



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ESTUDIO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE
TRANSICIÓN ENTRE LAS FALLAS AGUA DE LOS BURROS Y LAS
CAÑAS, ENTRE 28°80' Y 29°00'S, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

PAULA ISIDORA MONTIEL ROMERO

PROFESOR GUÍA:
MARCELO FARÍAS THIERS.

PROFESOR CO-GUÍA:
FERNANDO POBLETE GÓMEZ.

COMISIÓN:
REYNALDO CHARRIER GONZÁLEZ.

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto ANID FONDECYT N°1220062

SANTIAGO DE CHILE

2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: GEÓLOGA
POR: PAULA ISIDORA MONTIEL ROMERO
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: MARCELO FARÍAS THIERS**

**ESTUDIO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE TRANSICIÓN ENTRE
LAS FALLAS AGUA DE LOS BURROS Y LAS CAÑAS, ENTRE 28°80' Y 29°00'S,
REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.**

En el límite occidental andino a 28°80'-29°00'S se encuentra una zona de transición entre las fallas inversas de vergencias opuestas, a saber, fallas Las Cañas y Agua de los Burros. Estas estructuras se prolongan a lo largo de más de 60 km en la norte-sur, solapando a lo largo de 17 km en el rumbo y con una separación en planta entre 4 y 5 km.

Entre ambas fallas, se define una zona de transición estructural longitudinal de régimen compresivo caracterizada por un alto grado de deformación desde una estructura inversa de vergencia este (tramo norte) a una oeste (tramos sur), presentando desarrollo de estructuras de menor orden como fallas inversas, normales y pliegues. Actualmente esta zona no presenta estudios detallados respecto a hipótesis e interacción de ambas fallas, lo que la identifica como una zona potencial para la comprensión de este tipo de sistemas estructurales.

El objetivo principal de este trabajo es utilizar este sistema estructural para comprender la implicancia que las fallas secundarias tienen en zonas de transición a cambios de vergencia estructural. Además de lo anterior, se caracterizan los dominios estructurales principales de la zona de estudio y se proponen las geometrías principales de acomodo para este tipo de zonas.

A partir de la confección de perfiles geológicos, se clasifican 2 dominios estructurales en la zona de transición: Dominio Las Cañas y Dominio Agua de los Burros. El primero de estos se localiza al occidente de la zona de estudio y se caracteriza por una deformación asociada con fallas inversas de bajo ángulo con vergencia oeste; por otro lado, al oriente se evidencia el Dominio Agua de los Burros caracterizado por una falla inversa principal de alto ángulo con vergencia este y desarrollo de estructuras secundarias propias de sistemas de inversión tectónica.

En la zona de transición entre ambas fallas, se aprecia que ambos dominios estructurales están desarrollados de forma independiente. Existe un tercer grupo de estructuras, denominadas en este estudio como fallas transversales, las que evidencian la conexión entre las estructuras principales del sistema.

Dada la geometría del bloque colgante entre ambas fallas transversales y mayores, se reconoce un evento de deformación posterior a la formación de las fallas Las Cañas y Agua de los Burros, lo que, en este estudio, se describe como una etapa inicial en el desarrollo de una flor positiva asociada con sistemas de cizalle sinistral en el bloque oeste, probablemente activa durante el Paleoceno - Eoceno Medio.

Para mi Familia

En especial para mi

Mamá y Papá

Saludos

¿Qué sería la vida si no tuviéramos el valor de intentar cosas nuevas?

-De un tal Van Gogh-

Agradecimientos

Agradezco a cada persona que he encontrado en el camino, que me ha dado una sonrisa, que ha compartido este largo proceso de formación. Las palabras de ánimo, las anécdotas, los chistes y chismes, las actividades de distención (y distracción). Je voulais juste te dire merci de faire partie de ma vie. Vale decir, esta página no tiene formato, así que me daré el lujo de poner mucho texto.

En primer lugar, quiero agradecer al Proyecto FONDECYT N°1220062 financiado por ANID, con la investigadora principal, Dra. Stephanie Brichau, por darme la oportunidad de seguir colaborando con el desarrollo de este trabajo. Además, agradecer a los geólogos y geólogas: Fernando Poblete, Esteban Salazar, Marcelo Farías, Sofía Rebolledo, Stephanie Brichau, Reynaldo Charrier, quienes vieron en mi persona una profesional, capaz de esto y mucho más, quienes han estado en mi formación como profesional y ahora presentes en mi formación doctoral.

Segundo, pero tan importante como el primero, agradezco a mi familia, mi mamá Fabiola y papá Francisco, por llevarme al Cajón del Maipo desde chiquitruspis (lugar donde nació la curiosidad por esta carrera), gracias por dejarme soñar en grande, sin ningún límite, siempre incentivando a esa Paula curiosa y preguntona a seguir siendo así. Guiándome para ser esa “ologa” que desde siempre he querido ser. En especial a mi mamá, por soportarme en mis malos ratos que llevaron este final muy muy esperado.

No puedo dejar de agradecer a los Romero Mañozos, Abuela, Abuelo, Tío Darwin, Tía Ada, Tía Pini, Tía Leo, Tío Alberto, Tío Rolando, quienes han estado apoyándome desde siempre, detrás de bastidores, con su llamada y palabras, quienes siempre están conmigo y me apoyan en cada paso que he dado.

Agradezco a mi Itu Tui, amiga del colegio, incondicional, una estimada, ya toda una adulta, que ha estado siempre a una llamada de distancia. A mis amigos desde el día 1 de U: Rubí, Javi, Jose quienes han estado por tantos años, los he visto crecer y los veo ahora como los adultos independientes (con gustos bien dementes).

Al team geo, los Geogang: Vicky Quesille, Tami, Lukas, Alex, Mauri, Fock, Jorge, y varios más (kajaskaj este grupo era demasiado grande). Gente de la Salita de memoristas, que fueron cambiando, pero fijo recordarme de la Isa, Gabi, Pino, Tomi Urrejola, quienes fueron efímeros en mi estadía.

Al los Difu, Pili, María José, Vicky Oporto, Kei, Isi, Coni C y Coni U, Ivania, quienes seguirán siendo parte de mi vida, por los bellos lazos que se han formado (y difu completo que me ha hecho crecer en la vocación científica y el amor por divulgar las ciencias).

Al mejor Team de postgrado, que han estado en mis últimas etapas del pregrado y viéndome brillar en el comienzo del Doctorado: Vicky Oporto, Cata, Denisse, Kristian, Alejo, + mucha gente. Quienes solo con verlos me dan calma y me siguen ayudando en el día a día, para terminar esto que ya solo es un trámite.

Bueno, fueron varios años, así que, si tal vez deje de mencionar a alguien, también estas aquí, juro que no te olvide jaja. Gracias a la Rama de Natación, a la gente que conocí en el intercambio, en Francia, en Biblioteca, actividades de Difusión Colegio, BeM. En verdad, estos infinitos años no fueron en soledad... pensando hacia atrás cada una de estas personas fueron parte de mi crecimiento y por eso no puedo más que mandarles mi amor, el fuuuuu e intentar con estas palabras demostrar lo bello que ha sido poder compartir.

No quiero solo romantizar la U, el proceso llevo lágrimas, sudor y desesperación, pero no solo eso, me permitió salir del país, crecer, aprender un nuevo idioma, probar mis límites, descubrirme como científica y continuar con mi formación. Que se sepa que, si bien la universidad no te lo da todo, me ha servido como trampolín para tomar la batuta y buscar mi camino.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Presentación del problema.....	2
1.3. Hipótesis de Trabajo.....	4
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Metodología de Trabajo	4
1.6. Ubicación y Accesos	5
Capítulo 2 : Marco Geológico.....	7
2.1. Marco Tectónico.....	7
2.2. Evolución tectono-estratigráfica.....	7
2.3. Geología Regional	10
2.3.1. Grupo Chañarcillo (Kch).....	11
2.3.2. Formación Cerrillos (Kc)	11
2.3.3. Formación Viñitas (Kv)	12
2.4. Unidades Intrusivas	12
2.4.1. Intrusivo hipabisal ocoítico Las Tunas (Kinht).....	12
2.4.2. Monzodiorita de Rodados Negros (Ksmdr)	13
2.5. Geología Estructural.....	13
2.5.1. Dominios morfoestructurales	13
Capítulo 3 : Resultados	17
3.1. Generalidades litologías local	17
3.2. Generalidades de la estructura local.....	22
3.2.1. Análisis de Planar de la Estructura.....	22
3.2.2. Dominios Estructurales	31

Capítulo 4 : Análisis de resultados.....	35
4.1. Estructuras geológicas	35
4.1.1. Perfiles geológicos	35
4.1.2. Dominios estructurales.....	37
4.1.3. Estructuras tipo <i>pop-up</i>	37
Capítulo 5 : Discusión.....	39
5.1.1. Generalidades y limitantes	39
5.1.2. Estructuras principales	39
5.1.3. Forma Sigmoidal.....	40
5.2. Cronología relativa.....	42
Capítulo 6 : Conclusiones	44
Bibliografía	45

Índice de Figuras

Figura 1.1: Clasificación de tipos de enlace entre Antithetic thrust linkage (Fallas inversas antitéticas), definidas por Higgins et al. (2007). Modificado de Higgins et al. (2007).	1
Figura 1.2: Esquema simplificado Zona de estudio. Falla Las Cañas vergencia oeste, Falla Agua de los Burros vergencia este y Zona de transición, bloque colgante. Modificado de Higgins et al. (2007) y sacado de Totake et al. (2017).	2
Figura 1.3: Zona de estudio.	3
Figura 1.4: Ubicación y accesos al área de estudio. Información de Red Vial 2019, BCN Chile.	6
Figura 2.1: Ciclo Tectónico andino. Subdivisión de las etapas desde el Andino hasta la actualidad. Modificado de Charrier et al. (2009).	8
Figura 2.2: Geometría de las placas en el margen sudamericano para a) Cretácico Superior temprano; b) Cretácico Superior al Mioceno superior; c) Mioceno superior al Presente. Modificado de Zonenshayn et al. (1984) en Quiroga (2013).	9
Figura 2.3: Tabla Cronoestratigráfica y dominios estratigráficos definidos por Salazar et al. (2021) entre los 28,5 a 30° altitud sur. Se destaca Sección Cordillera de la Costa, por contener zona de estudio. Modificado de Salazar et al. (2021).	10
Figura 2.4: Mapa geológico simplificado entre los 28°30'-29° S y los 70°-71°W (Modificado de Arévalo et al. 2009; Salazar et al. 2013 y Salazar & Coloma, 2016. Extraído de Briones, 2018).	14
Figura 2.5: Mapa y perfil geológico cuenca de Chañarillo, al norte de Vallenar (Martínez et al., 2013). Falla Elisa de Bordos, prolongación norte de la Falla Agua de los Burros. Extraído de Figura 5, Martínez et al. (2015). EB-AG Fault: Sistema de Falla Elisa de Bordos-Agua de los Burros. 1) Formación Cerrillos, 2) Grupo Chañarillo, 3) Formación Punta del Cobre, 4) Intrusivos cretácicos.	16
Figura 3.1: Diferenciación en la colorimetría de las formaciones en la zona de estudio, quebrada Cabecita Larga. Ubicación referencial de litologías e intrusivos	17
Figura 3.2: Estratos del Grupo Chañarillo, quebrada Cabecita Larga. a) Estratificación capas calcarenitas y calcilutitas. b) Conchas de bivalvos en arenisca media a gruesa. c) Icnofósil de tipo Thalassinoide galerías anaranjadas en arenisca media. d) Fósiles de Rynchonellas, en areniscas.	18
Figura 3.3: Sucesión de areniscas y fangolitas, gradación de Fm Cerrillos a Viñitas sector oriental quebrada Cabecita larga.	19

Figura 3.4: Formación Viñitas en Quebrada Cabecita Larga. a) Toba Andesítica. b) Conglomerado. c) Alteraciones en Tobas de lapilli.	20
Figura 3.5: a) Intrusivo hipabisal Las Tunas (Kinht) bajo estratificación del Grupo Chañarcillo (Kch). Intrusivo sigue la estratificación de Kch. b) Textura ocoítica, fenocristales de plagioclasa.	20
Figura 3.6: Distribución Monzodiorita de Rodados Negros, orientación N-S. Sector Oriental de Quebrada Cabecita Larga. a) vista norte en perspectiva, b) vista en planta. Imagen de Google Earth. En línea punteada contacto entre litologías. Kc: Formación Cerrillos, Kv: Formación Viñitas, Ksmdr: Intrusivo monzodiorita de Rodados Negros.	21
Figura 3.7: Mapa geológico de la zona de estudio, comprende entre los 28,8°S - 29°S y 70,76°W – 70,60°W. Compilado de Cartas Geológicas (Arévalo et al. (2009), Salazar et al. (2015) y el presente trabajo.	23
Figura 3.8: Perfil A-A'. Mapa y perfil geológico sección norte. En zona de Transición.	25
Figura 3.9: Vista ladera sur Quebrada Cabecita Larga, sector occidental (a), centro (b) y oriental (c), secciones en el perfil. Imagen e interpretación estructural próxima a Falla Las Cañas. Simbología de Figura 3.8. Kch: Grupo Chañarcillo, Kc: Formación Cerrillos, Kv: Formación Viñitas, Ksmdr: Intrusivo Monzodiorita de Rodados Negros.	27
Figura 3.10: Perfil B-B'. Mapa y perfil geológico de la sección central por la quebrada Cabecita Larga. En zona de Transición. Simbología y leyenda de Figura 3.8.	28
Figura 3.11: Perfil C-C'. Mapa y perfil geológico sección sur, próximo a quebrada Algarrobal. Misma Simbología de Figura 3.8.	30
Figura 3.12: Vista en planta, polígono área de estudio y extensión norte-sur fallas principales. División de dominios.	31
Figura 3.13: Mapa Geológico Estructural de la zona de transición. En azul las estructuras asociadas al dominio falla Las Cañas; en verde a dominio falla Agua de los Burros y rojo a estructuras de interacción entre dominios.	34
Figura 4.1: Esquema retro-corrimiento en sector oeste, en Figura 3.9 y perfil B-B' (Figura 3.10). Imagen Satelital Google Earth.	35
Figura 4.2: Esquema propagación de Falla. i) Elementos en una propagación de falla lateral superficial. ii) Etapa inicial de propagación sur, Falla Agua de los Burros. iii) Condición actual e interpretación de las estructuras, en Figura 3.9 y perfil B-B' (Figura 3.10). Modificado de Totake et al. (2017).	36
Figura 4.3: Estructuras pop-up en zona de transición. a) En línea roja fallas inversas transversales, polígono rojo zona de pop-up 1 y 2. b) Mapa Zona de transición, continuidad de lineamientos de falla, forma sigmoidal-rómbica. Leyenda y simbología de Figura 3.7.	38

Figura 4.1: a) Tabla resumen evolución de pop-up a variados ángulo entre fallas principales, desplazamiento sinestral, Extraído de McClay y Bonoso (2001). b) Comparación caso de estudio con modelos análogos de McClay y Bonoso (2001).41

Figura 4.2: Fallas Principales, morfo estructuras. Desplazamiento sinestral en zona de transición, consistente con fallas al oeste de la zona de estudio. Modificado de Salazar et al. (2021)...42

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

El estudio cinemático y las variaciones estructurales a lo largo del enlace entre fallas ha sido ampliamente estudiado para régimen extensivos y compresivos en sistemas de estructuras de misma vergencia. Por el contrario, el entendimiento de la conexión entre fallas de vergencias opuestas no ha sido totalmente comprendido e investigación en esta área no han entregado resultados claros de su comportamiento.

De estas investigaciones sobresale Higgins *et al.* (2007), el cual trabajó el sistema de fallas inversas de vergencias opuestas en la franja plegada y corrida submarina del delta Niger, Nigeria. A partir de su estudio con sísmica en 3D, clasificó el enlace de fallas inversas divergentes (“*antithetic thrust fault linkages*”) en tres tipos: i) fallas que coinciden espacialmente en un anticlinal cortado por ambas fallas y formando un pop up central; ii) fallas conectadas en profundidad que forman un pliegue anticlinal sin fallas y iii) fallas continuas en superficie y profundidad que se cortan entre sí formando pliegues y estructuras complejas (Figura 1.1).

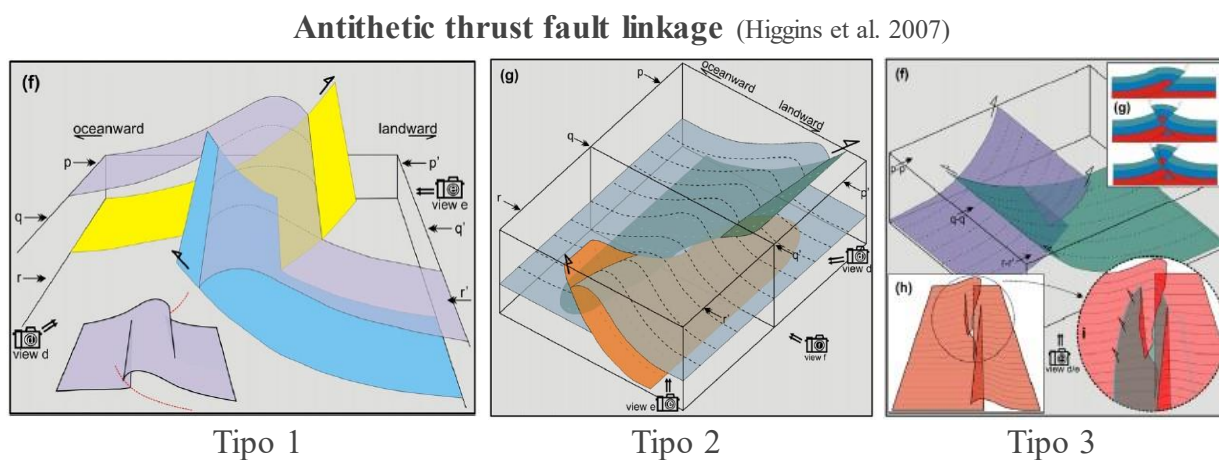


Figura 1.1: Clasificación de tipos de enlace entre Antithetic thrust linkage (Fallas inversas antitéticas), definidas por Higgins *et al.* (2007). Modificado de Higgins *et al.* (2007).

A partir del trabajo de Higgins *et al.* (2007) y trabajos posteriores (ej. Higgins *et al.*, 2009; Greenhalgh, 2014; Song *et al.*, 2020), se da pie al estudio y clasificación de la zona de transición y enlace entre las fallas mayores Las Cañas y Agua de los Burros, como caso de estudio en el territorio chileno.

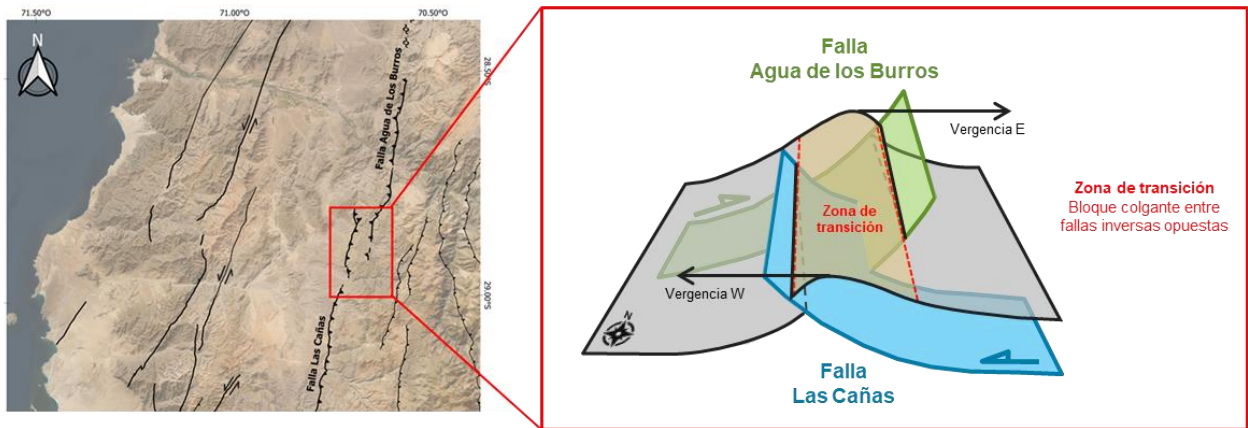


Figura 1.2: Esquema simplificado Zona de estudio. Falla Las Cañas vergencia oeste, Falla Agua de los Burros vergencia este y Zona de transición, bloque colgante. Modificado de Higgins et al. (2007) y tomado de Totake et al. (2017).

Dentro de las clasificaciones de Higgins *et al.* (2007), la esquematización simplificada de la interacción de ambas fallas (enlace tipo 1) se presentaría como dos fallas mayores de vergencias opuestas, falla Las Cañas de vergencia oeste y Agua de los Burros vergencia este, entre las cuales se desarrolla una zona de transición, caracterizada por un bloque colgante compartido entre estructuras inversas (Figura 1.2). Se identifica esta zona de transición como la zona de mayor impacto en la deformación de ambas estructuras, donde su estudio y comprensión estructural da evidencia para la comprensión en el proceso de interacción entre fallas divergentes.

1.2. Presentación del problema

La configuración estructural actual de la Cordillera de los Andes es el resultado de una serie de procesos geológicos, ocurridos desde el Jurásico hasta la actualidad (ej. Coira *et al.*, 1982; Mpodzis y Ramos, 1989; Oliveros *et al.*, 2006; Charrier *et al.*, 2007). El margen oeste de Sudamérica ha sufrido eventos extensivos y compresivos que han dado origen a distintos procesos orogénicos identificados en los Andes, formando así estructuras geológicas corticales de escala regional paralelas al margen de subducción y con largos se traza superiores a 50 km en superficie.

Durante la primera etapa del Ciclo Andino (*sensu* Charrier *et al.*, 2007, 2015), entre el Jurásico y Cretácico, el borde occidental de Gondwana sufrió una tectónica principalmente extensional en el retro-arco, la que controló la formación de cuencas sedimentarias por apertura de fallas normales y subsecuente subsidencia termal (ej. Cuenca del Chañarcillo). En etapas posteriores, pulsos compresivos generaron la reactivación inversa de las fallas normales que participaron en la apertura de las cuencas (ej. Martínez *et al.*, 2013, 2015), formando sistemas geológicos con variadas respuestas estructurales.

Esto se observa específicamente en el límite oriental de la Cordillera de la Costa entre Vallenar y Domeyko, entre los 28°80'S y 29°00'S, donde se encuentra una zona de deformación sin estudios

estructurales detallados, con continuidad litológica evidente y sistemas estructurales complejos de orientación preferente NNE.

El presente trabajo se enfoca en el estudio de las estructuras geológicas regionales Falla Las Cañas, la cual estuvo activa entre los 89 – 84 Ma y Falla Agua de los Burros que corresponde a falla invertida y límite oriental de la cuenca del Chañarcillo. En específico en la zona de transición, ubicada en el tramo final de ambas trazas de falla. El área abarca, 17 km de largo en su rumbo con una separación en planta entre 4 y 5 km.

Dentro de la zona de estudio, se destaca que la comprensión de la formación y deformación estructural considera una variable económica importante, en relación con el favorecimiento del emplazamiento de pórfidos cupríferos cretácicos. Según Creixell *et al.* (2015) dentro de las estructuras regionales del norte de Chile (28°-30°S), el sistema de fallas inversas Agua de los Burros-Las Cañas, corresponden a uno de los dos principales metalotectos estructurales de la zona con interés exploratorio.

La asociación entre el sistema de fallas y los cuerpos intrusivos del Cretácico Superior, no se presenta de forma directa a lo largo de su rumbo (Creixell *et al.*, 2015), no obstante, se relaciona como metalotecto principal, dado que los eventos compresivos causantes de la inversión y formación de las fallas regionales corresponden espacialmente con el emplazamiento de los pórfidos cupríferos de edades similares (92-87 Ma).

La geología de la zona da la oportunidad de realizar un estudio geológico estructural a partir del análisis superficial, con el objetivo de dar comprensión a la configuración estructural presente e identificar procesos geológicos que den respuesta a los sistemas de fallas y deformaciones presentes en el límite oriental de la Cordillera de la Costa entre Vallenar y Domeyko.

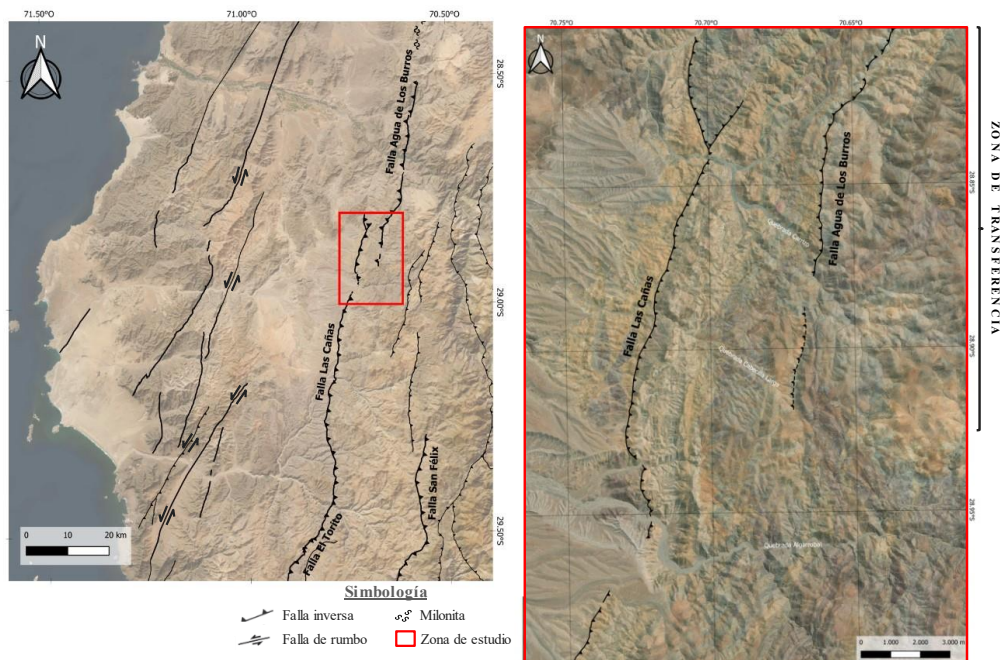


Figura 1.3: Zona de estudio.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Las estructuras secundarias originadas por deformación en los alrededores de fallas de primer orden pueden explicar procesos de interacción con fallas regionales próximas. Además, la geometría y distribución superficial de fallas de 2do orden pueden evidenciar etapas del proceso de deformación e interacción de falla de forma local.

En particular, la deformación secundaria a partir de las fallas Las Cañas y Agua de los Burros puede indicar el mecanismo estructural principal para la zona de transición entre fallas inversas de vergencia opuesta.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Comprender el comportamiento de las zonas de transición longitudinal entre fallas inversas regionales que presenten vergencias opuestas divergentes, utilizando como caso de estudio la zona de transición entre las fallas Agua de los Burros y Las Cañas (entre los 28°80' y 29°00' latitud sur), Región de Atacama, Chile.

1.4.2. Objetivos Específicos

- i. Identificar la zona de transición, a partir del estudio superficial y zona de transición entre vergencias opuestas.
- ii. Caracterizar las estructuras de primer orden de la zona de estudio y los estilos de deformación en la zona de transición entre fallas principales.
- iii. Identificar la implicancia en la deformación de la zona de transición en relación con las diferencias estructurales entre las Fallas Las Cañas y Agua de los Burros.
- iv. Proponer geometría estructural para la acomodación de acortamiento horizontal entre fallas inversas de vergencia opuesta para el caso de estudio específico.

1.5. Metodología de Trabajo

El Trabajo se desarrolló a partir de 4 etapas: (1) Trabajo de gabinete, basado principalmente en la recopilación, revisión bibliográfica y a partir de lo anterior confección de una síntesis geológica y estructural del área estudiada; (2) Realización de un trabajo de campo de 3 días de trabajo efectivo; (3) Procesamiento de la información obtenida en terreno, acompañado del mapeo con teledetección de la zona de estudio; para la posterior elaboración de perfiles geológicos del área de

trabajo; y finalmente, (4) Identificación de dominios estructurales y zonas de deformación, para el análisis y discusión estructural del área de estudio.

A continuación, se detallan las etapas y su relación con los objetivos propuestos.

Referente al objetivo específicos i), la identificación de la zona de transición se realiza a partir de la recopilación bibliográfica de la zona de estudio, enfocado en la geología regional, estratigrafía y la geología estructural, y con ello contar con las condiciones estructurales generales y regionales que enmarcan el sector de estudio y generar una base inicial para la identificación de factores estructurales y posterior definición de la zona de transición.

Referente al objetivo específico ii), se realizó un terreno de 3 días de trabajo efectivo, en el cual se recopiló información litológica y estructural, para la verificación y/o actualización de la información recopilada en etapa de gabinete.

Referente al objetivo específico iii), en base al mapeo geológico mediante la recopilación bibliográfica y datos obtenidos en terreno, se confeccionan 3 perfiles geológicos, dos dentro de la zona de transición y uno en sector sur de la misma, con ello se diferencia y caracteriza las estructuras de primer y segundo orden de la zona de transición, subdividiéndolas por estilos de deformación estructural.

Referente al objetivo específico iv), con aproximación en la literatura de casos de estudios similares y de modelos análogos, se identifican las estructuras que controlan la acomodación del sistema estructural.

1.6. Ubicación y Accesos

El área de estudio se ubica en la Cordillera de la Costa, en la comuna de Vallenar, provincia del Huasco, III Región de Atacama, en el Norte Chico de Chile. La zona se encuentra entre las latitudes de 28°80'S y 29°00' S y longitudes de 70°60'W y 70°80'W (Figura 1.4).

A modo de referencia, la zona estudiada se encuentra a 680 km al norte de Santiago, Región Metropolitana, por la Panamericana Norte o ruta 5, a 23 km al norte del pueblo de Domeyko y a 45 km al sur de la ciudad de Vallenar.

En particular, el ingreso a la quebrada Cabecita Larga, principal zona de estudio en terreno tiene un acceso aledaño a la ruta 5, desde la ruta no pavimentada C-509, utilizada originalmente para labores mineras. Dicho acceso recorre de forma paralela la quebrada de estudio, y se conecta con caminos internos menores, accesibles con vehículos con tracción (Figura 1.4).

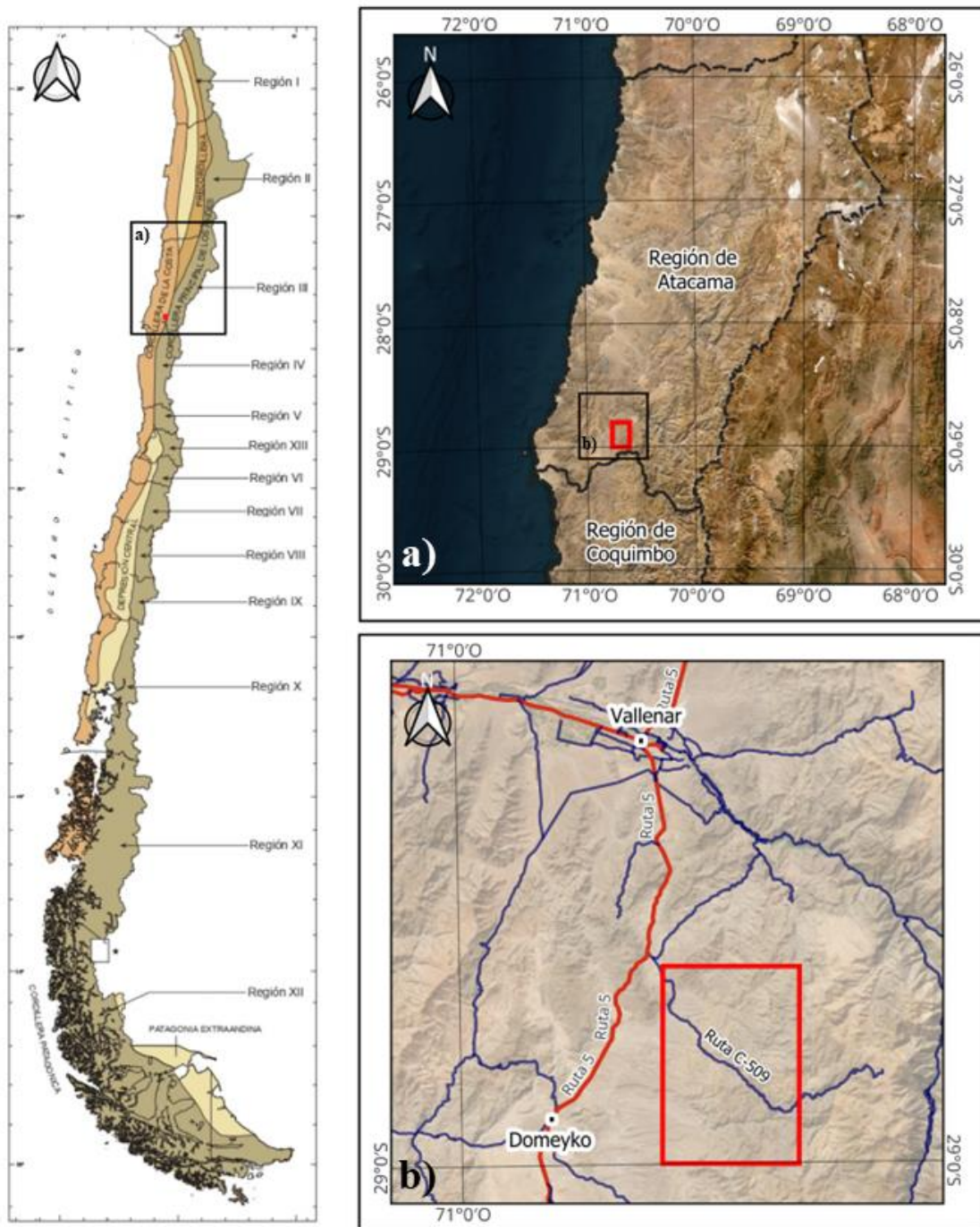


Figura 1.4: Ubicación y accesos al área de estudio. Información de Red Vial 2019, BCN Chile.

Capítulo 2: Marco Geológico

2.1. Marco Tectónico

La evolución de la Cordillera de los Andes a lo largo del margen sudamericano ha sido controlada por la subducción oceánica-continental de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana desarrollada desde el Jurásico hasta la actualidad (Coira *et al.*, 1982; Mpodozis y Ramos, 1989, Kay *et al.*, 1991; Oliveros *et al.*, 2006; Charrier *et al.*, 2007).

En el sector chileno de la Cordillera de los Andes existen variaciones latitudinales, controladas principalmente por el ángulo de subducción (Jordan *et al.*, 1983). A lo largo de este sector andino, la subducción se presenta fundamentalmente con una inclinación de unos 20 a 30° al este y se la denomina de tipo Andino (o Chileno, según Uyeda y Kanamori, 1979). En el sector comprendido entre 27° y 33° S, la subducción presenta un menor ángulo de inclinación, del orden de unos 12° E por lo que se lo denomina de subducción plana o “*Flat-Slab*” (Cahill e Isacks, 1992; Pardo *et al.*, 2002; Gutscher *et al.* 2000; Ramos *et al.*, 2002; Kay y Kay, 2002; Ramos, 2009).

El *Flat-Slab*, o “segmento de subducción plana de Chile Central” (Barazangi y Isacks, 1976; Jordan *et al.*, 1983; Gutscher *et al.*, 2000) corresponde a una subducción en la que, a partir de la Zona de Benioff, a 150 km de profundidad, la placa presenta un ángulo de aproximadamente 10°, esta configuración estructural se encuentra entre los 28° a 33° de latitud sur.

En la literatura, varios autores (Jordan *et al.*, 1983; Cahill e Isacks, 1992; Pardo *et al.*, 2002; Gutscher *et al.*, 2000; Ramos *et al.*, 2002; Kay y Kay, 2002; Charrier *et al.*, 2007; Ramos, 2009) caracterizan esta zona por la ausencia en el eje de la cordillera de volcanismo activo de arco desde el Mioceno superior, fuerte acoplamiento entre placas tectónicas; ausencia de Depresión Central; además de, presentar el desarrollo de la faja plegada y corrida epidérmica de la Precordillera, asociado a una deformación de tipo piel final en el ante-país; y la formación de las Sierras Pampeanas en Argentina.

2.2. Evolución tectono-estratigráfica

La construcción de los Andes Chilenos se ha subdividido en 3 etapas diferenciadas por fases tectónicas que fueron determinando cambios en la paleogeografía, Andino I, II y III, precedida por el Pre-Andino (Charrier *et al.*, 2007) (

Figura 2.1).

En la primera etapa del ciclo Andino comenzó con un periodo de régimen extensional en el margen occidental de Gondwana, desarrollado por el break-up del super continente Pangea (Charrier *et al.*, 2007). Esta primera fase se caracterizó por un arco volcánico activo ubicado en la actual Cordillera

de la Costa, y la formación y sedimentación en cuencas de tras-arco marinas de orientación N-S al este del arco, y entre estas, la cuenca del Chañarillo (Aguirre-Urreta, 1993).

EDAD	ERA	PERIODO	CICLO TECTONICO	ETAPAS	EVENTOS TECTONICOS
10	CENOZOICO	NEOGENO	A N D I N O	Tercera	Orogenia Pehuenche Extensión
50		PALEOGENO		Segunda	Orogenia Incaica Transtensión Orogenia K-T Extensión
100	CRETACICO	Primera		Orogenia Peruana Extensión Subsidencia termal	
150	MESOZOICO	JURASICO	PRE ANDINO		Extensión Subsidencia tectónica Emersión de la cuenca
200					Extensión Subsidencia termal Subsidencia tectónica

Figura 2.1: Ciclo Tectónico andino. Subdivisión de las etapas desde el Andino hasta la actualidad. Modificado de Charrier et al. (2009).

El arco volcánico se vio afectado por la deformación causada por las primeras etapas de desarrollo de la Zona de Falla de Atacama, presentando un régimen sinistral asociado a la convergencia oblicua de la placa Phoenix con Sudamérica (Boric *et al.*, 1990; Scheuber y Andriessen, 1990; Scheuber y González, 1999; Reutter, 2001; en Urresty, 2009) (Figura 2.2 a).

La primera etapa del Andino llegó a su fin entre el Cretácico Inferior y Cretácico Superior, donde se produjo a la fase Peruana, evento formado por un pulso compresivo, el cual generó una inversión positiva parcial en cuencas sedimentarias con depósitos del Jurásico Inferior y Cretácico Inferior.

Según Scheuber *et al.* (1994) y Reutter (2001) (en Urresty; 2009), esta fase se debió al desplazamiento al sureste de la placa Farallón y con ello se habría producido una convergencia oblicua dextral con la placa Sudamericana (Figura 2.2 b).

En la segunda fase del Ciclo Andino, el arco magmático se desplazó hacia el este y ubicándose en la actual Depresión Central; esto desarrolló una cuenca de antepaís en la anterior cuenca de trasarco (Charrier *et al.*, 2007). En una etapa inicial de esta fase, se produjo un periodo de extensión, durante el cual se depositó de manera sintectónica la Formación Cerrillos en la cuenca de Chañarillo (Charrier *et al.*, 2007; Perroud, 2017; Briones, 2018).

En el límite entre el Cretácico y el Paleoceno, ocurrió la fase K-T (Cretácico/Terciario), evento compresivo que controló principalmente la inversión de las fallas desarrolladas a lo largo del arco. Posteriormente, se reanudó un régimen extensivo de menor intensidad, el que continuó hasta el Eoceno medio. La extensión terminó con un pulso compresivo, Orogénesis Incaica (Steinmann, 1929; Charrier y Vicente, 1972; Charrier y Malumián, 1975; Maksaev, 1978; Reutter, 2001; Cornejo *et al.*, 2003; en Urresty, 2009), la cual invirtió las cuencas desarrolladas en el último régimen extensivo lo que dio fin al Andino II.

La última fase del Ciclo Andino se desarrolla desde el Paleógeno Superior hasta el presente, y se caracteriza por el desarrollo de la configuración estructural actual de los Andes. Riquelme *et al.* (2003) señalaron que la actividad del Sistema de Fallas de Atacama alzó el sector occidental de la Cordillera de la Costa, lo que bloqueó el drenaje de las cuencas hidrográficas provenientes del este y permitió la acumulación de sedimentos gruesos que dieron origen a las Gravas de Atacama, durante el Mioceno.

Hace 25 Ma, la placa Farallón se fragmentó en las placas de Nazca y de Cocos, lo que aumenta la tasa de convergencia y cambia la dirección de subducción, a su configuración actual casi ortogonal ($\sim 10^\circ\text{S}$) (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998; Somoza y Ghidella, 2005; Sdrolias y Muller, 2006, en Perroud, 2017). En cuanto a la zona de estudio, hace aproximadamente 10 Ma, se estableció un régimen de subducción plana, “*Flat Slab*” (Barazangi y Isacks, 1976; Jordan *et al.*, 1983; Gutcher *et al.*, 2000), el cual finalizó con la actividad volcánica, y con ello propició el desarrollo de fajas plegadas y corridas entre los $28^\circ\text{-}33^\circ\text{S}$.



Figura 2.2: Geometría de las placas en el margen sudamericano para a) Cretácico Superior temprano; b) Cretácico Superior al Mioceno superior; c) Mioceno superior al Presente. Modificado de Zonenshajn *et al.* (1984) en Quiroga (2013).

2.3.1. Grupo Chañarcillo (Kch)

El Grupo Chañarcillo fue definido en su localidad tipo, valle del Río Copiapó, por Segerstrom y Parker (1959) como secuencia marina a facies continentales se depositó en la cuenca del Chañarcillo, adquiriendo así su nombre. Por definición, esta se compone por 4 formaciones, de base a techo, la Formación Abundancia, Nantoco, Totoralillo y Pabellón, de las cuales solo Formación Abundancia no aflora en el área de estudio.

La Formación Nantoco (Kin) de edad hauteriviana superior corresponde a la formación más joven del grupo Chañarcillo que aflora en el occidente de la zona de estudio. Esta fue definida originalmente por Biese-Nickel (1942); y descrita en la *Hoja Geológica Área Vallenar-Domeyko* (Arévalo *et al.*, 2009) como una sucesión de calizas marinas de color gris oscuro y calizas brechosas; y contienen ammonites del Hauteriviano (Aguirre-Urreta *et al.*, 2007). Su relación de contacto respecto a otras formaciones del Kch son de tipo concordante en base y techo con la Formación Abundancia y Totoralillo respectivamente (Corvalán, 1973).

La Formación Totoralillo (Kit), también definida por Biese-Nickel (1942), se describe como la formación intermedia del Grupo Chañarcillo identificada por una litología uniforme compuesta por intercalación de lutitas calcáreas y calizas margosas (Arévalo *et al.*; 2009). Destaca la abundancia fosilífera de ambiente inter a infra mareal y laminación fina granocreciente, esto último interpretado por otros autores como un período de transgresión marina generalizada (Mourgues, 2007; Arévalo y Welkner, 2008; Peña *et al.*, 2013; Perroud, 2017). En cuanto a su posición relativa, la Formación Totoralillo se encuentra concordante sobre la Formación Nantoco y bajo la Formación Pabellón.

En el techo del Grupo Chañarcillo, se dispone la Formación Pabellón (Kip) definida por Biese-Nickel (1942). Esta se encuentra concordante en su base con la Formación Totoralillo y en pseudoconcordancia con la Formación Cerrillos en su techo (Corvalán, 1974). Está constituida por calizas, en parte arcillosas y arenosas, con estratificación gruesa en la parte inferior, y secuencias clásticas de arenisca, conglomerados y brechas en su parte superior (Corvalán, 1974). Su espesor varía geográficamente, pasando a tener una potencia de 500 m en Quebrada Algarrobal (Arévalo *et al.*, 2009) a 2000 m en el área de Sierra Lechuza (Arévalo y Welkner, 2008; Peña *et al.*, 2013).

2.3.2. Formación Cerrillos (Kc)

La Formación Cerrillos (Kc) de edad albiana al cenomaniana, fue definido por Segerstrom y Parker (1959) y enmendado por Salazar *et al.* (2021) como una formación compuesta por una serie clástica y volcánica, constituida únicamente por el miembro “Checos de Cobre”. Según Salazar *et al.* (2021) esta formación se encuentra en contacto concordante en su base con la Formación Pabellón del Grupo Chañarcillo; en su techo, se presenta con leve discordancia angular con Formación Viñitas y en discordancia con la Formación Los Elquinos (al norte de los 29°S); además de lo anterior, esta formación se correlaciona con a la Formación Quebrada Marquesa (Pineda y Empa-

rán, 2006) al sur de los 29,5°S. Ha sido referida por Perroud (2017) y Briones (2018), como depósitos syn-inversión de la cuenca del Chañarcillo. Para esta formación, se ha determinado una edad de sedimentación entre 112 y 94 Ma (Salazar et al., 2021).

2.3.3. Formación Viñitas (Kv)

Descrita originalmente por Aguirre y Egert (1965) y redefinida por varios autores (Emparán y Pineda, 1999; Arévalo *et al.*, 2009; Creixell *et al.*, 2013; Salazar *et al.*, 2021), la Formación Viñitas (Kv) se define como una formación de la edad turoniana a coniaciano?, y corresponde a una sucesión sedimentaria continental y volcánica que aflora exclusivamente en la cordillera de la costa en orientación NS a NNW, con un manteo de 15-25° hacia el este (Salazar *et al.*, 2021).

Su relación de contacto hacia la base presenta una leve discordancia angular con rocas de la Formación Cerrillos y se encuentra con repetición estratigráfica hacia el sur de la zona de estudio, a causa de la tectónica de Falla Las Cañas-El Torito. Por otra parte, hacia el techo se encuentra dispuesta en aparente concordancia por la Formación Los Elquinos (Emparán y Pineda, 2006; Salazar *et al.*, 2021).

Según Salazar et al. (2021), la Formación Viñitas, en torno a su localidad tipo en Quebrada Marquesa, se compondría de coladas de andesitas, con espesores de metros a centímetros, intercalados por brechas tobáceas de lapilli de igual composición, que aumentan hacia el techo.

Esta formación se ha sido datada por U-Pb (Creixell *et al.*, 2013 y Salazar *et al.*, 2021) asignándose una edad de formación entre los 88 a 94 Ma.

2.4. Unidades Intrusivas

2.4.1. Intrusivo hipabisal ocoítico Las Tunas (Kinht)

Cuerpo intrusivo fue definido por primera vez en la *Hoja Geológica Área Vallenar-Domeyko* por Arévalo *et al.* (2009), esta se encuentra intruyendo el Grupo Chañarcillo, por debajo de calizas marrones de la Formación Nantoco y en contacto por falla con la Formación Totalillo.

Según Arévalo et al. (2009), su composición está identificada como andesitas basálticas con fenocristales de plagioclasa (labradorita-andesina) y, piroxeno y olivino como los principales ferromagnesianos. Geocronológicamente, no existen dataciones para este intrusivo, pero por relación de cortes con la Formación Nantoco, se indica una edad mínima del Hauteriviano superior; además, relacionándolo con intrusivos ocoíticos similares, Arévalo *et al.* (2005a y 2005b) le asignó una edad tentativa del Cretácico inferior.

2.4.2. Monzodiorita de Rodados Negros (Ksmdr)

Definido por Arévalo *et al.* (2009), la monzodiorita corresponde a cuerpos plutónicos rojizos a blanquecinos, los cuales se encuentran distribuidos en el cordón Rodados Negros intruyendo rocas de la Formación Viñitas.

Litológicamente se compone de monzodioritas cuarcíferas de anfíbol y biotita, con texturas de equigranular a levemente porfídica (Arévalo *et al.*, 2009). Las dataciones existentes fueron realizadas por Arévalo *et al.* (2009) con método de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en biotita (71.0 ± 0.8 , 73.1 ± 0.6 Ma) y K-Ar en biotita (74.2 ± 2 Ma, edad máxima) definiendo así su edad de emplazamiento entre los 71 a 73 Ma.

2.5. Geología Estructural

2.5.1. Dominios morfoestructurales

Moscoso y Mpodozis (1988) en su descripción de los estilos estructurales del Norte Chico de Chile, entre 28 y 31°S , identificaron dos dominios diferentes y complementarios. Estos autores reconocen el área occidental de Cordillera de la Costa como un dominio por deformación de piel fina y, por otro lado, al oriente de la Falla San Félix, el dominio de la Cordillera Frontal caracterizado por una deformación de piel gruesa.

En particular, la zona de estudio se encuentra dentro del dominio estructural de la Cordillera de la Costa y presenta los siguientes subdominios definidos por Moscoso y Mpodozis (1988): el Dominio Este que se extiende al oriente de la falla Agua de los Burros y Dominio Oeste hacia el occidente de esta misma falla (Briones, 2018) (Figura 2.4).

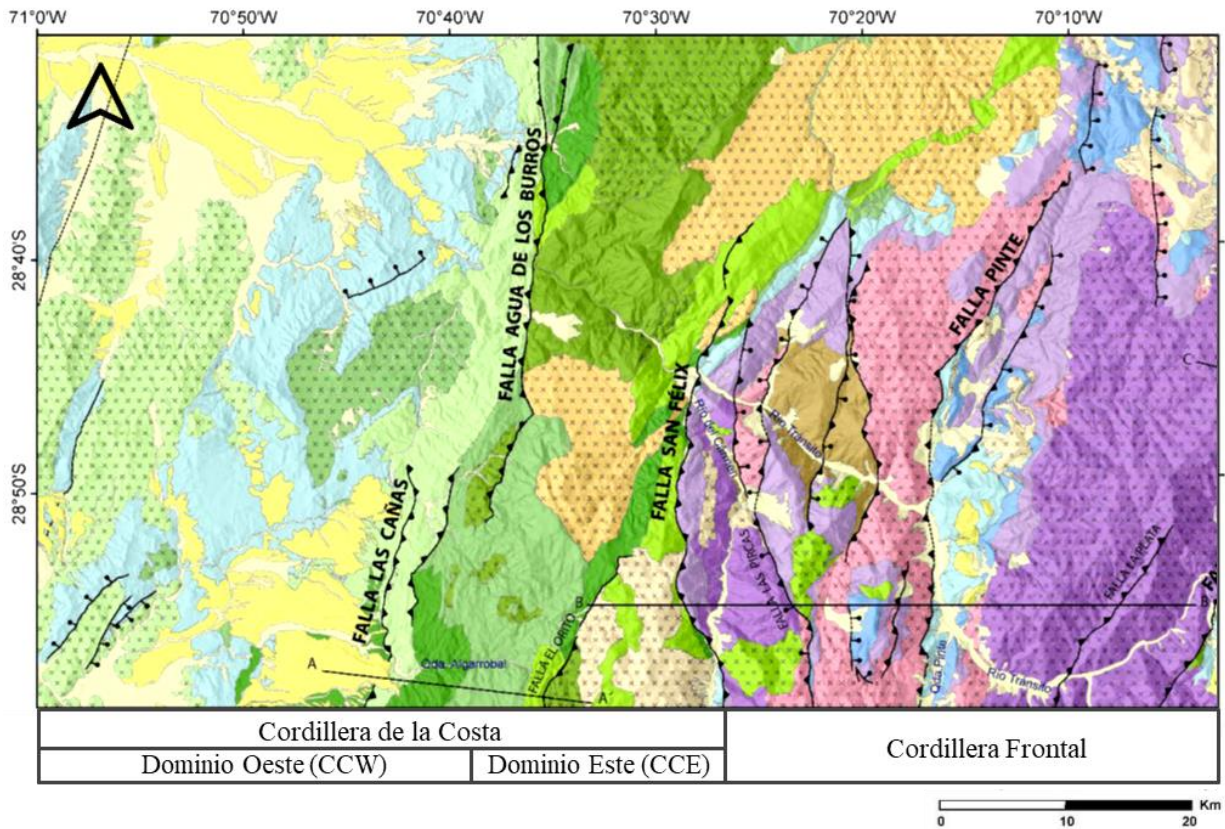


Figura 2.4: Mapa geológico simplificado entre los 28°30'-29° S y los 70°-71°W. Modificado de Arévalo et al. 2009; Salazar et al. 2013 y Salazar & Coloma, 2016 (Extraído de Briones, 2018).

El Dominio Oeste se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas y marinas del Jurásico Superior al Cretácico Inferior, dispuestas principalmente de forma sub-horizontal con aumento de su manteo hacia el este, próxima a la falla Agua de los Burros. Este dominio interactuó directamente con la traza sur del Sistema de fallas Atacama, lo que desarrolló un ambiente de transpresión sinistral en fallas de orientación NW-SE (Thiele y Pincheira, 1987) al oeste del área de estudio.

Por otra parte, el Dominio Este expone principalmente rocas volcano-sedimentarias y plutónicas del Albiano al Maastrichtiano las que desarrollaron estructuras de primer orden: sinclinal de flexura monoclinual de vergencia oeste con un manteo que disminuye desde 80°W en Alto del Carmen, hacia suaves manteos al este en la quebrada Algarrobal y al norte en Embalse Santa Juana; interrumpido por fallas y plegamientos de segundo orden (Moscoso y Mpodozis, 1988; Salazar et al., 2013; 2017). Dada la deformación de estratos jóvenes datados, la edad de formación del sinclinal sería posterior a 80 Ma (Salazar et al., 2013).

2.5.1.1. Falla Las Cañas (FLC)

Esta falla corresponde a una de las estructuras principales dentro de la zona de estudio, se ubica en área occidental del área de estudio (Figura 3.7), ha sido definida anteriormente como una estructura de desplazamiento inverso y deformación compresiva de vergencia oeste (Creixell *et al.*, 2013) que pone en contacto al Grupo Chañarcillo por sobre rocas volcánicas de la Formación Cerrillos y unidades más jóvenes del Grupo Chañarcillo.

Según Creixell *et al.* (2013), esta falla representaría la continuidad de la falla inversa El Torito; representando así la traza norte del sistema de fallas frágiles Falla Las Cañas-El Torito, de configuración general de orientación NNE, inversa de vergencia oeste, con una traza superficial superior a los 80 km de largo. La geometría de la falla fue sugerida como una estructura de tipo rampa (Creixell *et al.*, 2013, 2020), dado su paralelismo con la estratificación de las rocas del Grupo Chañarcillo (en particular observable en la quebrada Algarrobal al sureste de la zona de estudio, Figura 3.7).

El origen de la falla Las Cañas aún se encuentra en discusión. Actualmente, hay dos hipótesis de formación asociadas a esta estructuras donde ambas trabajan con el concepto de inversión tectónica positiva: primero descrita por Creixell *et al.* (2013) como una falla que correspondió al límite de depositación marina asociada a la cuenca Chañarcillo (probablemente borde de cuenca) que sufrió una inversión; mientras que Briones (2018) la describe como una estructura tipo “*footwall shortcut*” (falla de atajo) formada por la inversión de la Falla San Félix ubicada al este de ésta.

Varios autores han definido la edad relativa de activación de la falla Las Cañas, según Creixell *et al.* (2013) y Salazar *et al.* (2013) entre los 89-84 Ma y, según Briones (2018), posterior al Maastrichtiano, hasta el Mioceno. Considerando que la FLC sobrepone rocas calcáreas del Grupo Chañarcillo por sobre la Formación Cerrillos y Viñitas, se considera para este estudio, una edad de activación entre los 89 y 84 Ma durante la Orogénesis Peruana (Creixell *et al.*, 2020).

2.5.1.2. Falla Agua de los Burros (FAB)

La falla Agua de los Burros corresponde a la segunda falla principal de la zona de estudio, esta se encuentra en el extremo más oriental de la zona de transición estructural y se extiende hacia el norte del área. Originalmente fue definida como falla normal con vergencia este (Moscoso y Mpodozis, 1988), que posteriormente fue reinterpretada como falla normal de vergencia oeste reactivada a falla inversa de vergencia este, basado en el contacto litológico observado por Salazar (2012) en el Embalse Santa Juana. Esta falla se caracteriza como una estructura compresiva (tipo inversa), con vergencia oeste y orientación general N-S.

Varios autores (Moscoso y Mpodozis, 1988; Arévalo y Mpodozis, 1991; Martínez *et al.*, 2013, 2015) relacionan esta estructura como la continuación sur de la falla Elisa de Bordos, de manera que el sistema estructural correspondería a una falla regional de comportamiento inverso con vergencia este y un largo de traza superficial superior a 100 km de largo, y habría, además, controlado

la formación del anticlinal Tierra Amarilla, ubicado a 130 km al norte de la zona de estudio (Martínez *et al.*, 2013; 2015). Vale decir que, el mapeo del enlace con la falla Las Cañas ha sido variado en el tiempo, Martínez *et al.*, (2013; 2015) la presenta como la misma falla con inversión parcial diferenciada a lo largo de su traza (Figura 2.5), en cambio, Arévalo *et al.* (2009), Salazar *et al.* (2013; 2021) y Salazar & Coloma (2016) las muestran como 2 estructuras con trazas de falla independientes entre sí (Figura 2.4).

La falla Agua de los Burros se ha considerado una falla normal con manteo al oeste asociada a la extensión la cuenca que controló la depositación del Grupo calcáreo Chañarcillo durante la primera etapa del Ciclo Andino, correspondiendo así con el límite oriental de la cuenca Chañarcillo. Posteriormente, con el cambio de régimen tectónico que ocurrió en el límite de deformación andina “K-T” (Cornejo *et al.*, 2003), esta falla sufrió una inversión tectónica positiva, generando la inversión de la cuenca y desarrollando la configuración actual de la falla (Figura 2.5).

A partir de dataciones realizadas en las Gravas de Atacama (las cuales cubren la traza de falla) se ha determinado una edad acotada de inversión entre el Maastrichtiano y Mioceno Inferior (Arévalo *et al.*, 2009). De igual modo, Moscoso (1979) plantea que ni las características ni la estratigrafía permitirían restringir un rango de tiempo más acotado.

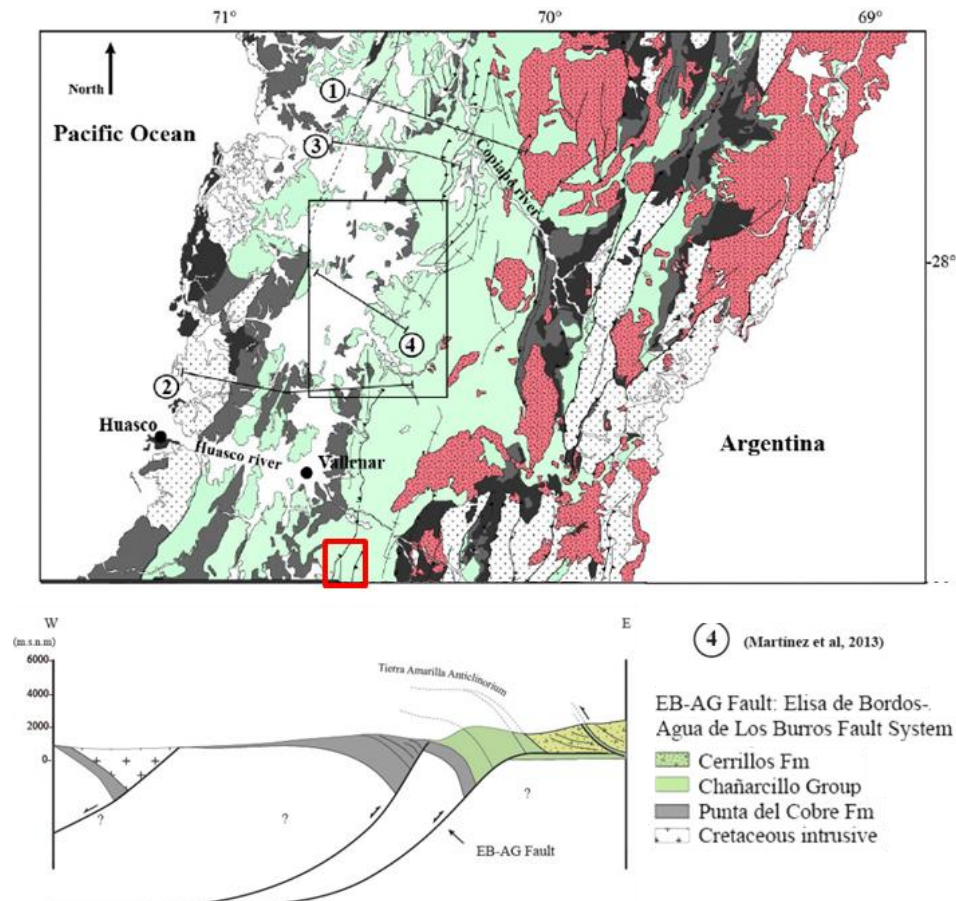


Figura 2.5: Mapa y perfil geológico cuenca de Chañarcillo, al norte de Vallenar (Martínez *et al.*, 2013). Falla Elisa de Bordos, prolongación norte de la Falla Agua de los Burros. Extraído de Figura 5, Martínez *et al.* (2015).

Capítulo 3: Resultados

Los resultados obtenidos en terreno corresponden a datos de tipo litológicos y estructurales obtenidos en la zona de mayor deformación aparente, tramo quebrada Cabecita Larga, identificada dentro de la zona de transición entre fallas Las Cañas y Agua de los Burros. La toma de datos consistió en la descripción litológica, identificación de registro fósil, toma de dato estructural e identificación del contacto entre formaciones geológicas.

A partir de los datos, se elaboró un mapa geológico actualizado, tres perfiles estructurales perpendiculares a la orientación general de estructuras y con ello se definen y clasifican tres dominios estructurales principales.

3.1. Generalidades litológicas local

La estratigrafía de la zona de estudio, Quebrada Cabecita Larga, afloran 3 formaciones geológicas de oeste a este se identifican en franjas de orientación NNE a NS: el Grupo Chañarcillo, formación sedimentaria marina; Formación Cerrillos, con litologías sedimentarias y en el límite este, Formación Viñitas, depósitos volcano-sedimentarios (Figura 3.1). De igual modo, se describen los cuerpos intrusivos aflorantes en la zona.



Figura 3.1: Diferenciación en la colorimetría de las formaciones en la zona de estudio, quebrada Cabecita Larga. Ubicación referencial de litologías e intrusivos

Grupo Chañarcillo (Kch): Corresponde a rocas que afloran al oeste de Quebrada Cabecita Larga, las cuales se caracterizan por secuencias estratificadas marinas compuesta por de calcarenitas y calcilititas (Figura 3.2 a), en una franja de orientación NNE. Su granulometría varía en capas intercaladas de arenisca fina a gruesa, de tonos amarillos a gris, y alto contenido fosilífero, entre estos bivalvos, rynchonellas e icnofósiles de thalassinoides (Figura 3.2), mencionados también por Salazar *et al.* (2021) y Arévalo *et al.* (2009), evidenciando un ambiente de sedimentación marina profunda a superficial.

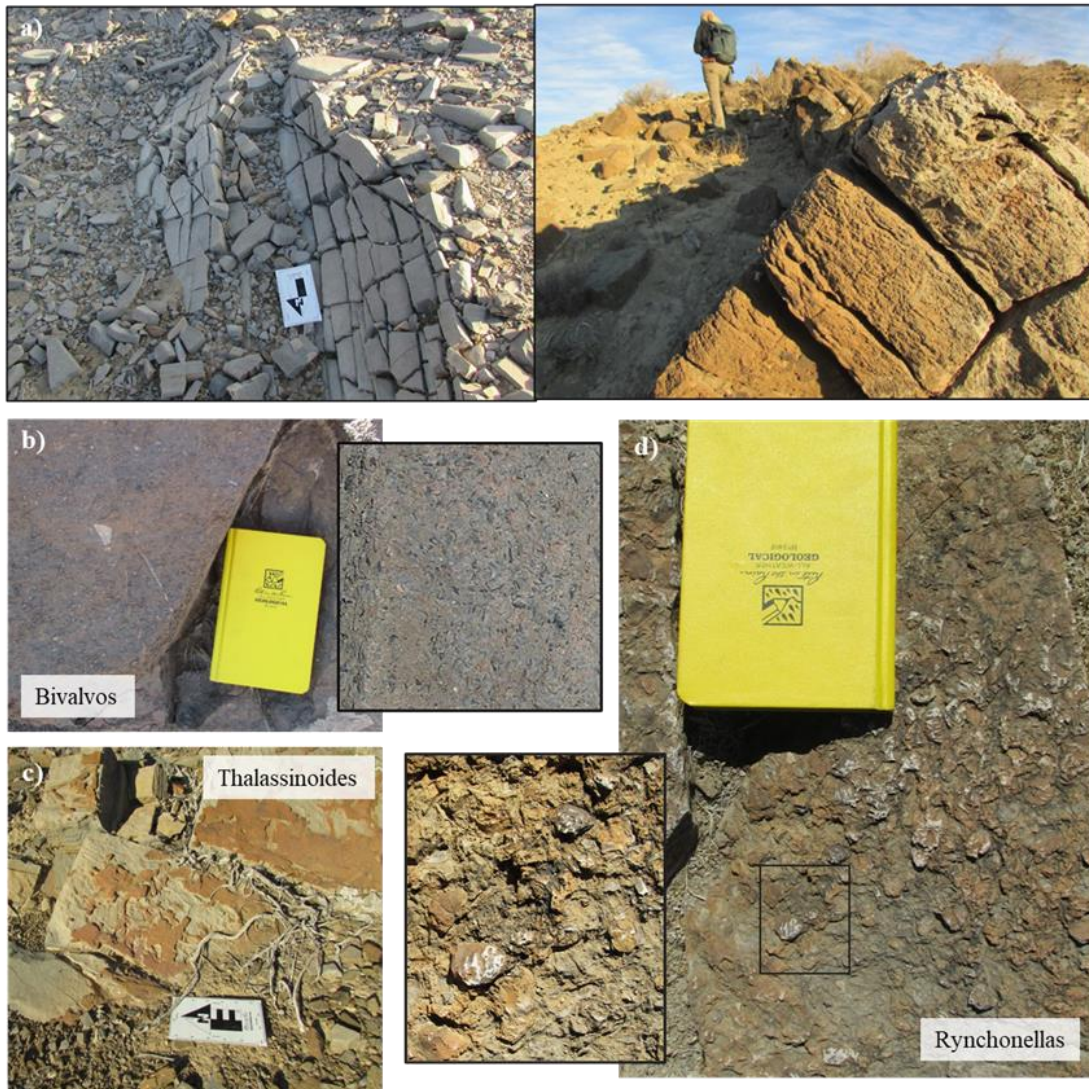


Figura 3.2: Estratos del Grupo Chañarcillo, quebrada Cabecita Larga. a) Estratificación capas calcarenitas y calcilititas. b) Conchas de bivalvos en arenisca media a gruesa. c) Icnofósil de tipo Thalassinoides galerías anaranjadas en arenisca media. d) Fósiles de Rynchonellas, en areniscas.

Formación Cerrillos (Fc): En particular, en la quebrada Cabecita Larga, esta aflora en una orientación NEE a NS, atravesando la quebrada; se encuentra en contacto por falla con el grupo Chañarcillo en su base y en contacto gradacional con la Formación Viñitas (Figura 3.3). Litológi-

camente hacia la base se compone por rocas sedimentarias, sucesiones de areniscas y conglomerados de colores rojizos, verdes y grises; y hacia el techo por intercalación de areniscas medias a finas.



Se destaca la presencia de sucesiones de areniscas y fangolitas calcáreas intercaladas, las que representan una transición gradacional desde un ambiente sedimentario a volcano-sedimentario entre las formaciones Cerrillos y Viñitas (

Figura 3.3). Esta sucesión también fue reconocida en varios sectores de la formación por Salazar et al. (2021) en su localidad tipo (quebrada Marquesa), como en la quebrada Algarrobal (sector sur de la zona de estudio).

Figura 3.3: Sucesión de areniscas y fangolitas, gradación de Fm Cerrillos a Viñitas sector oriental quebrada Cabecita larga.

Formación Viñitas (Fv): En la quebrada Cabecita Larga la formación no varía litológicamente de lo observado en su localidad tipo, esta aflora al este de la quebrada en una sucesión estratigráfica de capas rojizas, amarillas y moradas compuestas por tobas de lapilli andesítica intercaladas con capas de conglomerado (Figura 3.4). Las capas de tobas presentan varios colores dada la variación en el tipo de alteración presente (Figura 3.4 c).

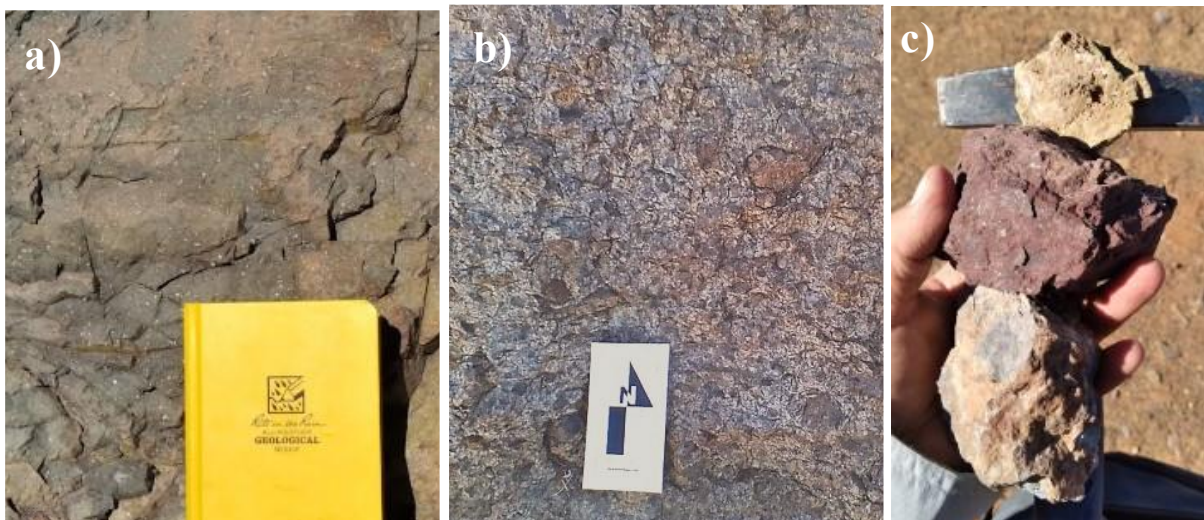


Figura 3.4: Formación Viñitas en Quebrada Cabecita Larga. a) Toba Andesítica. b) Conglomerado. c) Alteraciones en Tobas de lapilli.

Intrusivo hipabisal Las Tunas: Este intrusivo aflora en el sector oeste en el lecho de la quebrada Cabecita Larga y se encuentra intruyendo paralelo a la estratificación de Grupo Chañarillo (presentado leve plegamiento consistente con las capas calcáreas superiores), con un contacto concordante bien definido (Figura 3.5).

Su composición corresponde a rocas andesíticas de matriz fina con fenocristales de plagioclasas blanquecinas (aislados y en maclas) de tamaño mayores a 1 cm de largo y evidenciables a muestra de mano. De lo anterior, se clasifica como un intrusivo de tipo sill andesítico ocoítico, consistente con caracterizaciones anteriores (Arévalo *et al.*, 2009).

Monzodiorita de Rodados Negros: Presenta aforamientos de área superficial entre 2 a 4 km² con geometría tabular y concordantes con la estratificación de las rocas instruidas. En particular en la quebrada Cabecita Larga, se encuentra en el sector oriental, aflora en una superficie de forma alargada con orientación N-S, y se pone en contacto con las formaciones Cerrillos y Viñitas (Figura 3.6).

En particular, la monzodiorita se encuentra en contacto por debajo de la Formación Cerrillos; en límite oeste del intrusivo, se observan rocas sedimentarias con alteración metamórfica definidas como parte de una aureola de contacto. Por otro lado, en el límite este, el intrusivo se sitúa por debajo de la Formación Viñitas y su contacto se observa difuso por la cobertura de depósitos no consolidados.

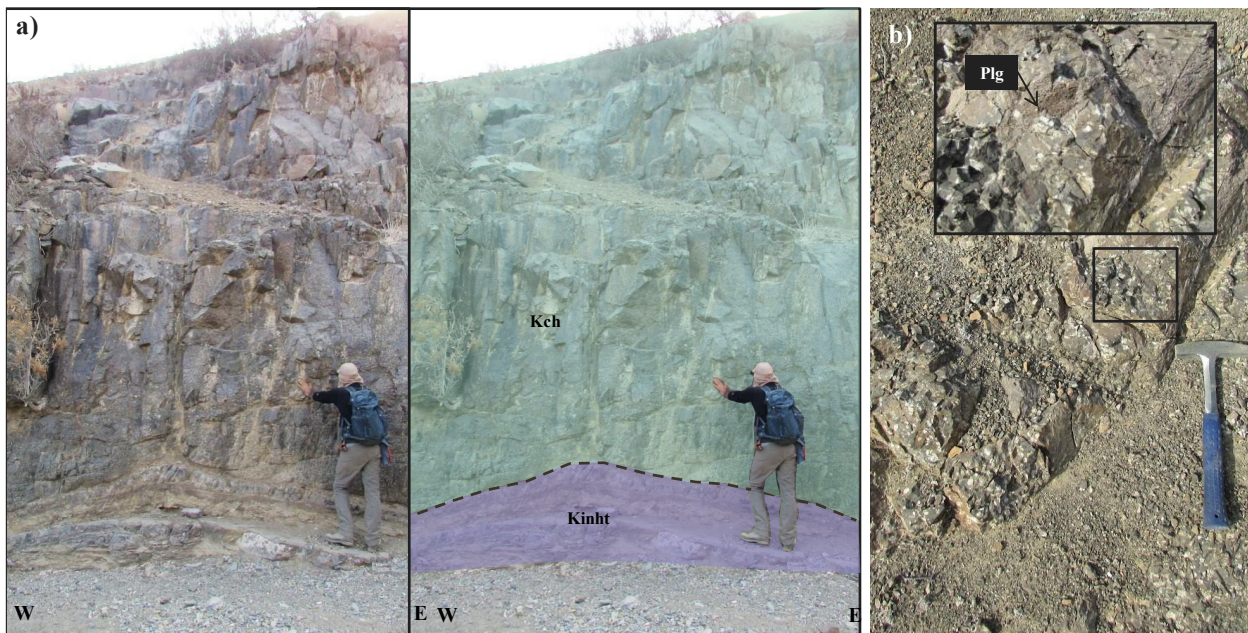


Figura 3.5: a) Intrusivo hipabisal Las Tunas (Kinht) bajo estratificación del Grupo Chañarillo (Kch). Intrusivo sigue la estratificación de Kch. b) Textura ocoítica, fenocristales de plagioclasa.

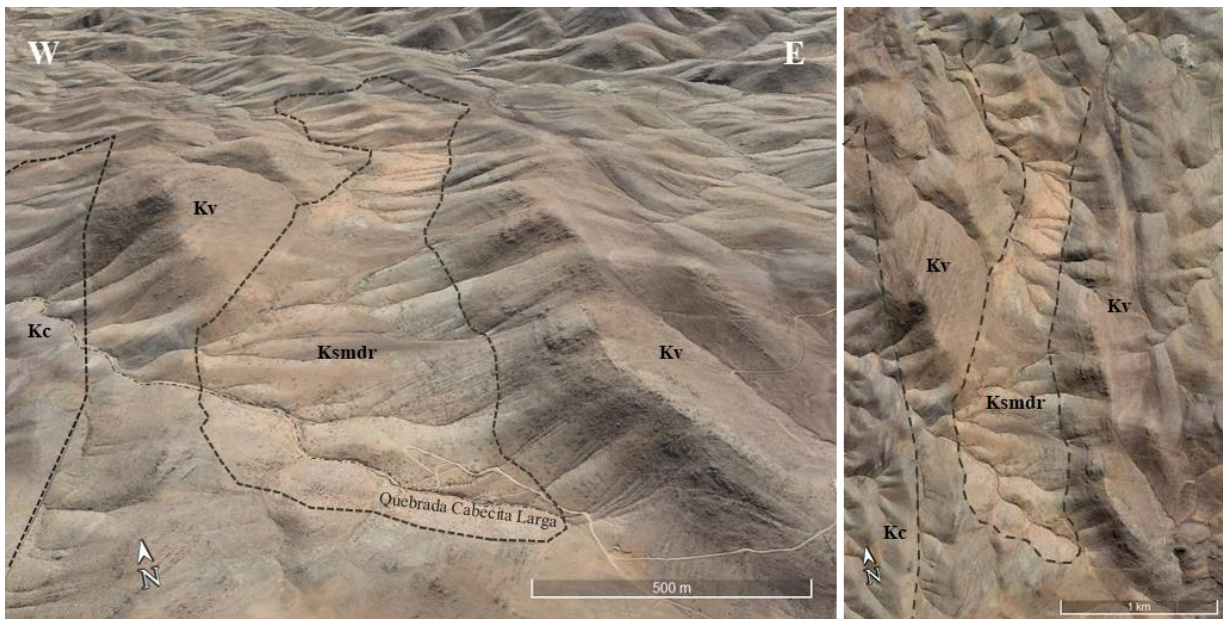


Figura 3.6: Distribución Monzodiorita de Rodados Negros, orientación N-S. Sector Oriental de Quebrada Cabecita Larga. a) vista norte en perspectiva, b) vista en planta. Imagen de Google Earth. En línea punteada contacto entre litologías. Kc: Formación Cerrillos, Kv: Formación Viñitas, Ksmdr: Intrusivo monzodiorita de Rodados Negros.

3.2. Generalidades de la estructura local

La región de estudio se caracteriza geológicamente por 3 unidades estratigráficas principales, Grupo Chañarcillo, y formaciones Cerrillos y Viñitas, descritas en la sección anterior, y por dos fallas mayores y una serie de estructuras secundarias de menor orden. La geología estructural se describe inicialmente con los rasgos principales y secundarios, para luego hacer un análisis estructural planar consistente en tres secciones geológicas.

En términos generales, las estructuras mayores, corresponden a la Falla Las Cañas y Falla Agua de los Burros, las cuales presentan vergencias opuestas, y comparten un mismo bloque colgante con deformación de variable a lo largo del rumbo.

Con el fin de una adecuada descripción estructural, se construyeron tres secciones que muestran la variación estructural a lo largo del rumbo, que además permiten evidenciar y subdividir la zona en tres dominios estructurales. Con lo anterior se permite el análisis de forma directa que será desarrollado en el Capítulo 4.

3.2.1. Análisis de Planar de la Estructura

Con la compilación de datos litológicos y estructurales obtenidos en terreno, sumado a la información geológica recopilada de trabajos anteriores en la zona (Arévalo *et al.*, 2009; Salazar *et al.*, 2012 y Briones, 2018), se elaboró un mapa geológico del área de estudio.

En la Figura 3.7 se presenta la distribución litológica, las estructuras de primer y segundo orden, los tipos de contactos entre formaciones y el trazado de perfiles estructurales resultantes con el presente estudio. Posteriormente, se presentan las secciones geológicas norte, centro y sur de la zona de transición, con su respectiva caracterización y descripción estructural.

3.2.1.1. Mapa Geológico

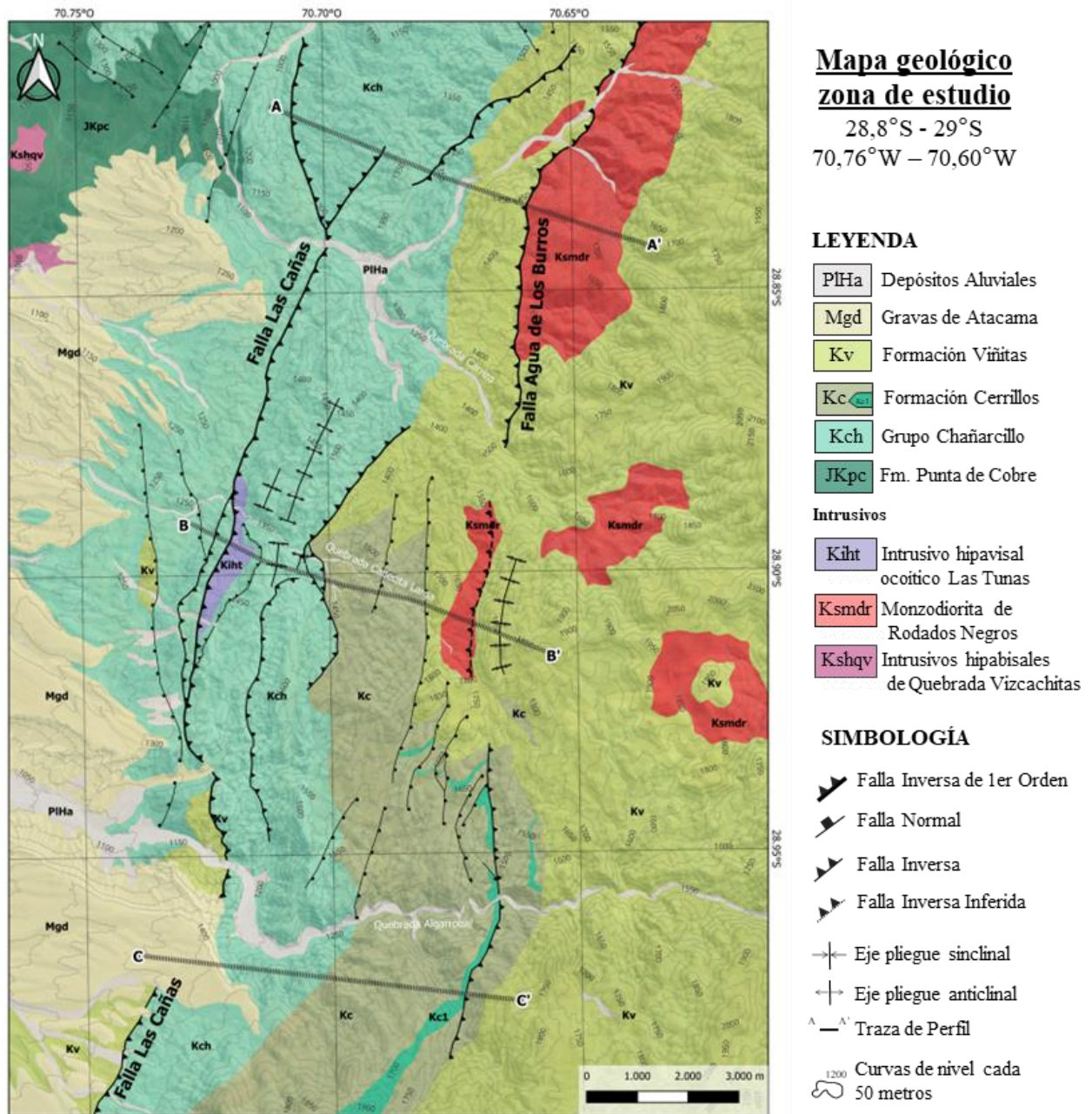


Figura 3.7: Mapa geológico de la zona de estudio, comprende entre los 28,8°S - 29°S y 70,76°W - 70,60°W. Compilado de Mapas Geológicos: Arévalo et al. (2009), Salazar et al. (2015), Briones (2018) y el presente trabajo.

3.2.1.2. Perfil A-A'

La sección norte de la zona de transición, comprende el tramo final norte de la Falla Las Cañas (FLC) y la traza de falla Agua de los Burros (FAB). A nivel general, se compone por 4 fallas de tipo inverso, las cuales forman una estructura tipo *pop-up* por cada falla principal del sistema (Figura 3.8).

Superficialmente se observa, al oeste una estructura de *pop-up*, formada por la bifurcación de la Falla Las Cañas, esta presenta una apertura hacia el norte y corresponde así a la estructura terminal, que acomoda la geometría de la falla inversa de vergencia oeste de Las Cañas.

Por otro lado, al este se evidencia la formación de un *pop up*, asociado a la falla Agua de los Burros, está compuesta por la traza de falla de primer orden de vergencia este y una secundaria opuesta ubicada al oeste de esta (no se interceptan en superficie); respecto a la estructura de *pop-up*, se observa una apertura hacia el sur (opuesta al *pop-up* relacionado a Las Cañas, al oeste del mismo transecto).

En profundidad, se interpreta la interacción de FLC y FAB, del sistema en profundidad se identifica un dominio de estructuras de vergencia oeste, de esta última se formarían en profundidad la falla de alto ángulo FAB. Ambas fallas secundarias formadoras de las estructuras de *pop-up*, se dieron origen a partir de las fallas principales (Figura 3.8).

De este modo, el sector norte de la zona de transición se caracteriza por formación de *pop-up*'s en ambas fallas principales (Las Cañas y Agua de los Burros) dadas por la interacción con fallas secundarias dentro del bloque colgante entre estas.

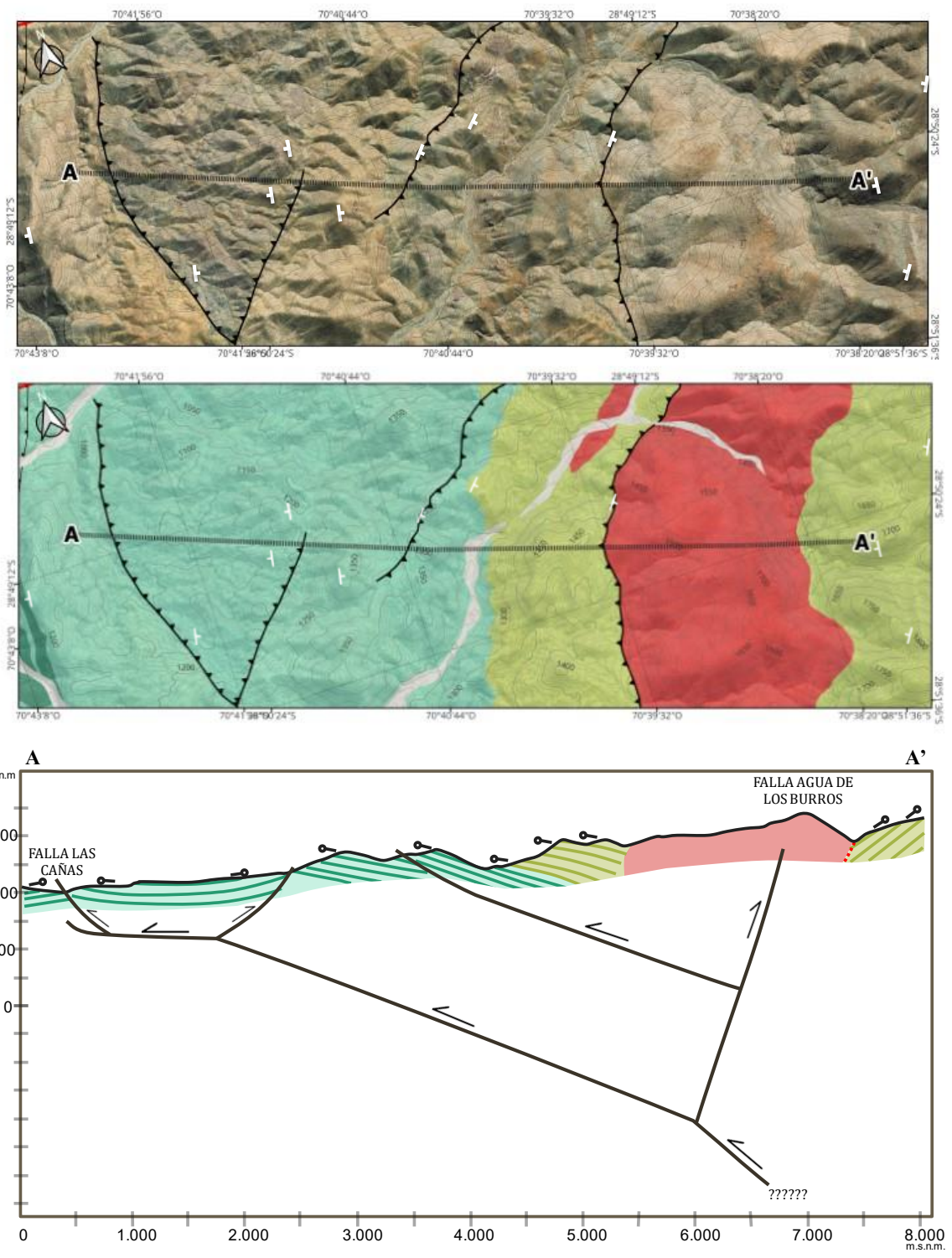


Figura 3.8: Perfil A-A'. Mapa y perfil geológico sección norte. En zona de transición.


















LEYENDA	SIMBOLOGÍA	
 Grupo Chañarillo	 Sinclinal	 Profundidad desconocida
 Formación Cerrillos	 Anticlinal	 Dato Estructural (Este trabajo)
 Formación Viñitas	 Falla Normal	 Dato Estructural Salazar et al.(2015)
 Gravas de Atacama	 Falla Inversa	 Dato Estructural Briones (2018)
 Intrusivo hipavital ocoítico Las Tunas	 Falla Inversa Inferida	 Dato Estructural calculado a partir de imagen satelital
 Monzodiorita de Rodados Negros	 Discordancia	

Figura 3.8: Continuación Perfil A-A'. Simbología de mapa y perfil geológico sección norte. En zona de transición.

3.2.1.3. Perfil B-B'

El perfil B-B' representa los resultados directos del levantamiento realizado en la Quebrada Cabecita Larga, sector en que se observa la deformación de ambas estructuras principales, fallas Las Cañas y Agua de los Burros, con mayor concentración de estructuras en secuencia, deformando el bloque colgante, presente entre las fallas principales.

En la zona occidente de la quebrada (Figura 3.9), se reconoce en el Grupo Chañarillo (Kch) un nivel basal de pliegues anticlinales y sinclinales sobreyacidos por un bloque de la misma litología montado según una estructura de retro-corrimiento compuesta por rampa-flat-rampa de vergencia este y evidenciando un pliegue anticlinal por flexura de falla en el nivel superior (Figura 3.9 i).

En el sector central del perfil, se tiene hacia el oeste de la Figura 3.9 ii un contacto por falla inversa entre la Formación Cerrillos (Kc) que se encuentra por debajo de las rocas calcáreas del Grupo Chañarillo. Esta misma falla presenta una estructura imbricada sintética (“*rejoining imbricate*”, según McClay,1999). Por otro lado, hacia el este, se identifican a partir de Salazar et al. (2015), estructuras de falla normal de orientación principalmente N-S que ponen en contacto a las formaciones Cerrillos y Viñitas (Figura 3.7).

En la traza final de la quebrada estudiada (Figura 3.9 iii) se identifica el cuerpo intrusivo Monzodiorita de Rodados Negros (Ksmdr) la cual intruye la Formación Viñitas. Hacia el oeste del intrusivo los estratos mantean en un rango de 40 a 60°W, mientras que al este el manto es menor y en sentido opuesto, entre 30 y 40°E. De lo anterior, se infiere la formación de un pliegue anticlinal fallado (“Anticlinal breakthrough”) y un sinclinal preservado (línea punteada en Figura 3.9 iii) formado por propagación de falla Agua de los Burros hacia el sur.

De las estructuras observadas, se confeccionó el perfil geológico B-B' de la Figura 3.10. Respecto a la caracterización general, la transecta presenta mayor variedad de estructuras en el área, mayor concentración de estructuras de deformación visibles en superficie y preferencia de deformación próximas a las estructuras principales (se observa menor deformación en el tramo central del perfil).

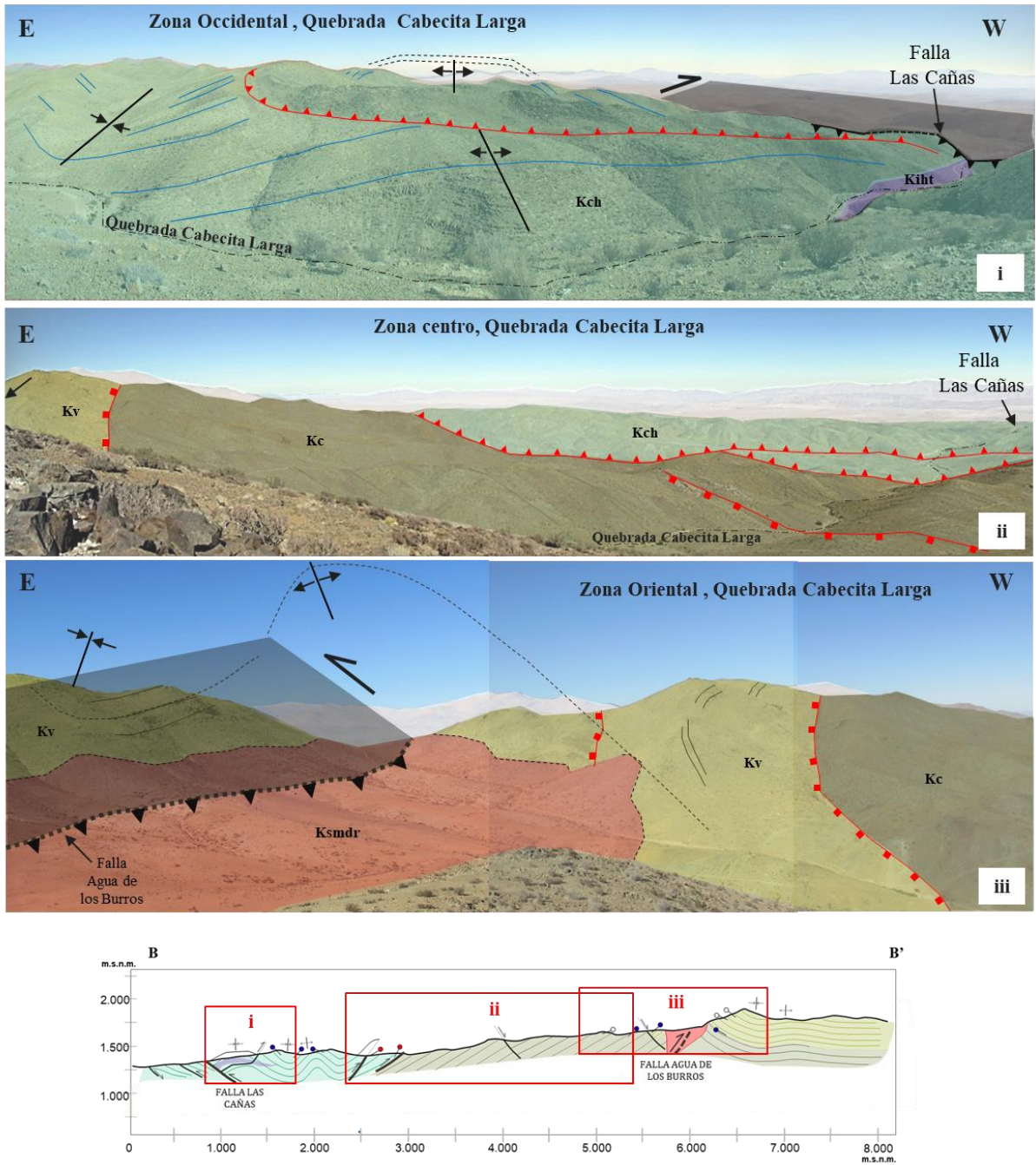


Figura 3.9: Vista lateral sur Quebrada Cabecita Larga, sector occidental (i), centro (ii) y oriental (iii), secciones en el perfil. Imagen e interpretación estructural próxima a Falla Las Cañas. Simbología de Figura 3.8. Kch: Grupo Chañarcillo, Kc: Formación Cerrillos, Kv: Formación Viñitas, Ksmdr: Intrusivo Monzodiorita de Rodados Negros.

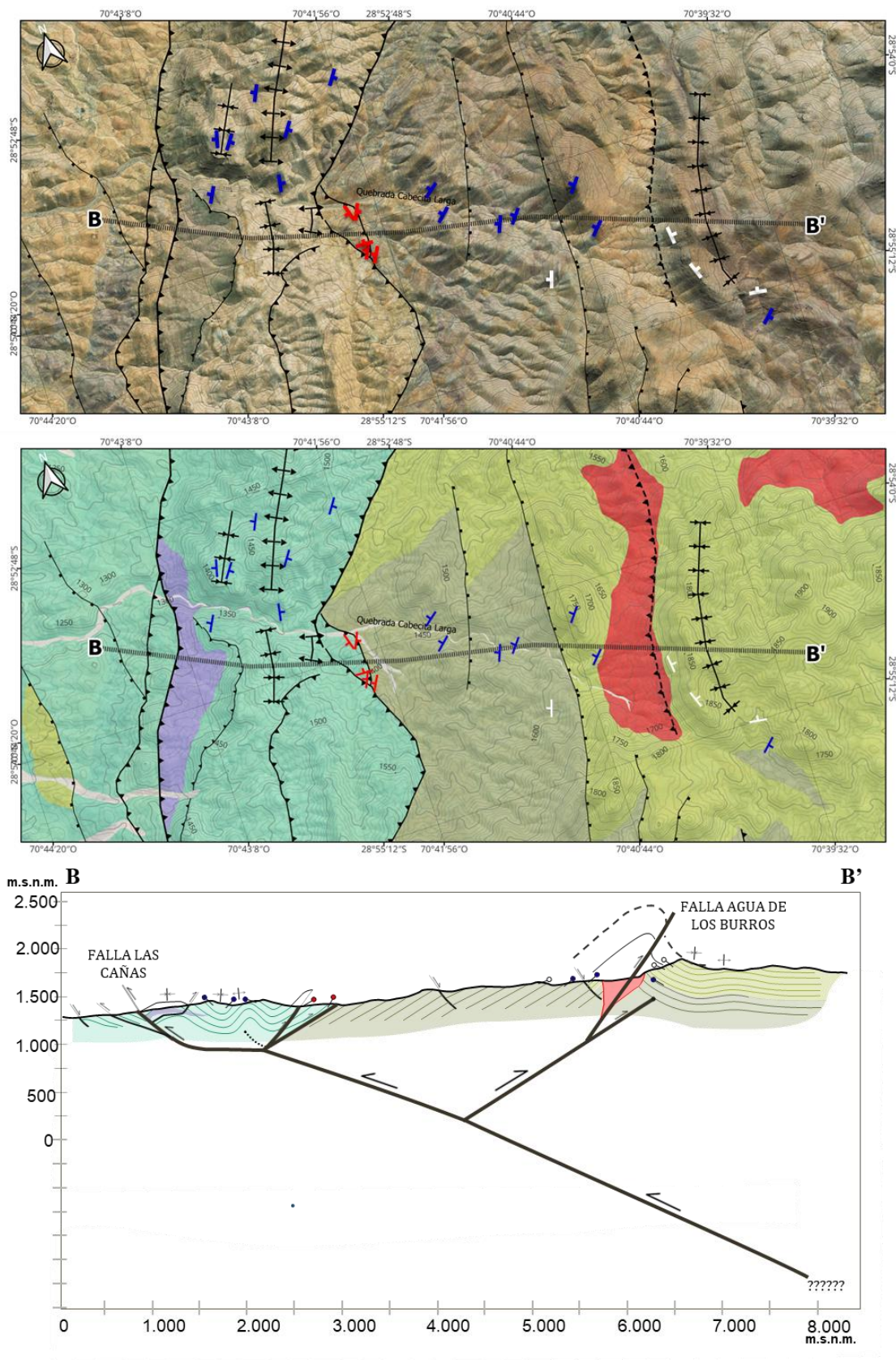


Figura 3.10: Perfil B-B'. Mapa y perfil geológico de la sección central por la quebrada Cabecita Larga. En zona de Transición. Simbología y leyenda de Figura 3.8.

3.2.1.4. Perfil C-C'

Sector sur de zona de transición (Figura 3.11), se distingue de las secciones anteriores, por solo presentar la traza superficial de la falla Las Cañas. A diferencia de las secciones anteriores, este perfil se caracteriza por un manto estratigráfico y estructural principalmente este, con desarrollo de fallas inversas de vergencia oeste.

En particular, se observa la falla de primer orden Las Cañas, la que pone en contacto el Grupo Chañarcillo por sobre Formación Viñitas; esta es una falla de bajo ángulo tipo rampa que se observa paralela a las capas estratificadas calcáreas que se encuentran por sobre esta.

Hacia el este se observa el paso del Grupo Chañarcillo a la Formación Cerrillos, toda la sucesión con manteos variantes de 7°E a 20°E (de oeste a este). En la sección final de la Formación Cerrillos se encuentra la traza de fallas inversas secundarias, con características, orientación y manteos similares a la falla Las Cañas, la cual sobrepone material sedimentario de Formación Cerrillos por sobre ella misma.

Las capas más orientales de la Formación Cerrillos (incluyendo la falla secundaria oriental) se encuentran truncadas y cubiertas por la Formación Viñitas, en un contacto discordante observable en la sección planar y en la vista en planta.

Finalmente, al oeste se encuentran los depósitos miocenos Gravas de Atacama, correspondiente a depósitos sub-horizontales (manto aproximado de 10°W) presentes a lo largo del borde occidental de la zona de estudio, los cuales cubren en contacto discordante, la traza de falla Las Cañas, Grupo Chañarcillo y Formación Viñitas, siendo este el último evento de depositación observable en el perfil (Figura 3.11).

En profundidad, se identifica la falla Las Cañas como falla inversa de bajo ángulo, con la formación de un pliegue evidenciado en el cambio progresivo del manto de oeste a este en las capas de Grupos Chañarcillo a Formación Cerrillos. Por procesos posteriores de erosión y depositación de las Gravas de atacama se tiene la configuración actual.

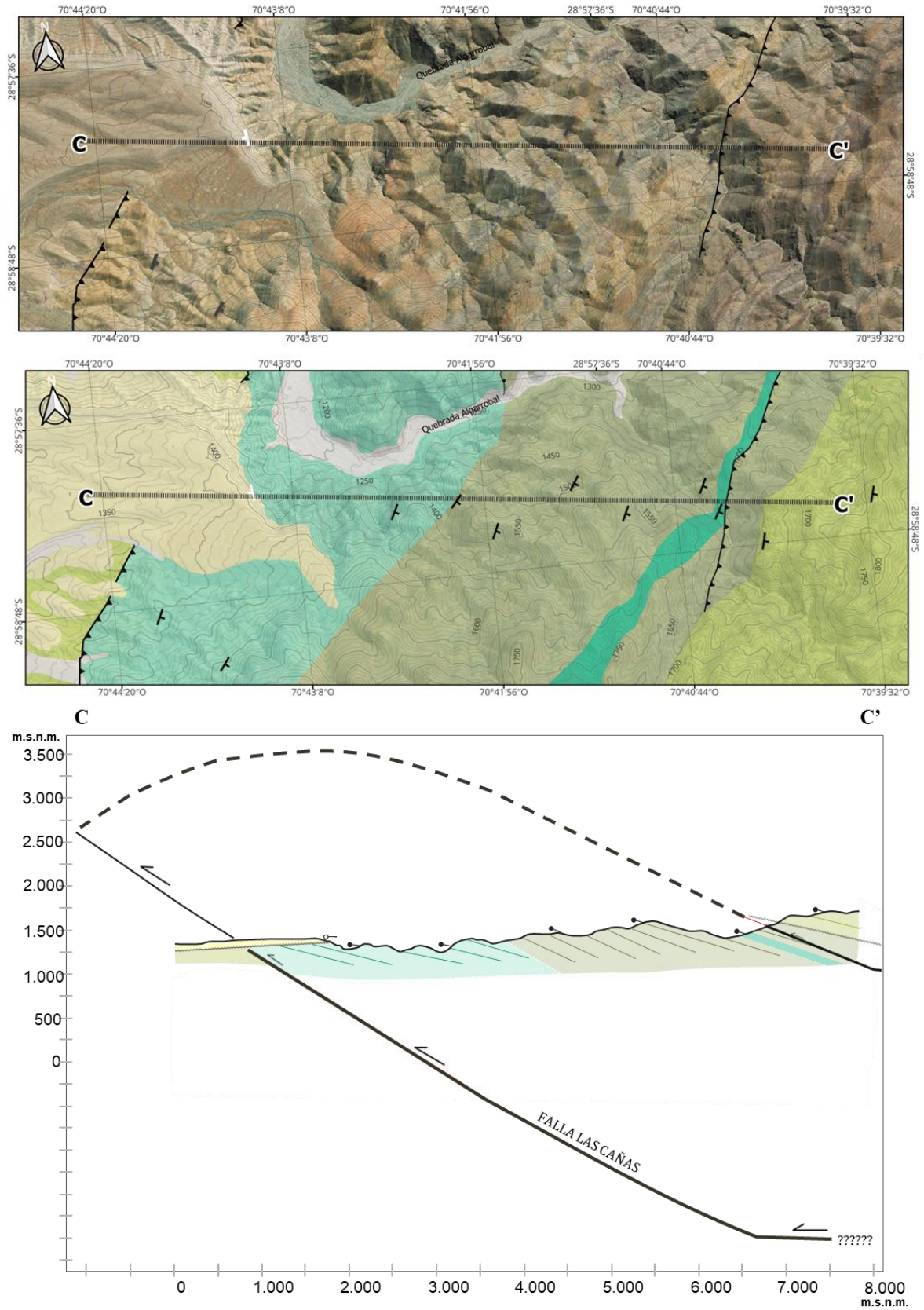


Figura 3.11: Perfil C-C'. Mapa y perfil geológico sección sur, próximo a quebrada Algarrobal. Misma Simbología de Figura 3.8

3.2.2. Dominios Estructurales

De la confección de secciones perfiles y la descripción de estructuras en la sección anterior, se clasificaron y agruparon en tres dominios estructurales principales evidenciables en la zona de estudio, caracterizándolos por su principal estructura de deformación, de norte a sur: a) Dominio Agua de los Burros; b) Dominio Las Cañas; c) Zona de Transición (Figura 3.12).

Cabe destacar que la zona de estudio exhibe una deformación que presenta variaciones latitudinales, observándose también variaciones en la frecuencia, número y tipo de estructuras geológicas, así como en la orientación y manto de capas.

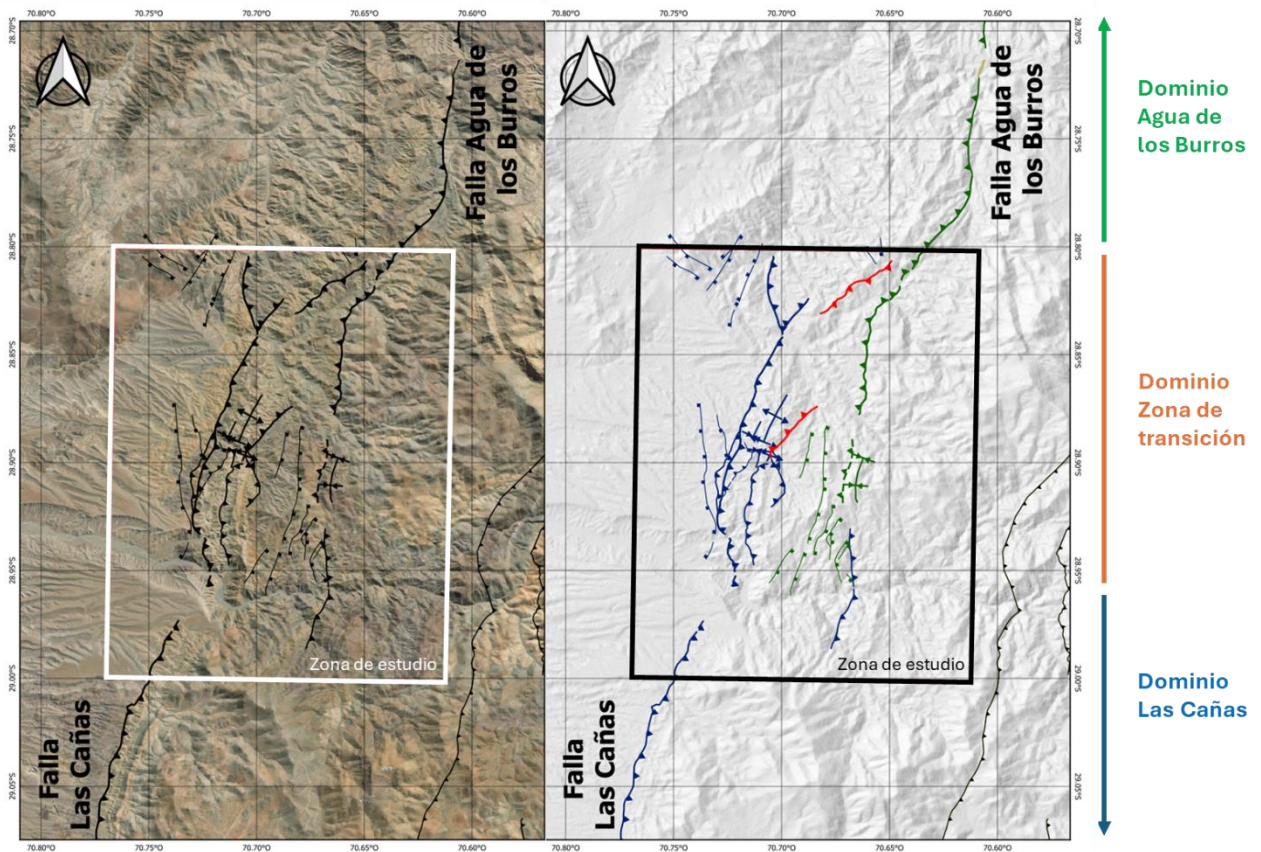


Figura 3.12: Vista en planta, polígono área de estudio y extensión norte-sur fallas principales. División de dominios.

3.2.2.1. Dominio Agua de los Burros

El Dominio Agua de los Burros agrupa estructuras que se desarrollan próximas a la estructura principal Falla Agua de los Burros o que se pueden relacionar como estructuras secundarias generadas por deformación directa de la estructura de primer orden.

Dado que los perfiles estructurales no representan la deformación únicamente relacionada con la falla Agua de los Burros, la definición de este dominio se realiza en base a observaciones de imagen satelital y perfiles presentados por Salazar *et al.* (2013) y Martínez *et al.* (2013).

El Dominio se caracteriza por el agente de deformación principal, falla Agua de los Burros, con una traza mayor a 100 km de largo superficial, que se extiende hacia el norte de la zona de estudio. Las estructuras son paralelas a la falla principal y ponen en evidencia una deformación de tipo piel fina con estructuras tales como fallas secundarias invertidas, fallas sintéticas en secuencia, pliegues anticlinales y sinclinales.

3.2.2.2. Dominio Las Cañas

El domino asociado a la Falla Las Cañas se encuentra representado hacia el sur de la zona de transición estructural, abarcando desde la traza del perfil C-C' (Figura 3.11) hasta su continuidad sur con la Falla el Torito. En este sector, el estilo estructural está determinado por la presencia de fallas inversas de vergencia oeste con bajo ángulo de manteo, las cuales favorecen un manteo estratigráfico preferentemente hacia el este. Su principal estructura de deformación corresponde a la falla Las Cañas.

Es importante notar que fallas secundarias distales de la falla Las Cañas, son relacionadas a este dominio, por la similitud de orientación y manteo de las fallas, como es el caso de la falla secundaria en el perfil C-C', las cuales pueden tener su origen como consecuencia del movimiento inverso de la falla Las Cañas.

3.2.2.3. Zona de Transición

El Dominio estructural de la zona de transición corresponde al dominio combinado por la deformación de las fallas Las Cañas y Agua de los Burros (Figura 3.13). De ese modo, se divide el área en subdominios los cuales se relacionan directamente con los súper-dominios presentados anteriormente. A partir del reconocimiento de la independencia de los dominios en la zona de transición, es posible observar estructuras desarrolladas por la deformación combinada de ambas estructuras principales (Figura 3.13).

Estructuralmente, la zona de transición entre el cambio de vergencia corresponde al bloque colgante limitado a ambos lados por las fallas de primer orden presentes en el sistema, por lo mismo, la secuencia de estructuras secundarias posteriores se presenta con mayor densidad en zonas próximas a los límites del bloque intermedio.

A continuación, se diferencian los dominios independientes de deformación y zonas de interacción entre ambos dominios estructurales.

3.2.2.3.1. Dominio I

El Dominio I se ubica en el sector oriente de la zona de transición y se relaciona directamente con el Dominio Agua de los Burros, (Figura 3.13), limitado al este con la falla principal Agua de los Burros y al oeste por el contacto por falla secundaria “f4” y las fallas transversales “T1 y T2”.

Las estructuras que la componen al norte es una estructura tipo *pop-up* “Pp2” formado entre la falla Agua de los Burros y la falla transversal “T2”, presenta una apertura hacia el sur, evidenciada en el aumento de la separación superficial entre ambas.

Por otro lado, al sur de la zona de transición, se presentan las fallas secundarias “f’2” y “f’3” de orientación N-S de tipo normal con vergencia este y manteos pronunciados al este los cuales estarían relacionados directamente con acomodación estructural y deformación en el límite con la Falla Agua de los Burros.

A modo general, el estilo estructural del Dominio I correspondería a fallas secundarias de acomodación estructural, entre ellas fallas inversas formando *pop-up* y fallas normales combinadas.

3.2.2.3.1. Dominio II

El Dominio II se encuentra en la zona de transición, limitado al oeste por la Falla Las Cañas y al este por la falla secundaria “f4” y fallas transversales “T1 y T2” (Figura 3.13), estas últimas limitan el contacto por falla entre Grupo Chañarcillo y la Formación Cerrillos; dentro de este dominio se presentan estructuras secundarias menores asociadas a la deformación de la estructura Las Cañas.

Este dominio presenta al norte el desarrollo de una estructura tipo *pop-up* “Pp1” formada por la falla principal Las Cañas y secundaria “f1” (Figura 3.13), esta estructura se cierra hacia el sur, donde ambas fallas se interceptan en superficie y representaría la estructura terminal. Por otro lado, hacia el centro de la zona de transición, se concentran las estructuras secundarias en roca calcárea, de tipo inversas sintéticas “f3” y antitéticas “f1 y f2” a la falla Las Cañas y, en menor medida, pliegues (“p1 y p2”), con eje paralelo a la traza de falla principal.

Respecto a las fallas normales ubicadas al oeste de la FLC, estas se encuentran fuera del bloque colgante de transición, pero se reconocen como estructuras preservadas desde la formación de la cuenca de Chañarcillo, algunas una leve componente de inversión.

3.2.2.3.1. Fallas fuera de los dominios

Considerando la independencia de los dominios I y II, asociados a la deformación principal de falla Agua de los Burros y Las Cañas, respectivamente y dada la separación superficial entre las áreas que abarcan la secuencia de estructuras secundarias de cada dominio; se evidencian 2 fallas transversales “T1 y T2” (Figura 3.13) las cuales no corresponden a las categorías de dominios principales. Ambas fallas transversales observan un rumbo similar entre sí y forman una estructura local tipo *pop-up* con sus fallas de primer orden, mostrando apreturas del bloque superior en sentidos opuesto enfrentándose entre sí.

Finalmente, se tiene una zona de transición estructural con 2 dominios: Dominio I, representando la continuidad sur de la falla Agua de los Burros hasta su terminal y Dominio II, representando continuidad al norte de la deformación por falla Las Cañas. Se destaca la presencia de 2 fallas transversales que no siguen el patrón para cada dominio principal.

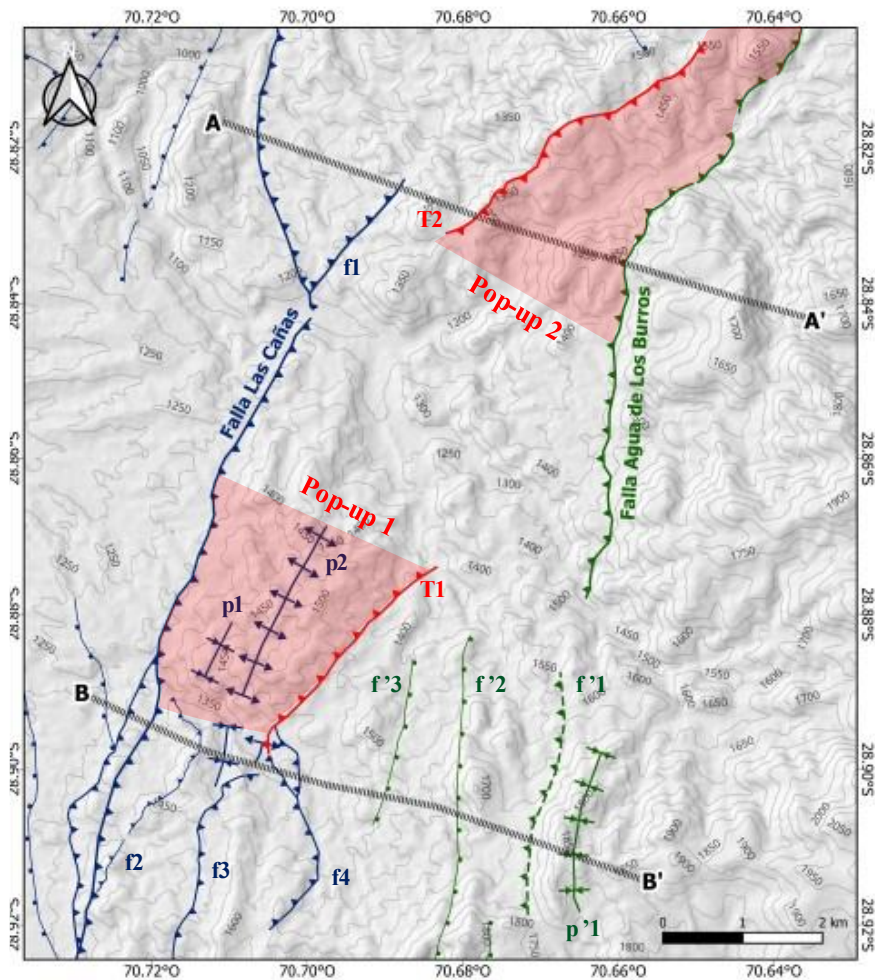


Figura 3.13: Mapa Geológico Estructural de la zona de transición. En azul las estructuras asociadas al dominio falla Las Cañas, en verde, aquellas asociadas al dominio falla Agua de los Burros y en rojo, a estructuras de interacción entre dominios

Capítulo 4: Análisis de resultados

4.1. Estructuras geológicas

4.1.1. Perfiles geológicos

Dentro de los resultados obtenidos en este trabajo, la construcción de los perfiles geológicos presentaron un grado de interpretación a partir de las estructuras reconocidas en la literatura y observada en terreno. A continuación, se desarrollan las interpretaciones asociadas a la confección de los resultados estructurales.

El perfil A-A' (Figura 3.8) se interpreta la formación de 2 estructuras tipo *pop-up* “Pp1” y *pop-up* oeste, en el que se parte de la suposición de que las fallas inversas “f1” y “T1” que las componen interactúan en profundidad, de no ser así, estas corresponderán únicamente a fallas inversas antitécticas a las fallas principales con una profundidad de término de la estructura desconocida.

Del perfil B-B' (Figura 3.10) al igual que en el perfil anterior, en el sector oeste del perfil, se asoció la falla transversal “T2” a una estructura tipo *pop-up* “Pp2”, lo cual parte de la interpretación de que ambas fallas interactúan en profundidad cumpliendo con la definición de este tipo de estructuras. Como parte del mismo perfil sector oeste, a menor escala se interpreta una falla inversa de tipo retro-corrimiento que monta rocas del Grupo Chañarcillo sobre sí mismas, esta interpretación se resuelve por la interacción entre fallas observada en terreno (Figura 3.9) y habría permitido el afloramiento del intrusivo hipabisal Las Tunas/Kiht (Figura 4.1).

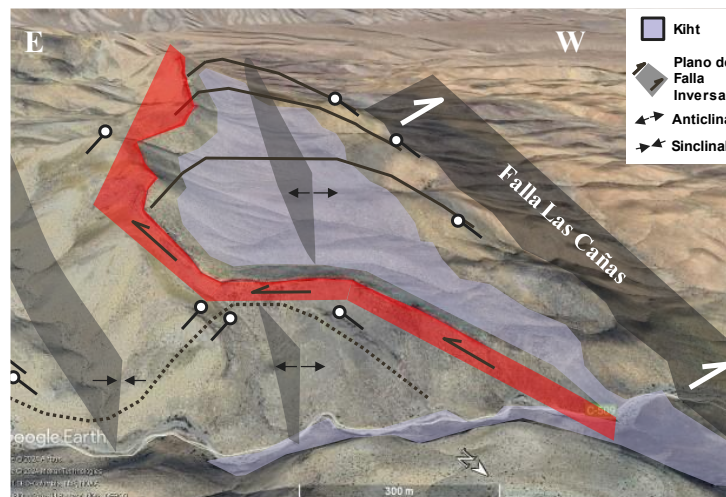


Figura 4.1: Esquema retro-corrimiento en sector oeste, en Figura 3.9 y perfil B-B'(Figura 3.10). Imagen Satelital Google Earth.

Respecto al sector este del perfil B-B', el cambio abrupto de los manteos entre capas a ambos lados del intrusivo monzodiorítico se interpretó como parte de limbos de un anticlinal formado como pliegue por propagación de falla (Figura 4.2 ii), relacionado al desarrollo de la Falla Agua de los Burros que florece hacia el norte; lo anterior se daría por una propagación de esta falla en profundidad la cual no presenta expresión superficial en la actualidad, y se encontraría ocupada por el intrusivo Rodados Negros (Figura 4.2 iii).

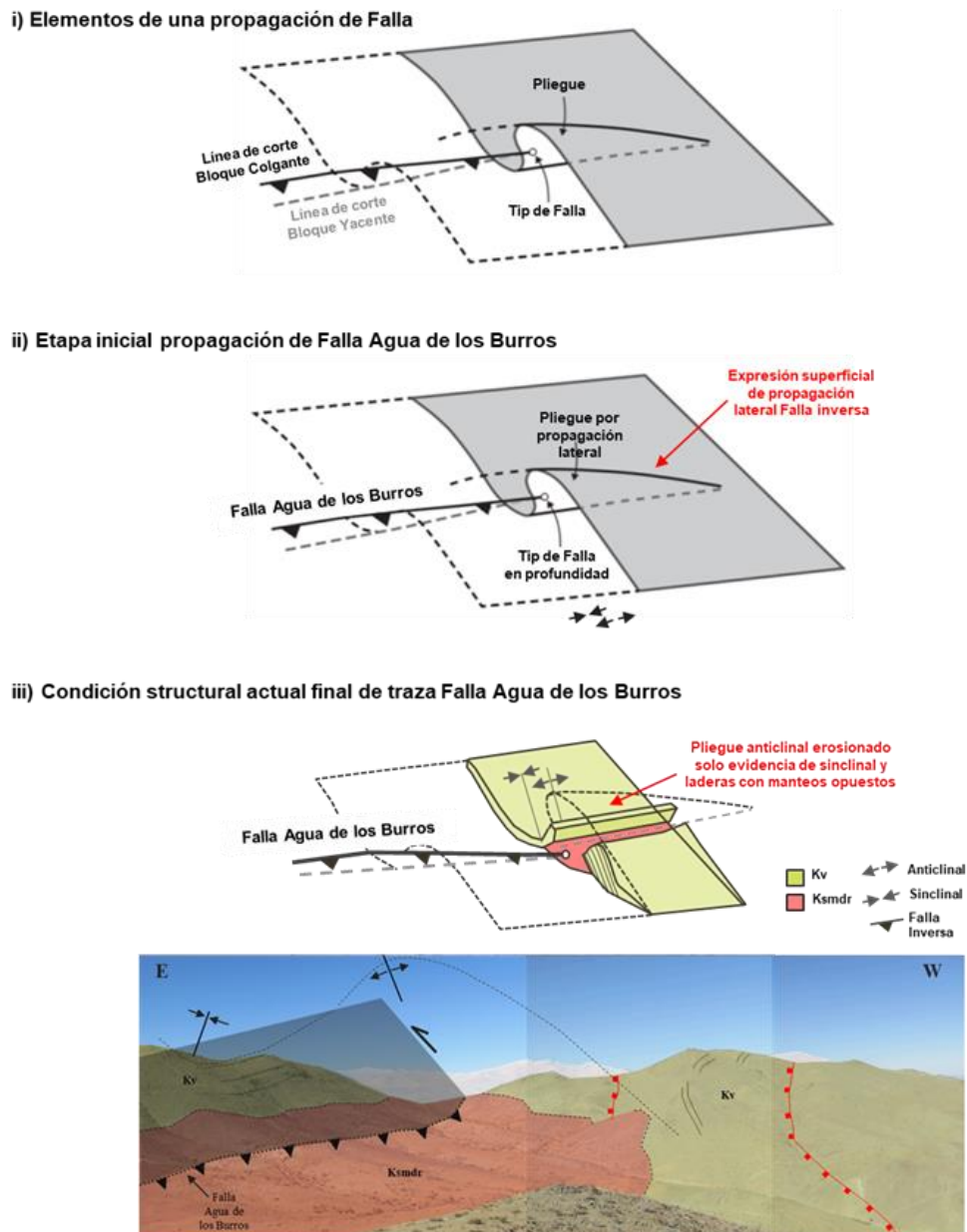


Figura 4.2: Esquema propagación de Falla. i) Elementos en una propagación de falla lateral superficial. ii) Etapa inicial de propagación sur, Falla Agua de los Burros. iii) Condición actual e interpretación de las estructuras, en Figura 3.9 y perfil B-B' (Figura 3.10). Modificado de Totake et al. (2017).

Finalmente, el perfil C-C' (Figura 3.11), la interpretación de las estructuras inversas (Falla Las Cañas y falla secundaria este) al presentar orientación similar entre sí, bajo grado de manteo (20-15°) y dominio de manteos de capas este entre trazas, ambas se relacionan a la formación causada por un evento geológico en común.

A nivel general, cabe destacar que las dos fallas transversales “T1” y “T2” de rumbo similar entre los N40°E-N50°E y con dirección de manteos opuestos; son consideradas en los perfiles como estructuras formadoras de *pop-up*, esto último, partiendo de la premisa de que las fallas interactúan en profundidad con las fallas de primer orden falla Las Cañas y Agua de los Burros.

4.1.2. Dominios estructurales

A partir de la correlación de estructuras secundarias a sus respectivas fallas principales, se clasifican las estructuras en los dominios Las Cañas y Agua de los Burros. Los dominios se definieron agrupando las estructuras interpretadas según la falla cortical que dio origen a su formación.

Para el dominio de Las Cañas las estructuras se presentan con proximidad superficial y orientación similar a la misma, NE-SW y N-S, y varían desde pliegues anticlinales y sinclinales, hasta la formación de *pop-up* en el segmento terminal de la falla Las Cañas; esta deformación se desarrolla principalmente en litologías del Grupo Chañarcillo, que presenta areniscas calcáreas marinas que favorecen la formación de pliegues.

Respecto al Dominio Agua de los Burros, nuevamente, este se define por proximidad y similitud en la orientación de las estructuras, la principal estructura secundaria identificada es el desarrollo de fallas normales formadas por colapso y reacomodo de material posterior a la depositación de la Formación Viñita (cortan a esta última).

En este caso particular de estudio, las fallas de primer orden presentan dominios estructurales independientes entre sí, siendo únicamente reconocible el desarrollo de estructuras tipo fallas inversas transversales, las que no corresponderían a los dominios previos y evidenciarían una interacción y enlace entre estructuras principales de las fallas Las Cañas y Agua de los Burros, las cuales serían la base de la formación de los *pop-up* de transición (“Pp1” y “Pp2”).

4.1.3. Estructuras tipo *pop-up*

La formación de *pop-up* es una estructura característica para los tramos finales del Dominio Las Cañas y Agua de los Burros. De las estructuras de *pop-up* secundarias formadas en la zona de transición (Figura 3.13, Figura 4.3), se observa un aumento progresivo de la separación de sus estructuras que las forman, en el caso del “Pp1” la falla secundaria “T1” de orientación NE-SW desarrolla una estructura con apertura hacia el norte; y para “Pp2”, la falla inversa antitética “T2” de igual orientación a la anterior con apertura hacia el sur, generando finalmente un acomodo de material en un punto intermedio de la zona de transición.

La proyección lineal de las fallas transversales, en continuidad con la orientación superficial actual, estarían evidenciando un estructuras *pop-up* de interacción entre las fallas Las Cañas y Agua de los Burros con un bloque colgante delimitado por 4 fallas inversas, presentando un límite de forma sigmoidal/romboédrica alargada (Figura 4.3), este corresponde así a la estructura principal del acomodo estructural de la zona.

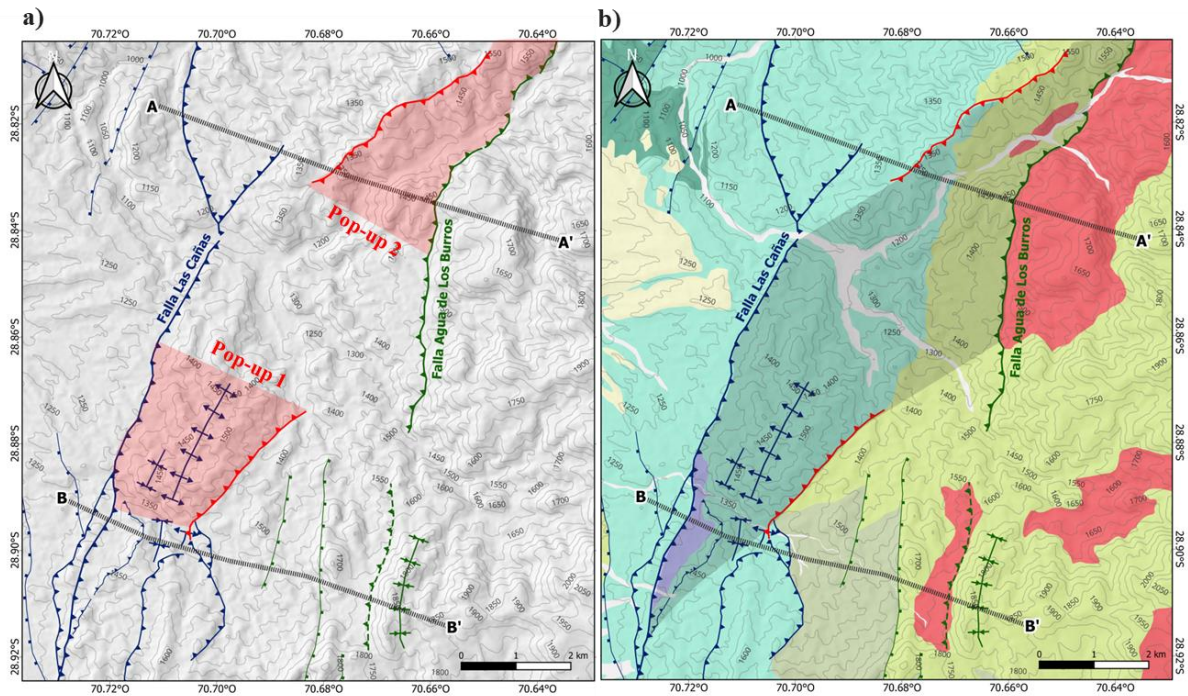


Figura 4.3: Estructuras *pop-up* en zona de transición. a) En línea roja fallas inversas transversales, polígono rojo zona de *pop-up* 1 y 2. b) Mapa Zona de transición, continuidad de lineamientos de falla, forma sigmoidal-rómbica. Leyenda y simbología de Figura 3.7.

Capítulo 5: Discusión

5.1.1. Generalidades y limitantes

La zona de estudio comprende el trabajo de 3 perfiles geológicos, perfil A-A' y B-B' observando la deformación de la zona de transición estructural; y perfil C-C' presentando deformación únicamente de falla Las Cañas. Aun así, no fue posible la confección de un cuarto perfil norte con la deformación estructural asociada netamente a la falla Agua de los Burros, producto de los pocos estudios estructurales próximos al sector. Igualmente, se define el dominio en función a secciones y observaciones estructurales realizadas por Salazar *et al.* (2013) en Embalse Santa Juana y Martínez *et al.* (2013) en cuenca Grupo Chañarcillo, las cuales presentan una continuidad respecto a las características generales del sistema de fallas Agua de los Burros-Elisa de los Bordos.

5.1.2. Estructuras principales

Las estructuras analizadas más importantes de la zona de estudio son las siguientes:

Falla Agua de los Burros: Según Moscoso y Mpodozis (1988), la falla Agua de los Burros originalmente corresponde a una falla normal de alto ángulo, manteo oeste, asociada a la extensión de la cuenca que controló la depositación del grupo sedimentario marino Chañarcillo durante la primera etapa del ciclo Andino, formando así el límite oriental de la cuenca Chañarcillo. Posteriormente, Salazar (2012) en el Embalse Santa Juana, describió que la falla sufrió una inversión positiva, correspondiendo actualmente a una falla inversa.

De la información obtenida en terreno, se confirma que el tramo final de la falla Agua de los Burros corresponde a una falla inversa que termina con un pliegue por propagación a la altura de la quebrada Cabecita Larga, dado por el avance sur del plano de falla. Además, a partir de la observación de la traza en superficie, se evidencia (a partir de la regla de las V's) un plano de falla de alto ángulo a subvertical, con emplazamiento de intrusivos en su traza superficial, lo que conversa bien con la propuesta de falla por inversión de Martínez *et al.* (2013, 2015). De igual manera, no se descarta que la estructura presente inversión diferencial con variaciones a lo largo de su rumbo, mostrando tramos de inversión parcial o falla normal.

Respecto a la proyección sur de la traza de falla Agua de los Burros, se interpreta que el cuerpo intrusivo monzodiorítico Rodados Negros, de área alargada y orientación NNE a NS, como una evidencia de la continuación sur. Esta afirmación (también utilizada por Peña, 2012), concuerda con lo señalado con Montari *et al.* (2010) en el que se reconoce la presencia de cuerpos intrusivos que se emplazan por un ascenso de flujo magmático a través de fallas compresivas hacia el núcleo del pliegue anticlinal, los cuales evidenciaría el rumbo de la falla compresiva original, y que para este estudio correspondería al emplazamiento en el núcleo del anticlinal (expresión superficial de falla en profundidad) asociado a su propagación lateral hacia el sur.

Falla Las Cañas: Tanto en este trabajo como trabajos anteriores (Creixell *et al.*, 2013, 2020; Briones; 2018, Salazar *et al.*, 2013), se ha descrito esta falla como estructura de desplazamiento inverso y deformación compresiva de vergencia oeste, en particular, donde en esta zona de estudio se sobrepone rocas del Grupo Chañarcillo sobre sí misma, además que en el sector sur de la zona de transición, se evidencia en contacto por falla de rocas del Grupo Chañarcillo por sobre rocas volcánico-sedimentarias de la Formación Viñitas.

Conforme al modelo cronológico estructural de Briones (2018) realizado a partir de datos próximos al perfil C-C', de este estudio, se reconoce y concuerda con la falla Las Cañas como estructura de bajo ángulo, sub-paralela a la estratificación del Grupo Chañarcillo. De igual modo, no se evidencia una relación directa con la estructura de inversión Falla San Félix, por lo que se mantiene la problemática asociada a su origen.

Finalmente, y en conformidad con el presente estudio, se descarta que las fallas Agua de los Burros y Las Cañas correspondan a una misma traza de falla con variaciones en su rumbo (observable en figuras de Martínez *et al.*, 2013, 2015), dado que no comparten estructuras significativas que presenten un enlace estructural importante y se desarrollan como estructuras independientes entre sí. Lo anterior, concuerda con lo señalado por Arévalo *et al.* (2009), Salazar *et al.* (2013; 2021) y Salazar & Coloma (2016).

Por otra parte, a partir de los perfiles estructurales de este trabajo, se evidencia una interacción en profundidad de ambas trazas de falla, por lo que de acuerdo con la clasificación de Higgins *et al.* (2007), estas estarían presentando un link de tipo 1 y compartirían un bloque colgante con deformación compartida, con ello, confirmando una componente de transferencia de materia de una dirección a otra.

5.1.3. Forma Sigmoidal

La zona de transición se encuentra caracterizada por la presencia de 2 dominios estructurales independientes asociado a ambas fallas principales presentes en el área de estudio. A pesar de ello, solo existen dos estructuras inversas transversales, las cuales se presentan superficialmente como estructura de forma sigmoidal formando un bloque colgante limitado por cuatro fallas inversas, dentro de las cuales forman 2 *pop-up* de transición, obtenido/interpretado a partir de los resultados.

Las estructuras de *pop-up*, estas son asociadas a formas sigmoidales alargadas que usualmente se relacionan a fallas de rumbo en ambientes transpresivos, formando estructura de tipo flor positiva construidas por irregularidades en los planos de falla de rumbo en los cuales predomina una componente de transcurrencia y compresión. De esta forma, se realizan comparaciones con modelos análogos de ambiente de transpresión trabajados por McClay y Bonora (2001).

Los modelos análogos de McClay y Bonora (2001) se evaluaron bajo las siguientes condiciones iniciales: material base de arenas cuarcíferas de grano <190 micras, simulando deformación frágil

en sedimentos de corteza superiores, a una escala de 1:100.000, con una velocidad de $4 \cdot 10^{-3}$ cm/sec; representando modelos de transpresión sinistral a diferentes ángulos de enlace entre fallas principales, se obtuvieron (Figura 4.1 a):

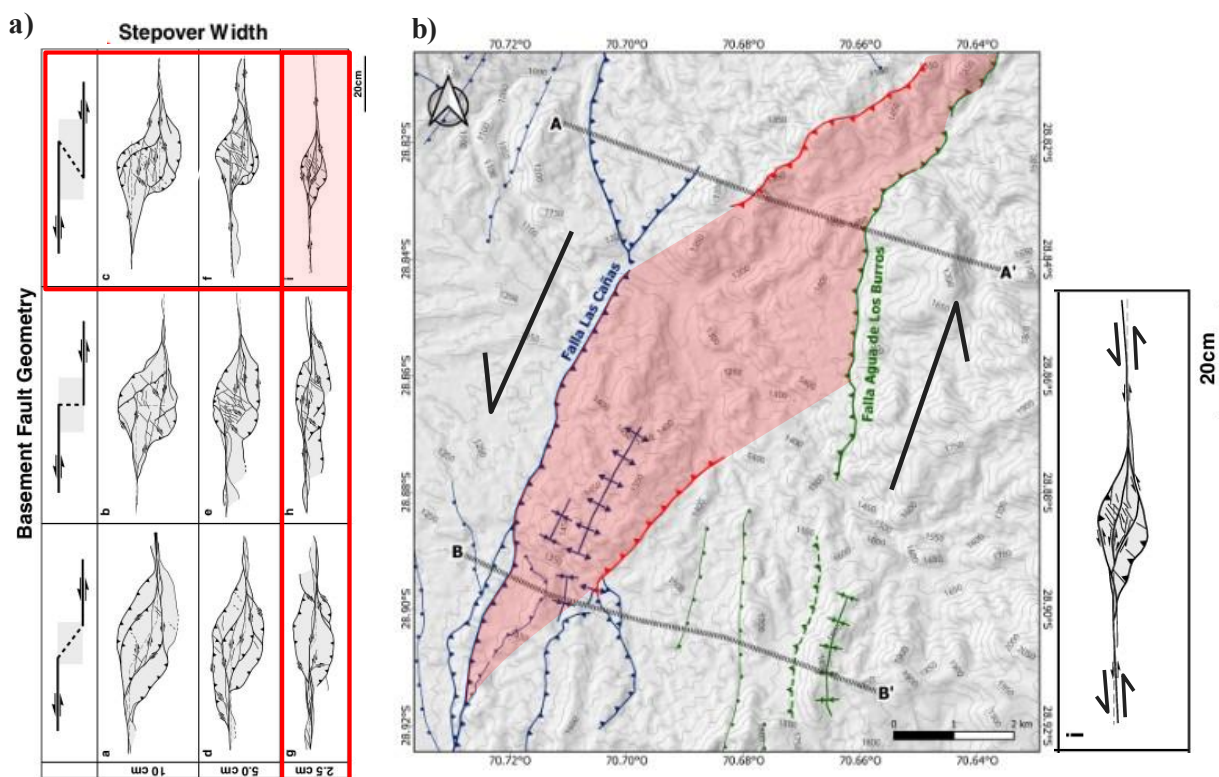


Figura 5.1: a) Tabla resumen evolución de pop-up a variados ángulo entre fallas principales, desplazamiento sinistral, Extraído de McClay y Bonoso (2001). b) Comparación caso de estudio con modelos análogos de McClay y Bonoso (2001).

De estos experimentos, es posible identificar que la zona de estudio (Figura 5.1 b), se aprecia una coincidencia geométrica con el modelo de transpresión sinistral en etapa de formación temprana (desplazamiento de 2,5 cm equivalente a 2,5 km) de una flor positiva, con un sobre solapamiento (ángulo de 150°) entre las trazas de fallas superficiales, de activación sinistral. Los *pop-up* de transición serían la primera expresión de la interacción entre fallas, causado por un régimen sinistral regional, con trazas de falla que actualmente no llegan a tener un enlace evidenciado en superficie, pero se proyectan de tal manera de esperar una expresión similar en un futuro.

De lo anterior, se establece que se desarrolló de una etapa de desplazamiento sinistral posterior a la formación de las fallas Las Cañas y Agua de los Burros, la cual se habría visto favorecido por la pre o coexistencia de los planos de falla, las cuales permitieron el desarrollo de *pop-up* en una zona de transición, representando una etapa inicial de una flor positiva (Figura 5.1 b).

En concordancia con la geología de la zona, se evidencian esfuerzos de transcurrancia sinistral, al oeste de la zona de estudio, Cordillera de la Costa y en presencia de fallas de rumbo sinistral con orientaciones NE-SW, pertenecientes al segmento sur del Sistema de Atacama (SFA) definida por

Thiele y Pincheira (1987). Estos son definidos como sistema de rumbo transpresivo sinistral activo entre el 137-144 Ma durante el Cretácico Inferior bajo (Hervé, 1987a). Aun así, puesto que no hay evidencia de desplazamiento del SFA posterior al Cretácico Inferior, los esfuerzos resultantes en la activación sinistral deben ser dados por eventos tectónicos entre el Paleoceno y Mioceno Inferior, considerando la preexistencia de la Falla Agua de los Burros y su edad de activación se acota actualmente entre el Maastrichtiano y Mioceno Inferior (Arévalo *et al.*, 2009).

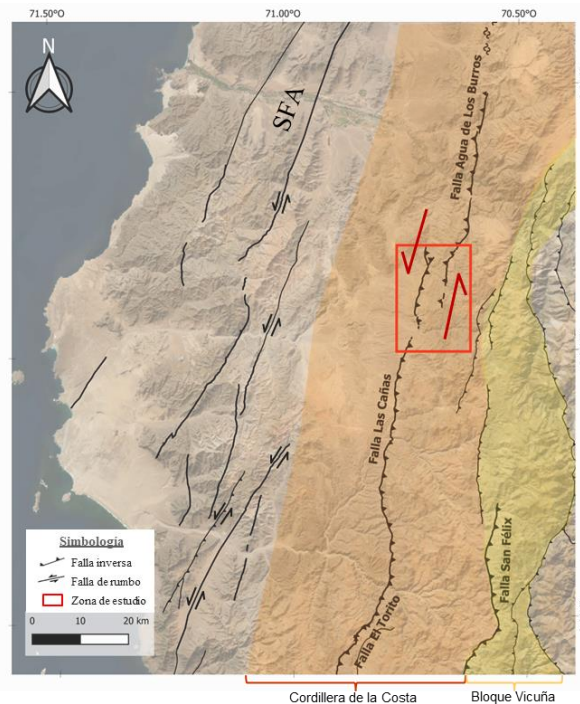


Figura 5.2: Fallas Principales, morfo estructuras. Desplazamiento sinistral en zona de transición, consistente con fallas al oeste de la zona de estudio. Modificado de Salazar *et al.* (2021).

5.2. Cronología relativa

Del estudio estructural, se evidencian 4 etapas de deformación, sin límites claros en su cronología e interacción entre eventos: 1) límite de edad de activación de la Falla Agua de los Burros; 2) origen de formación y edad límite de activación de Falla Las Cañas; 3) desarrollo de zona de transferencia; 4) forma sigmoidal, fase inicial de desplazamiento sinistral.

La Falla Las Cañas presenta variaciones respecto a su edad de activación, según Creixell *et al.* (2020), la cual se habría activado entre 89- 84 Ma durante la Orogénesis Peruana. Por el contrario, la Falla Agua de los Burros tiene edad de activación bastante amplia, desde el Maastrichtiano y hasta el Mioceno inferior (Arévalo *et al.*, 2009), limitada por la cubierta de Gravas de Atacama sobre su traza de falla.

Considerando la información disponible a la fecha, además que las zonas de deformación de falla Las Cañas y Agua de los Burros son independientes una de la otra, y que las estructuras secundarias no representan información suficiente para poder identificar la cronología, se tiene lo siguiente:

1. Jurásico superior - Cretácico inferior: Formación y sedimentación de cuencas de tras-arco marinas de orientación N-S, cuenca Chañarcillo con límite este de cuenca correspondiente a la estructura normal de alto ángulo, falla Agua de los Burros.
2. Depositación de estratos Grupo Chañarcillo (Hauteriviano al Aptiniano /~133-113 Ma)
3. Emplazamiento cuerpo intrusivo ocoítico Las Tunas (edad tentativa Cretácico inferior, ~145,5 - ~99,6 Ma), en forma de sill entre estratos calcáreo grupo Chañarcillo.
4. Transición de ambiente de depositación marino a continental. Depositación Formación Cerriillos (112 – 94 Ma), rellenos sin-tectónicos de inversión.
5. Entre Cretácico inferior y superior: fase de orogénesis peruana. Inicio inversión de la cuenca del Chañarcillo, inversión falla normal a inversa de Falla Agua de los Burros.
6. Cambio progresivo de ambiente de depositación de sedimentario a volcano-sedimentario. Depositación Formación Vinita (94 -88 Ma), depósitos post-inversión.
7. Activación falla inversa Las Cañas (89 – 84 Ma), Deformación Dominio Las Cañas. Contacto por falla de Grupo Chañarcillo sobre Formación Viñitas, sector sur zona de estudio.
8. Entre Cretácico inferior y Paleoceno: fase orogénesis K-T
9. Paleoceno a Eoceno medio: Cota mínima de edad de activación de Falla Agua de los Burros. Etapa de desplazamiento sinistral en bloque oeste de la zona de transición. formación etapa temprana de estructura flor positiva.
10. Eoceno medio: fase de orogénesis Incaica, alzamiento de la cordillera de la Costa.
11. Mioceno: Acumulación de sedimentos Gravas de atacama, cubriendo trazas de falla Las Cañas y Agua de los Burros

A pesar de los amplios rangos de edad de activación de las fallas, todas las evidencias de este estudio permiten interpretar la formación de las fallas transversales causantes de los *pop-up* de transición, como estructuras generadas posterior a la formación de las fallas Las Cañas y Agua de los Burros y evidenciarían el desplazamiento sinistral asociado a esfuerzos del bloque oeste durante el Paleoceno-Eoceno Medio. Esta última estaría utilizando los planos de debilidad ya formados por las fallas corticales preexistentes y desarrollaría una estructura en etapas iniciales de flor positiva en la zona de transición. Cabe destacar, que los *pop-up* de transición se interpretan como una respuesta estructural independiente de la actividad de las fallas principales.

Capítulo 6: Conclusiones

De la información geológica-estructural de la región de estudio analizadas en 3 perfiles geológicos, se concluye la existencia de tres dominios de deformación estructural, los cuales presentan continuidad respecto a las trazas de falla principales Las Cañas y Agua de los Burros.

A modo general y correspondiendo con la sucesión de eventos cronológicos enlistados en las discusiones, se entiende que, la zona de estudio está dada por la formación independiente de dos fallas inversas de primer orden de vergencias opuestas entre sí, falla Las Cañas y Agua de los Burros (de orden regional, orientación NNE-NS), las cuales en sus tramos terminales comparten un mismo bloque colgante, el cual presenta dominios de deformación Las Cañas en el extremo oeste y dominio Agua de los Burros límite este.

La principal estructura de acomodación en la zona de transferencia de vergencia viene dada por la formación de *pop-up* con aperturas superficiales opuestas, las que concentran el material en el bloque colgante de ambas fallas inversas maestras.

La deformación del bloque colgante, dado el espaciamiento y el acortamiento causado por la secuencia de estructuras secundarias, no han sido suficientes para deformarlo de manera relevante. De igual modo, dado un evento posterior de deformación sinistral, se evidencia la formación de fallas inversas transversales, las cuales limitarían los extremos NW y SE del bloque colgante, proyectando una geometría sigmoidal, relacionada en este estudio, a una etapa temprana de flor positiva, la cual fue evidenciada por la comparación con modelos análogos de transcurrencia sinistral.

Finalmente, este estudio representa un aporte al conocimiento estructural al área. Si bien los resultados dan evidencia de movimiento sinistral remanente por esfuerzos del bloque oeste a la zona de estudio, se recomienda obtener más información del bloque colgante limitado por las fallas inversas, a modo de buscar evidencias concretas para establecer el movimiento sinistral.

Por otra parte, se recomienda completar los estudios de la zona de transición con estudios geofísicos de sísmica de reflexión en 3D, (metodología Higgins *et al.*, 2007) con el objetivo de evidenciar las variaciones en profundidad de las estructural a lo largo del rumbo, en especial bloque colgante, fallas Las Cañas y Agua de los Burros.

Bibliografía

Aguirre-Urreta, M. B. (2007). The Lower Cretaceous Chañarcillo and Neuquén Andean basins: ammonoid biostratigraphy and correlations. *Geological Journal*, 42, 143-173.

Arévalo, C. y Mpodozis, C. (1991). *Tectónica del Grupo Chañarcillo: una franja de cabalgamientos con vergencia al oeste en el valle del Río Copiapó, Región de Atacama, Chile*. In: Congreso Geológico Chileno (Viña del Mar), Actas, 6, 81–83.

Arévalo, C. (2005a). Carta Copiapó, Región de Atacama, Carta Geológica de Chile, N° 91: Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Arévalo, C. (2005b). Carta Los Loros, Región de Atacama, Carta Geológica de Chile, N° 92: Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Arévalo, C. y Welkner, D. (2008). *Carta Carrizal Bajo-Chacritas, Región de Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geológica Básica, escala: 1:100 000.

Arévalo, C., Mourgues, F. y Chávez, R. (2009). Geología del área Vallenar-Domeyko, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 120:64p., 1 mapa escala 1:100.000

Barazangi, M. y Isacks, B. (1976). Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692.

Biese-Nickel, W. (1942). *La distribución del Cretáceo inferior al sur de Copiapó*. In Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología, No1, Anales, Vol. 2, p.429-466. Santiago.

Briones, N. (2018). Análisis del estilo y cronología de deformación de la Cordillera de Vallenar (28°30'-29°S): Influencias en la construcción del Oroclino de Vallenar. Memoria para optar a título de Geóloga. Universidad Andrés Bello.

Cahill, T. y Isacks, B. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research*, 97: 17503-17529

Cifuentes, M., Creixell, C., Donoso, C. y Delgado, F. (2015). Geometría tridimensional y mecanismos de emplazamiento del Plutón Las Campanas, regiones de Atacama y Coquimbo, Chile. XIV Congreso Geológico Chileno. Serena-octubre 2015.

Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, P. (2007). *Tectonostratographic evolution of the Andean orogen in Chile*, en: *The Geology of Chile*. Editado por: Moreno, T. & Gibbons, W., The Geol. Soc., 21–114.

Charrier, R.; Farías, M. y MaksaeV, V. (2009). *Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina*. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65 (1): 5-35.

Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C. y Ramos, V. (1982). *Tectonic and magmatic evolution of Northern Argentina and Chile*. Earth Sci. Rev., 18: 303-332.

Corvalán, D., (1973). *Estratigrafía del Neocomiano Marino de la Región al sur de Copiapó, Provincia de Atacama*, Revista Geológica de Chile, 13–36, 1973.

Creixell, C., Labbé, M., Arévalo, C. y Salazar, E. (2013). Geología del área Estación Chañar-Junta de Chingoles, Regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica x: 87 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Dediós, P. (1967). Cuadrángulo Vicuña, Provincia de Coquimbo., Carta Geológica de Chile, Instituto de Investigaciones Geológicas, p. 65.

Emparán, C. y Pineda, G. (1999). Área Condoriaco-Rivadavia, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos, No. 12, 1 mapa escala 1:100.000. 1 anexo, Santiago.

Gutcher, M., Spakman, W., Bijwaard, H. y Engdahl, E. (2002). Geodynamics of flat subduction: Seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. Tectonics, vol. 19, no. 5, p. 814-833.

Greenhalgh, S.; McBride, J.; Bartley, J.; Keach, W.; Britt, B. y Kowallis, B. (2015). Along-strike variability of thrust fault vergence. 3 (3): SX1–SX12. doi: <https://doi.org/10.1190/INT-2014-0182.1>

Hervé, M. (1987). Movimiento sinistral en el Cretácico Inferior de la Zona de Falla de Atacama al norte de Paposó (24°S), Chile. Revista Geológica de Chile 0 (31) : 37-42.

Higgins, S.; Davies, R. J. y Clarke, B. (2007). Antithetic fault linkages in a deep-water fold and thrust belt. Journal of Structural Geology, Volume 29, Issue 12, December 2007, Pages 1900-1914. [<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.09.004>]

Higgins, S., Clarke, B., Davies, R. J. y Cartwright, J. (2009). Internal geometry and growth history of a thrust-related anticline in a deep-water fold belt. *Journal of Structural Geology*, 31(12), 1597–1611. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.07.006>

Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Brewer, J. A., Ramos, V. A. y Ando, C. J. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 341-361.

Kay, S. M., Mpodozis, C., Ramos, V. A. y Munizaga, F. (1991). Magma source variations for mid–late Tertiary magmatic rocks associated with a shallowing subduction zone and a thickening crust in the central Andes (28 to 33 S). *Geological Society of America Special Papers*, 265, 113-138.

Kim, Y.S. y Sanderson, D.J. (2005). The relation between displacement and length of fault: A review. *Earth Sci. Rev.* 68 (3-4), 317-334.

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Charrier, C. y Deckart, K. (2015). Tectonic styles and crustal shortening of the Central Andes “Pampean” flat-slab segment in northern Chile (27–29°S). *Tectonophysics*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.11.019>

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Del Real, I. y Deckart, K. (2013). The structure of the Chañarcillo Basin: an example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 1-16.

Martinod, J., Husson, L., Roperch, P., Guillaume, B. y Espurt, N. (2010). Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier, 299, 299-309. doi:<10.1016/j.epsl.2010.09.010>.<hal-00536991>

McClay, K. (1999). 4.2 *Thrust systems II - a review of thrust terminology*. In McClay, K.R., 1999. *Tectonic regimes and fault systems: structural geology for petroleum exploration*. Short Course. Professor of Royal Holloway, University of London. p. 293-307.

McClay, K. y Bonora, M. (2001). Analog Models of Restraining Stepovers in Strike-Slip Fault Systems. *AAPG Bulletin* 2001; 85 (2): 233–260. oi: <https://doi.org/10.1306/8626C7AD-173B-11D7-8645000102C1865D>.

Mourgues, F.A., (2007). La transgression du Crétacé Inférieur au Nord du Chili. Biostratigraphie, Paléontologie (Ammonites) Stratigraphie Séquentielle et Tectonique Syn-sédimentaire. Doctoral thesis (Unpublished). University of Toulouse, France.

Moscoso, R. (1979). Geología de una franja transversal a la Cordillera de la Costa y Cordillera de los Andes a la latitud de Domeyko (29°S), Región de Atacama. Memoria de Título, Univ. Chile, Depto. Geol., 166p. Santiago.

Moscoso, R. y Mpodozis, C. (1988). Estilos Estructurales en el Norte Chico de Chile (28-31°S), Regiones de Atacama y Coquimbo. *Revista Geológica de Chile*, 15 (2), 151-156.

Moscoso, R., Nasi, C. y Salinas, P. (1982). Geología de la hoja Vallenar y Parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 55:100 p., 1 mapa escala: 1:250.000.

Murillo, I.; Velásquez, R. y Creixell, C. (2017). Geología de las áreas Guanta-Los Cuartitos y Paso de Vacas Heladas, región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 192-193: 96 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Pardo, M., Comte, D. y Monfret, T. (2002). Seismotectonic and stress distribution in the 2589 central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 2590 11-22.

Peña, M. (2012). Reconocimiento del límite sur del patrón paleógeno de rotaciones horarias entre los 28°-32° S del margen chileno a través de un estudio paleomagnético. Obtenido de <http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/111881>

Peña, M., Arriagada, C., Martínez, F. y Becerra, J., (2013). *Carta Geológica Yerbas Buenas-Tres Morros, Región de Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, escala: 1:100 000.

Perroud, S. (2017). *Geología y evolución tectónica de la Cuenca de Chañarcillo, entre los 28°20' y 28°40'S*. 10.13140/RG.2.2.31904.38404.

Pineda, G. y Emparán, C. (2006). Geología del área Vicuña-Pichasca, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos 97, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Ramos, V., Cristallini, E. y Pérez, D. (2002). The Pampean flat-slab of the Central Andes: *Journal of South American Earth Sciences*. 15, 59-78.

Ramos, V.A. y Folguera, A. (2009). Andean flat-slab subduction through time, in Murphy, J.B., Keppie, J.D., and Hynes, A.J., eds., *Ancient Orogens and Modern Analogues: Geological Society, London, Special Publication 327*, p. 31–54, <https://doi.org/10.1144/SP327.3>.

Salazar, E.; Arriagada, C.; Mpodozis, C.; Martínez, F.; Peña, M. y Álvarez, J. (2009). Análisis estructural del Oroclino de Vallenar: Primeros resultados. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago, 22-26 noviembre, 2009.

Salazar, E. (2012). Evolución tectonoestratigráfica de la cordillera de Vallenar: Implicancias en la construcción del Oroclino de Vallenar. Tesis de Magíster (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 126 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Salazar, E., Coloma, F. y Creixell, C. (2013). Geología Del Área El Tránsito-Lagunillas, III Región De Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 149: 106p. 1 mapa escala 1:100.000.

Salazar, E., Franco, C., Creixell, C., Merino, R. y Suárez, M. (2015). Albian to Santonian tectonic closure of the Andean marginal basin at 28°S: Sedimentological, geochronological and structural evidences.

Salazar, E. y Coloma, F. (2016). Geología del área Cantaritos-Laguna Chica, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. 1 mapa escala 1:100.000.

Salazar, E.; Merino, R.; Creixell, C.; Mpodozis, C. y Murillo, I. (2021). Estratigrafía del Cretácico Superior entre los 28,5 y los 30° S, regiones de Atacama y Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-90: 33 p. Santiago.

Seegerstrom, K. y Parker, R. L. (1959). Cuadrángulo Cerrillos, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 1 (2): 33 p., 1 mapa escala 1:50.000.

Song, G., Wang, M., Jiang, D., Chen, Z., Yan, B. y Feng, W. (2020). Along-strike structural linkage and interaction in an active thrust fault system: A case study from the western Sichuan foreland basin, China. *Basin Res.* 2020; 00:1–17. <https://doi.org/10.1111/bre.12461>

Thiele, R y Pincheira, M. (1987). Tectónica transpresiva v movimiento de desgarre en el segmento sur de la Zona de Falla Atacama, Chile. *Revista Geológica de Chile* 0 (31) 77-94.

Totake, Y., Butler, R.W.H., Bond, C.E. y Aziz, A. (2017). Analyzing structural variations along strike in a deep-water thrust belt, *Journal of Structural Geology*, doi: 10.1016/j.jsg.2017.06.007.

Urresty, C. (2009). Evolución geomorfológica de la parte sur de la depresión de Domeyko (29°00-29°40'S) durante el Neógeno. Memoria para optar a título de Geólogo. Universidad de Chile.

Uyeda, S. y Kanamori, H. (1979). Back-arc Opening and the Mode of Subduction. *Journal of Geophysical Research*. 84. 1049-1062. 10.1029/JB084iB03p01049.