oblicuos con componentes sinistrales y normales. En conjunto con la organización geométrica y las relaciones de corte observadas, estas evidencias son compatibles con un régimen transtensional sinistral para el sector NW.

La integración con los demás sectores del proyecto evidenció tendencias estructurales recurrentes en unidades cretácicas, miocenas y cuaternarias. Esta correspondencia no permitió demostrar la reactivación de una misma falla ni actividad tectónica actual. Las fallas y sus posibles zonas de daño fueron interpretadas como posibles sectores de debilidad mecánica y factores condicionantes de la deformación superficial y subsidencia, sin establecer una relación causal directa.

PALABRAS CLAVE: TIERRA AMARILLA - GEOLOGÍA ESTRUCTURAL - TRANSTENSIÓN - SUBSIDENCIA.

ABSTRACT

A geological-structural study of the Cretaceous units in the northwestern (NW) sector of the urban area of Tierra Amarilla, Atacama region, was conducted within the framework of the project "*Diagnóstico de prospección del subsuelo de Tierra Amarilla para la detección de cavidades o fracturas*". The objective was to develop a geological-structural model of the NW sector through the analysis of the geometry, kinematics, and temporal relationships of the identified structures.

Geological and structural background information, cartography, and satellite imagery were integrated with surface geological-structural mapping at a scale of 1:10,000. Lithologies, structural orientations, kinematic indicators, and cross-cutting relationships were recorded in the field, and the resulting data were processed and integrated to construct the structural model.

The results allowed the recognition of a main structure with an approximately N-S orientation and secondary NNW-NW, E-W, and NE structural families, whose geometric arrangement is compatible with a Riedel shear model. Within this structural framework, structures compatible with the R', T, and P sets were recognized; cross-cutting relationships indicate that P structures postdate R' and T. Kinematic indicators observed in structures where the sense of movement could be determined revealed oblique movements with sinistral and normal components. Together with the geometric organization and observed cross-cutting relationships, these features are compatible with a sinistral transtensional regime for the NW sector.

Integration with the other sectors of the project revealed recurrent structural trends in Cretaceous, Miocene, and Quaternary units. This correspondence does not demonstrate reactivation of the same fault or present-day tectonic activity. Faults and their possible damage zones are interpreted as potential zones of mechanical weakness and as factors that may condition surface deformation and subsidence, without establishing a direct causal relationship.

KEYWORDS: TIERRA AMARILLA - STRUCTURAL GEOLOGY - TRANSTENSION - SUBSIDENCE.

1 CAPÍTULO. INTRODUCCIÓN

La comuna de Tierra Amarilla se localiza en la región de Atacama, norte de Chile, ~16 kilómetros al sureste de la ciudad de Copiapó. En el área urbana de esta comuna afloran unidades geológicas de edad cretácica hasta los depósitos recientes, representados principalmente por: (i) unidades volcanosedimentarias, sedimentarias marinas y clásticas correspondientes a la Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior–Valanginiano inferior) y a las formaciones Abundancia (Valanginiano superior temprano) y Nantoco (Hauteriviano) del Grupo Chañarcillo; (ii) una amplia unidad de gravas del Mioceno asociadas a las 'Gravas de Atacama'; y (iii) una reciente cobertura sedimentaria no consolidada del Plioceno-Holoceno (Arévalo, 2005a; Arévalo *et al*., 2006).

1.1 Problema de investigación

El área urbana de Tierra Amarilla y sus alrededores son particularmente susceptibles a eventos de inestabilidad superficial, manifestados como subsidencias, socavones, fracturas superficiales, agrietamientos y escarpes (Sánchez, 2016). Esta problemática ha adquirido especial relevancia durante los últimos años debido a la ocurrencia de eventos de gran magnitud, entre los que destacan los socavones asociados a las minas Los Santos y Alcaparrosa (Gómez, 2023), los cuales han generado preocupación por sus potenciales efectos sobre la infraestructura, la seguridad de la población y la estabilidad del terreno. Este tipo de fenómenos puede estar asociado a la interacción entre factores geológicos naturales y la intensa actividad minera desarrollada históricamente en el sector. Dentro de los factores geológicos naturales, la geología estructural podría desempeñar un papel relevante mediante mecanismos directos e indirectos. Las estructuras presentes en superficie y su posible continuidad hacia el subsuelo pueden actuar como discontinuidades mecánicas capaces de condicionar la distribución de la deformación superficial (Lamperein-Polo *et al*., 2022). Asimismo, las fallas y sus zonas de daño pueden modificar la permeabilidad y conectividad del medio, actuando localmente como conductos o barreras para la circulación de fluidos (Bense *et al*., 2013).

Considerando los antecedentes descritos, surge la necesidad de desarrollar un estudio geológico-estructural que permita identificar, caracterizar e interpretar las principales estructuras presentes en las unidades geológicas del sector NW del área urbana de Tierra

Amarilla. Esta investigación se enmarca dentro del proyecto ‘‘*Diagnóstico de prospección del subsuelo de Tierra Amarilla para la detección de cavidades o fracturas*’’ (SNG-240402-SER-IT-GE-115-P, código de licitación BIP 40053947-0), cuyo propósito es contribuir a la comprensión de los factores geológicos que podrían influir en la ocurrencia de subsidencias y otros procesos de inestabilidad superficial.

Adicionalmente, la proximidad de estas estructuras a sectores urbanos, infraestructura vial y áreas afectadas históricamente por fenómenos de subsidencia y colapso superficial refuerza la relevancia del estudio propuesto.

Trabajos previos en el área de estudio han reconocido estructuras geológicas con orientaciones preferenciales N-S a NNW-SSE, acompañadas por sistemas estructurales secundarios que han sido interpretados como parte de un modelo de cizalle desarrollado durante el Cretácico (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo *et al*., 2006; Del Real *et al*., 2023). Sin embargo, existen discrepancias respecto de la cinemática y del régimen tectónico que controlaron la generación y evolución de estas estructuras. Arévalo *et al*. (2006) interpretan que el desarrollo estructural del distrito estuvo controlado por condiciones transtensivas, caracterizadas por una combinación de deformación extensional y desplazamientos de carácter sinistral, favoreciendo la generación de estructuras dilatacionales y la apertura de espacios para la circulación de fluidos. Por otra parte, Del Real *et al*. (2023) proponen una evolución asociada a un régimen transpresivo sinistral, sustentado en evidencias de acortamiento regional, inversión de estructuras previas, desarrollo de pliegues y componentes compresivas asociadas a fallas de rumbo. Esta diferencia interpretativa evidencia la falta de consenso respecto de la evolución deformacional de las unidades cretácicas del área de estudio y refuerza la necesidad de obtener antecedentes estructurales locales que permitan contrastar la geometría y cinemática observada en terreno con los modelos tectónicos propuestos para el distrito Candelaria–Punta del Cobre.

Por lo tanto, esta investigación busca contribuir a la caracterización geológico-estructural del sector NW del área urbana de Tierra Amarilla mediante el análisis de la distribución, geometría, cinemática y relaciones temporales de las estructuras reconocidas, con el propósito de desarrollar un modelo geológico-estructural local.

Asimismo, se pretende aportar antecedentes que permitan evaluar si la configuración estructural puede constituir un factor condicionante de la deformación superficial, sin establecer una relación causal directa entre las fallas y los procesos de subsidencia registrados en Tierra Amarilla.

1.2 Hipótesis

Las estructuras que afectan a las unidades cretácicas del sector NW del área urbana de Tierra Amarilla presentan una asociación de componentes cinemáticas sinistrales y normales que, junto con su organización geométrica, resulta más consistente con un régimen de deformación transtensional local que con uno transpresivo, considerando como marco tectónico regional la evolución mesozoica del Sistema de Fallas de Atacama.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Desarrollar un modelo geológico-estructural del sector NW del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, mediante el análisis e interpretación de los componentes estructurales presentes en las unidades cretácicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la distribución espacial de las unidades litológicas, sistemas de fallas y principales estructuras tectónicas presentes en el sector NW del área de estudio.
- Determinar la geometría y cinemática de las estructuras presentes en las unidades cretácicas.
- Establecer las relaciones temporales relativas entre las principales familias estructurales reconocidas en las unidades cretácicas, mediante el análisis de relaciones de corte y superposición.
- Interpretar el régimen de deformación registrado en las unidades cretácicas.
- Proponer sectores de interés para futuros estudios interdisciplinarios y monitoreo estructural.

1.4 Relación entre objetivos específicos y la metodología empleada.

Objetivos específicos	Metodología empleada
1. Caracterizar la distribución espacial de las unidades geológicas, sistemas de fallas y principales estructuras tectónicas presentes en el sector NW del área de estudio.	•Recopilación y revisión de antecedentes geológicos y estructurales. •Análisis de cartografía geológica, imágenes satelitales y ortofotografías. •Mapeo geológico-estructural de superficie a escala 1:10.000. •Reconocimiento y caracterización macroscópica de las principales unidades litológicas. •Integración cartográfica de unidades, trazas estructurales y puntos de control mediante QGIS 3.40.3.
2. Determinar la geometría y cinemática de las estructuras presentes en las unidades cretácicas.	•Medición de rumbo y manteo mediante regla de la mano derecha (RHR). •Medición de lineaciones mediante *trend/plunge*. •Reconocimiento de indicadores cinemáticos: estrías, escalones, sigmoides, *tool marks* y relaciones geométricas. •Procesamiento estructural mediante Dips 7.0. •Elaboración de diagramas de roseta y concentración de polos. •Integración de orientación, geometría e indicadores cinemáticos para definir los conjuntos estructurales.
3. Establecer las relaciones temporales relativas entre las principales familias estructurales reconocidas en las unidades cretácicas, mediante el análisis de relaciones de corte y superposición.	•Registro y análisis de relaciones de corte y superposición entre estructuras reconocidas en terreno. • Establecimiento de temporalidades relativas entre las principales familias estructurales, a partir de las evidencias observadas. • Comparación de las relaciones temporales reconocidas con la evolución descrita en modelos experimentales de cizalle. •Identificación de familias estructurales para las cuales no fue posible establecer una temporalidad relativa debido a la ausencia de relaciones de corte suficientes.
4. Interpretar el régimen de deformación registrado en las unidades cretácicas.	•Integración de orientaciones, relaciones angulares, indicadores cinemáticos y relaciones de corte. •Análisis de los conjuntos estructurales definidos en terreno. •Comparación de la geometría obtenida con modelos de cizalle descritos en la bibliografía. •Integración de las componentes de movimiento determinadas en terreno. •Contraste con modelos de deformación descritos en los antecedentes bibliográficos.
5. Proponer sectores de interés para futuros estudios interdisciplinarios y monitoreo estructural.	•Integración cartográfica de trazas y antecedentes estructurales mediante QGIS. •Análisis espacial de las principales trazas de falla y sus proyecciones. •Identificación de sectores de interacción entre estructuras y potenciales zonas de daño. •Comparación espacial con sectores donde se registran manifestaciones de deformación superficial y subsidencia. •Priorización de sectores para futuros estudios y monitoreo instrumental.

Tabla 1. Relación entre objetivos específicos y la metodología empleada.

1.5 Ubicación y acceso al área de estudio.

El área de estudio se localiza en el sector NW del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama, aproximadamente 16,8 kilómetros al sureste desde la Universidad de Atacama, en la ciudad de Copiapó. El acceso al sector se realiza desde la Universidad de Atacama mediante la Avenida Copayapu, recorriendo ~10,6 km en dirección sureste hasta salir del radio urbano de Copiapó. Posteriormente, se continúa por la ruta C-35 durante ~4,6 km hasta empalmar con un camino secundario de tierra utilizado principalmente por vehículos asociados a actividades mineras del sector. Tras recorrer ~1,6 km por esta vía, se alcanza el acceso al área de estudio, ubicada en las cercanías de la mina Alcaparrosa. Las coordenadas del punto de acceso del área de estudio son: 374.501 m E, 6.961.321 m N, 504 m s.n.m. (Figura 1).

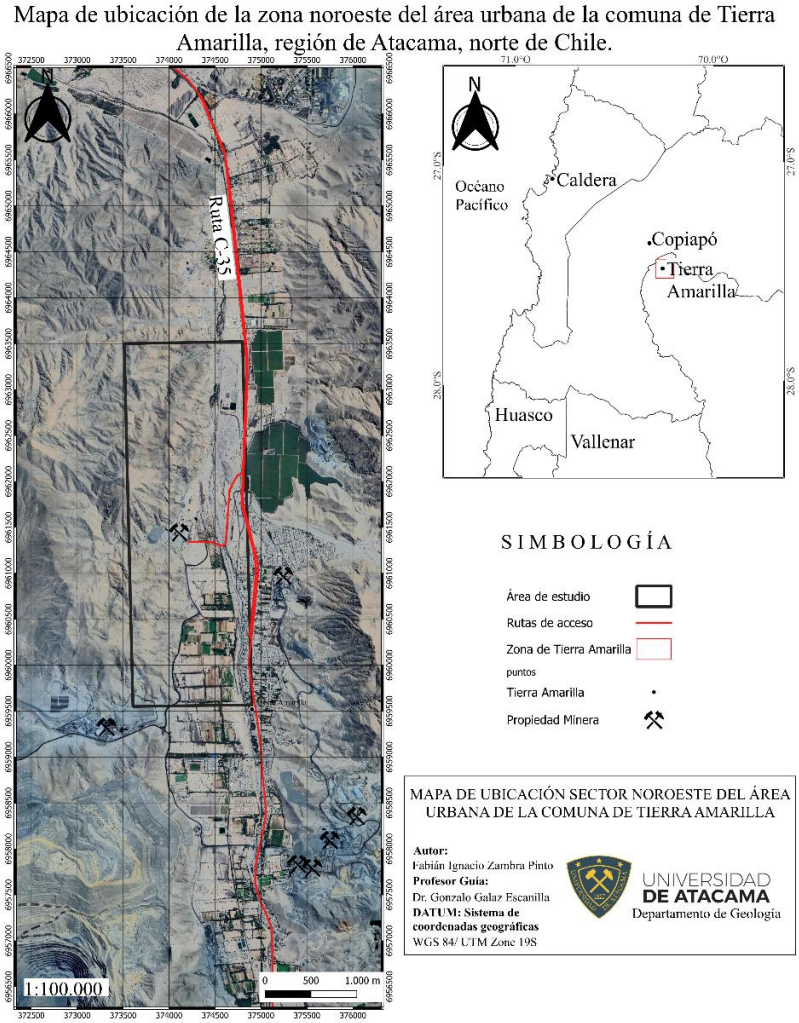


Figura 1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio.

1.6 Trabajos previos

En este apartado se presentan antecedentes bibliográficos y trabajos previos relacionados con el área de estudio y las temáticas abordadas en la presente investigación. Se incluyen publicaciones científicas, cartografía geológica e informes técnicos disponibles públicamente, los cuales constituyen la base de referencia para el desarrollo del estudio. Asimismo, existen trabajos e información técnica asociados al proyecto "*Diagnóstico de Prospección del Subsuelo de Tierra Amarilla*" que, debido a su carácter privado y acceso restringido, no pueden ser incorporados íntegramente en este documento. Sin embargo, dichos antecedentes fueron considerados como apoyo complementario para la interpretación y contextualización de los resultados obtenidos.

-Arévalo (2005a) este trabajo realiza un levantamiento geológico básico de escala de 1:100.000, en la región de Atacama más específicamente en el distrito de Copiapó.

-Arévalo *et al*. (2006) investigan el control estructural del depósito IOCG Candelaria y proponen una evolución deformacional polifásica, caracterizada por el desarrollo de sistemas de fallas bajo condiciones transtensionales durante parte de su evolución, seguido por deformación contraccional que sobreimprime estructuras previas. El estudio destaca además las relaciones entre deformación dúctil-frágil, emplazamiento plutónico y mineralización.

-Del Real *et al*. (2018) este trabajo realiza controles litológicos y estructurales en la génesis del distrito de oro de óxido de hierro de Candelaria-Punta del Cobre, norte de Chile.

-Del Real *et al*. (2023) analizan la evolución estructural del distrito Candelaria-Punta del Cobre y proponen un modelo de deformación transpresiva sinistral durante parte de su evolución, caracterizado por fallas de rumbo NNW, acortamiento principal NW-SE y estructuras compresivas asociadas. Este modelo reconoce la coexistencia de cizalle sinistral, acortamiento y extensión local mediante partición de la deformación.

-Fossen (2016) es una obra integral que establece los fundamentos de la geología estructural moderna, con énfasis en los análisis cinemáticos y la modelación de la deformación por strain en regímenes extensionales y transpresionales/transtensionales.

- Kim *et al*. (2004) este estudio proponen criterios para la caracterización de zonas de daño asociadas a fallas, utilizados en la identificación e interpretación de estructuras secundarias dentro de zonas de deformación frágil.

-Marschik y Fontboté (2001) caracterizan la evolución geológica, estructural y metalogenética del distrito Candelaria-Punta del Cobre, aportando antecedentes sobre las principales orientaciones estructurales y su relación con la mineralización.

-Minería & Servicios Spa. (2025). Informe de datos estructurales del área urbana de Tierra Amarilla. Documento de acceso privado.

-Sánchez (2016) este trabajo aborda la ponderación de factores antropogénicos y naturales que causan subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama.

-Peacock *et al*. (2016) este artículo es un glosario exhaustivo de la terminología de redes de fallas y otras fracturas.

2 CAPÍTULO. MARCO TEÓRICO

2.1 Geología estructural

2.1.1 Partición de la deformación en márgenes de subducción oblicua

En márgenes de subducción oblicua, el movimiento relativo entre placas puede distribuirse entre distintas estructuras mediante un proceso denominado partición de la deformación. En este contexto, la componente paralela al margen puede ser acomodada por fallas transcurrentes, mientras que la componente normal se concentra principalmente en la zona de subducción. Esta distribución no necesariamente es completa ni uniforme, pudiendo variar entre distintos dominios deformados (Fitch, 1972; McCaffrey, 1992).

La partición de la deformación permite la coexistencia de desplazamientos transcurrentes con componentes de acortamiento o extensión, configurando condiciones transpresivas o transtensionales, respectivamente (Teyssier *et al*., 1995). En consecuencia, la cinemática registrada por una estructura individual no necesariamente representa el régimen de deformación global del sistema, por lo que su interpretación requiere considerar la organización geométrica y las relaciones cinemáticas entre las distintas estructuras (McCaffrey, 1992; Teyssier *et al*., 1995).

2.2 Esfuerzos principales y tipos de fallas

El modelo de fallamiento de Anderson (1905) relaciona los principales regímenes de falla con la orientación de los esfuerzos en la corteza superior, donde uno de los esfuerzos principales se dispone verticalmente (σv). Según la relación entre σv y los esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3, se distinguen regímenes de fallamiento normal ($\sigma v = \sigma_1$), de rumbo ($\sigma v = \sigma_2$) e inverso ($\sigma v = \sigma_3$) (Fossen, 2016; Figura 2). Desde el punto de vista cinemático, las fallas pueden presentar desplazamientos según el manteo, paralelos al rumbo o una combinación de ambas componentes, dando lugar a movimientos oblicuos (Niemeyer, 1999; Fossen, 2016).

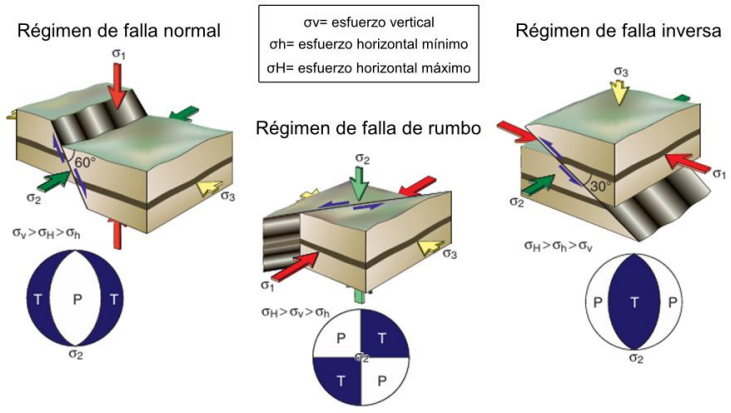


Figura 2. Clasificación de los regímenes de esfuerzos y su relación con los principales tipos de fallas según el modelo de Anderson (1905). Se ilustran las orientaciones de los esfuerzos principales (σv= esfuerzo vertical, σh= esfuerzo horizontal mínimo, σH= esfuerzo horizontal máximo) y sus correspondientes campos de tensión (T) y compresión (P) mediante proyecciones esféricas de igual área. Extraída y modificada de Fossen (2016).

2.2.1 Fallas con desplazamiento oblicuo

Las fallas con desplazamiento oblicuo presentan componentes de movimiento paralelas al rumbo y según el manteo del plano de falla (Figura 3). La primera corresponde a un desplazamiento lateral dextral o sinistral, mientras que la segunda puede ser normal o inversa, según el movimiento relativo de los bloques. La orientación de las estrías, expresada mediante su *rake* o barrido sobre el plano, permite evaluar la componente de desplazamiento predominante; sin embargo, la determinación del sentido de movimiento requiere indicadores cinemáticos adicionales (Niemeyer, 1999; Fossen, 2016).

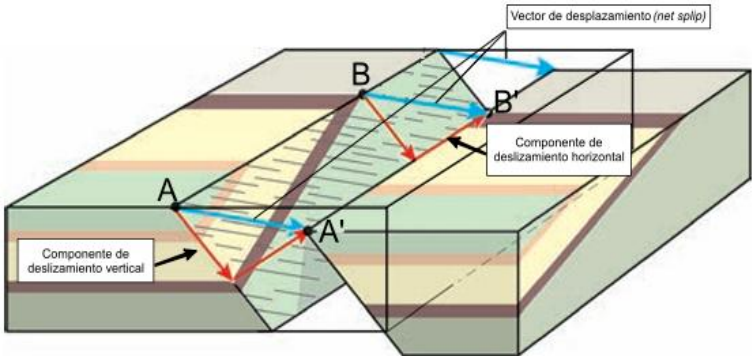


Figura 3. Falla de rumbo oblicua de cinemática sinistral-normal, donde se reconocen componentes de desplazamiento lateral y vertical respecto al plano de falla. Modificada de Fossen (2016).

2.2.2 Estructuras secundarias

El análisis de las estructuras secundarias asociadas al fallamiento frágil se sustenta principalmente en modelos experimentales desarrollados para zonas de cizalle. Los experimentos de Riedel (1929) permitieron reproducir el desarrollo sistemático de estructuras secundarias durante el desplazamiento relativo de bloques. Posteriormente, Tchalenko (1970) demostró que estas geometrías presentan patrones comparables a distintas escalas, mientras que Petit (1987) integró observaciones naturales y resultados experimentales para establecer criterios aplicables al análisis cinemático de superficies de falla.

Las fallas de rumbo pueden desarrollar zonas de cizalle compuestas por fallas menores, fracturas y pliegues dispuestos de manera sistemática. En condiciones de deslizamiento paralelo, los experimentos tipo Riedel (1929) reproducen esta deformación mediante el desplazamiento relativo de dos bloques rígidos cubiertos por una capa deformable, generando estructuras secundarias en echelon respecto de la dirección principal de movimiento (Niemeyer, 1999; Figura 4).

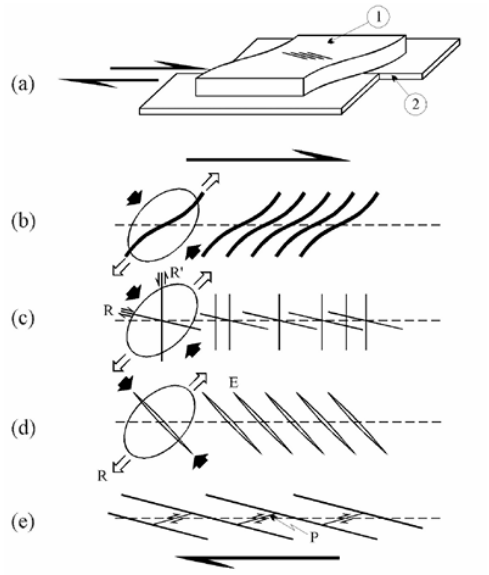


Figura 4. Estructuras resultantes del cizalle transcurrente. (a) El esquema ilustra las características desarrolladas en el experimento de Riedel con una capa de arcilla húmeda (1) sobre dos bloques rígidos (2) que se deslizan paralelamente. (b) Pliegues. (c) Fallas R y R'. (d) Fracturas de extensión. (e) Fallas P. Las flechas negras indican la dirección de acortamiento máximo (eje compresivo) y las flechas blancas señalan la dirección de extensión máxima (eje tensional). Extraído de Niemeyer (1999).

Dentro de este arreglo se reconocen fallas sintéticas R, desarrolladas a bajo ángulo respecto de la zona de desplazamiento principal (ZDP) y con el mismo sentido de cizalle; fallas antitéticas R', dispuestas a mayor ángulo y con sentido opuesto; fracturas extensionales T, asociadas a apertura local; y fallas sintéticas P, desarrolladas a bajo ángulo y generalmente en etapas posteriores, favoreciendo la conexión entre segmentos previamente formados. Estas relaciones geométricas constituyen una referencia para reconocer la organización y cinemática relativa de una zona de cizalle (Niemeyer, 1999; Tchalenko, 1970).

Además de los conjuntos R, R', P y T, algunos modelos reconocen estructuras secundarias adicionales denominadas X (P'), asociadas a la evolución progresiva de la zona de deformación (Dresen, 1991). Estas estructuras han sido representadas en modelos posteriores como P' y presentan una disposición antitética respecto del movimiento principal.

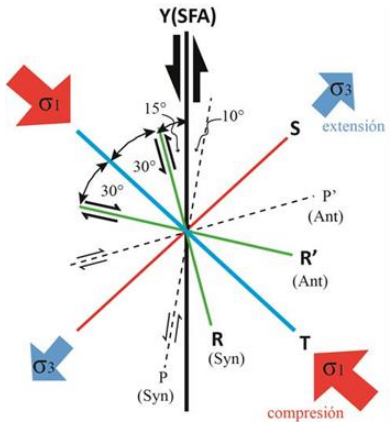


Figura 5. *Modelo de cizalle de Riedel* aplicado a estructuras secundarias asociadas a fallas de rumbo. Modificación basada en Petit (1987) y Dresen (1991).

Tchalenko (1970) reconoce además una evolución progresiva de estas estructuras, donde R y R' se desarrollan durante etapas tempranas, seguidas por estructuras P que conectan segmentos previos, hasta concentrar progresivamente el desplazamiento en una zona principal. La similitud de estos patrones desde ensayos de laboratorio hasta fallas naturales permite utilizar estas geometrías como referencia para el análisis estructural a distintas escalas.

2.2.3 Indicadores cinemáticos

Los indicadores cinemáticos corresponden a rasgos tectónicos que permiten inferir el sentido de desplazamiento relativo en fallas y zonas de cizalle (Niemeyer, 1999). Estos rasgos pueden observarse a distintas escalas y son especialmente relevantes cuando el desplazamiento no puede determinarse a partir de marcadores geológicos desplazados. En superficies de fallas en rocas frágiles, la dirección de movimiento puede estar registrada por lineaciones de falla, tales como surcos de deslizamiento o estrías (Figura 6), mientras que el sentido de movimiento se interpreta mediante criterios morfológicos desarrollados sobre el plano de falla (Petit, 1987; Fossen, 2016).



Figura 6. Fotografía de estrías de falla desarrolladas sobre un plano de falla y su respectivo esquema interpretativo. A la izquierda se observan estrías de fallas indicando una dirección de movimiento subhorizontal; a la derecha se presenta un esquema simplificado de la orientación de estrías sobre el plano de falla. Elaboración propia.

Petit (1987) aplicó la geometría de estructuras secundarias al reconocimiento del sentido de movimiento sobre superficies de falla, distinguiendo criterios asociados a fracturas T y a cizalles secundarias R y P. Las estructuras R corresponden a superficies secundarias estriadas que forman ángulos bajos respecto del plano principal, mientras que las estructuras P corresponden igualmente a superficies secundarias de cizalle estriadas, desarrolladas con una disposición angular característica respecto de la superficie principal. Para estas últimas, Petit (1987) distingue las morfologías PO y PT, definidas por la relación entre superficies P estriadas y superficies secundarias no estriadas. La nomenclatura posee un carácter principalmente geométrico y cinemático y no implica, por sí sola, una génesis idéntica a la reproducida en los experimentos de Riedel.

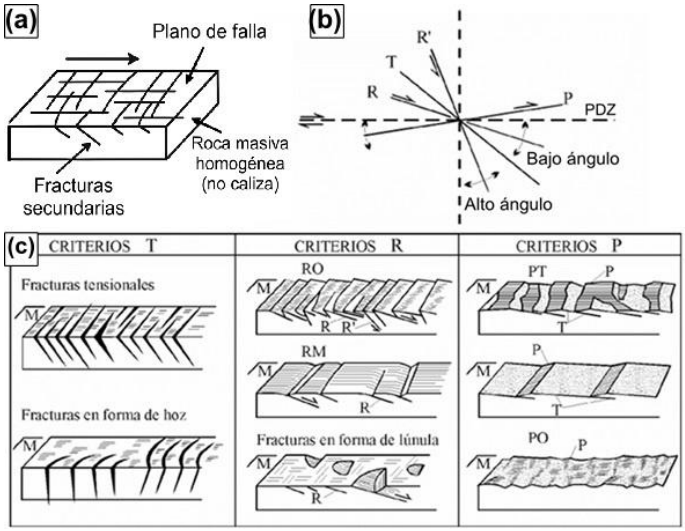


Figura 7. Criterios cinemáticos T, R y P. (a) Fracturas secundarias asociadas a un plano de falla en roca maciza homogénea. (b) Relación geométrica entre fracturas R, R', T y P respecto a la zona de desplazamiento principal. (c) Principales criterios morfológicos utilizados para inferir el sentido de movimiento en superficies de falla: criterios T, R y P. Modificada de Petit (1987).

Además de los criterios anteriores, existen otros indicadores cinemáticos (Figura 8), tales como fibras minerales oblicuas al plano de falla, fábricas sigmoidales en salbanda, clivaje en rocas carbonatadas, escalones mineralizados y marcas de abrasión generadas por el arrastre de clastos (*tool marks*). La interpretación cinemática debe integrar la geometría del plano de falla, la orientación de las estrías o lineaciones y la coherencia entre los distintos indicadores observados en terreno.

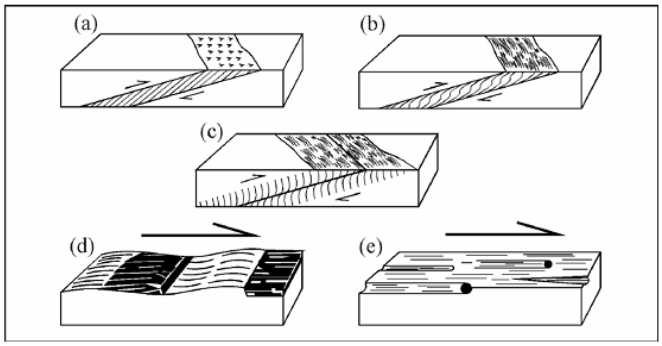


Figura 8. Criterios cinemáticos adicionales en fallas frágiles. (a) Fibras de relleno. (b) Fábrica sigmoidal en salbanda. (c) Clivaje en rocas carbonatadas. (d) Saltos rellenos con material fibroso. (e) Marcas de arrastre de clastos (*tool marks*). Extraída de Niemeyer (1999).

2.2.4 Reactivación de fallas y cambios en el sentido de movimiento

La reactivación de una falla corresponde a un nuevo episodio de desplazamiento sobre una estructura previamente formada. En fallas de rumbo, este proceso puede conservar el sentido de movimiento original o involucrar una inversión cinemática, caracterizada por

un desplazamiento posterior de sentido opuesto. Su reconocimiento requiere identificar evidencias que permitan distinguir diferentes episodios de deformación sobre una misma estructura (Kim *et al*., 2001).

Kim *et al*. (2001) describen criterios asociados a la inversión del sentido de movimiento, entre ellos la presencia de conjuntos de estrías con diferentes orientaciones y sentidos de desplazamiento sobre una misma superficie de falla, el desarrollo de familias de fracturas de punta (*tip cracks*) en lados opuestos de la estructura y la presencia de desplazamientos reducidos, nulos o invertidos hacia sus extremos. Cuando las familias de fracturas de punta presentan diferencias angulares cercanas a 90°, pueden desarrollar geometrías asimétricas denominadas «estructuras de árbol», características de este tipo de reactivación (Figura 9).

Estos criterios permiten reconocer evidencias de reactivación cinemática en fallas de rumbo. Sin embargo, la semejanza de orientación entre estructuras desarrolladas en unidades geológicas de distintas edades no constituye, por sí sola, evidencia suficiente para demostrar la reactivación de una misma falla.

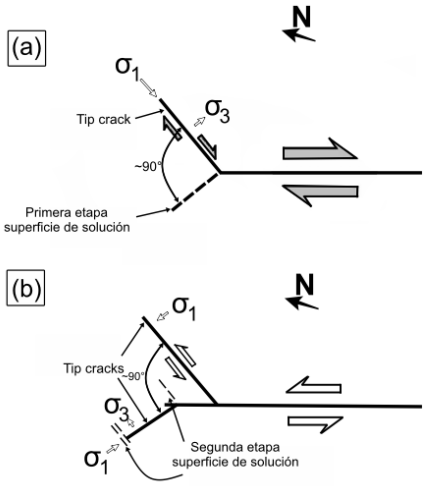


Figura 9. Desarrollo esquemático de fracturas de punta en una falla de rumbo reactivada. (a) Primera etapa de deslizamiento. (b) Segunda etapa con cinemática opuesta, generando fracturas en el lado contrario de la falla y una geometría tipo ‘‘estructura de árbol’’. Extraída y modificada de Kim *et al*. (2001).

2.3 Subsidencia y manifestaciones superficiales

La subsidencia corresponde al descenso de la superficie del terreno asociado a procesos de pérdida de soporte, compactación o deformación del subsuelo, los cuales pueden

responder a factores naturales, antrópicos o a su interacción. Entre estos se reconocen variaciones en los niveles de agua subterránea, disolución de rocas, actividad minera subterránea y extracción de agua (Sánchez, 2016). Sus manifestaciones superficiales pueden incluir hundimientos localizados, socavones, grietas y escarpes. No obstante, el agrietamiento no constituye por sí mismo evidencia de subsidencia, sino una manifestación de deformación superficial que puede desarrollarse mediante distintos mecanismos (Barragán y Rodríguez, 2021).

2.3.1 Subsidencias asociadas a estructuras geológicas

Las fallas, fracturas y discontinuidades geológicas preexistentes pueden condicionar la distribución de la deformación superficial al delimitar sectores con distinto comportamiento mecánico, modificar la circulación de fluidos o favorecer asentamientos diferenciales en materiales suprayacentes. Monroy *et al*. (2001) describen que los hundimientos diferenciales y agrietamientos pueden organizarse espacialmente a lo largo de trazas estructurales, mientras que Barragán y Rodríguez (2021) reconocen que las discontinuidades sepultadas y las irregularidades del sustrato pueden influir en la distribución de asentamientos y grietas superficiales. En consecuencia, la correspondencia espacial entre estructuras geológicas y manifestaciones de subsidencia puede representar un factor condicionante, sin demostrar necesariamente una relación causal directa ni actividad tectónica reciente.

2.3.2 Zonas de daño asociadas a fallas

Las zonas de daño corresponden a volúmenes de roca fracturada y deformada asociados al desarrollo y desplazamiento de fallas. Según su distribución espacial, pueden distinguirse zonas de daño de punta, localizadas en los extremos de las estructuras; zonas de pared, desarrolladas a lo largo de las superficies de falla; y zonas de enlace o transferencia, presentes entre segmentos que interactúan, donde puede concentrarse el desarrollo de fracturas secundarias (Kim *et al*., 2004; Figura 10).

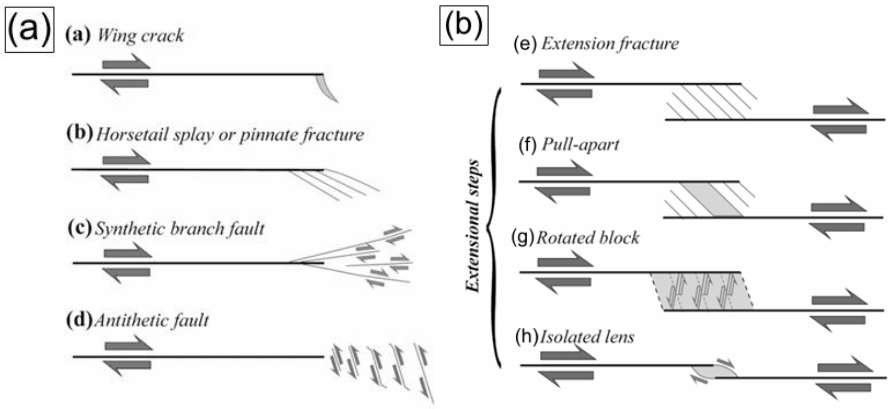


Figura 10. Tipos principales de zonas de daño asociadas a fallas. (a) Zonas de daños de punta, incluyendo fracturas en ala, fracturas tipo cola de caballo, fallas de rama sintéticas y fallas antitéticas. (b) Zonas de daños de enlace o transferencia desarrolladas en escalones extensionales, donde pueden generarse fracturas de extensión, estructuras tipo *pull-apart*, bloques rotados y lentes aisladas. Modificada de Kim *et al*. (2004).

Peacock *et al*. (2016) reconocen además zonas de daño de aproximación, desarrolladas entre fallas que interactúan sin intersectarse físicamente, y zonas de daño de intersección, asociadas a sectores donde dos o más estructuras se cortan. Estas configuraciones pueden concentrar fracturamiento y aumentar la conectividad entre discontinuidades dentro del macizo rocoso (Figura 11). Su identificación requiere distinguir las intersecciones estructurales reconocidas directamente de aquellas inferidas mediante proyecciones cartográficas.

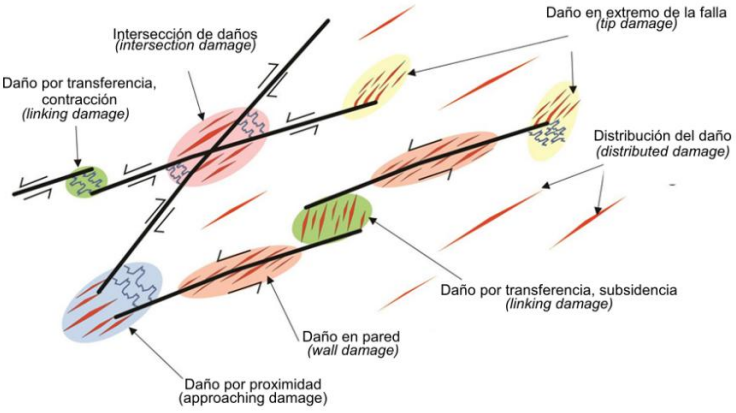


Figura 11. Diferentes tipos de zonas de daño, incluyendo los términos de zona de daño de aproximación y zona de daño de intersección. Modificada de Peacock *et al*. (2016).

3 CAPÍTULO. MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología Regional

Durante el Jurásico–Cretácico Inferior, la subducción de litosfera oceánica bajo la placa Sudamericana favoreció el desarrollo de un arco magmático de orientación general N-S en el norte de Chile, acompañado por cuencas de intraarco y retroarco donde se acumularon secuencias volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias marinas (Coira *et al*., 1982; Marschik y Fontboté, 2001).

La convergencia oblicua entre la placa Aluk o Phoenix y la placa Sudamericana (Figura 12) favoreció la partición de la deformación y el desarrollo de sistemas transcurrentes paralelos al margen. La distribución de la deformación varió durante la evolución mesozoica en relación con cambios en la oblicuidad y el acople interplaca, registrándose componentes de cizalle, extensión y acortamiento en distintos episodios (Scheuber *et al*., 1994; Scheuber y González, 1999; Grocott y Taylor, 2002; Cembrano *et al*., 2005).

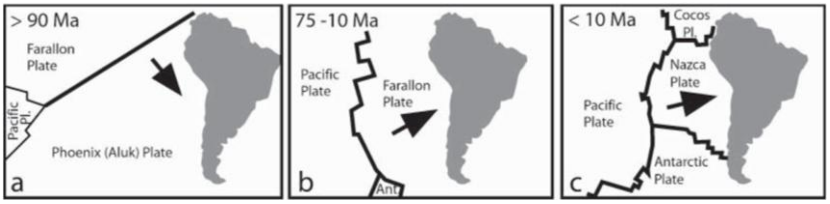


Figura 12. Configuración de placas del margen occidental de Sudamérica para distintos intervalos temporales. (a) >90 Ma. (b) 75-10 Ma. (c) <10 Ma, con la configuración actual dominada por la placa de Nazca. La variación en la oblicuidad de convergencia entre (a) y (b) permite explicar cambios en el sentido de movimiento a lo largo de la Zona de Falla de Atacama. Extraído de Scheuber *et al*. (1994).

En este contexto, se desarrollaron zonas de cizalle regionales con fallas maestras de orientación dominante N-S a NNW-SSE y estructuras subsidiarias oblicuas, vinculadas a deformación frágil y dúctil en distintos niveles corticales (Scheuber y Andriessen, 1990; Grocott y Taylor, 2002; Cembrano *et al*., 2005). La evolución tectono-magmática del margen incluyó además la migración de los sistemas magmáticos y deformacionales hacia dominios más orientales, junto con procesos de inversión tectónica posterior (Amilibia *et al*., 2008).

En la región de Atacama, esta evolución quedó registrada en unidades jurásico-cretácicas y cretácicas, entre las que destacan la Formación Punta del Cobre, el Grupo

Chañarcillo y unidades volcánicas como la Formación Bandurrias (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo, 2005a; Arévalo *et al*., 2006). En el distrito Candelaria-Punta del Cobre, estas unidades presentan deformación expresada por fallas N-S a NNW-SSE, sistemas NW-SE y NE-SW, zonas de cizalle y pliegues, asociados a distintos eventos deformacionales (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo *et al*., 2006; Del Real *et al*., 2023).

3.2 Geología local del área de estudio

3.2.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior – Valanginiano inferior)

Aflora principalmente en ambos flancos del valle del río Copiapó y en las quebradas Paipote y Los Fierros. Litológicamente, corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria compuesta por lavas andesíticas, brechas volcánicas, domos dacíticos, lutitas rojizas y niveles clásticos subordinados (Arévalo, 2005a).

3.2.2 Grupo Chañarcillo (Cretácico Inferior)

La Formación Abundancia, de edad valanginiana superior temprana, aflora principalmente en la quebrada Meléndez, donde corresponde a una secuencia sedimentaria calcáreo-arenosa constituida por calcilutitas y grauvacas verdosas. Por su parte, la Formación Nantoco, de edad hauteriviana, se reconoce en el mismo sector y corresponde a una secuencia carbonática compuesta principalmente por calizas grises, calcilutitas y calcarenitas (Arévalo, 2005a).

3.2.3 Gravas de Atacama (Mioceno medio)

Afloran en las laderas del río Copiapó, el llano Cachiyuyo de Llampos y las nacientes de la quebrada Meléndez. Litológicamente, corresponden a gravas polimícticas mal a medianamente consolidadas, con niveles de cenizas intercaladas, dispuestas como terrazas remanentes que cubren unidades pre-miocenas (Arévalo, 2005a).

3.2.4 Depósitos aluviales, coluviales y fluviales (Cuaternario)

Se distribuyen principalmente en quebradas, laderas y sectores del valle del río Copiapó. Litológicamente, corresponden a depósitos no consolidados constituidos por ripios, gravas, arenas, limos y arcillas, asociados a procesos aluviales, coluviales y fluviales (Arévalo, 2005a).

3.3 Mineralización y alteración en Tierra Amarilla

El distrito Candelaria-Punta del Cobre presenta mineralización tipo IOCG de Fe-Cu-Au, desarrollada principalmente en rocas de la Formación Punta del Cobre y niveles basales del Grupo Chañarcillo. La distribución de vetas, brechas y zonas de alteración evidencia una asociación espacial entre estructuras geológicas, mineralización y circulación de fluidos (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo *et al*., 2006). En el contexto del presente estudio, las vetillas, rellenos minerales y zonas de alteración adquieren relevancia como elementos que pueden registrar relaciones espaciales y temporales entre discontinuidades estructurales y procesos de mineralización, particularmente mediante el reconocimiento de relaciones de corte.

3.4 Geología estructural

El distrito Candelaria-Punta del Cobre se caracteriza por la superposición de estructuras dúctiles y frágiles que afectan principalmente a la Formación Punta del Cobre, al Grupo Chañarcillo y a los cuerpos intrusivos asociados al Batolito de Copiapó (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo *et al*., 2006; Del Real *et al*., 2023). A la latitud de Copiapó-Tierra Amarilla, Arévalo (2005a) distingue los dominios estructurales de la Cordillera de la Costa y la Precordillera, situándose Tierra Amarilla en este último, caracterizado por unidades estratificadas afectadas por fallas de alto ángulo. En el distrito se reconocen sistemas estructurales de orientación N-S, NNW-NW y NE, relacionados con la evolución deformacional regional (Marschik y Fontboté, 2001).

Entre las principales estructuras se encuentra el Anticlinal de Tierra Amarilla, de orientación NNE, asociado al sistema de pliegues y cabalgamientos de Paipote (Arévalo *et al*., 2006). Del Real *et al*. (2023) lo denominan Anticlinorio de Tierra Amarilla y describen un flanco noroccidental fuertemente atenuado y localmente invertido, próximo a los cuerpos intrusivos La Brea y San Gregorio. Asimismo, destaca la Zona de Cizalle Ojancos-La Florida, descrita como una franja milonítica de orientación NNE, desarrollada próxima al contacto entre el Plutón San Gregorio y las unidades estratificadas de la Formación Punta del Cobre y del Grupo Chañarcillo (Arévalo *et al*., 2006). Del Real *et al*. (2023) reconocen además zonas de alta deformación caracterizadas por foliación, vetas deformadas y relaciones de corte con vetas tardías.

La deformación frágil del distrito comprende fallas de alto ángulo con orientaciones predominantes N-S a NNW-SSE y NW-SE, además de estructuras secundarias NE-SW y E-W. Se reconocen fallas normales, transcurrentes sinistrales y estructuras con componentes de desplazamiento oblicuo, algunas asociadas espacialmente a vetas y cuerpos mineralizados (Marschik y Fontboté, 2001; Arévalo *et al*., 2006). Entre las principales estructuras destacan las fallas Lar, Rocío y San Gregorio, de orientación general NNW y cinemática predominantemente sinistral. Del Real *et al*. (2023) documentan componentes normales y evidencias de reactivación inversa en las fallas Lar y Rocío, lo que refleja la superposición de diferentes movimientos en estructuras del distrito.

Arévalo *et al*. (2006) presentan una reconstrucción de la evolución estructural del depósito Candelaria, que comprende el desarrollo de fallas de crecimiento, el emplazamiento de los plutones La Brea y San Gregorio y una posterior sobreimpresión contraccional. Su modelo considera condiciones transtensionales durante etapas del desarrollo de los sistemas de fallas, seguidas por deformación contraccional que afecta las estructuras previamente formadas (Figura 13).

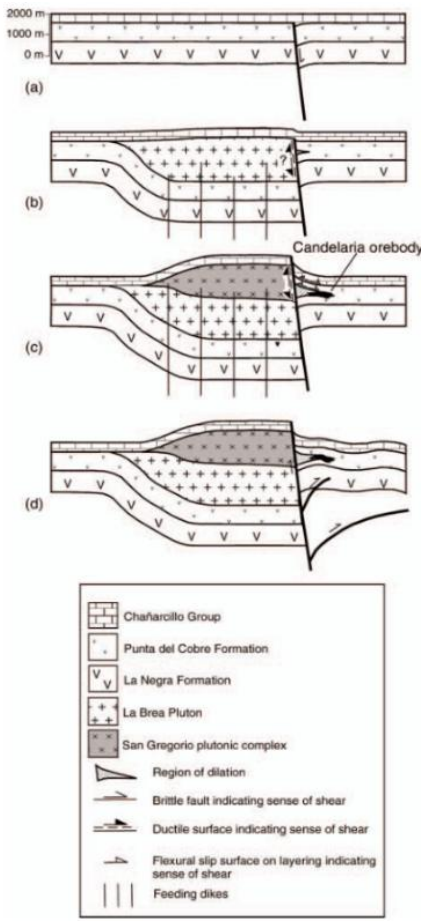


Figura 13. Evolución estructural esquemática del depósito Candelaria en relación con el emplazamiento de los plutones La Brea y San Gregorio (a) Depositación del Grupo Chañarcillo y desarrollo de fallas de crecimiento durante el Valanginiano–Aptiano. (b) Emplazamiento del plutón La Brea (~119 Ma). (c) Emplazamiento del complejo plutónico San Gregorio (~111 Ma), asociado a levantamiento de techo, plegamiento, dilatación de las rocas de caja y migración de fluidos mineralizantes. (d) Contracción tardía (~90–80 Ma), que retrabaja estructuras previas y pliega las unidades estratificadas y el cuerpo mineralizado. Extraída de Arévalo *et al*. (2006).

Por su parte, Del Real *et al*. (2023) proponen un modelo de deformación transpresiva sinistral para parte de la evolución del distrito, caracterizado por fallas de rumbo NNW, estructuras compresivas NE y un eje principal de acortamiento NW-SE. La configuración estructural propuesta contempla la coexistencia de cizalle sinistral, acortamiento y extensión local durante la evolución del sistema (Figura 14). Estos antecedentes se insertan en una evolución tectónica regional que incluye componentes de deformación transcurrente y extensional durante el Mesozoico (Scheuber y González, 1999; Grocott y Taylor, 2002; Cembrano *et al*., 2005).

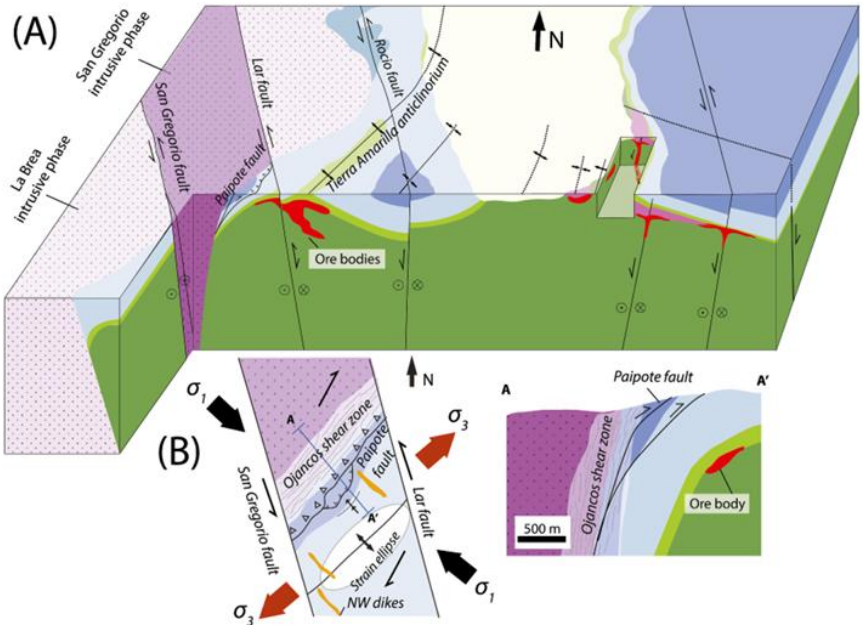


Figura 14. Modelo estructural transpresivo propuesto para el distrito Candelaria-Punta del Cobre. (A) Distribución esquemática de las principales litologías, estructuras y mineralización del distrito. (B) Configuración estructural asociada a un eje principal de acortamiento NW-SE (σ_1), que favorece el desarrollo de estructuras compresivas NE, extensión NW y fallas de rumbo sinistrales NNW. Extraída de Del Real *et al*. (2023).

3.5 Neotectónica

La neotectónica aborda el estudio de las deformaciones corticales recientes, reconocibles mediante estructuras y rasgos geomorfológicos como fallas que afectan depósitos neógenos y cuaternarios, escarpes y terrazas deformadas. Estas evidencias permiten identificar episodios de deformación posteriores a la depositación de las unidades afectadas, sin implicar necesariamente actividad tectónica actual.

En el norte de Chile se han documentado evidencias de deformación posterior al Cretácico en distintos segmentos asociados al Sistema de Fallas de Atacama. Riquelme *et al*. (2002) reconocen movimientos verticales desde el Mioceno medio en el segmento El Salado, mientras que Marquardt *et al*. (2004) describen episodios de deformación extensional y compresiva durante el Plioceno y Cuaternario en el área de Caldera-Bahía Inglesa. Por su parte, Hervé (1987) documenta movimientos postcretácicos predominantemente verticales en el segmento Paposo.

En el ámbito local, Rodríguez (2026) reconoce estructuras que afectan depósitos miocenos y pleistoceno-holocenos en el sector noreste del área urbana de Tierra Amarilla,

asociadas a escarpes y agrietamientos superficiales. Estos antecedentes permiten contextualizar la deformación posterior al Cretácico en el área de estudio y constituyen referencias para evaluar posibles relaciones entre estructuras presentes en unidades de distintas edades, sin demostrar por sí solos la reactivación de una misma falla.

3.6 Geomorfología

El sector de Tierra Amarilla se emplaza en el tramo medio de la cuenca del río Copiapó, dentro de una unidad geomorfológica asociada a valles transversales. El relieve se caracteriza por un valle fluvial principal, laderas de pendiente moderada a fuerte y quebradas tributarias, entre las que destaca la quebrada Meléndez, cuya cuenca desemboca hacia el sector urbano y presenta depósitos aluviales compuestos principalmente por gravas arenosas provenientes de las laderas circundantes (Bucarey, 2018). Asimismo, se reconocen depósitos fluviales, aluviales y coluviales, además de terrazas y abanicos aluviales asociados a la evolución geomorfológica del valle (Arévalo, 2005a; Bucarey, 2018; Gómez, 2023).

4 CAPÍTULO. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología utilizada comprendió la recopilación y análisis de antecedentes geológicos y estructurales, la planificación y ejecución de campañas de mapeo geológico-estructural de superficie, el muestreo dirigido de unidades litológicas, el procesamiento de datos estructurales y cartográficos y, finalmente, la integración de los resultados obtenidos con los demás sectores estudiados en el marco del proyecto.

4.1 Recopilación de antecedentes estructurales

Se realizó una recopilación y revisión de antecedentes geológicos y estructurales provenientes de tesis, publicaciones científicas, cartografía geológica e informes técnicos relacionados con el área de estudio y el distrito Candelaria-Punta del Cobre. Complementariamente, se utilizó información técnica de carácter confidencial proporcionada por compañías mineras e instituciones vinculadas al proyecto, cuyo acceso fue autorizado mediante acuerdos de confidencialidad, por lo que su contenido no puede incorporarse íntegramente en este documento.

Los antecedentes recopilados permitieron reconocer las principales unidades geológicas, estructuras previamente cartografiadas y características estructurales del área, constituyendo una base de información para la planificación del levantamiento y el posterior contraste de los resultados obtenidos en terreno.

4.2 Instrumentación y recursos

Para el levantamiento geológico-estructural se utilizó una brújula geológica tipo Brunton, martillo geológico Estwing de 22 oz, lupa de mano de 10×, rayador de tungsteno con imán, ácido clorhídrico (HCl) al 10 % y huincha métrica de 30 m. El registro de datos, coordenadas y fotografías georreferenciadas se realizó mediante un dispositivo móvil iPhone XS y la aplicación SW Maps, registrándose coordenadas Este, Norte y elevación.

La información espacial fue registrada y procesada utilizando el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 19S (EPSG:32719). Para la fotointerpretación y apoyo cartográfico se emplearon *Google Earth Pro*, *Bing Satellite* y ortofotografías disponibles en el marco del proyecto. La integración y elaboración cartográfica se realizó mediante QGIS 3.40.3,

mientras que el procesamiento y representación de los datos estructurales se efectuó mediante Dips 7.0 (*Rocscience*).

4.3 Análisis de antecedentes y planificación del terreno

Los antecedentes recopilados fueron analizados conjuntamente con cartografía geológica, imágenes satelitales y ortofotografías mediante fotointerpretación, con el propósito de identificar lineamientos, posibles continuidades estructurales y sectores con exposición favorable de las unidades cretácicas.

A partir de este análisis se definieron zonas prioritarias para el levantamiento de terreno, considerando estructuras previamente cartografiadas, intersecciones de lineamientos, sectores próximos a manifestaciones de subsidencia y disponibilidad de afloramientos. La planificación estuvo condicionada por las restricciones de acceso existentes en propiedades mineras y otros sectores del área de estudio.

Posteriormente, las imágenes satelitales y ortofotografías fueron utilizadas como apoyo para examinar la continuidad espacial aproximada de estructuras y lineamientos en sectores donde no fue posible efectuar controles directos.

4.4 Trabajo en terreno

El mapeo geológico-estructural de superficie se realizó en el sector NW del área urbana de Tierra Amarilla a escala 1:10.000, mediante campañas sucesivas desarrolladas en el marco del proyecto. Las actividades de terreno fueron efectuadas por equipos de composición variable, integrados por los memoristas participantes y el profesor guía. La distribución de los puntos de control estuvo condicionada principalmente por la disponibilidad de afloramientos y las restricciones de acceso asociadas a propiedades mineras.

Las estructuras reconocidas fueron caracterizadas mediante mediciones de orientación efectuadas con brújula geológica tipo Brunton. Los planos de falla, fracturas, diques y otras discontinuidades fueron registrados mediante rumbo y manteo en formato de círculo completo (0–360°), siguiendo la regla de la mano derecha (*Right-Hand Rule*, RHR). Cuando se reconocieron estrías u otras lineaciones sobre los planos de falla, estas fueron registradas mediante *trend/plunge*.

Las orientaciones estructurales fueron consignadas directamente a partir de las lecturas efectuadas en terreno, sin aplicar una corrección por declinación magnética durante el levantamiento ni en el procesamiento posterior. Por consiguiente, los azimuts utilizados corresponden a las lecturas originales de brújula y deben considerarse al compararlos con orientaciones referidas al norte geográfico.

Para el análisis cinemático se registraron indicadores reconocibles sobre las superficies de falla, incluyendo estrías, escalones, estructuras sigmoidales y marcas de arrastre (*tool marks*). La determinación del sentido de movimiento se realizó mediante la interpretación de estos indicadores, considerando los criterios descritos por Petit (1987) y Niemeyer (1999). Las estrías fueron utilizadas para registrar la orientación de las lineaciones, mientras que su sentido de movimiento se evaluó a partir de los indicadores cinemáticos disponibles. Adicionalmente, se documentaron relaciones de corte entre estructuras para establecer temporalidades relativas.

Cada punto de control fue registrado mediante coordenadas Este, Norte y elevación, además de observaciones geológicas y fotografías georreferenciadas obtenidas mediante la aplicación SW Maps.

El reconocimiento litológico se complementó mediante un muestreo dirigido y no sistemático de muestras de mano, destinado a caracterizar las principales unidades aflorantes. No se utilizó una malla regular ni un espaciamiento predeterminado entre puntos de muestreo, debido a la distribución de los afloramientos y las restricciones de acceso. La selección de los puntos estuvo orientada por los antecedentes geológicos y por la presencia de afloramientos accesibles y representativos, priorizando sectores donde fuera posible obtener roca fresca y aquellos con evidencias de alteración hidrotermal o mineralización.

En cada punto seleccionado se utilizó martillo geológico para acceder a material fresco y extraer entre dos y tres fragmentos, de los cuales se seleccionó la muestra considerada más representativa. Para la caracterización litológica se conservaron cuatro muestras principales: dos correspondientes a la Formación Punta del Cobre, representadas por andesita y lutita; una de la Formación Abundancia y una de la Formación Nantoco. Este procedimiento tuvo como finalidad la caracterización macroscópica de las unidades y no

correspondió a un muestreo geoquímico sistemático mediante *chip sample* o *channel sample*.

4.5 Procesamiento y modelamiento de datos

Las muestras recolectadas en terreno fueron caracterizadas macroscópicamente considerando color, composición mineralógica observable, textura, estructura y presencia de alteración hidrotermal o mineralización. La identificación se complementó mediante lupa de mano de 10×, reacción con ácido clorhídrico (HCl) al 10 %, dureza relativa mediante rayador de tungsteno y respuesta magnética mediante imán. Las proporciones de minerales y masa fundamental fueron estimadas visualmente, por lo que los porcentajes indicados corresponden a valores aproximados.

Los datos estructurales obtenidos en terreno fueron organizados, revisados y procesados mediante Dips 7.0 (Rocscience), considerando las orientaciones de los planos de falla, lineaciones e indicadores cinemáticos registrados. Para el análisis direccional se elaboró un diagrama de roseta utilizando la opción *Apparent Strike*, con una normal de referencia de tendencia 0° e inclinación 90°, equivalente a un plano horizontal de referencia para representar las orientaciones de las trazas de los planos. Se utilizaron intervalos angulares (*bin size*) de 10°, un ángulo mínimo de representación de 45° y uno máximo de 90°, obteniéndose un total de 26 planos representados. Complementariamente, se elaboró un diagrama estereográfico de concentración de polos mediante proyección equiangular (*Equal Angle*) en el hemisferio inferior, utilizando contornos Fisher y un *counting circle size* de 1,0 %.

Debido al tamaño y distribución espacial del conjunto de mediciones, los diagramas obtenidos mediante Dips fueron utilizados principalmente como herramientas descriptivas para reconocer las tendencias estructurales presentes en los datos, sin considerarlos una caracterización estadística exhaustiva de la población regional de fallas. En consecuencia, la definición de las familias estructurales no se realizó exclusivamente a partir de los máximos representados en los diagramas, sino mediante la integración de las orientaciones medidas, sus relaciones angulares respecto de la zona de desplazamiento principal (ZDP), los indicadores cinemáticos y las relaciones de corte observadas en terreno.

La configuración geométrica obtenida fue posteriormente contrastada con el modelo experimental de cizalle de Riedel (1929), utilizando las relaciones angulares entre estructuras como referencia interpretativa. La determinación del sentido de movimiento se sustentó en los indicadores cinemáticos reconocidos en terreno, considerando los criterios descritos por Petit (1987) y Niemeyer (1999). En aquellas estructuras donde no se identificaron indicadores cinemáticos suficientes, la asignación a las familias del modelo se consideró principalmente geométrica e interpretativa.

La revisión de calidad de los datos comprendió el examen conjunto de las mediciones estructurales, coordenadas y registros fotográficos asociados a cada punto de control, comprobándose su correspondencia con las observaciones realizadas en terreno. Asimismo, las relaciones temporales relativas entre estructuras se establecieron a partir de evidencias de corte y superposición, sin asumir que la semejanza geométrica entre las distintas familias implique necesariamente su formación durante un mismo evento de deformación.

Posteriormente, la información geológica y estructural fue integrada mediante QGIS 3.40.3, utilizando el sistema de referencia WGS 84 / UTM zona 19S (EPSG:32719). Se incorporaron unidades litológicas, puntos de control, trazas de falla y demás elementos cartográficos para elaborar el mapa geológico-estructural del sector NW a escala 1:10.000.

Finalmente, la integración de las observaciones de terreno, relaciones geométricas y cinemáticas, temporalidades relativas y principales tendencias estructurales permitió desarrollar el modelo geológico-estructural del sector NW del área urbana de Tierra Amarilla.

4.6 Integración de datos estructurales del proyecto

En el marco del proyecto ‘*Diagnóstico de Prospección del Subsuelo de Tierra Amarilla’* se desarrollaron estudios geológico-estructurales paralelos en distintos sectores del área urbana de Tierra Amarilla. Sus resultados fueron integrados con la información obtenida en el sector NW, con el propósito de ampliar el análisis hacia unidades de distintas edades y evaluar la recurrencia de orientaciones estructurales y sus correspondencias espaciales.

Inicialmente, los resultados del sector NW fueron comparados con los obtenidos en el sector SW (Albornoz, 2026), debido a que ambos levantamientos comprenden principalmente estructuras desarrolladas en unidades cretácicas. Posteriormente, estos antecedentes fueron contrastados con las estructuras reconocidas en los sectores NE (Rodríguez, 2026) y SE (Urra, 2026), correspondientes a unidades miocenas y cuaternarias.

La integración consideró la distribución espacial, orientación, geometría y cinemática de las estructuras, además de la edad de las unidades geológicas afectadas. Esta comparación permitió identificar tendencias estructurales semejantes en unidades de distinta edad y examinar su posible relación con estructuras preexistentes.

La recurrencia de orientaciones fue utilizada como un criterio de comparación geométrica, sin considerar que la coincidencia de tendencias entre distintas unidades constituya, por sí sola, evidencia suficiente para demostrar la reactivación de una misma falla.

5 CAPÍTULO. RESULTADOS

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

6 CAPÍTULO. DISCUSIÓN

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

7 CAPÍTULO. CONCLUSIONES

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

8 RECOMENDACIONES

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

9 REFERENCIAS

Albornoz, N. (2026). Estudio geológico-estructural de las unidades del Cretácico del sector SW del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Proyecto "*Diagnóstico de prospección del subsuelo de Tierra Amarilla*, para la detección de cavidades o fracturas". Trabajo de titulación para optar al título de Geólogo, Universidad de Atacama. (En preparación).

Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., y Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. Journal of Structural Geology, 30(12), 1520-1539.

Anderson, E. M. (1905). The dynamics of faulting. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8, 387–402.

Arévalo, C. (2005a). Carta Copiapó, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 91, 53 páginas, 1 mapa escala 1:100.000.

Arévalo, C., Grocott, J., Martin, W., Pringle, M. y Taylor, G. (2006). Structural setting of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit, Chilean Andes (27° 30´S). Econ. Geol. 101, 819–841.

Barragán, E., Rodríguez, J.M. (2021). Génesis y Mitigación del Agrietamiento del Subsuelo en el Suroriente del Valle de México. XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C., 1001-1010.

Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O., y Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. Earth-Science Reviews, 127, 171–192.

Bucarey Aichele, N. C. (2018). Evaluación de la susceptibilidad de flujos de detritos en Quebradas Carrizalillo y de Meléndez, comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama (Tesis de Geología, Universidad de Chile). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.

Cembrano, J., González, G., Arancibia, G., Ahumada, I., Olivares, V., y Herrera, V. (2005). Fault zone development and strain partitioning in an extensional strike slip duplex: A case study from the Mesozoic Atacama fault system, Northern Chile. Tectonophysics, 400(1-4), 105-125.

Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., y Ramos, V. (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. Earth-Science Reviews, 18(3), 303-332.

Del Real, I., Allmendinger, R.W., Thompson, J.F.H. y Creixell, C. (2023). Evidence for transpression during formation of the Candelaria Punta del Cobre IOCG district and regional implications. Journal of South American Earth Sciences 126, 104289.

Del Real, I., Thompson, J.F.H. y Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. Ore Geology Reviews 102, 106–153.

Dresen, G. (1991). Stress distribution and the orientation of Riedel shears. Tectonophysics, 188(3–4), 239–247.

Fitch, T. J. (1972). Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the western Pacific. Journal of Geophysical Research, 77(23), 4432–4460.

Fossen, H. (2016). Structural Geology (Segunda ed.). Cambridge University Press.

Gómez, O. (2023). Estudio de la geomorfología, sedimentología y consecuencias de los eventos de remoción en masa (25m y 10 m) en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile. Tesis de titulación (inédita), Geología, Universidad de Atacama, Chile, 146 p.

Grocott, J., y Taylor, G. (2002). Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25°30′S to 27°00′S). Journal of the Geological Society, 159(4), 425-442.

Hervé, M. (1987). Movimiento normal de la Falla Paposo, Zona de Falla Atacama, en el Mioceno, Chile. Revista Geológica de Chile, 31, 31–36.

Kim, Y. S., Peacock, D., y Sanderson, D. (2004). Fault damage zones. Journal of Structural Geology, 26, 503-517.

Kim, Y., Andrews, J., y Sanderson, D. (2001). Reactivated strike-slip faults: Examples from North Cornwall, UK. Tectonophysics, 340(3-4), 173-194.

Lamperein-Polo, P., Vidal-Páez, P., y Pérez-Martínez, W. (2022). Estimación de la subsidencia en torno a la traza de la falla de San Ramón Chile, mediante la técnica SBAS DInSAR usando imágenes TerraSAR-X. Revista de Teledetección, 59, 87-102.

Marschik, R., y Fontboté, L. (2001). The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre–Candelaria area, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences, 14, 399–431.

Marquardt, C., Lavenue, A., Ortlieb, L., Godoy, E., y Comte, D. (2004). Coastal neotectonics in Southern Central Andes: Uplift and deformation of marine terraces in Northern Chile (27°S). Tectonophysics, 394, 193–219.

McCaffrey, R. (1992). Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B6), 8905–8915.

Minería & Servicios Spa. (2025). *Diagnóstico de prospección del subsuelo de Tierra Amarilla para la detección de cavidades o fracturas: Informe final de geología estructural*. Proyecto SNG-240402-SER, documento SNG-240402-SER-IT-GE-115-P, BIP 40053947-0. Gobierno Regional de Atacama–Servicio Nacional de Geología y Minería. (Documento técnico de acceso restringido).

Monroy G., V. H., Arreygue Rocha, E., Israde Alcántara, I., y Rodríguez Torres, G. M. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sismicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18(1), 37–54.

Niemeyer, H. (1999). Geología estructural. RIL Editores. 292 p. Antofagasta, Chile.

Peacock, D. C. P., Nixon, C. W., Rotevatn, A., Sanderson, D. J., y Zuluaga, L. F. (2016). Glossary of fault and other fracture networks. Journal of Structural Geology, 92, 12-28.

Petit, J. P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. Journal of Structural Geology, 9(5-6), 597-608.

Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen ein Beitrag zum Problem der Fiederspatten. Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abteilung B: Geologie und Paläontologie, 1929(8), 354-368.

Riquelme, R., Martinod, J., Darrozes, J., Charrier, R., y Farías, M. (2002). A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). Tectonophysics, 346(1-2), 1-21.

Rodríguez, I. J. (2026). Estudio geológico-estructural de las unidades del Mioceno y Pleistoceno-Holoceno del sector noreste del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Trabajo de titulación para optar al título de Geólogo, Universidad de Atacama.

Sánchez, L. (2016). Ponderación de factores antropogénicos y naturales que causarían la subsidencia de terreno en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile.

Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., y Reutter, K. J. (1994). Tectonic development of the north Chilean Andes in relation to plate convergence and magmatism since the Jurassic. In Tectonics of the southern Central Andes: structure and evolution of an active continental margin (pp. 121-139). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Scheuber, E., y Andriessen, P. A. M. (1990). The kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. Journal of Structural Geology, 12, 243–257.

Scheuber, E., y Gonzalez, G. (1999). Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. Tectonics, 18(5), 895-910.

Tchalenko, J. S. (1970). Similarities between shear zones of different magnitudes. Geological Society of America Bulletin, 81, 1625–1640.

Teyssier, C., Tikoff, B., y Markley, M. (1995). Oblique plate motion and continental tectonics. Geology, 23(5), 447–450.

Urra, G. (2026). Estudio geológico-estructural de las unidades del Mioceno y Cuaternario del sector SE del área urbana de la comuna de Tierra Amarilla. Proyecto "*Diagnóstico de prospección del subsuelo de Tierra Amarilla, para la detección de cavidades o fracturas*". Trabajo de titulación para optar al título de Geólogo, Universidad de Atacama. (En preparación).

10 ANEXOS

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.

Contenido reservado por motivos de confidencialidad.