



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CUENCA CRETÁCICA DE CHAÑARCILLO (27° -  
28°S) A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS Y  
GRAVIMÉTRICOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

HUGO SEBASTIÁN OCHOA GUERRERO

PROFESOR GUÍA

FERNANDO MARTÍNEZ ORTÍZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

CÉSAR ARRIAGADA ORTEGA

EMILIO VERA SOMMER

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Geólogo.  
POR: Hugo Sebastián Ochoa Guerrero  
FECHA: 16/03/2015  
PROFESOR GUÍA: Fernando Martínez Ortíz

## ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA CUENCA CRETÁCICA DE CHAÑARCILLO (27° - 28°S) A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS Y GRAVIMÉTRICOS.

La cuenca cretácica de Chañarcillo forma parte de los sistemas extensionales que caracterizaron la evolución tectónica del Cretácico Inferior de los Andes Centrales del Norte de Chile. Específicamente entre los 27°-28°S, las potentes sucesiones volcánicas y de rocas carbonatadas fosilíferas de carácter marino que conforman su relleno, han grabado evidencias de estos procesos, sin embargo, actualmente, estas se encuentran afectadas por sistemas estructurales compresivos ligados a la deformación Andina del margen continental, lo cual ha permitido una sobreimposición estructural compleja en la región.

El presente trabajo intenta dar respuesta al debate acerca de la estructura cortical de primer orden que predomina en la Cuenca de Chañarcillo. Aunque diversos autores han propuestos distintos modelos que permiten reproducir su estructura superficial, su estructura en subsuperficie se mantiene aún en discusión. Considerando lo anterior, en el presente trabajo se integraron datos estructurales de superficie conjuntamente con datos gravimétricos, a fin de modelar la geometría en profundidad de la cuenca y definir un modelo geológico para la misma.

Para ello se realizaron dos transectas (O-E) de adquisición de datos gravimétricos, se midieron nuevos datos estructurales y se obtuvieron muestras de rocas para estudios de densidad. Los resultados de su estructura superficial corresponden a un anticlinal de inversión vergente al este (Anticlinorium de Tierra Amarilla); por otro lado, las curvas de anomalía residual han permitido definir geometrías asociadas y comparables con sistemas de *rift* intra-placa que encajan dentro de un modelo de hemigrábenes. De acuerdo con la integración realizada con los datos litológicos y estructurales de superficie, se propone una arquitectura para la cuenca definida por un sistema de hemigrábenes parcialmente invertidos.

*Pasaré una sola vez por este camino; de modo que cualquier bien que pueda hacer o cualquier cortesía que pueda tener para con cualquier ser humano, que sea ahora. No la dejaré para mañana, ni la olvidaré, porque nunca más volveré a pasar por aquí.*

## AGRADECIMIENTOS

Te agradezco Dios por las oportunidades que me has dado, por darme la fuerza de haber llegado hasta aquí y por permitirme caminar por senderos que me han dejado grandes enseñanzas.

Agradezco:

A mi madre, por enseñarme los valores que tengo grabados en mi corazón, porque lo que soy, se lo debo a ella.

A mi padre, por transmitirme fuerza y seguridad.

A mis hermanos Ignacio y Paula, por ser mis compañeros de vida.

A mi Dani porque la amo y siento en su mirada hermosa que me ama.

A mis amigos Christian e Ignacio, porque hemos disfrutado estos años estudiando la geología.

A David, porque aprendimos a trabajar en equipo: codo a codo nos abrimos paso para llegar hasta esta facultad.

A Fernando, por ser un verdadero profesor guía. Le agradezco la oportunidad de haber podido realizar este trabajo y el que usted haya coordinado la salida a terreno. También agradezco su ayuda: siempre tuvo la disposición para conversar conmigo y de revisar y corregir mis escritos. De todo corazón: Gracias.

Al equipo de docentes del Departamento de Geofísica que me ha apoyado:

Gracias profesor Emilio Vera por siempre hacerse un tiempo para escuchar mis preguntas y brindarme su ayuda, además de facilitar los instrumentos con los cuales se llevó a cabo la campaña gravimétrica

Gracias Andrei Maksymowicz por también escuchar mis preguntas; tus respuestas dieron el soporte al estudio gravimétrico de mi trabajo.

Gracias Daniel Díaz por facilitar los datos de prospección Magnetotelúrica.

Agradezco la participación de Andrei y Daniel en el terreno, la calidad de los datos se las debo a ustedes.

Al profesor Cesar Arriagada, porque su labor como docente es destacable. Quiere que sus alumnos aprendan, que caminen por los cerros, y si hay algo interesante en lugares de difícil acceso, los lleva con más entusiasmo.

A la profesora Luisa Pinto por creer y sacar lo mejor de nosotros. Por enseñar de una manera destacable usando distintas metodologías, despertando el deseo en su alumnado a aprender más. En particular, gracias por las oportunidades que me ha brindado.

Agradecer también al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), proyecto n° 3140557: *The crustal structure and timing deformation along the Chilean flat-slab subduction segment (27°-29°) Central Andes*, por brindar el financiamiento de este trabajo

Gracias a todos los que me han acompañado.

## TABLA DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	El Problema.....	1
1.2	Objetivos .....	4
1.2.1	Objetivo general:.....	4
1.2.2	Objetivos específicos:.....	4
1.3	Hipótesis de trabajo.....	4
1.4	Metodología .....	5
1.5	Ubicación y accesos.....	6
2	CAPÍTULO: MARCO GEOLÓGICO .....	7
2.1	Origen y evolución de la Cuenca Cretácica de Chañarillo.....	7
2.2	Modelos estructurales propuestos para la Cuenca de Chañarillo .....	9
2.2.1	Geology and Ore Deposits of Central Atacama Province, Chile (Segerstrom, 1967) .....	9
2.2.2	Carta Copiapó y los Loros (Arévalo, 2005a, b).....	11
2.2.3	Carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008).....	11
2.2.4	Compressional deformation along the Chañarillo basin west margin: North Chilean Late Jurassic-Early Cretaceous back-arc basin (Amilibia, 2009). .....	11
2.2.5	The structure of the Chañarillo Basin: An example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile (Martínez, <i>et al.</i> , 2013).....	12
2.3	Unidades Estratigráficas .....	12
2.3.1	Jurásico Inferior .....	16
2.3.2	Jurásico Superior-Cretácico Inferior .....	16
2.3.3	Cretácico Inferior .....	17
2.3.4	Cretácico Superior- Paleoceno.....	18
2.4	Unidades Intrusivas.....	19
2.4.1	Triásico .....	19
2.4.2	Jurásico Superior.....	20
2.4.3	Cretácico Inferior .....	20
2.4.4	Cretácico Superior .....	20
2.4.5	Paleógeno .....	20
2.5	Unidades no Consolidadas .....	21
2.5.1	Neógeno .....	21

2.5.2	Cuaternario .....	21
2.6	Rasgos estructurales.....	21
3	CAPÍTULO: METODOLOGÍA.....	22
3.1	Adquisición de datos.....	22
3.2	Gravimetría .....	23
3.2.1	Fundamento Teórico.....	23
3.2.2	Instrumentación utilizada.....	24
3.2.3	Procesamiento de Datos .....	25
3.3	Cálculo de densidades.....	34
3.4	Antecedentes bibliográficos .....	36
4	CAPÍTULO: RESULTADOS .....	37
4.1	Estructura superficial de la Cuenca Chañarcillo .....	37
4.2	Densidades .....	42
4.3	Profundidad del relleno no consolidado .....	47
4.4	Anomalía Residual .....	51
5	CAPÍTULO: ANÁLISIS .....	53
5.1	¿Qué produce la anomalía positiva en borde occidental de la cuenca? .....	53
5.2	Modelamiento gravimétrico .....	55
5.2.1	Perfil Norte.....	56
5.2.2	Perfil Sur.....	59
5.3	Perfiles Estructurales .....	60
5.3.1	Perfil Norte.....	60
5.3.2	Perfil Sur.....	64
6	CAPÍTULO: DISCUSIÓN .....	67
6.1	Distintos perfiles estructurales .....	67
6.2	Elección de la Tendencia Regional .....	69
6.3	Logro de los objetivos propuestos.....	72
6.3.1	Posición y geometría de fallas maestras (bordes de cuenca) .....	74
6.3.2	Profundidad del basamento ígneo-metamórfico y espesor del relleno estratigráfico.....	75
6.3.3	Posibles zonas de emplazamiento de cuerpos intrusivos.....	76
7	CAPÍTULO: CONCLUSIONES.....	77
8	BIBLIOGRAFÍA .....	79
	ANEXOS .....	87
	Anexo A: Tabla de Equivalencias .....	87
	Anexo B: Datos de gravimetría recogidos en terreno .....	88

Anexo C: Correcciones: Gravedad Medida.....	92
Anexo D: Correcciones: Gravedad Estándar .....	96
Anexo E: Prospección Magnetotélúrica .....	100
Anexo E.1: Ubicación de los perfiles anteriores .....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de las densidades de las muestras obtenidas en terreno por el método de Arquímedes. La ubicación de las muestras está ilustrada en la Figura 32. ....	42
Tabla 2. Índices de porosidades propuestos por Freeze y Cherry (1979), para los siguientes depósitos no consolidados y rocas. ....	46
Tabla 3. Tabla resumen donde se muestran las densidades de las unidades principales. ....	46
Tabla 4. Unidades ocupadas en el modelo gravimétrico .....	47
Tabla 5. Expedientes obtenidos de la página web de la DGA. Las coordenadas están en el sistema WGS84, huso 19. El pozo que intercepta roca está destacado con asterisco, ver texto, para su discusión. ....	48
Tabla 6. Los perfiles MT están ordenados de acuerdo a la dirección de oeste a este. El valor en metros corresponde a la profundidad desde la superficie. Del perfil H11 no se puede extraer una información clara. ....	51
Tabla 7. Ubicación las estaciones de MT, en datum WGS 84 UTM, huso 19. ....	103



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Visión regional del área de estudio, donde se destaca las principales litologías y estructuras. Modificado de SERNAGEOMIN (2003). .....	2
Figura 2. Se muestran los Dominios y las estructuras que se encuentran en la zona de estudio, además de las litologías que se formaron entre el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior. También se señalan, en puntos azules, las transectas denominadas Norte y Sur, de adquisición de datos gravimétricos, que se realizaron en este estudio, las cuales tienen una longitud de 44 y 30 km, respectivamente. Modificado de Blanco <i>et al.</i> (2003), Arévalo (2005b), Arévalo y Welkner (2008) y Peña <i>et al.</i> (2013).....	3
Figura 3. Modelo estructural que se espera obtener del presente estudio (Modificado de Martínez <i>et al.</i> , 2013). .....	5
Figura 4. Mapa de ubicación y accesos a la zona de estudio en coordenadas UTM WGS 84. La zona de estudio está representada por un cuadro de borde rojo. Se observa la ruta 5 Norte de color rojo, y los caminos de tierra y ripio se muestran de color gris. Además se muestran las faenas mineras principales (categoría A: corresponde al trabajo promedio de igual o mayor a 400 trabajadores durante un año) según SERNAGEOMIN (2011). .....	6
Figura 5. Principales sistemas de Rift desarrollados a partir de la ruptura y expansión del margen occidental de Gondwana, en el territorio Chileno y Argentino (Ramos y Alemán, 2000; modificado por Martínez <i>et al.</i> , 2013).....	8
Figura 6. Se señalan los centros dispersores que gatillaron la ruptura continental en círculos amarillos. A la izquierda se muestra la fragmentación de Gondwana durante el Jurásico Temprano y a la derecha, el evento del Paraná separa América del Sur de África a fines del Jurásico e inicio del Cretácico. Modificado de Mpodozis y Ramos (2008).....	9
Figura 7. Perfiles estructurales realizados para la Cuenca de Chañarcillo. Modificados de Segerstrom (1967), Arévalo (2005a), Arévalo y Welkner (2008), Amilibia (2009) y Martínez <i>et al.</i> (2013). .....	10
Figura 8. Mapa geológico de la zona de estudio, realizado al combinar cuatro cartas geológicas. Modificado de 1) Blanco <i>et al.</i> (2003) (carta Castilla y Totoral Bajo), 2) Arévalo (2005b) (carta Los Loros), 3) Arévalo y Welkner (2008) (carta Carrizal Bajo-Chacritas) y 4) Peña <i>et al.</i> (2013) (carta Yervas Buenas-Tres Morros).....	13
Figura 9. Leyenda de la Figura 8 .....	14
Figura 10. Columna estratigráfica de la zona de estudio junto con su respectiva simbología, que engloba todo lo escrito respecto a las Unidades Estratigráficas e Intrusivas.....	15
Figura 11. Mapa principal indicando la disposición de las transectas Norte y Sur, representadas por los puntos azules y morados, respectivamente. El punto negro sobre el perfil Norte indica el punto Base. En la parte inferior derecha se muestra un mapa de ubicación y accesos de la zona de estudio. Para ver información de la leyenda del mapa geológico ir a la Figura 9. Ir la Figura 4 para observar con mayor detalle la imagen de la ubicación. ....	23
Figura 12. Relación entre la lectura vista en terreno con su respectiva equivalencia en mgal. ....	25

Figura 13. Se muestra las variaciones de gravedad debido al efecto de mareas. Tomado de Seigel (1995).....	26
Figura 14. Gráfico simplificado para ilustrar la corrección por deriva instrumental, donde los puntos bases son representados por puntos rojos y los azules corresponden a las mediciones realizadas en terreno. Además "m" significa la pendiente de la recta. La corrección para cada punto corresponde a: $M1-m*T1$ , $M2-m*T2$ y $M3-m*T3$ (Estrada, 2012). ....	27
Figura 15. Se ilustra la placa de Bouguer. La simbología corresponde a: $g_m$ es la gravedad medida, $g_t$ representa la corrección Latitud, $h$ es la distancia vertical entre las dos anteriores, y $\rho$ corresponde a la densidad de la placa.....	29
Figura 16. Se ilustra el efecto de la topografía sobre el punto P. Este punto representa la gravedad teórica donde se ha aplicado la corrección por Latitud, Aire libre y Bouguer. Se observa que el efecto topográfico genera una componente vertical de gravedad con dirección hacia arriba, que es necesario restar a la gravedad en el punto P.....	30
Figura 17. Se ilustra en forma general como determinar la Anomalía Residual al identificar la Anomalía Regional de la curva de la <b>ABC</b> . Tomado de Estrada, 2012. ....	31
Figura 18. Residuales obtenidos “al ojo” y por computador. El <i>Manual background</i> (Regional dibujado “al ojo”) reconoce la separación entre el regional y la anomalía local, por lo tanto la anomalía residual es probablemente una buena aproximación del efecto de la fuente local. El <i>Computer background</i> (Regional obtenido gracias al computador) es dibujada de forma sesgada por la presencia de la anomalía local, y el Residual correspondiente es, por lo tanto, flanqueada por valles. Tomado de Milson (2003) .....	32
Figura 19. Imágenes obtenidas del programa <i>Model Vision</i> . Se observan las ubicaciones de las estaciones gravimétricas obtenidas en terreno para los perfiles Norte (imagen superior) y Sur (imagen inferior), representadas por cruces rojas. La recta azul, que une el punto inicial con el final, representa el eje de la abscisa del perfil donde fue realizado el modelamiento gravimétrico, en la cual perpendicular a esta, se dibujan los cuerpos modelados (los cuerpos rojos y verdes para los correspondientes perfiles Norte y Sur). En colores se ilustra el plano de la correspondiente tendencia regional. ....	33
Figura 20. Se ilustra el procedimiento para elegir la Tendencia Regional (línea roja). En el perfil, Distancia <i>versus</i> mgal, los puntos negros unidos con una línea representan la <b>ABC</b> . Aquí, para elegir el Regional, es cual es considerado lineal, es necesario definir dos puntos: Marcadores A y B que representan los bordes oeste y este de la cuenca. Ver texto para mayor explicación.....	34
Figura 21. Se ilustra el método de Arquímedes para la determinación de la densidad de las muestras. Notar que no importa el volumen de agua de la probeta, sino que solo se considera la medición de la balanza ( <b>me</b> ) para efectos de cálculo.....	35
Figura 22. Mapa geológico de la zona de estudio, para ver las unidades en más detalle y la simbología, ir a la Figura 8 y a la Figura 9. Se observa la ubicación y orientación de las principales fotografías tomadas en terreno, que van desde la Figura 23 hasta la Figura 31, exceptuando la Figura 28; además, de las estaciones gravimétricas de la parte oriental de las transectas Norte y Sur, donde también se hicieron observaciones estructurales. ....	38

Figura 23. Imagen tomada en el punto G16. Muestra la deformación sufrida por el grupo Chañarcillo, cuyos estratos mantean hacia el este. Ver Figura 22 para su ubicación. .....	39
Figura 24. Imagen obtenida en la parada P03. Se observan los estratos del Grupo Chañarcillo con mateos subverticales. Ver Figura 22 para su ubicación. ....	39
Figura 25. Imagen tomada entre las paradas P05 y P06. Se observa como los estratos del mismo Grupo Chañarcillo tienen manteos en direcciones opuestas, formando así una estructura anticlinal. El cuadrado negro sugiere ver la Figura 26 para mayor detalle. Ver Figura 22 para su ubicación en el punto P05.5 .....	40
Figura 26. Imagen obtenida de la parada P04. Muestra como los estratos del Grupo Chañarcillo mantean hacia el este. Ver Figura 22 para su ubicación.....	40
Figura 27. Imagen tomada entre las paradas P12 y P13. Se observa como hacia el este, los manteos de los estratos del Grupo Chañarcillo se suavizan, llegando a ser subhorizontales. Ver Figura 22 para su ubicación en el punto P12.5 .....	40
Figura 28. Imagen obtenida de <i>Google Earth</i> . Muestra una vista hacia el Norte, desde una posición más abajo del Perfil Sur (los puntos azules representan esta transecta). De esta manera se abarca todo el espacio comprendido por las imágenes anteriores observando claramente el Anticlinorium de Tierra Amarilla. ...	41
Figura 29. Imagen obtenida en la parada P03 mirando hacia el Sur. Se muestra el contacto en discordancia angular entre la Formación Hornitos y el Grupo Chañarcillo. ....	41
Figura 30. Imagen obtenida en Quebrada Chuschampis, en el punto B, en dirección al Suroeste. Es posible observar la deformación sufrida por los estratos del Grupo Chañarcillo cuyos manteos van de 30° a 80°, aproximadamente, definiendo así la geometría del Anticlinorium de Tierra Amarilla.....	41
Figura 31. Imagen obtenida en la Quebrada Chuschampis en el punto A, en dirección hacia el Noreste. Es posible observar como los estratos del Grupo Chañarcillo tienen manteos subverticales, y luego como estos se van haciendo subhorizontales al oeste, definiendo así el Anticlinorium de Tierra Amarilla. ....	42
Figura 32. Mapa litológico donde se muestra la ubicación de las muestras obtenidas en terreno, para la obtención de densidades. La muestra M6 señala que hay un afloramiento de la Formación Nantoco bajo los depósitos no consolidados del Neógeno. Para conocer la simbología ver Figura 9. ....	43
Figura 33. Mapa donde los puntos celestes muestran la ubicación de los pozos obtenidos de los expedientes de la DGA. Solamente uno de estos interceptó roca, el pozo 38* (ver texto arriba para su discusión). Los puntos rojos señalan las estaciones gravimétricas, de los perfiles Norte y Sur.....	49
Figura 34. Vista de las ubicaciones de las estaciones de MT en puntos morados. También se observa la ubicación de los perfiles Norte y Sur en puntos azules.....	50
Figura 35. Perfil Norte. En la parte superior se observa la <b>ABC</b> mostrada con puntos negros. La línea roja corresponde a la Anomalía Regional. La resta entre estas dos da como resultado la Anomalía Residual mostrada en la parte inferior de la figura. .....	52
Figura 36. Perfil Sur. En la parte superior se observa la <b>ABC</b> mostrada con puntos negros. La línea roja corresponde a la Anomalía Regional. La resta entre estas dos da como resultado la Anomalía Residual mostrada en la parte inferior de la figura. .....	52

Figura 37. Mapa donde se muestra las faenas mineras más próximas a la zona de estudio. Los perfiles gravimétricos Norte y Sur están coloreados de acuerdo a su valor de la anomalía residual en mgal.....	54
Figura 38. Magnetometría del área Chacritas realizada por Vivallo y Donoso (2013). En la imagen, la zona de estudio está marcada por un rectángulo rojo, además se muestran las ubicaciones de los perfiles de adquisición de datos gravimétricos Norte y Sur, los cuales están coloreados según sus valores en miligales. A la derecha se presenta la leyenda de la imagen magnética en valores de nanotesla. Se observa como la anomalía positiva gravimétrica del perfil Sur coincide con una anomalía positiva magnética, lo cual sugiere que el cuerpo responsable tendría una densidad alta, quizás, debido a la presencia de minerales como la magnetita. ....	55
Figura 39. En el Perfil Norte están dibujadas las ubicaciones de los perfiles MT con sus respectivas profundidades según la.....	57
Figura 40. Se ilustra de forma esquemática un cerro y el relleno sedimentario no consolidado. Mientras más cerca se está del cerro, es más probable que el espesor del relleno sea menor.....	57
Figura 41. Se muestra la ubicación de los <i>peaks</i> , en puntos de color rojo, mostrados en la Figura 39. Notar la especial relación y cercanía que tienen estos pequeños altos gravimétricos con la topografía. ....	57
Figura 42. Perfil Norte. En la parte superior de la figura se observa la curva de Anomalía de Bouguer Completa (puntos negros) con la respectiva tendencia regional (línea roja), además de la señal modelada (línea azul). En la parte del medio, la Anomalía Residual también está representada por puntos negros y la señal modelada, por la línea azul. Luego en la parte inferior se muestran los cuerpos que producen la respectiva señal. Es importante destacar que el cuerpo rojo de densidad $2.67 \text{ g/cm}^3$ se dibujó para destacar el contacto entre las unidades que rellenan la cuenca y los intrusivos del Cretácico, pero no genera respuesta gravimétrica ya que tiene la misma densidad que el basamento. La simbología es la misma para la Figura 44.	58
Figura 43. Las barras moradas muestran las condiciones de bordes obtenidas de los pozos de la sección 4.3 e indican las profundidades mínimas que tendría el relleno no consolidado. Los números 1 y 2 marcan la profundidad 120 y 86 metros, respectivamente.....	59
Figura 44. Perfil Sur. En la parte superior de la figura se observa la curva de Anomalía de Bouguer Completa (puntos negros) con la respectiva tendencia regional (línea roja), además de la señal modelada (línea azul). En la parte del medio, la Anomalía Residual también está representada por puntos negros y la señal modelada, por la línea azul. Luego en la parte inferior se muestran los cuerpos que producen la respectiva señal. Es importante destacar que el cuerpo rojo de densidad $2.67 \text{ g/cm}^3$ se dibujó para destacar el contacto entre las unidades que rellenan la cuenca y los intrusivos del Cretácico, pero no genera respuesta gravimétrica ya que tiene la misma densidad que el basamento. Simbología en Figura 42.....	60
Figura 45. Condiciones de borde para elaborar un perfil estructural. La barra horizontal de colores indica la litología observada en superficie. Superpuesta a esta barra se muestran las estructuras también observadas en superficie, además a lo largo del perfil se dibujaron los manteos. Toda esta información proviene del mapa geológico de la Figura 6. Finalmente los números de color blanco indican las profundidades de los depocentros. Simbología en la Figura 40 .....	62
Figura 46. Simbología de la Figura 45 y de la Figura 48.....	63

- Figura 47. Perfil Estructural Norte. Se muestran los tres principales depocentros limitados por fallas lístricas invertidas y normales. Dentro de dos depocentros se observan discontinuidades internas explicadas por fallas normales. También al oriente está dibujada la Falla Santa María y al occidente la traza del SFA.....63
- Figura 48. Condiciones de borde para elaborar un perfil estructural. La barra horizontal de colores indica la litología observada en superficie. Superpuesta a esta barra se muestran las estructuras también observadas en superficie, además a lo largo del perfil se dibujaron los manteos. Toda esta información proviene del mapa geológico de la Figura 6. Finalmente los números de color blanco indican las profundidades de los depocentros. Simbología en la Figura 40. ....65
- Figura 49. Perfil estructural Sur. Se muestran los dos principales depocentros limitados por fallas lístricas invertidas. La falla inversa, quizás, se desarrolló cuando ocurrió la inversión de la cuenca. Simbología en Figura 47.....66
- Figura 50. Se observa esquemáticamente paso a paso la creación de un *Antiformal stack* (Modificado de Pedersen, 2005).....68
- Figura 51. Perfil Norte. Se observa que el Marcador B aumenta su valor en la vertical en 2.5 mgal y 5 mgal en los perfiles B) y C) respectivamente, de acuerdo a su condición inicial (perfil A). De esta forma se pone de manifiesto que la profundidad tiene amplios grados de incerteza, pero no así la geometría propuesta para la Cuenca de Chañarillo.....70
- Figura 52. Perfil Sur. Se observa que el Marcador B aumenta su valor en la vertical en 2.5 mgal y 5 mgal en los perfiles B) y C) respectivamente, de acuerdo a su condición inicial (perfil A). De esta forma se pone de manifiesto que la profundidad tiene amplios grados de incerteza, pero no así la geometría propuesta para la Cuenca de Chañarillo.....71
- Figura 53. Se muestran las Anomalías de Bouguer Completa (parte superior) y Residual (parte del medio). En la parte inferior se observa el modelo gravimétrico que mejor se ajusta a estas curvas. El número 1 indica la anomalía positiva que posiblemente correspondería a un intrusivo relacionado con los procesos mineralizadores de la Franja Ferrífera Chilena (ver sección 5.1), y el número 2, indica dos anomalías negativas que, dada la información geológica de superficie y los modelos estructurales realizados por distintos autores, es muy probable que correspondan a hemigrábenes. ....73
- Figura 54. Se muestran las Anomalías de Bouguer Completa (parte superior) y Residual (parte del medio). En la parte inferior se observa el modelo gravimétrico que mejor se ajusta a estas curvas. El número 1 indica la anomalía positiva que posiblemente correspondería a un intrusivo relacionado con los procesos mineralizadores de la Franja Ferrífera Chilena (ver sección 5.1), y el número 2, indica dos anomalías negativas sutiles que, dada su relación con el perfil norte y la información geológica de superficie y los modelos estructurales realizados por distintos autores, es muy probable que correspondan a hemigrábenes.....74
- Figura 55. Se muestra un resumen de los perfiles de la Figura 51 y Figura 52. Los colores rojo, celeste y verde indican el modelo y la tendencia regional de los perfiles A), B) y C), respectivamente. Como conclusión se tiene que la profundidad del basamento para el perfil Norte y Sur varía aproximadamente, en sus partes más profundas, entre 700 m y 800 m respectivamente, pero la geometría de la cuenca sigue asemejándose a distintos hemigrábenes. Por lo tanto si bien los valores de profundidad pueden tener grandes grados de incerteza, la geometría

propuesta para la Cuenca de Chañarcillo (hemigrábenes en dominó parcialmente invertidos), gracias al estudio gravimétrico, es muy acertada. ....	75
Figura 56. Nombre H01 .....	100
Figura 57. Nombre H02 .....	100
Figura 58. Nombre H03 .....	100
Figura 59. Nombre H04 .....	100
Figura 60. Nombre H05 .....	101
Figura 61. Nombre H06 .....	101
Figura 62. Nombre H07 .....	101
Figura 63. Nombre H08 .....	101
Figura 64. Nombre H09 .....	102
Figura 65. Nombre H10 .....	102
Figura 66. Nombre H11 .....	102
Figura 67. Nombre H12 .....	102
Figura 68. Nombre H13 .....	103

# 1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN

## 1.1 El Problema

La evolución tectónica durante el mesozoico (Jurásico Temprano-Cretácico Temprano) de los Andes Centrales del norte de Chile, estuvo marcada principalmente por el establecimiento de un conjunto de sistemas de arcos volcánicos y cuencas extensionales de trasarco, ligadas con la subducción en retroceso de la Placa oceánica de Fénix bajo el margen continental (Coira *et al.*, 1982; Ramos *et al.*, 1986; Mpodozis y Ramos, 1989; Scheuber *et al.*, 1994; Ramos y Alemán, 2000; Charrier *et al.*, 2007; Ramos, 2009; Seton *et al.* 2012). Especialmente a lo largo del norte de Chile, las evidencias de este proceso han sido continuamente atribuidas, a la presencia de un conjunto de cuerpos intrusivos e importantes volúmenes de rocas volcánicas del Jurásico Temprano, así como también a potentes series sedimentarias marinas y continentales del Jurásico Superior-Cretácico Temprano (Figura 1) (Mpodozis y Ramos, 1990; Mpodozis y Allmendinger, 1993; Arévalo, 2005a y b; Mourgues, 2007; Amilibia *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2013). Sin embargo, parte importante de las sucesiones volcánicas y sedimentarias jurásicas y cretácicas, yacen hoy en día afectados por sistemas estructurales compresivos derivados de la orogenia andina, lo cual brinda una clara complejidad tectónica para la región.

Específicamente sobre el segmento de subducción sub-horizontal de los Andes Centrales del norte de Chile entre los (27°-28°S), las espesas sucesiones volcánicas y de rocas carbonatadas fosilíferas de carácter marino, de edad Jurásico y Cretácico, han sido reconocidas a través de sus dos provincias tectónicas principales (Cordillera de la Costa y Cordillera Frontal), como se observa en Figura 2, y han sido tradicionalmente interpretadas como un importante componente estratigráfico del régimen extensional mesozoico (Mpodozis y Allmendinger, 1993; Moscoso y Mpodozis, 1988; Arévalo, 2005a y b; Mourgues, 2007; Martínez *et al.*, 2012 y 2013). Sin embargo, a lo largo del flanco oriental de la Cordillera de la Costa, la Cuenca Cretácica Chañarcillo es quizás el rasgo morfo-estructural más imponente ligado a este proceso (Seegerstrom y Ruiz, 1962; Aguirre-Urreta, 1993; Arévalo, 2005a, Mourgues, 2007, entre otros). El relleno de esta cuenca, de más 100 km de longitud, ha grabado la historia geológica mesozoica y cenozoica del margen continental, la cual ha dejado notables sobreimposiciones de estilos estructurales que pueden ser analizadas a través de las excelentes exposiciones de su registro estratigráfico.

Esta última situación ha favorecido el debate sobre la definición de la estructura principal de la cuenca, representando así un problema aún por resolver, lo cual permitiría mejorar el entendimiento de la evolución tectónica de la región, así como comprender mejor los principales mecanismos de deformación durante la orogenia andina. En este sentido, distintos modelos estructurales han sido propuestos, pero siempre limitados a observaciones de superficie, de tal forma que la estructuración del subsuelo aún es una incertidumbre. Es por esta razón que para la Cuenca de Chañarcillo se han propuestos 4 modelos estructurales principales: Arévalo (2005a), propone un sistema de flor positiva; Arévalo y Welkner (2008), señalan que la

deformación en la cuenca es provocada por un sistema de fallas inversas con vergencia hacia el oeste, además interpretan el límite principal de la cuenca como una falla normal que inclina progresivamente hacia el este; Amilibia (2008), afirma que la deformación se debe a fallas inversas que afectaron el borde occidental de la cuenca y que levantaron, transportaron y plegaron las secuencias calcáreas y finalmente Martínez, y colaboradores (2013), proponen una estructura de hemigraben invertido. Aunque todos los modelos anteriores reproducen la deformación de superficie, son muy distintos entre ellos en cuanto a las interpretaciones estructurales del subsuelo y ello da cuenta de lo complejo que es crear un modelo solamente con datos de superficie. Considerando lo anterior, en el presente trabajo se integrará datos de superficie con datos geofísicos gravimétricos para modelar la geometría en profundidad de la cuenca, la cual espera conseguirse mediante la determinación de contrastes mayores de densidades, entre el relleno de la misma y su basamento.

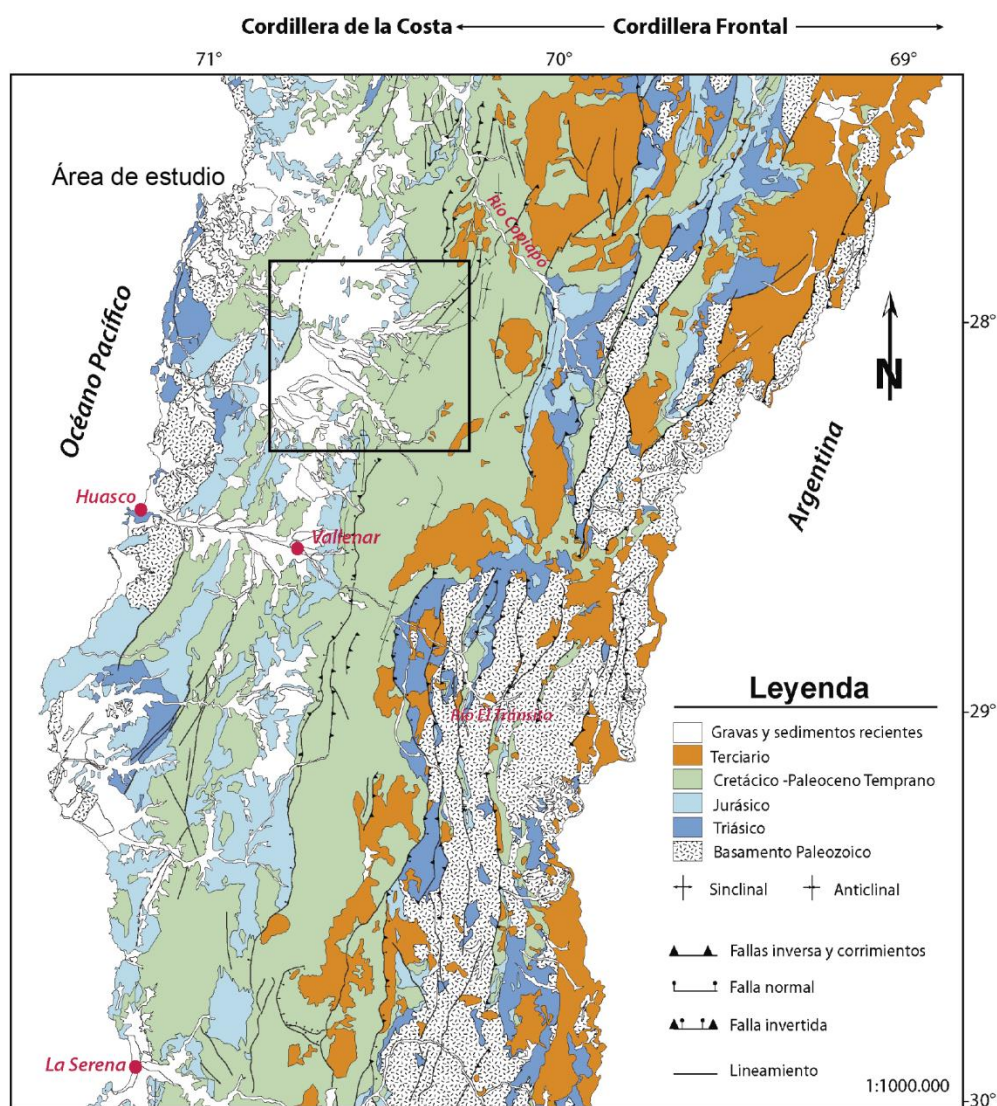


Figura 1. Visión regional del área de estudio, donde se destaca las principales litologías y estructuras. Modificado de SERNAGEOMIN (2003).



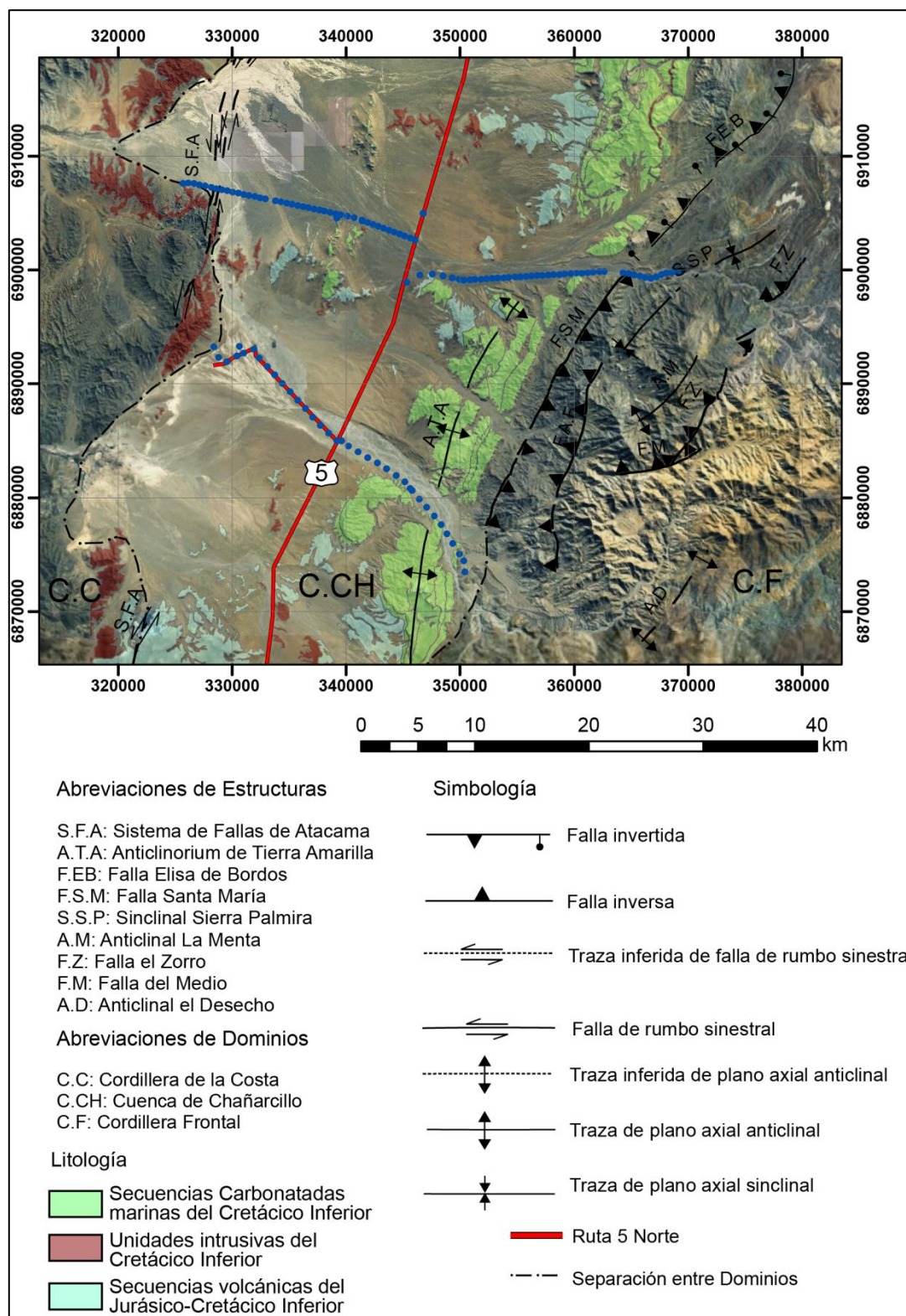


Figura 2. Se muestran los Dominios y las estructuras que se encuentran en la zona de estudio, además de las litologías que se formaron entre el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior. También se señalan, en puntos azules, las transectas denominadas Norte y Sur, de adquisición de datos gravimétricos, que se realizaron en este estudio, las cuales tienen una longitud de 44 y 30 km, respectivamente. Modificado de Blanco *et al.* (2003), Arévalo (2005b), Arévalo y Welkner (2008) y Peña *et al.* (2013).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general:

A partir del uso de la información geológica disponible (estructural-estratigráfica), las nuevas interpretaciones estructurales y la obtención de nuevos datos gravimétricos, se pretende: determinar las características estructurales de primer orden inherentes a la Cuenca Chañarcillo. El producto final comprende un modelo estructural 2D de la cuenca con énfasis en su geometría de subsuperficie.

### 1.2.2 Objetivos específicos:

A partir de información gravimétrica 2D y de los estudios geológicos-estructurales a escala de cuenca, se pretende definir:

- Posición y geometría de fallas maestras (bordes de cuenca).
- Profundidad del basamento ígneo-metamórfico.
- Espesor del relleno stratigráfico.
- Posibles zonas de emplazamiento de cuerpos intrusivos.

## 1.3 Hipótesis de trabajo

La Cuenca de Chañarcillo presenta dos estructuras principales: el Anticlinorium de Tierra Amarilla y la Falla Elisa de Bordos. La primera involucra a las secuencias volcánicas y calcáreas de la Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior) y del Grupo Chañarcillo (Cretácico Inferior), respectivamente, además, antecedentes geológicos reconocen que los espesores de estas secuencias no son constantes a través de la estructura (Segerstrom, 1967; Arévalo, 2005a; Martínez *et al.*, 2013, entre otros), sino que disminuyen considerablemente de este a oeste, desde el limbo frontal hacia el limbo dorsal de la estructura. Por otro lado, la Falla Elisa de Bordos marca el límite oriental para las secuencias calcáreas del Grupo Chañarcillo.

Si bien distintos modelos estructurales pueden reproducir la configuración descrita anteriormente (como se verá más adelante en la sección 2.2), se propone como hipótesis el modelo planteado por Martínez *et al.* (2013), ya que permite explicar a la Falla Elisa de Bordos como un borde para la cuenca, así mismo, permite explicar al Anticlinorium de Tierra Amarilla como un anticlinal de inversión dada las diferencias de espesor de las secuencias volcánicas y calcáreas que corresponderían a un relleno de un depocentro con geometría de hemigraben. Basado en lo anterior, se plantea la hipótesis que el modelo 2D de la cuenca, que se espera obtener de la integración de la información obtenida de gravimetría y del registro geológico de superficie, corresponda al de una cuenca parcialmente invertida como el mostrado en la Figura 3.

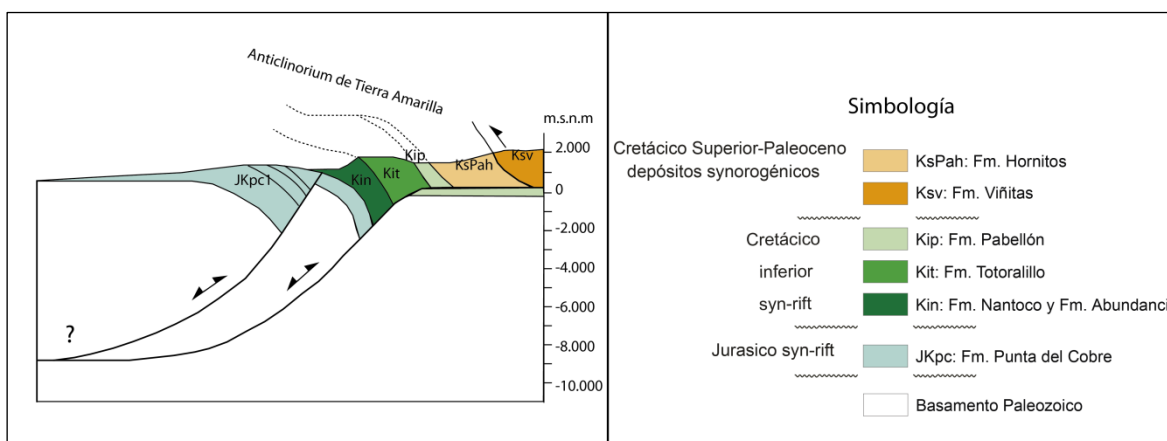


Figura 3. Modelo estructural que se espera obtener del presente estudio (Modificado de Martínez *et al.*, 2013).

#### 1.4 Metodología

Se llevó a cabo una campaña de terreno entre los días 16 y 21 de Julio del 2014 con los siguientes objetivos: realizar dos transectas para adquisición de datos gravimétricos, obtener nuevos datos estructurales y muestras de roca para determinar su densidad. Las transectas para adquisición de datos gravimétricos, fueron dispuestas de manera transversal a la Cuenca de Chañarillo; la primera definida como transecta norte, de 44 km de longitud, consta de 85 puntos espaciados cada 500 m, mientras que la segunda o transecta sur, de 30 km de largo, está compuesta por 36 puntos espaciados cada 1000 m (Figura 2). Para realizar este proceso se utilizó un gravímetro LaCoste & Romberg modelo G411, así como un GPS doble diferencial marca Topcon modelo Hiper V, pertenecientes al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Posteriormente se procesó la información adquirida en terreno, utilizando rutinas en Excel. Esta actividad se dividió en dos:

- Determinación de gravedad medida: para ello se procedió a determinar el valor de la gravedad relativa para cada uno de los puntos medidos. Esto incluye las correcciones por mareas y por la deriva instrumental (Honores, 2013).
- Determinación de gravedad estándar: con este procedimiento se modificaron los datos anteriores al aplicarles una serie de correcciones las cuales son por latitud, aire libre, Bouguer, topográfica. (Honores, 2013).

El objetivo fue comparar los resultados de ambas fases, para obtener, finalmente, una anomalía residual de gravedad. Utilizando esto y la información geológica de superficie, mucha de ella publicada por Blanco *et al.* (2003), Arévalo (2005b), Arévalo y Welkner (2008), Peña *et al.* (2013) y Martínez *et al.* (2012 y 2013); se procedió a la ejecución de un perfil gravimétrico 2D utilizando el programa *Model Vision 10.00*. Por último, se realizaron perfiles estructurales.

## 1.5 Ubicación y accesos

La zona de estudio se ubica en la Tercera Región de Atacama, aproximadamente a 83 km al sur de la ciudad de Copiapó. El acceso se logró a través de la ruta 5 Norte, desde la cual se tomaron desvíos hacia el este y el oeste por caminos de tierra y de ripio en buen estado, para realizar los perfiles gravimétricos.

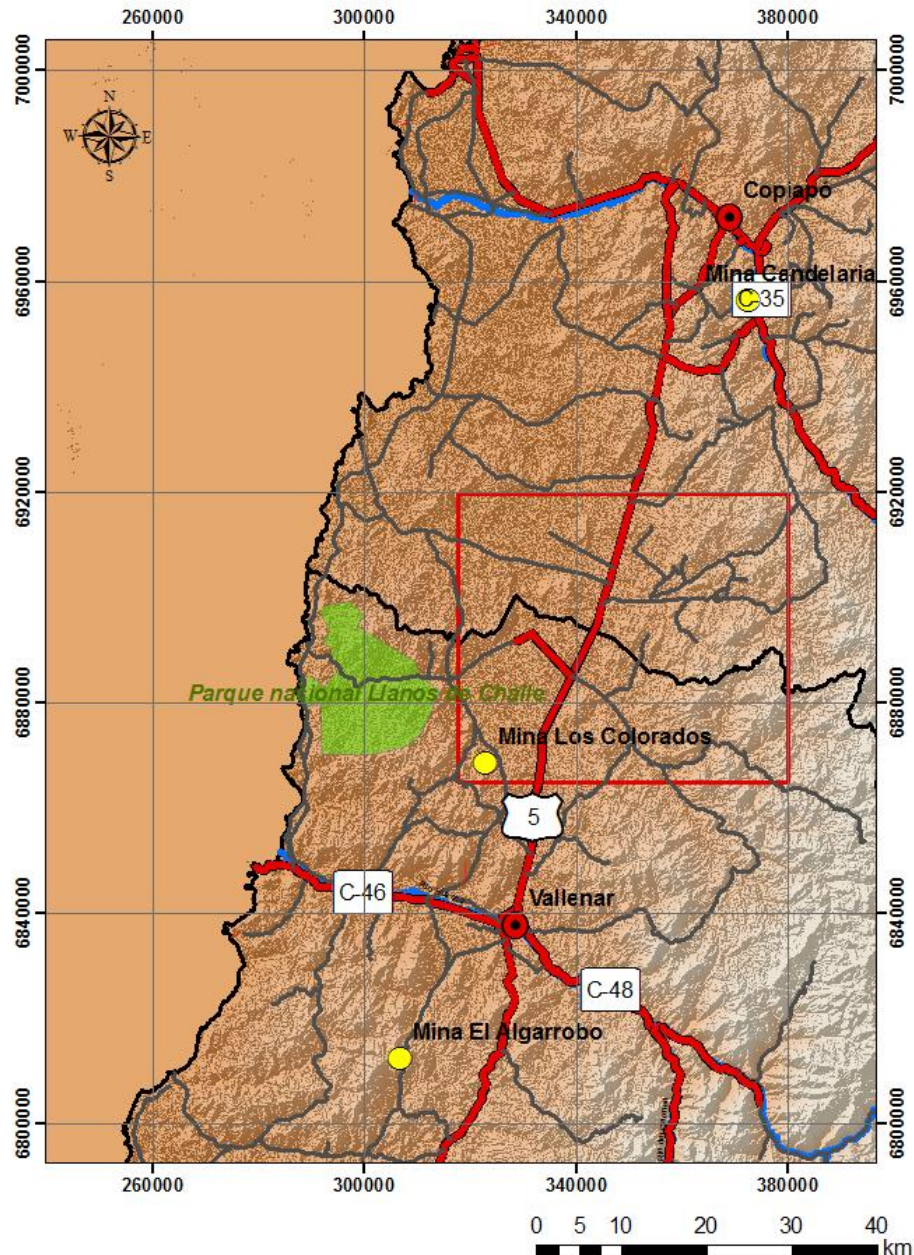


Figura 4. Mapa de ubicación y accesos a la zona de estudio en coordenadas UTM WGS 84. La zona de estudio está representada por un cuadro de borde rojo. Se observa la ruta 5 Norte de color rojo, y los caminos de tierra y ripio se muestran de color gris. Además se muestran las faenas mineras principales (categoría A: corresponde al trabajo promedio de igual o mayor a 400 trabajadores durante un año) según SERNAGEOMIN (2011).

## 2 CAPÍTULO: MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 Origen y evolución de la Cuenca Cretácica de Chañarcillo

La Cuenca de Chañarcillo se ubica entre los dominios Cordillera de la Costa y la Cordillera Frontal, entre las latitudes 27°S y 29°S. El inicio de su historia geológica se relaciona con la fragmentación del supercontinente Gondwana debido al centro dispersor del Karoo (Cox, 1988, ver Figura 6), durante los 183 y 179 Ma (Jourdan *et al.*, 2005). Este evento inició la subducción de la placa oceánica de Fénix bajo el margen occidental de Sudamérica lo cual permitió el desarrollo de una extensión generalizada, manifestada a través del establecimiento de un arco magmático que se extendió desde el sur del Perú hasta Chile Central, además de diversos sistemas de cuencas de intra y trasarco como es el caso del arco de La Negra, la Cuenca de Tarapacá y la Cuenca Lautaro, al norte de Chile (Charrier, 1979; Uliana *et al.*, 1989; Ramos y Kay, 1991; Scheuber *et al* 1994; Mpodozis y Ramos, 2008; Ramos, 2009; Seton *et al* 2012). El arco La Negra, recibe el nombre gracias a una Formación ampliamente distribuida llamada de la misma manera. En la Zona de estudio, vestigios de este arco Jurásico son evidenciados por la Fm. La Negra y, probablemente, también por la Diorita San Antonio.

Luego del proceso de fragmentación continental, el cual culminó entre los 132-133 Ma, apareció otro centro de expansión llamado Paraná, (Renne *et al.*, 1992, ver Figura 6) el cual produjo la separación de la parte sur de Sudamérica y África. Durante este tiempo se desarrolló casi totalmente una tectónica extensional de trasarco a lo largo del norte Chile, cuya subsidencia permitió la expansión de plataformas marinas carbonáticas, las cuales estuvieron conectadas con el protopacífico, a través de espacios laterales entre el arco volcánico (Spalletti *et al.*, 2000; Macdonald *et al.*, 2003). Como rasgos tectónicos importantes de este proceso, resaltan el Rift de Salta en el noroeste de Argentina y la cuenca trasarco de Chañarcillo, como se muestra en la Figura 5 (Salfity y Marquillas, 1994; Ramos y Alemán, 2000; Mourgues, 2004; entre otros). La Cuenca de Chañarcillo está representada por una potente cuña de sedimentos carbonáticos y clásticos (Grupo Chañarcillo), que forman una franja de más de 200 km de longitud a lo largo del límite oriental de la Cordillera de la Costa (Mourgues, 2007). Finalmente al terminar el Cretácico Inferior con la apertura del Océano Atlántico y la subsecuente separación de Sudamérica y África, se da comienzo a la deformación compresiva y la inversión de cuencas en el Sur de los Andes Centrales (Cobbold y Rosello, 2003; Zamora Valcarce *et al.*, 2006; Somoza y Zaffarana, 2008). Particularmente este tiempo marcó el comienzo de la deformación en la Cuenca de Chañarcillo (Amilibia, 2009; Peña *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2013).

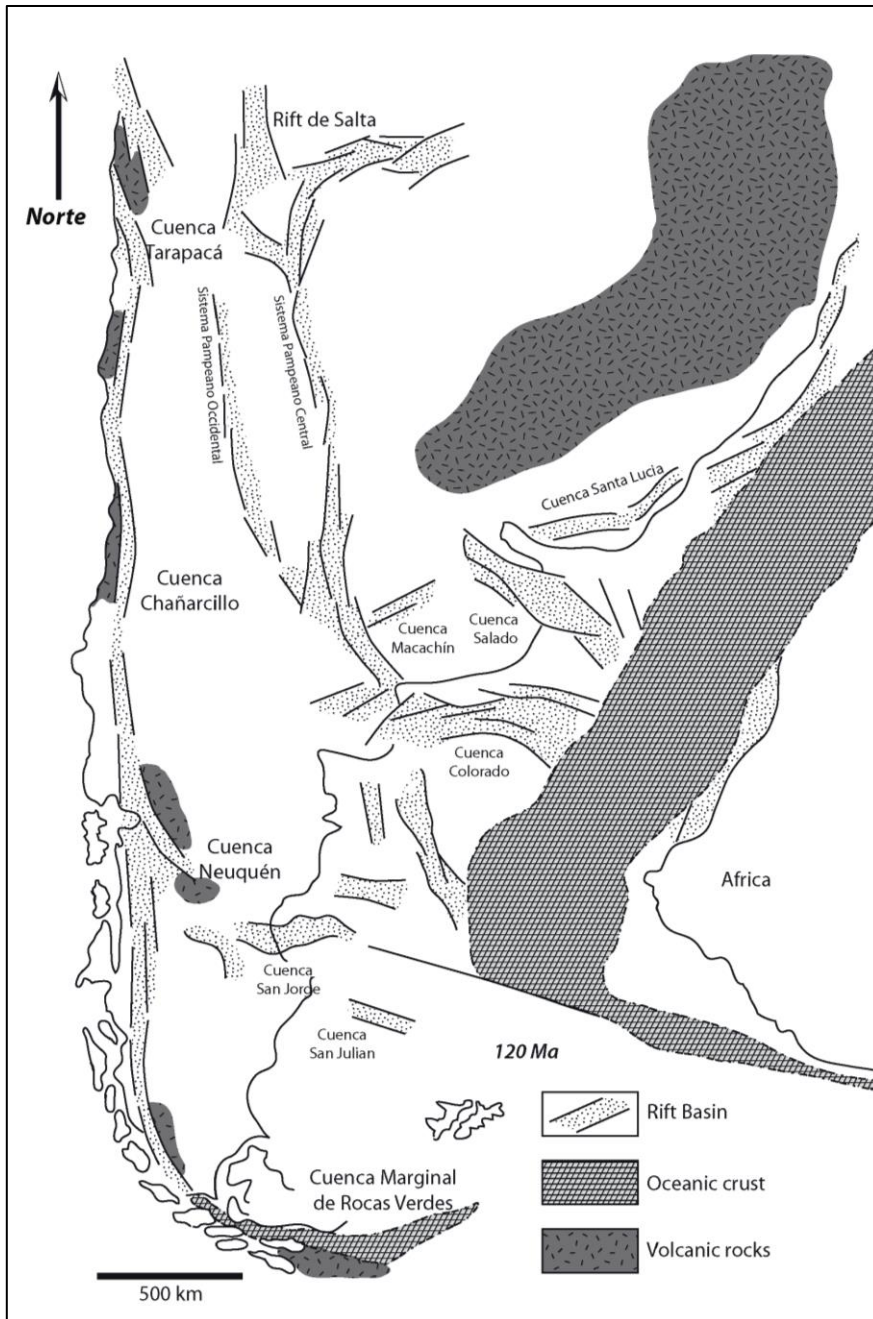


Figura 5. Principales sistemas de Rift desarrollados a partir de la ruptura y expansión del margen occidental de Gondwana, en el territorio Chileno y Argentino (Ramos y Alemán, 2000; modificado por Martínez *et al.*, 2013)

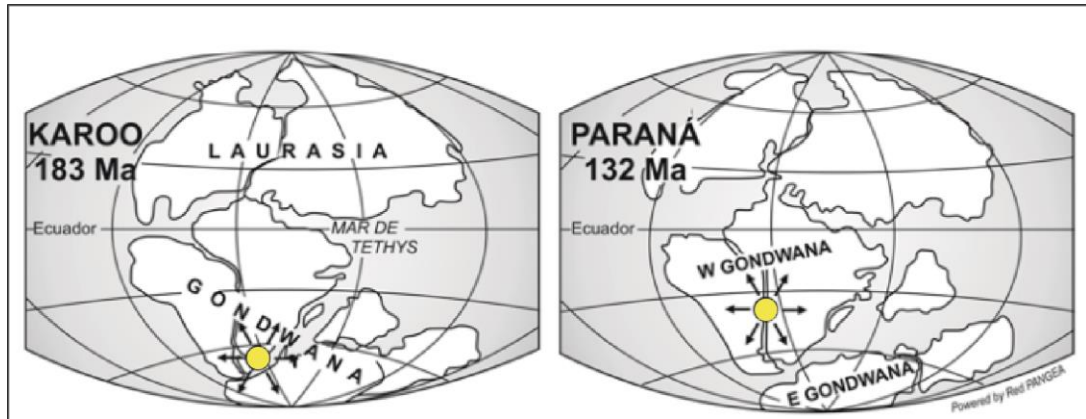


Figura 6. Se señalan los centros dispersores que gatillaron la ruptura continental en círculos amarillos. A la izquierda se muestra la fragmentación de Gondwana durante el Jurásico Temprano y a la derecha, el evento del Paraná separa América del Sur de África a fines del Jurásico e inicio del Cretácico. Modificado de Mpodozis y Ramos (2008).

## 2.2 Modelos estructurales propuestos para la Cuenca de Chañarcillo

Diversos autores han llevado a cabo perfiles estructurales. En ellos se muestran estilos estructurales, todos distintos entre sí, pero que respetan las condiciones de borde entregadas por la geología de superficie. La Figura 7, da cuentas de estas discrepancias. A continuación se presentan las ideas que estos autores desarrollaron acerca de la configuración de las estructuras de la Cuenca de Chañarcillo:

### 2.2.1 Geology and Ore Deposits of Central Atacama Province, Chile (Segerstrom, 1967)

El autor define la estructura principal de la cuenca como un anticlinal asimétrico de vergencia este al cual llamó “Anticlinorium de Tierra Amarilla” (Figura 7). En su descripción determinó que la asimetría de la estructura, está dada por los manteos más inclinados que presenta ésta en su flanco oriental, con respecto a los manteos más suaves que muestra la misma, hacia su flanco occidental. Por otro lado el autor señala como parte de la estructura de la cuenca, a un conjunto de fallas inversas de rumbo NNE y con alto ángulo de manteo que superan los  $45^\circ$ , las cuales son mejor expuestas hacia la zona norte de la cuenca. Dentro de este conjunto de estructuras resalta como la más importante, la Falla de Paipote.

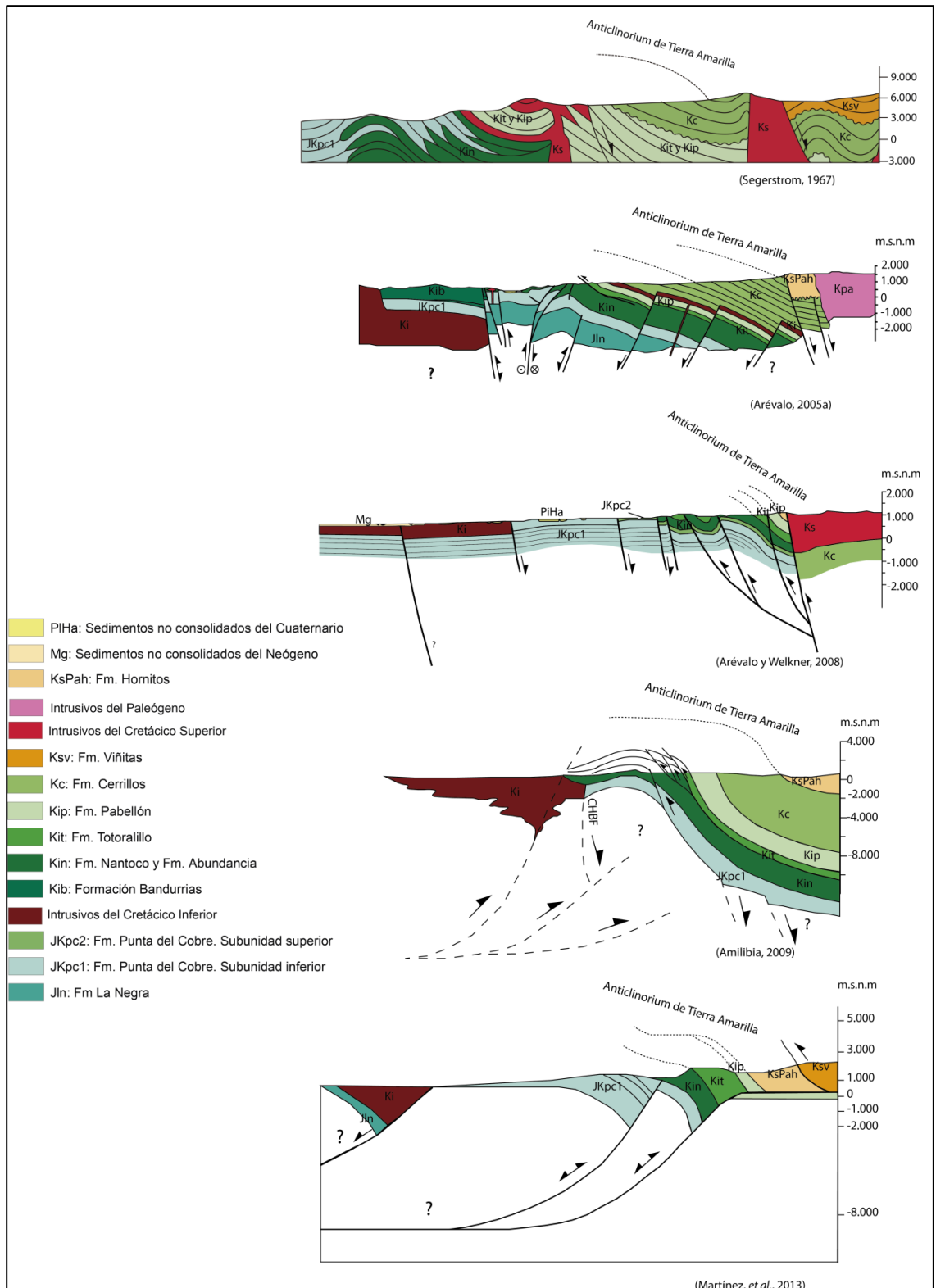


Figura 7. Perfiles estructurales realizados para la Cuenca de Chañarcillo. Modificados de Segerstrom (1967), Arévalo (2005a), Arévalo y Welkner (2008), Amilibia (2009) y Martínez *et al.* (2013).



### 2.2.2 Carta Copiapó y los Loros (Arévalo, 2005a, b)

El autor propone, en esta carta, que la Faja Plegada y Corrida de Paipote representa la estructura principal de la cuenca, la cual describe como un sistema estructural de flor positiva (Figura 7), que desplaza y deforma las secuencias del Cretácico Inferior y que de esta manera, genera el anticlinal de escala kilométrica conocido como Anticlinorium de Tierra Amarilla (Segerstrom 1960). Esta estructura es interpretada, por el autor, como un anticlinal de inversión producido por la reactivación contraccional de una falla normal preexistente, activa durante la depositación de las rocas calcáreas. Estas estructuras, producto de la deformación compresiva, se habrían formado durante un episodio de transpresión sinistral, en el Cretácico Superior temprano (93-80 Ma) (Arévalo y Grocott, 1997; Arévalo, 1999)

### 2.2.3 Carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008)

Al este del Anticlinorium de Tierra Amarilla (Figura 7) los autores han reconocido la presencia del Complejo Plutónico Los Morteros (69-61Ma) que está en contacto con rocas del Grupo Chañarcillo a lo largo de la Falla Agua de los Burros. En base a esta relación los autores describen la siguiente cinemática estructural para explicar la configuración actual de la cuenca en su extremo sur:

“El desplazamiento ‘plutón hacia abajo’ (Complejo Plutónico Los Morteros), es sinplutónico, dúctil, y permitió la depresión del piso plutónico en el colgante de la falla para generar el espacio en que se emplaza el plutón. El desplazamiento ‘plutón hacia arriba’ es más tardío, de más baja temperatura y está probablemente ligado a la contracción documentada por las fallas inversas y pliegues de vergencia occidental que desplazan las secuencias calcáreas adyacentes del Grupo Chañarcillo. Esta deformación más tardía coincide con la fase contraccional del Cretácico-Terciario”

### 2.2.4 Compressional deformation along the Chañarcillo basin west margin: North Chilean Late Jurassic-Early Cretaceous back-arc basin (Amilibia, 2009).

Lo que propone el autor es que durante la extensión que creó la Cuenca de Chañarcillo, se desarrolló un sistema de grábenes, limitados por fallas lítricas. Luego, durante la deformación andina, en el Albiano, ocurrió la inversión, donde la falla normal que limitaba el borde oeste de la Cuenca de Chañarcillo (CHBF, Figura 7), no pudo reactivarse e invertirse, lo que trajo como consecuencia la formación del Sistema de Falla de Paipote, el cual el autor lo interpretó como fallas inversas que transportaron hacia el este el *footwall* de la CHBF, desarrollando así el plegamiento del relleno de la cuenca, acomodando parte de la deformación en el limbo frontal este. El autor apoya su hipótesis gracias a que los depósitos continentales de la Formación Cerrillos muestran clastos de calizas metamorfizadas de la Formación Nantoco, lo que le hace pensar que la fuente de estos clastos debería estar en el margen oeste de la Cuenca de

Chañarcillo donde la Fm. Nantoco fue metamorfozada durante el emplazamiento de la complejos plutónicos en el Albiano. Esto indica que tuvo que haber una inversión en el Albiano que levantó y exhumó el borde oeste de la Cuenca de Chañarcillo.

#### 2.2.5 The structure of the Chañarcillo Basin: An example of tectonic inversion in the Atacama region, northern Chile (Martínez, *et al.*, 2013)

El autor propone que la falla maestra está ubicada en el borde este de la Cuenca de Chañarcillo (Figura 7). Esta se habría iniciado como una falla normal lístrica durante la depositación del relleno de la cuenca, dando paso a un arreglo estructural de hemigrábenes en dominó. Luego, en el evento compresivo K-T (Cornejo *et al.*, 2003), ocurriría la inversión de la cuenca, cambiando el sentido normal a inverso de la falla maestra, deformando las secuencias *syn-rift*, produciendo la expulsión de parte del relleno sedimentario, generando así el Anticlinorium de Tierra Amarilla definido por Segerstrom (1960).

### 2.3 Unidades Estratigráficas

Las Unidades estratigráficas, intrusivas y no consolidadas fueron descritas, principalmente, gracias a la integración de 4 cartas geológicas del SERNAGEOMIN: Blanco *et al.* (2003) (carta Castilla y Totoral Bajo), Arévalo (2005b) (carta Los Loros), Arévalo y Welkner (2008) (carta Carrizal Bajo-Chacritas) y Peña *et al.* (2013) (carta Yervas Buenas-Tres Morros). A continuación, en la Figura 8 y Figura 10 se muestra al mapa obtenido con su respectiva columna estratigráfica.

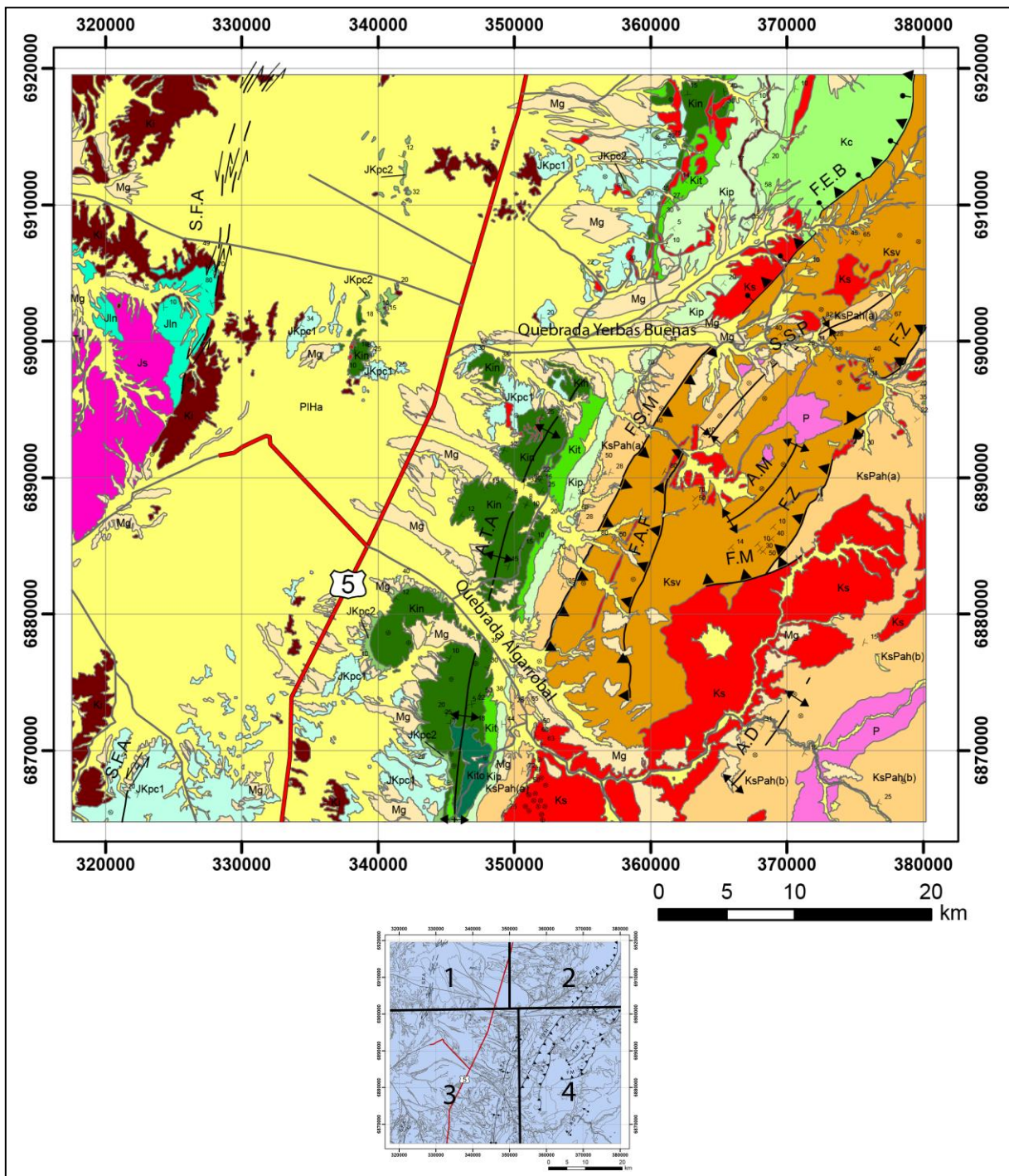




















Figura 8. Mapa geológico de la zona de estudio, realizado al combinar cuatro cartas geológicas. Modificado de 1) Blanco *et al.* (2003) (carta Castilla y Totoral Bajo), 2) Arévalo (2005b) (carta Los Loros), 3) Arévalo y Welkner (2008) (carta Carrizal Bajo-Chacritas) y 4) Peña *et al.* (2013) (carta Yervas Buenas-Tres Morros).

# Leyenda

## Unidades Estratificadas

	PIHa: Sedimentos no consolidados del Cuaternario
	Mg: Sedimentos no consolidados del Neógeno
	KsPah(b): Fm. Hornitos: El Molle
	KsPah(a): Fm. Hornitos: La Higuera
	Ksv: Fm. Viñitas
	Kc: Fm. Cerrillos
	Kip: Fm. Pabellón
	Kit: Fm. Totalillo
	Kin: Fm. Nantoco
	Kito: Estratos de Sierra El Toro
	JKpc2: Fm. Punta del Cobre. Subunidad superior
	JKpc1: Fm. Punta del Cobre. Subunidad inferior
	Jln: Fm La Negra

## Unidades Intrusivas

	P: Intrusivos del Paleógeno
	Ks: Intrusivos del Cretácico Superior
	Ki: Intrusivos del Cretácico Inferior
	Js: Diorita San Antonio (Jurásico)
	Tr: Granito Algodones (Triásico)

## Abreviaciones de Estructuras

S.F.A:	Sistema de Fallas de Atacama
A.T.A:	Anticlinorium de Tierra Amarilla
F.EB:	Falla Elisa de Bordos
F.S.M:	Falla Santa María
S.S.P:	Sinclinal Sierra Palmira
A.M:	Anticlinal La Menta
F.Z:	Falla el Zorro
F.M:	Falla del Medio
A.D:	Anticlinal el Desecho

## Simbología







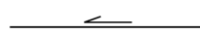





	Rumbo y manto de estratos
	Estratificación horizontal
	Estratificación vertical
	Falla invertida
	Falla inversa
	Traza inferida de falla de rumbo sinistral
	Falla de rumbo sinistral
	Traza inferida de plano axial anticlinal
	Traza de plano axial anticlinal
	Traza de plano axial sinclinal
	Caminos de ripio y tierra
	Ruta 5 Norte

Figura 9. Leyenda de la Figura 8 .

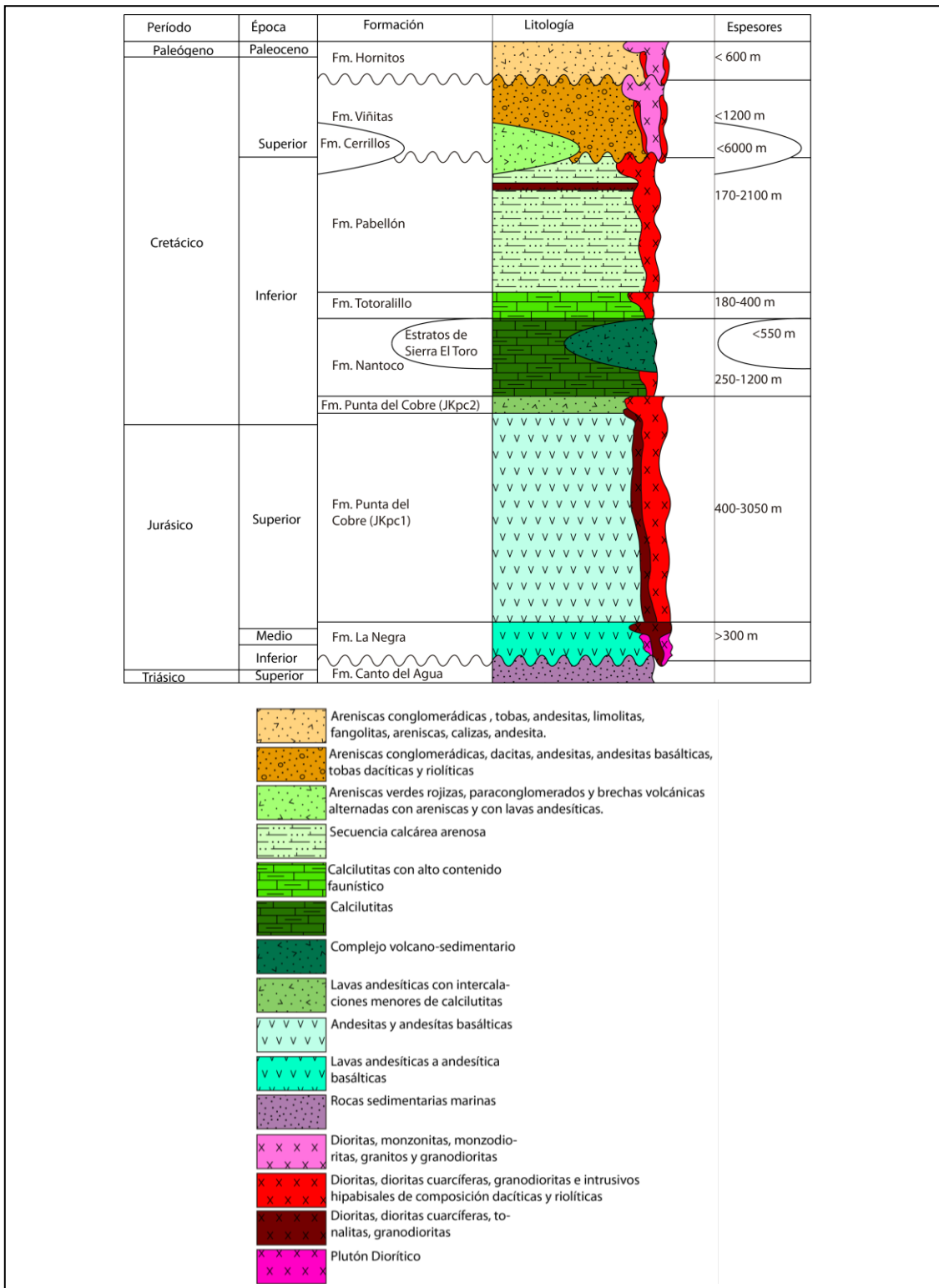


Figura 10. Columna estratigráfica de la zona de estudio junto con su respectiva simbología, que engloba todo lo escrito respecto a las Unidades Estratigráficas e Intrusivas.

## 2.3.1 Jurásico Inferior

### 2.3.1.1 Formación La Negra (Pliensbachiano-Jurásico Superior) (García, 1967)

Corresponde a una secuencia homogénea de 300 m de espesor mínimo, mayoritariamente compuesta de lavas andesíticas a andesitas basálticas afaníticas y porfídicas con fenocristales de plagioclasa. Su aspecto es macizo y de color rojizo, propio de meteorización. Sobreyace en contacto discordante sobre las areniscas de la Formación Canto del Agua, la cual está fuera del área de estudio. En la base presenta una intercalación con tobas soldadas, de composición dacítica ricas en cristales de plagioclasas. Se encuentra intruida por la Diorita San Antonio e Intrusivos de Cretácico Inferior como se muestra en la Figura 8 (Arévalo y Welkner, 2008). En la carta Castilla y Totoral Bajo, Blanco *et al.* (2003) menciona que la Fm. Tendría un espesor mínimo de 546 m.

## 2.3.2 Jurásico Superior-Cretácico Inferior

### 2.3.2.1 Formación Punta del Cobre (Jurásico Superior-Valanginiano) (Segerstrom y Ruiz, 1962)

La Fm. Punta del Cobre, para fines de este estudio, se separó en dos unidades debido a que las cuatro cartas geológicas que contienen esta formación (Carrizal Bajo-Chacritas, Yervas Buenas-Tres Morros, Castilla y Carrizal Bajo y Los Loros) no tienen un consenso en relación a las subdivisiones. Además esta subdivisión presenta ventajas al momento de considerarlas en el modelamiento gravimétrico, debido a que, en términos generales, en la separación se consideró una diferencia litológica importante. La subunidad inferior está compuesta principalmente por lavas andesíticas y andesitas basálticas, donde la base presenta tobas arenosas y soldadas, el techo, a su vez, presenta una serie clástica formada por brechas tobáceas y conglomerados. La subunidad superior corresponde a lavas andesíticas con intercalaciones menores de calcilitas bioclásticas, además de lutitas. En la Carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008) la primera subunidad tendría un espesor de 2900 m y en la segunda, unos 150 m. En la Carta Yervas Buenas-Tres Morros (Peña *et al.*, 2013) la potencia total es de 400 m. Un estudio más detallado, realizado 40 km al norte, fuera de la zona de estudio, fue desarrollado por Marschik y Fontboté (2001), los cuales proponen, por lo menos, un espesor total de 1300m. De acuerdo a sus relaciones de contacto subyace de manera concordante a las calizas de la Formación Nantoco. En el mapa (Figura 8), su relación de base no está expuesta, pero más al sur, en la carta de Freirina-El Morado (Welkner *et al.*, 2006), capas volcanoclásticas de esta Formación sobreyacen, de manera concordante a la Fm. La Negra. Es importante mencionar que en la Carta Los Loros se reportan coladas lenticulares de lavas andesítico basálticas con *pillows*.

### 2.3.3 Cretácico Inferior

#### 2.3.3.1 Estratos de Sierra El Toro (Barremiano)

(Arévalo y Welkner, 2008)

Es un complejo volcano-sedimentario lenticular, de unos 550 m de espesor máximo. Sobreyace de manera concordante a calizas del Miembro Inferior de la Fm. Nantoco y subyace a calizas del Miembro Superior de la Fm Nantoco, Totalillo y Pabellón.

#### 2.3.3.2 Grupo Chañarcillo (Hauteriviano Superior-Aptiano)

(Segerstrom y Parker, 1959)

Compuesta por secuencias marinas carbonatadas del Cretácico Inferior que se disponen en concordancia con la Fm. Punta del Cobre, este Grupo incluye a las Formaciones Abundancia, Nantoco, Totalillo y Pabellón. Todas ellas son concordantes entre sí. En la zona de estudio no aflora la Fm. Abundancia (Figura 8). Es importante mencionar que para el Grupo Chañarcillo se ha encontrado un espesor considerable de 4000 m, hacia el norte del área de estudio, a lo largo del río Copiapó (Biese, 1942; Mourgues, 2004 y 2007).

- Formación Nantoco (Hauteriviano)  
(Biese-Nickel in Hoffdtetter *et al.*, 1957)

En la carta de Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008) se compone de calcilutitas homogéneas y en el techo de brechas macizas y calcilutitas grises oscuras. En la carta Yervas Buenas-Tres Morros (Peña *et al.*, 2013), está formada por calizas grises, calizas bituminosas que gradan a calcilutitas y lutitas calcáreas hacia el techo, alcanzando un espesor de 250 m, aun así, en la Carta Los Loros (Arévalo, 2005b) se describe que al norte de la presente zona de estudio, la Fm. Nantoco tendría un espesor entre 800 a 1200m, disminuyendo notablemente al sur hasta reducirse a unas pocas decenas de metros. La presencia de calcilutitas y calizas grises bituminosas indica que se habrían formado como depósitos carbonatados de ambiente submareal profundo.

- Formación Totalillo (Barremiano)  
(Biese-Nickel in Hoffdtetter *et al.*, 1957)

Su color de meteorización amarillento o rosado, el aspecto bien estratificado y su alto contenido faunístico son características de la unidad. En la Carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008) corresponde a calcilutitas margosas y en la Carta Yervas Buenas-Tres Morros (Peña *et al.*, 2013) se presenta como una secuencia de lutitas y calcilutitas de alrededor de 400 m de espesor, valor que, en la Carta Los Loros (Arévalo, 2005b), corresponde entre 180 a 300m. Se interpreta producto de un evento regional de transgresión marina.

- Formación Pabellón (Aptiano)  
(Biese-Nickel in Hoffdtetter *et al.*, 1957)

En la Carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008) se presenta como una secuencia calcárea y clástica, compuesta por calizas bioclásticas intercaladas con horizontes de chert. Luego son sucedidas por 50-100 m de calizas margosas amarillentas y finalmente un paquete homogéneo de calcarenitas grises oscuras son intercaladas por niveles lenticulares de areniscas y areniscas conglomerádicas. En la Carta Yervas Buenas (Peña *et al.*, 2013) está compuesta por un espesor reducido de 60 m de calcilutitas y lutitas, 80 m de areniscas calcáreas y calizas fosilíferas y biomicríticas y finalmente 30 m de areniscas calcáreas terminan con un techo de areniscas limolíticas calcáreas, dando así un espesor aproximado de 170 m. En la carta los Loros (Arévalo, 2005b) se describe como una secuencia calcárea arenosa, en parte volcánica, de 550 a 2100m de espesor. Se interpreta como una transición desde un ambiente distal a otra más somera o cercano a la línea de olas.

#### 2.3.3.3 Formación Cerrillos (Albiano-Turoniano). (Segerstrom y Parker, 1959)

Secuencia sedimentaria, volcánica y continental que yace en discordancia de erosión sobre la Formación Pabellón y está cubierta en discordancia angular por la Formación Viñitas. El espesor estimado de la secuencia es de alrededor de 6000 m, aunque en la carta Copiapó de Arévalo (2005a) se ha estimado en alrededor de 4000 m. La secuencia inferior consiste de aproximadamente 2.300 m de areniscas verde rojizas mientras que la sección superior incluye un espesor mínimo de 3.500 m de paraconglomerados y brechas volcánicas alternadas con areniscas grises rojizas, y con lavas andesíticas. La edad fue asignada por relaciones de contacto ya que no posee fósiles de valor cronoestratigráfico (Arévalo, 2005b)

#### 2.3.4 Cretácico Superior- Paleoceno

##### 2.3.4.1 Formación Viñitas (Santoniano-Campaniano) (Aguirre y Egert, 1965, emend Emparan Y Pineda, 1999)

Se ocupó la definición dada en la Carta Yervas Buenas –Tres Morros (Peña *et al.*, 2013) por ser el trabajo más actualizado y se expandió arealmente, según las relaciones de continuidad, a las cartas Los Loros (Arévalo, 2005b) y Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008) con las cuales limitaba en sus bordes norte y oeste, respectivamente (Figura 8).

Esta unidad se encuentra en discordancia angular sobre la Fm. Pabellón y es sobreyacida en suave discordancia angular por la Fm. Hornitos. Consiste de base a techo en: areniscas de grano medio, areniscas conglomerádicas volcanoclásticas, dacitas, andesitas, andesitas basálticas, areniscas rojas, areniscas conglomerádicas, conglomerados y tobas dacíticas y riolíticas. Tiene un espesor de hasta 1200 m en la quebrada Yervas Buenas. Los depósitos sedimentarios corresponden a un ambiente volcanosedimentario continental.



#### 2.3.4.2 Formación Hornitos (Campaniano- Daniano) (Segerstrom, 1959; enmend Peña, 2013)

Secuencia volcanosedimentaria que se encuentra en discordancia sobre las Formaciones Pabellón y Viñitas y que subyace, también en contacto discordante, a las Gravas de Atacama. Esta unidad se separa en dos unidades litoestratigráficas contemporáneas, pero de distinta naturaleza depositacional (Peña *et al.*, 2013).

- **Facies La Higuera:**  
En la base presenta conglomerados y areniscas conglomerádicas verdosas, cubiertas por tobas líticas riolíticas, tobas vítreas, areniscas rojas con intercalaciones de areniscas conglomerádicas, andesitas, limolitas y fangolitas que gradan a areniscas, calizas y lutitas calcáreas, areniscas grises con intercalaciones de andesita, grauvacas y conglomerados brechosos. El espesor máximo de esta unidad es de unos 600m. Se interpreta como depósitos de llanura de inundación y depósitos lacustres, además la presencia de tobas sugieren depósitos de caída distales respecto a la fuente volcánica que los originó. Se encuentra limitada en el mapa (Figura 8) entre el Grupo Chañarcillo y la Fm. Viñitas, y también entre la Fm. Viñitas y los Intrusivos del Cretácico Superior.
- **Facies El Molle:**  
De base a techo está constituido principalmente por tobas cristalinas, riolitas cuarcíferas, tobas riolíticas soldadas líticas, tobas dacíticas con fiammes, tobas cristalinas líticas, tobas pumíceas, tobas riolíticas cristalinas, riolitas, lavas andesíticas, tobas soldadas con fiammes y tobas cristalinas dacíticas. El espesor de esta facie varía entre los 2500 a los 3000 m. Los depósitos indican una relación más proximal a la fuente volcánica, representando así un ambiente depositacional de oleada piroclástica. Se encuentra en el mapa (Figura 8) limitada desde el noroeste por los intrusivos del Cretácico Inferior hasta el borde de la zona de estudio al oriente.

### 2.4 Unidades Intrusivas

#### 2.4.1 Triásico

##### 2.4.1.1 Granito Algodones (203-199 Ma) (Arévalo y Welkner, 2008)

Aflora en la parte occidental del mapa. En la carta Carrizal Bajo-Chacritas (Arévalo y Welkner, 2008) se observa una planta elipsoidal y de eje mayor NE. Se reconocen facies félsicas compuestas por monzogranitos y granodioritas de anfíbola y biotita, además de unas facies más máficas integradas por dioritas cuarcíferas de anfíbola y biotita.

## 2.4.2 Jurásico Superior

### 2.4.2.1 Diorita San Antonio (152 -149 Ma)

(Arévalo y Welkner, 2008)

Corresponde a un plutón diorítico homogéneo de planta elipsoidal y de eje NNE. En las cartas Castilla y Totoral Bajo (Blanco *et al.*, 2003), afloramientos de esta unidad fueron descritos como Diorita Canto del Agua, término que fue desestimado por Arévalo y Welkner (2008).

## 2.4.3 Cretácico Inferior

Las rocas intrusivas agrupadas según este rango de edad se encuentran en la mitad oeste de la zona de estudio e intruyen las unidades estratificadas de las Formaciones La Negra, Punta del Cobre y Pabellón, también intruyen a la Diorita San Antonio del Jurásico Superior. Estas rocas están compuestas principalmente por dioritas, dioritas cuarcíferas, tonalitas y granodioritas. Se ubican en franjas con edades progresivamente menores hacia el este y estas fluctúan entre los 143 y 120 Ma. Este grupo es integrado por 9 intrusivos, de los cuales uno es importante considerarlo y corresponde a la Diorita Cuarçífera Barros Luco, la cual tiene un rango de edad entre 130-120 Ma, y se ubica a lo largo de la traza del Sistema de Fallas de Atacama (SFA) que lo pone en contacto con la Fm. La Negra (ver Figura 8). Blanco *et al.* (2003) sugiere que esta unidad se habría emplazado en forma sintectónica a la actividad transcurrente del SFA (Blanco *et al.*, 2003; Arévalo, 2005b; Arévalo y Welkner 2008 y Peña *et al.*, 2013).

## 2.4.4 Cretácico Superior

Las rocas intrusivas de esta edad se encuentran en la mitad este de la zona de estudio e intruyen a las rocas estratificadas de la Fm. Punta del Cobre, Grupo Chañarcillo, Fm. Cerrillos, Fm. Viñitas y Fm. Hornitos (Figura 8). Además, están compuestas, principalmente, por dioritas, dioritas cuarcíferas, granodioritas e intrusivos hipabisales de composición dacíticas y riolíticas. Se disponen en franjas con edades progresivamente menores hacia el este y estas fluctúan entre los 99 y 66 Ma (Blanco *et al.*, 2003; Arévalo, 2005b; Arévalo y Welkner, 2008 y Peña *et al.*, 2013).

## 2.4.5 Paleógeno

Este grupo está compuesto por dos cuerpos intrusivos llamados Plutón El Sauce y el Complejo Plutónico Salitral. El primero consiste en un conjunto de granodioritas, que intruyen a las Formaciones Viñita y Hornitos, así como a intrusivos del Cretácico superior. Posee una morfología irregular, además de filones de granodiorita de orientación NE-SW. Le corresponde una edad aproximada de 56 Ma. El segundo corresponde a un conjunto de dioritas, monzonitas, monzodioritas, granitos y

granodioritas que intruyen a la Formación Hornitos. En planta muestra una forma elongada con su eje máximo de elongación de rumbo NE y se ubica en la parte sureste del mapa (Figura 8). Su rango de edad varía entre los 54-51 Ma (Peña *et al.*, 2013).

## 2.5 Unidades no Consolidadas

### 2.5.1 Neógeno

Este grupo de unidades está formado por las Gravas de Atacama, Gravas de Totoral y los depósitos aluviales y coluviales antiguos. El primero tiene una edad del Mioceno Medio y está constituido por gravas, ripios y arenas polimícticas, mal a medianamente consolidadas. Se reconocen como terrazas remanentes (Arévalo y Welkner, 2008). El segundo solo se encuentra en la parte noroeste del mapa (Figura 8) en las quebradas que forman los intrusivos de Cretácico Inferior. Es una unidad informal con una edad del Mioceno Inferior y corresponde a depósitos de bloques, gravas, arenas y limos, pobremente consolidados (Blanco *et al.*, 2003). El tercero tiene una edad Mioceno Superior-Plioceno y está constituido por conos aluviales, depósitos coluviales y llanuras de inundación (Arévalo y Welkner, 2008).

### 2.5.2 Cuaternario

En este período se incluyen rocas y depósitos no consolidados que presentan una amplia distribución en la región. Incluyen depósitos coluviales, aluviales, de remociones en masa, eólicos y fluviales (Arévalo y Welkner, 2008).

## 2.6 Rasgos estructurales

Diversos rasgos estructurales afectan a distintos Dominios dentro de la zona de estudio. En el Dominio de la Cordillera de la Costa se encuentran sistemas de fallas de rumbo de sentido sinistral, que pertenecen al Sistema de Fallas de Atacama (SFA), las cuales estarían deformando unidades intrusivas occidentales del Jurásico Superior y Cretácico Inferior, como también a las Formaciones La Negra y Punta del Cobre. En el Dominio Central, compuesto por la Cuenca de Chañarcillo, sobresale el Anticlinorium de Tierra Amarilla que deforma las secuencias sedimentarias del Grupo Chañarcillo. Luego, en el Dominio de la Cordillera Frontal, se expone la Falla Santa María, que corresponde a un corrimiento de vergencia oeste, que levanta a la Fm. Viñitas sobre la Fm. Hornitos (Peña *et al.*, 2013). Esta falla, más al norte, correspondería a la Falla Elisa de Bordos, la cual se trataría de una falla invertida (Martínez *et al.*, 2013) de vergencia este. Otro rasgo dentro de este Dominio es el Sinclinal de Sierra de Palmira que afecta a rocas sedimentarias de la Fm. Hornitos, cuyo rumbo varía entre NE-SW y NNE-SSW. A escala local, al este del sinclinal se observa el Anticlinal La Menta cortado al este por la Falla El Zorro de naturaleza inversa y manteo de 30° al oeste. Internamente la Fm. Viñitas se encuentra dislocada al este de la Falla Santa María por la Falla Agua de la Falda de vergencia este (Peña *et al.*, 2013).

### 3 CAPÍTULO: METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos de este trabajo, se realizaron diversas tareas ligadas con análisis de datos geofísicos y geológicos. La primera de ellas consistió en una recopilación bibliográfica, en donde fueron revisados mapas geológicos del SERNAGEOMIN en distintas escalas, tesis de pre y post grado, así como información contenida en revistas científicas. La idea de este proceso fue recabar la mayor cantidad de antecedentes geológicos y de estudios geofísicos desarrollados en el área de estudio. Como segunda tarea se desarrolló una campaña de terreno en la cual se obtuvieron un conjunto de datos gravimétricos a lo largo de dos transectas de más de 30 km de longitud. Durante esta etapa también fueron recolectadas un conjunto de muestras de mano correspondientes a las unidades geológicas aflorantes para la determinación de densidad, así como también nuevos datos de manteos.

Posteriormente al trabajo de terreno se desarrollaron tareas de gabinete, donde se analizaron los datos gravimétricos obtenidos y se confeccionaron los perfiles asociados a las transectas levantadas. Por otro lado, se determinaron las densidades de las muestras de roca recolectadas. Finalmente se integró toda la información para realizar un modelamiento 2D e interpretación de la geometría estructural de la Cuenca Chañarillo soportada por dos perfiles estructurales.

#### 3.1 Adquisición de datos.

La campaña de terreno se realizó entre los días 16 y 21 de Julio del año 2014, a unos 60 km al sur de la ciudad de Copiapó (Figura 11). En esta fecha se adquirieron datos gravimétricos a lo largo de dos transectas este-oeste, definidas en este estudio como, transecta norte y transecta sur, las cuales fueron dispuestas de forma transversal a la orientación regional de la cuenca y de sus estructuras de primer orden (Figura 11). Esta campaña se realizó con el apoyo de un equipo de geofísicos del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile compuesto por los drs. Andrei Maksymowicz y Daniel Díaz. La logística de esta etapa, se logró utilizando una camioneta 4x4, un GPS doble diferencial marca Topcon y modelo Hiper V, un gravímetro G-411 La Coste & Romberg y una serie de equipos menores de terreno. Las transectas para adquisición de datos gravimétricos se realizaron aprovechando los caminos dispuestos para el ingreso a faenas mineras, con una posición transversal al rumbo de las estructuras y unidades geológicas presentes. La transecta norte (Figura 11), de 44 km de longitud, consiste de 85 puntos espaciados cada 500 m, mientras que la transecta sur, de 30 km de largo, está compuesta por 36 puntos espaciados cada 1000 m. Cada transecta se realizó en un período de dos días, midiendo puntos gravimétricos y de GPS en una misma estación base, al comenzar y terminar cada jornada, con el fin de medir la deriva instrumental.

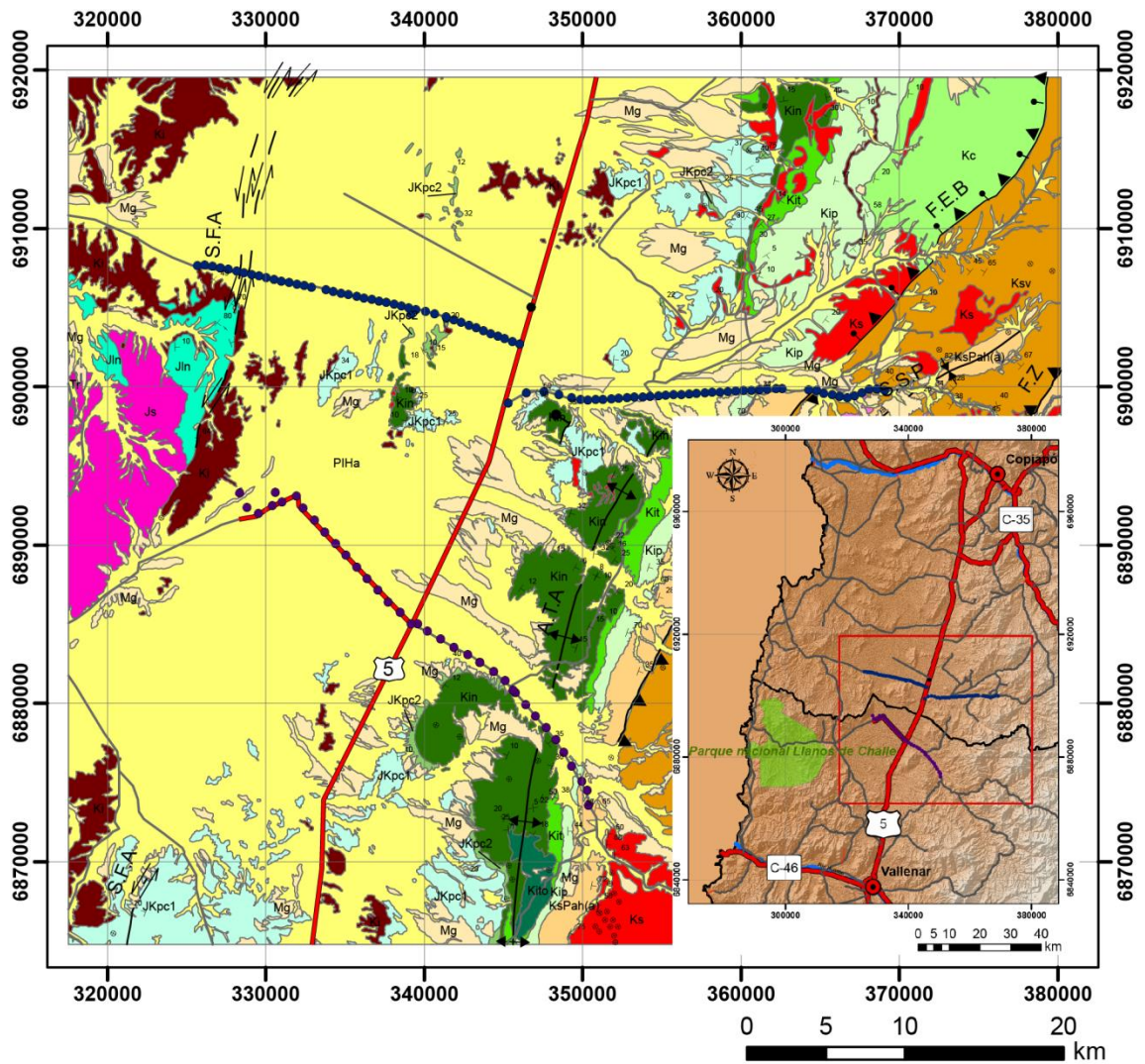


Figura 11. Mapa principal indicando la disposición de las transectas Norte y Sur, representadas por los puntos azules y morados, respectivamente. El punto negro sobre el perfil Norte indica el punto Base. En la parte inferior derecha se muestra un mapa de ubicación y accesos de la zona de estudio. Para ver información de la leyenda del mapa geológico ir a la Figura 9. Ir la Figura 4 para observar con mayor detalle la imagen de la ubicación.

## 3.2 Gravimetría

### 3.2.1 Fundamento Teórico

Una de las fuerzas básicas de la naturaleza es la atracción entre las masas. Esta atracción es llamada la fuerza de gravedad. De acuerdo a la ley de Newton, la fuerza de gravedad entre dos masas puntuales cualesquiera está dada por:

$$F = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{r^2}$$

Dónde:

- $G = 6.673 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$ ; *Constante de Gravitación Universal.*
- $M_1$  y  $M_2$  *corresponden a dos masas en kg.*
- $r$  *es la distancia entre las masas puntuales en metros.*

El resultado de la aceleración  $a$  de la masa  $M_1$ , está dada por:

$$\frac{F}{M_1} = a = \frac{G \cdot M_2}{r^2} \text{ en } \frac{m}{s^2}$$

Se sabe que la masa de un objeto está relacionada con su volumen  $V$ , y su densidad  $\rho$  de la siguiente manera:

$$M = \rho \cdot V$$

Además, si el objeto no tiene una densidad uniforme, la aceleración gravitacional que él ejerce sobre otros cuerpos está dada, vectorialmente, por:

$$\vec{a} = G \int \frac{\rho \cdot \vec{r}}{r^3} dv$$

Integrando sobre el volumen del objeto.

Así, la atracción gravitacional de un cuerpo de densidad no homogénea varía, punto a punto, en respuesta a la distribución de la densidad dentro del cuerpo. Por esta razón, medidas de variación, con la respectiva localización, de la atracción gravitacional de la Tierra puede proveer información de valor acerca de la geología del subsuelo. Esta es la base para la teoría y la práctica de medidas gravimétricas (Seigel, 1995).

### 3.2.2 Instrumentación utilizada.

Los instrumentos utilizados para la adquisición de datos gravimétricos y posicionamiento de las estaciones fueron: un gravímetro G-411 La Coste & Romberg y un GPS doble diferencial de marca Topcon y modelo Hiper V. El primero corresponde a un gravímetro relativo, el cual no entrega el resultado en mgal y tiene una lectura máxima de 7000 UL alcanzando una resolución de 0.01mgal. La conversión a mgal de las lecturas obtenidas con este equipo es realizada por medio de una tabla estándar proporcionada por el fabricante (ver Anexo A). El segundo equipo entrega las coordenadas de los puntos medidos con una precisión en la vertical de 4 mm. Este equipo tiene dos GPS, uno se dejaba en la estación base durante toda la jornada de

trabajo y el otro iba en la camioneta realizando las mediciones en cada parada. Se justifica la utilización de este GPS ya que entrega datos muy precisos acerca de la altura, valor muy importante con el cual se realizaron ciertas correcciones, como se verá más adelante. Ambos instrumentos fueron facilitados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

### 3.2.3 Procesamiento de Datos

Una vez finalizada la campaña de terreno, se realizó el procesamiento de datos gravimétricos, el cual comprendió dos etapas: la primera consistió en determinar la gravedad medida en cada uno de los puntos de las transectas realizadas, y en la segunda se obtuvieron los valores teóricos de gravedad aplicando un modelo estándar. El objetivo final en este proceso, es contrastar los resultados de ambas etapas y generar una Anomalía Residual, la cual corresponde a la presencia de cuerpos en el subsuelo de distintas densidades, que no se consideraron en el modelo estándar (Honores, 2013).

#### 3.2.3.1 Gravedad medida ( $g_m$ )

A los datos gravimétricos obtenidos es necesario hacerles algunas consideraciones. Primeramente para empezar a trabajar es necesario convertirlos a mgal, así como eliminar el efecto de las mareas y la deriva instrumental, y finalmente, asignarles un valor de gravedad absoluta. Para convertir a mgal las mediciones efectuadas, se ocupó una tabla (ver Anexo A) obtenida del manual del instrumento. Según la tabla, los valores de la lectura siguen una relación lineal, entre dos puntos consecutivos, con los valores equivalentes en mgal, como se muestra en la siguiente Figura 12.

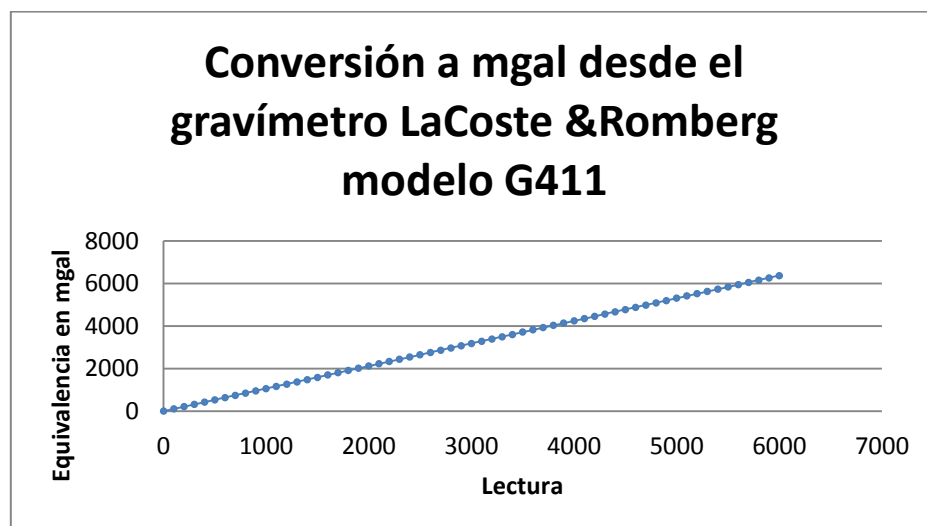


Figura 12. Relación entre la lectura vista en terreno con su respectiva equivalencia en mgal.

La atracción gravitacional del sol, y principalmente de la luna, causan cambios en las mediciones de gravedad. Esto se observa cuando, para un mismo punto a medida que pasa el tiempo, las lecturas van cambiando como se muestra en la Figura 13. Este efecto puede llegar a contribuir aproximadamente  $\pm 0.3$  mgal en una medición, y es necesario aislarlo para hacer comparables las lecturas entre días distintos. Para realizar esta corrección se utilizó un programa en C++ basado en las fórmulas de Longman (1959) (Seigel, 1995).

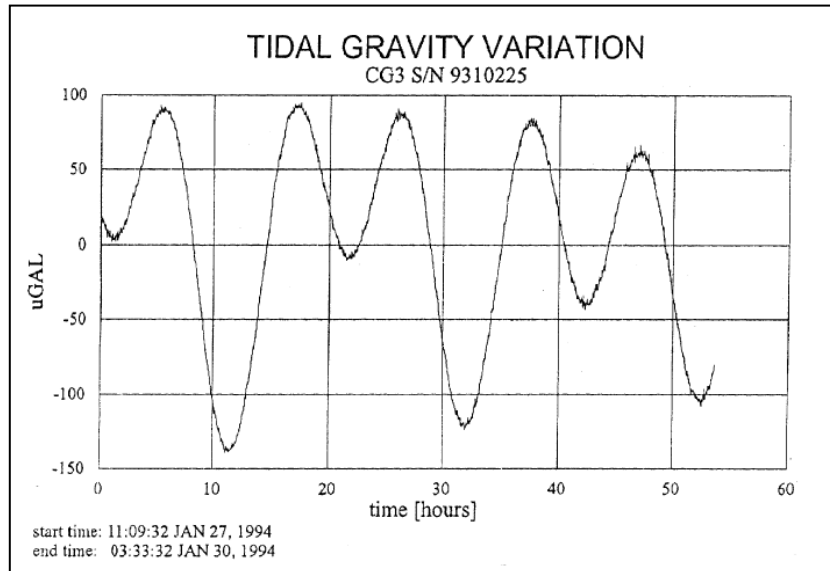


Figura 13. Se muestra las variaciones de gravedad debido al efecto de mareas. Tomado de Seigel (1995).

Como se mencionó anteriormente, al empezar y terminar cada jornada se midió con el gravímetro en un mismo punto base todos los días. Esto se realizó para tener un control del instrumento, ya que luego de realizar las correcciones por mareas las mediciones efectuadas en el mismo punto base deberían ser iguales, pero en la realidad no lo son. Esto se explica considerando la sensibilidad del gravímetro, ya que éste es afectado por cambios de temperaturas, clima, movimientos durante el viaje, fatiga de los mecanismos internos del mismo, entre otras cosas. Una manera de realizar esta corrección es graficando las mediciones (ya corregidas por mareas) versus el tiempo respectivo de una jornada, como se muestra en la Figura 14. Luego se obtendrá una recta realizada solo con las dos mediciones de los puntos base de la cual se calculará la pendiente. La corrección consiste en que a cada medición se le restará el valor del producto entre la pendiente y el tiempo que corresponde al punto al cual se le está aplicando la corrección (Seigel, 1995; Estrada, 2012).



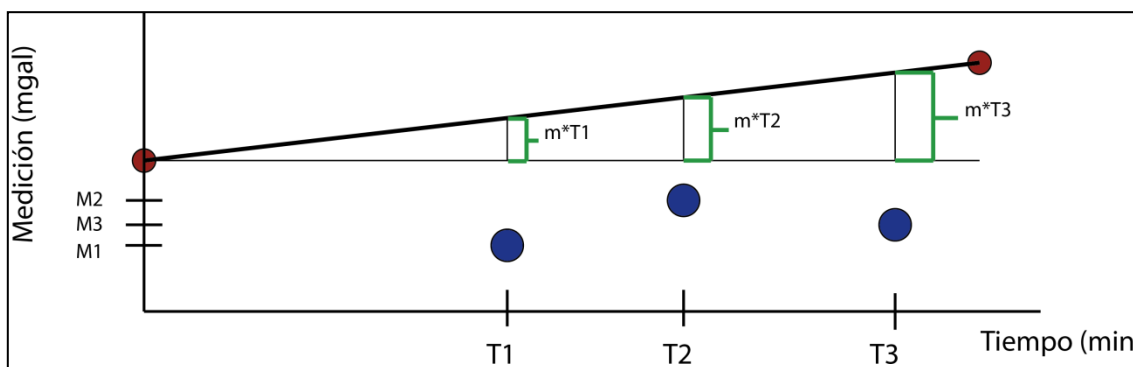


Figura 14. Gráfico simplificado para ilustrar la corrección por deriva instrumental, donde los puntos bases son representados por puntos rojos y los azules corresponden a las mediciones realizadas en terreno. Además "m" significa la pendiente de la recta. La corrección para cada punto corresponde a:  $M1 - m \cdot T1$ ,  $M2 - m \cdot T2$  y  $M3 - m \cdot T3$  (Estrada, 2012).

Finalmente, luego de convertir los datos a mgal, y corregidos por mareas y por deriva instrumental se procedió a obtener la aceleración de gravedad absoluta para cada punto. Para esto se ocupó la siguiente fórmula:

$$g_{iA} = g_{0A} + (g_{im} - g_{0m})$$

Dónde:

$g_{iA}$ : Gravedad absoluta en el punto de medición  $i$

$g_{0A}$ : Punto de gravedad absoluta de la Estación Base

$g_{im}$ : Gravedad medida en el punto de medición  $i$

$g_{0m}$ : Gravedad medida en la Estación Base

La gravedad absoluta que se consideró para la Estación Base es de 977631.11 mgal. Este valor proviene de la Corrección por Latitud, de aire Libre, de Bouguer y Topográfica, las cuales se explicarán, más adelante. Si bien este valor no es del todo correcto para llamarlo Gravedad Absoluta, si es una buena aproximación, además es importante mencionar que se puede prescindir de este último paso ya que se obtendría la misma curva de Anomalía Residual, pero aun así, se hizo para obtener una curva de Anomalía Completa de Bouguer en un rango de valores de mgal aceptables.

### 3.2.3.2 Gravedad estándar ( $g_s$ )

Luego de obtener los valores de gravedad medida, es necesario que estos sean comparados con valores teóricos, es decir, comparar el valor obtenido versus el valor que se esperaría encontrar asumiendo un modelo teórico. El valor que se esperaría encontrar corresponde a la suma de diversos procedimientos llamados correcciones gravimétricas, las cuales comprenden a las correcciones: por latitud, por aire libre, de Bouguer y topográfica. Si este valor es igual al respectivo valor de gravedad medida, el modelo de subsuperficie es correcto, de lo contrario, existe una anomalía que corresponde a cuerpos de distintas densidades que no se han considerado (Honores, 2013).

- Corrección por Latitud ( $g_t$ )

Debido a la forma de la Tierra, ésta no presenta un radio constante, por lo tanto hay un cambio en el valor de gravedad por el simple hecho de que algunos puntos de la superficie están más cerca del centro de masa que otros. Además, como la Tierra gira, se genera una fuerza dirigida hacia el exterior que es proporcional a la distancia del eje y a la velocidad de rotación (Estrada, 2012; Honores, 2013). Para corregir por este efecto se utilizó la última expresión matemática definida por la IAG (*International Association of Geodesy*) conocida como gravedad normal o gravedad teórica, la cual considera el sistema de referencia WGS84 (*World Geodetic System 1984*):

$$g_t = 9.7803267714 \left( \frac{1 + 0.00193185138639 \sin^2 \lambda}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \sin^2 \lambda}} \right)$$

Donde  $g_t$  tiene unidades de  $\frac{m}{s^2}$ , y  $\lambda$  corresponde a la latitud en grados decimales. La latitud norte y sur se representa con un signo positivo y negativo respectivamente. Cabe mencionar que, en términos simples, este valor corresponde al de la gravedad que esperaríamos encontrar en una latitud  $\lambda$ .

- Corrección de Aire libre ( $g_{al}$ )

Para este análisis basta suponer la Tierra como una esfera sin rotación, dando como resultado el siguiente valor de gravedad:

$$g = -G \frac{M}{r^2}$$

Donde  $M$  es la masa de la Tierra y  $r$  es la distancia del centro de la Tierra al punto de medición. Si la altura sobre el nivel de referencia (elipsoide equipotencial con forma normal a la Tierra) cambia, por ejemplo, por la topografía, la gravedad será distinta por el solo hecho de que cambia la distancia al centro de la Tierra (Estrada, 2012; Honores, 2013). La fórmula comúnmente usada, es:

$$g_{al} = 0.3086h$$

Donde  $g_{al}$  se mide en mgal y  $h$  es la altura, en metros, respecto al elipsoide equipotencial con forma normal a la Tierra.

- Corrección de Bouguer ( $g_b$ )

La corrección anterior solo considera la diferencia de altura en relación al nivel de referencia, sin tomar en cuenta el efecto gravitatorio del material que se encuentra entre medio. Para modelar este efecto se considera una placa de espesor  $h$ , de extensión lateral infinita (Estrada, 2012; Honores, 2013) como se ilustra en la siguiente Figura 15.

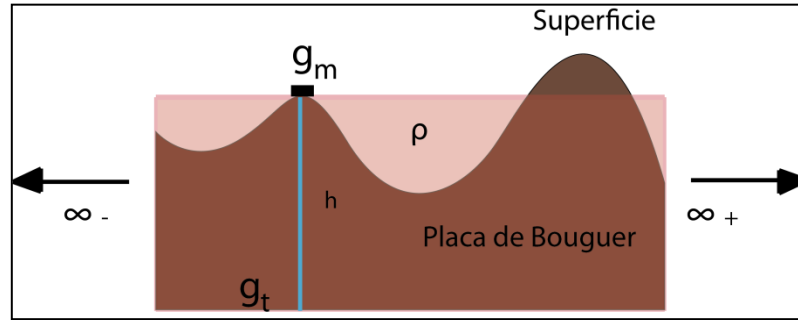


Figura 15. Se ilustra la placa de Bouguer. La simbología corresponde a:  $g_m$  es la gravedad medida,  $g_t$  representa la corrección Latitud,  $h$  es la distancia vertical entre las dos anteriores, y  $\rho$  corresponde a la densidad de la placa.

La ecuación utilizada para esta corrección es:

$$g_b = 0.04193 \cdot \rho \cdot h$$

Donde  $g_b$  se mide en mgal,  $\rho$  es la densidad considerada para la placa de Bouguer medida en  $\frac{g}{cm^3}$  y  $h$  es la altura, en metros, entre la gravedad teórica ( $g_t$ ) y la gravedad medida.

- Corrección Topográfica ( $g_{topo}$ )

Esta corrección viene a considerar los valles y las montañas que la corrección de Bouguer no tuvo en cuenta. Respecto de la placa, los cerros corresponden a un material que no ha sido tomado en consideración, mientras que en los valles fue considerado un material inexistente (Figura 16). Por lo tanto, ambos generan un valor de gravedad con una componente vertical en dirección hacia arriba, la cual hace disminuir el valor teórico de la gravedad. Esta corrección tiene sentido una vez hecha la corrección de Bouguer. Para obtener el valor de esta corrección se utilizó la extensión *montaj Gravity and Terrain Correction* del programa *Oasis montaj* (Estrada, 2012; Honores, 2013). Es importante mencionar que tanto la Corrección de Bouguer como la Topográfica necesitan un valor de densidad. Se utilizó el valor estándar de  $2.67 \frac{g}{cm^3}$ , el cual es discutido más adelante.

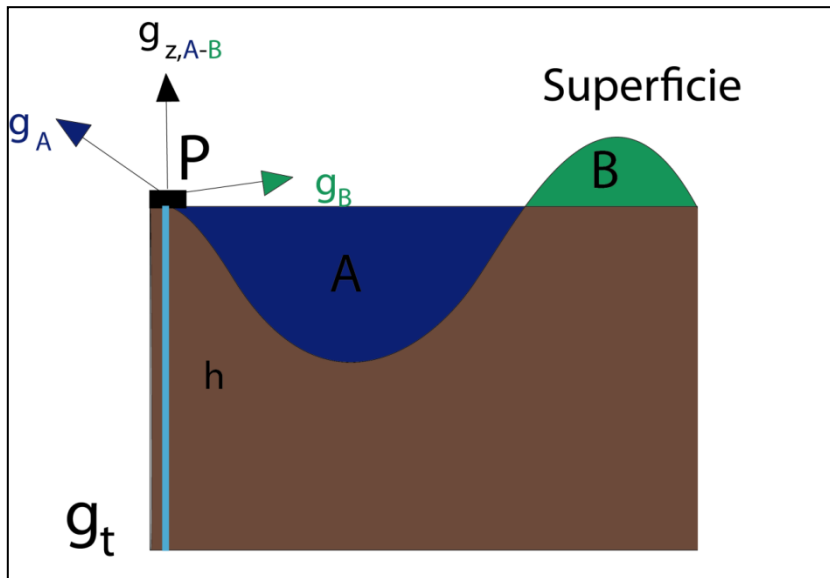


Figura 16. Se ilustra el efecto de la topografía sobre el punto P. Este punto representa la gravedad teórica donde se ha aplicado la corrección por Latitud, Aire libre y Bouguer. Se observa que el efecto topográfico genera una componente vertical de gravedad con dirección hacia arriba, que es necesario restar a la gravedad en el punto P.

### 3.2.3.3 Anomalía residual

La anomalía de Bouguer Completa ( $A_{BC}$ ), considera todas las correcciones antes mencionadas de la siguiente manera:

$$A_{BC} = g_m - g_s$$

$$A_{BC} = g_m - (g_0 - g_{al} + g_b - g_{topo})$$

$$A_{BC} = g_m - g_0 + g_{al} - g_b + g_{topo}$$

Es importante destacar que dentro de la  $A_{BC}$  se encuentran la Anomalía Regional y Residual (Figura 17). La primera corresponde a grandes estructuras a nivel de geología de gran escala que se caracterizan por ser ondas amplias y suaves, mientras que la segunda es de extensión limitada y de menor longitud de onda producida por características geológicas locales, las cuales son el interés del presente estudio, además, ésta se determina restando la Anomalía de Bouguer Completa con la Anomalía Regional (Estrada, 2012).

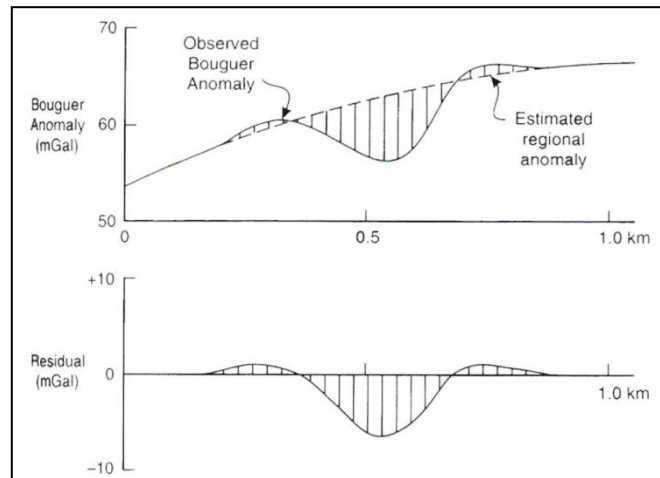


Figura 17. Se ilustra en forma general como determinar la Anomalía Residual al identificar la Anomalía Regional de la curva de la  $A_{BC}$ . Tomado de Estrada, 2012.

Milson (2003) señala que en un perfil: distancia *versus* mgal, estimar el Regional “al ojo” puede ser más exacto que obtenerlo usando un programa, debido a la imposibilidad de crear uno que produzca un Regional no influenciado por los valores anómalos (Figura 18). Por lo anterior, es que las tendencias Regionales fueron realizadas por deducciones y observaciones, y no aplicando algoritmos computacionales.

Después de obtener la  $A_{BC}$  se trabajó con el programa *Model Vision*, con el cual se realizó el modelamiento gravimétrico de cada transecta por separado. La primera etapa de este trabajo consistió en obtener la tendencia Regional, la cual será considerada como una superficie plana. Al importar los datos de coordenadas y  $A_{BC}$  de una transecta al programa, este dibujaba en el plano x-y las ubicaciones de las estaciones gravimétricas adquiridas en terreno. Luego se creó un perfil donde el eje de las abscisas representaba la distancia entre el primer y último punto gravimétrico, en metros; y el eje las ordenadas correspondía a los valores de la  $A_{BC}$ , en mgal. Después, fue dibujado el plano de la tendencia Regional, cuyo rumbo era perpendicular a la traza en planta del perfil (Figura 19). Finalmente se necesitaba la inclinación del plano para terminar la modelación del Regional y para realizar esto, bastó con definir dos puntos específicos en el perfil distancia *versus* mgal (los cuales se llamarán, en este trabajo, como Marcadores A y B, para los puntos occidentales y orientales, respectivamente, ver Figura 20).

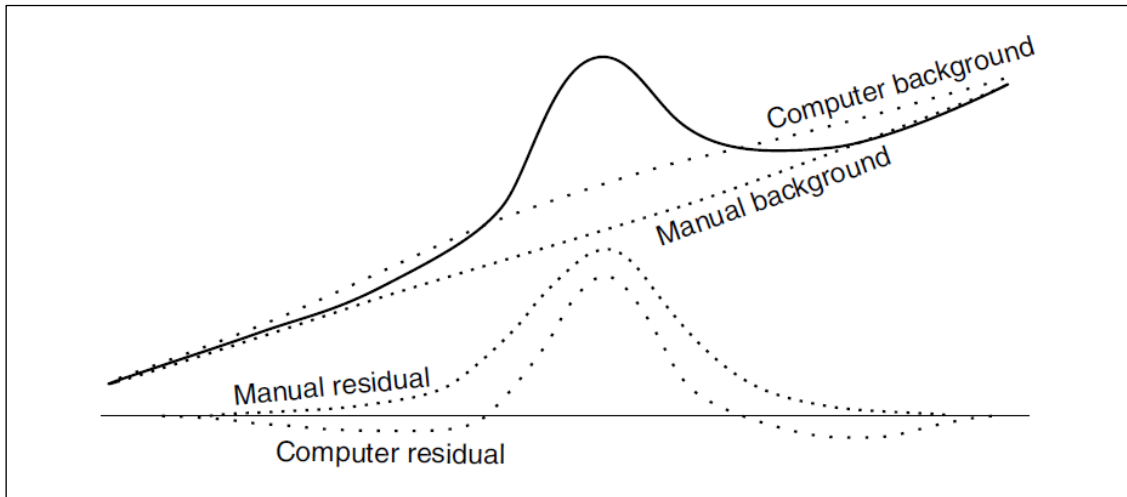


Figura 18. Residuales obtenidos “al ojo” y por computador. El *Manual background* (Regional dibujado “al ojo”) reconoce la separación entre el regional y la anomalía local, por lo tanto la anomalía residual es probablemente una buena aproximación del efecto de la fuente local. El *Computer background* (Regional obtenido gracias al computador) es dibujada de forma sesgada por la presencia de la anomalía local, y el Residual correspondiente es, por lo tanto, flanqueada por valles. Tomado de Milson (2003)

El estudio gravimétrico tiene como objetivo determinar la geometría de la Cuenca de Chañarcillo, por lo tanto se busca distinguir, entre los datos gravimétricos, el basamento o unidades geológicas de gran escala y el relleno de la cuenca, representados por la tendencia Regional y la anomalía Residual, respectivamente. Es por eso que en estos estudios no basta con obtener datos de adquisición gravimétrica sobre el relleno, sino que también es indispensable obtener datos sobre los dos bordes de la cuenca (en el caso de un perfil 2D). En conclusión: la ubicación y la señal gravimétrica de estos dos bordes corresponden a los dos puntos (marcadores) necesarios para obtener la inclinación del plano de la tendencia Regional (Figura 20).

Particularmente, de los 4 marcadores totales, solo se obtuvo un marcador sobre el basamento que corresponde al borde oeste del perfil Norte, los demás fueron obtenidos siguiendo ciertas observaciones. El borde oeste del perfil Sur se encontraba a aproximadamente 1.5 km de lo que se interpretó como parte del basamento, por lo tanto se siguió la tendencia de la  $A_{BC}$  hasta el borde oeste de la cuenca, obteniéndose así el Marcador A, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 20. Luego el borde este de la cuenca, está sepultado por Formaciones *syn-orogénicas*, como lo son Hornitos y Viñitas, las cuales se extienden varios kilómetros al este. Para solucionar este problema, en cada perfil se siguieron procedimientos distintos. En la  $A_{BC}$  de la transecta Norte se observa una pequeña anomalía positiva en el borde este del perfil (como se verá más adelante en la sección 4.4), la cual hace suponer que podría corresponder a un segmento del basamento que estaría más cerca de la superficie; en consecuencia el Marcador B del perfil Norte se ubicó entre 1 y 2 mgal sobre esta anomalía (Figura 20), para señalar que existe todavía relleno *syn-orogénico* entre el punto gravimétrico y el basamento, que en este caso, dio como resultado 200m. Para el perfil sur se supuso que el basamento también se encontraba a la misma profundidad de 200 m, en el borde este de la cuenca, de esta manera, al momento de modelar se

tienen como condiciones de borde la profundidad y la densidad de la unidad, con lo cual la tendencia Regional se ajusta para que la curva modelada se asemeje a la  $A_{BC}$ . Esto puede ser discutido ampliamente, ya que las suposiciones mencionadas anteriormente podrían no ser ciertas, conduciendo a errores en relación a la profundidad y geometría del relleno de la cuenca. Esto será visto con mayor detalle en la sección 6.2.

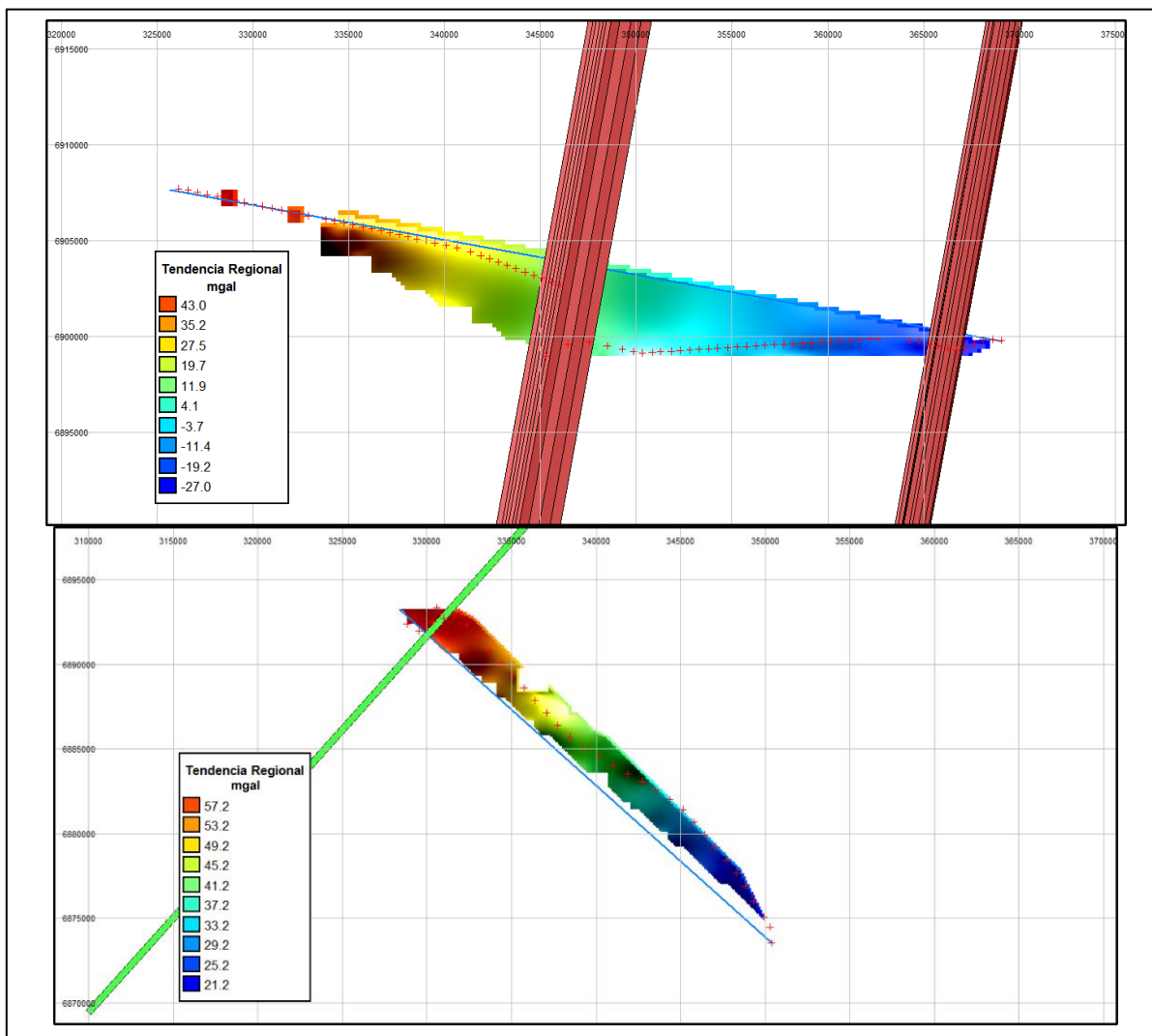


Figura 19. Imágenes obtenidas del programa *Model Vision*. Se observan las ubicaciones de las estaciones gravimétricas obtenidas en terreno para los perfiles Norte (imagen superior) y Sur (imagen inferior), representadas por cruces rojas. La recta azul, que une el punto inicial con el final, representa el eje de la abscisa del perfil donde fue realizado el modelamiento gravimétrico, en la cual perpendicular a esta, se dibujan los cuerpos modelados (los cuerpos rojos y verdes para los correspondientes perfiles Norte y Sur). En colores se ilustra el plano de la correspondiente tendencia regional.

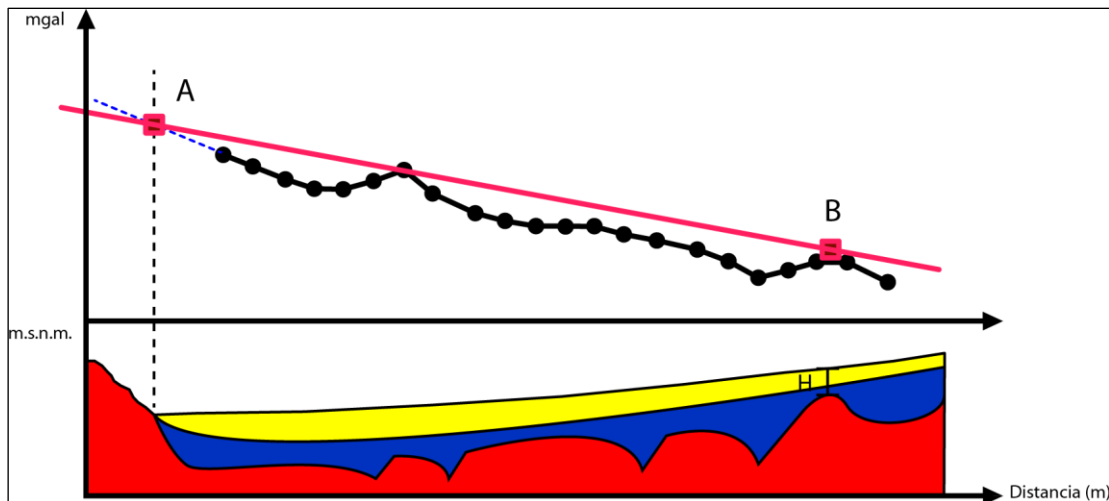


Figura 20. Se ilustra el procedimiento para elegir la Tendencia Regional (línea roja). En el perfil, Distancia *versus* mgal, los puntos negros unidos con una línea representan la  $A_{BC}$ . Aquí, para elegir el Regional, es cual es considerado lineal, es necesario definir dos puntos: Marcadores A y B que representan los bordes oeste y este de la cuenca. Ver texto para mayor explicación.

Finalmente, luego de obtener la Anomalia Residual se procedió a la confección de distintos cuerpos que dieran respuestas gravimétricas similares a esta Anomalia. Para dibujar estos cuerpos, como se ha dicho, el programa crea un perfil, es decir, una línea recta que une los puntos iniciales y finales de cada transecta, y, en relación a esta línea, crea cuerpos perpendiculares (Figura 19). Los cuerpos considerados tenían rumbos de 60 km de extensión. El número de cuerpos modelados fue lo más reducido posible: formaciones similares en litología y densidad fueron agrupadas bajo el nombre de una misma unidad. Luego, para determinar la geometría se ocupó la información obtenida de la revisión bibliográfica.

### 3.3 Cálculo de densidades

Durante la campaña de terreno se obtuvieron un total de 13 muestras correspondientes a las unidades geológicas aflorantes, con el objeto de determinar su densidad y poder generar así, un modelo gravimétrico con mayor consistencia. Para esto se llevó a cabo el Método de Arquímedes de la siguiente manera: a) cada muestra fue reducida a un tamaño de un diámetro máximo de no más de 4 cm, b) luego se les amarró a un hilo de nylon y fueron pesadas en una balanza cuya precisión es de 0.01 gramos. De este modo se obtuvo la masa de la roca en seco ( $m_s$ ), c) Por otro lado se tiene la misma balanza sobre la cual hay una probeta llena hasta los tres cuartos con agua, considerando esta configuración como la condición inicial, se dejó el visor en 0 gramos (Figura 21); d) posteriormente la masa fue fijada en un soporte e introducida a la probeta con agua, como se muestra en la Figura 21. Este valor es llamado ( $m_e$ ). La densidad del agua ( $\rho_a$ ) es conocida por lo tanto la densidad de la roca se logra de la siguiente fórmula:



$$\rho_{roca} = \frac{m_s \cdot \rho_a}{m_e}$$

En el desarrollo de esta actividad se observó que a medida que transcurría el tiempo, el valor  $m_e$  disminuía, esto se podría deber a que la muestra se estaba saturando en agua, y además de que existía un cierto porcentaje de evaporación, por lo tanto, el valor ocupado para determinar la densidad fue el valor mostrado por la balanza luego de 7 minutos, ya que en ese lapso las diferencias de  $m_e$  empezaban a ser cada vez menores. Por último, para aumentar la precisión en las densidades obtenidas, se tomaron dos trozos de cada muestra para promediar los valores logrados al aplicar esta metodología.

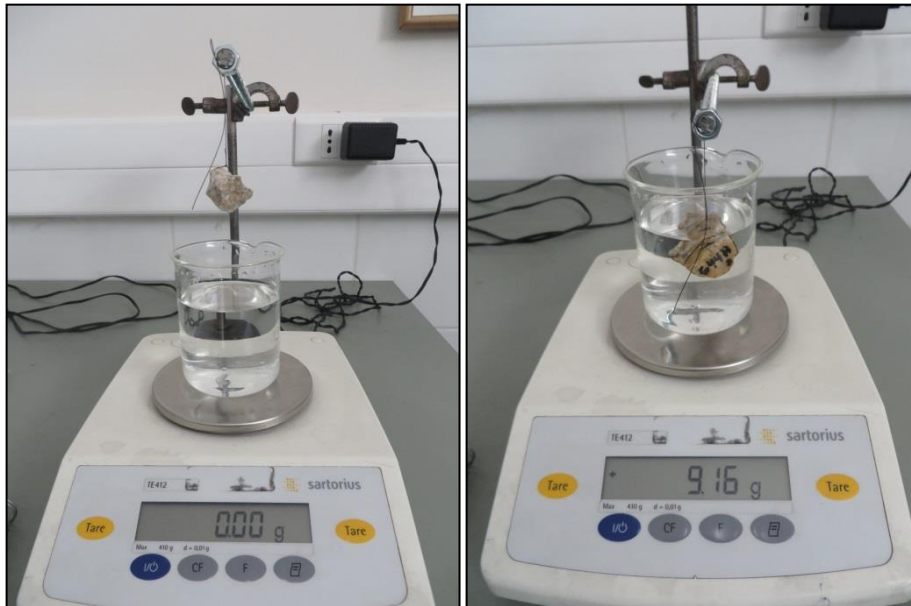


Figura 21. Se ilustra el método de Arquímedes para la determinación de la densidad de las muestras. Notar que no importa el volumen de agua de la probeta, sino que solo se considera la medición de la balanza ( $m_e$ ) para efectos de cálculo.

Los valores obtenidos con esta metodología no se consideraron directamente para la modelación, sino que son interpretados como valores máximos, ya que la densidad así obtenida solo considera una roca medianamente fresca y sin fracturas, pero en Gravimetría la densidad que importa es la de los cuerpos a modelar, y estos tienen fracturamiento a gran escala, diaclasas, porosidad, niveles saturados de agua, alteraciones, etc. Por lo tanto, para obtener la densidad de las distintas unidades, se procedió a una búsqueda bibliográfica con el objetivo de promediar los valores propuestos por distintos autores, para las respectivas litologías, teniendo en cuenta siempre los valores máximos obtenidos por este método.

### 3.4 Antecedentes bibliográficos

Para una misma anomalía residual existen variadas soluciones: diversos cuerpos con determinadas formas y densidades pueden reproducir una misma anomalía residual, es por eso que, para generar un perfil gravimétrico confiable es necesario recopilar la mayor información posible acerca del subsuelo. Como primera observación, luego de reconocer, en la zona de estudio, las unidades litológicas, no consolidadas y estructurales; se tiene que la unidad con menor densidad es el relleno no consolidado del Cuaternario y Neógeno, afectando de manera considerable la interpretación que se pueda dar de la profundidad de la misma Cuenca Cretácica de Chañarcillo ya que la gravimetría muestra contrastes de densidades, por lo tanto es indispensable obtener la geometría de esta cobertura. Como segunda observación, se tiene que en los dos perfiles de Anomalía Residual (que se mostrarán más adelante en el Capítulo 4 en la Figura 35 y en la Figura 36), existe una anomalía positiva notable en el borde oeste de cada perfil, haciendo suponer la existencia de un cuerpo de gran densidad. Para resolver estos problemas se hizo lo siguiente: en el primer punto se buscaron perfiles de pozos de captación de agua en la página web de la DGA, ubicados en la zona de estudio o muy cercana a esta, para determinar de forma acertada el contacto relleno-roca y además, se pudo contar con perfiles magnetotelúricos que ayudaron bastante a definir la geometría de este relleno no consolidado, los cuales están incluidos en el Anexo E. Para la segunda observación, se intentó establecer una relación entre la Anomalía Positiva con la Franja Ferrífera Chilena.

## 4 CAPÍTULO: RESULTADOS

### 4.1 Estructura superficial de la Cuenca Chañarcillo

Como se mencionó en la sección 2.2 de este trabajo, la estructura principal de la Cuenca Chañarcillo está representada por el Anticlinorium de Tierra Amarilla (Segerstrom, 1967), la cual, en la región de estudio, corresponde a una estructura anticlinal de rumbo NNE y de vergencia este, que puede ser reconocida a lo largo de 40 km desde el norte de la Quebrada Yerbas Buenas hasta la Quebrada Algarrobal (Figura 22), afectando principalmente a los depósitos volcánicos *syn-rift* de la Fm. Punta del Cobre, así como a las sucesiones sedimentarias marinas del Grupo Chañarcillo y a los depósitos volcano-clásticos *post-rift* de la Fm. Cerrillos.

A lo largo de ambas quebradas, esta estructura se observa como un anticlinal asimétrico de larga longitud de onda compuesto por un limbo frontal mucho más inclinado que su limbo dorsal, el cual se mantiene en una posición casi horizontal. En la Quebrada Yerbas Buenas, el limbo frontal del anticlinal está compuesto por las rocas de la Formación Pabellón, las cuales mantienen una inclinación 50°-70°E (Figura 23), sin embargo, la parte alta de la formación, al norte de la quebrada, se encuentra afectada por la presencia de intrusivos del Cretácico Superior. En este sector el limbo frontal yace truncado por la Falla Elisa de Bordos (Figura 22). Esta última corresponde a una estructura NNE de moderado ángulo y vergencia este, que coloca en contacto a los depósitos cretácicos *syn-rift* del Grupo Chañarcillo con las rocas volcánicas jóvenes de la Formación Viñitas (Cretácico Superior). La Falla Elisa de Bordos solo aflora desde este sector hacia el norte por casi 20 km, a lo largo de una traza continua y prácticamente marca un límite oriental de primer orden para las calizas del Grupo Chañarcillo y por ende para la cuenca. En contraste, hacia el oeste por esta misma quebrada, se observa como progresivamente las rocas del Grupo Chañarcillo van disminuyendo su inclinación, hasta estar horizontales y apoyarse en suave discordancia angular sobre la Formación Punta del Cobre.

Al sur, a lo largo de la Quebrada Algarrobal se reconoce el mismo estilo estructural para los depósitos del Grupos Chañarcillo. Sin embargo, en este sector su limbo frontal mantiene una inclinación que va entre 35°E a subverticales (Figura 24). A diferencia del sector norte, aquí el limbo frontal se encuentra parcialmente cubierto por los depósitos volcano-clásticos de la Formación Hornitos, definiendo así una clara discordancia angular (Figura 29). Al este de este sector, también se han reconocido algunos cabalgamientos vergentes al este, pero que generalmente afectan a las rocas del Cretácico Superior-Paleoceno (formaciones Viñitas y Hornitos). Al oeste, el Anticlinorium de Tierra Amarilla aumenta su amplitud como consecuencia de que su limbo dorsal se hace progresivamente más horizontal (Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28).

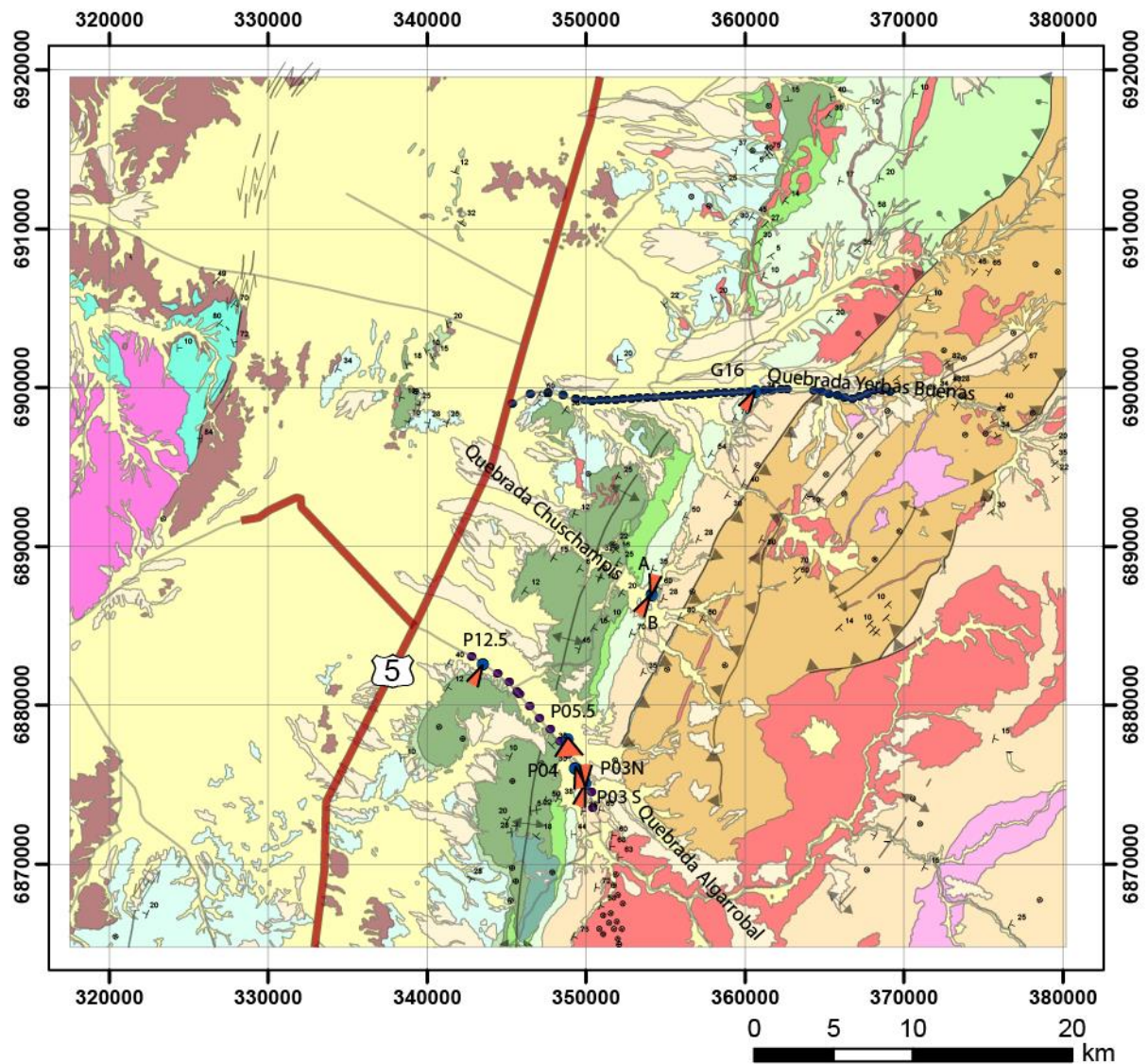


Figura 22. Mapa geológico de la zona de estudio, para ver las unidades en más detalle y la simbología, ir a la Figura 8 y a la Figura 9. Se observa la ubicación y orientación de las principales fotografías tomadas en terreno, que van desde la Figura 23 hasta la Figura 31, exceptuando la Figura 28; además, de las estaciones gravimétricas de la parte oriental de las transectas Norte y Sur, donde también se hicieron observaciones estructurales.

Otras fotografías han sido tomadas en la Quebrada Chuschampis (Figura 30 y Figura 31) que dan cuenta de la geometría del Anticlinorium de Tierra Amarilla. En ellas es posible observar como esta estructura afecta a las secuencias del Grupo Chañarcillo, asimismo da cuenta de su asimetría y vergencia hacia el este. Además de dejar en clara evidencia los altos ángulos de inclinación del limbo frontal y como hacia el este el limbo dorsal de hace subhorizontal.

Notorios cambios de espesor también han sido documentados a lo largo de la estructura del Anticlinorium, los cuales fueron reconocidos en la región de estudio. Por ejemplo, el espesor de las secuencias estratigráficas del Grupo Chañarcillo varía entre los limbos frontales y dorsales del Anticlinorium de Tierra Amarilla. En el limbo dorsal

los depósitos tienen un espesor menor a 1000 m; mientras que en el limbo frontal, estos superan los 2000 m, llegando incluso alcanzar los 3000 m de espesor. Estos cambios de espesor definen una geometría de cuña para los depósitos del Grupo Chañarcillo, las cuales son típicamente desarrolladas por secuencias depositadas durante episodios extensionales. Estas geometrías también fueron reportadas previamente por Martínez *et al.*, (2013) y Martínez *et al.*, (en prep.).

Deformaciones menores, tales como, fallas y pliegues contracciones de doble vergencia o fallas normales *syn*-extensionales localizadas internamente en los depósitos del Grupo Chañarcillo, no representan un buen criterio para dar una impresión del contexto regional y de la anatomía de la cuenca, por lo que no han sido consideradas a la hora de realizar el modelamiento de la misma.

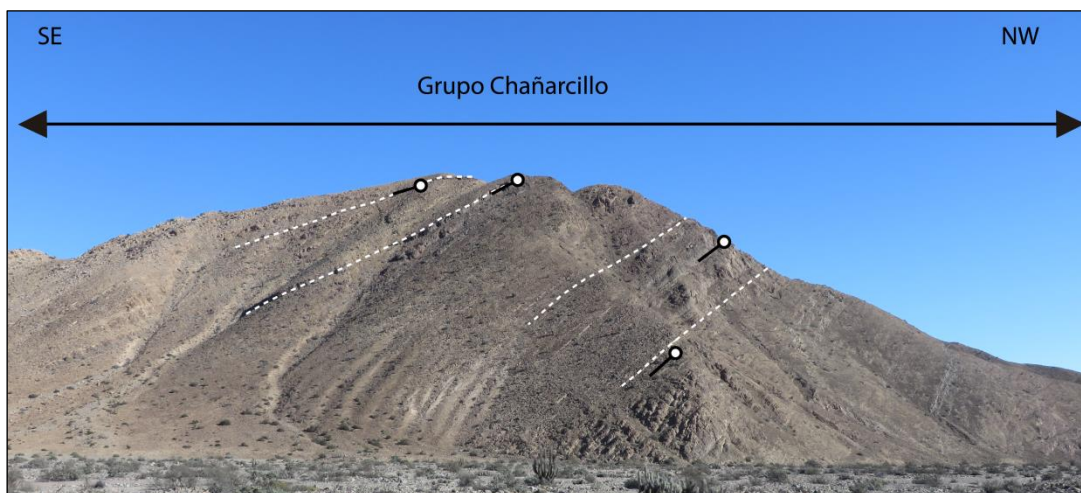


Figura 23. Imagen tomada en el punto G16. Muestra la deformación sufrida por el grupo Chañarcillo, cuyos estratos mantean hacia el este. Ver Figura 22 para su ubicación.

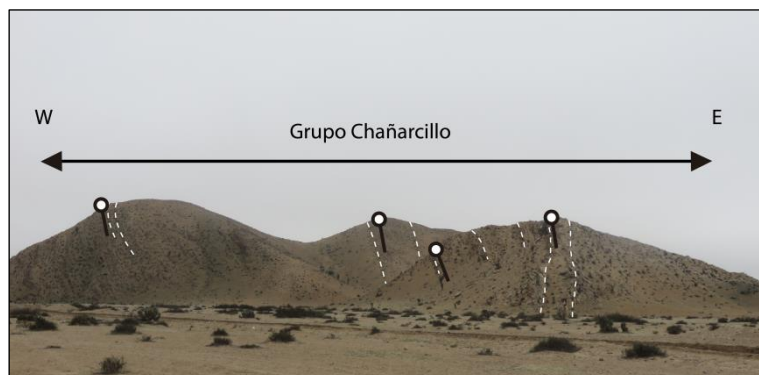


Figura 24. Imagen obtenida en la parada P03. Se observan los estratos del Grupo Chañarcillo con mateos subverticales. Ver Figura 22 para su ubicación.

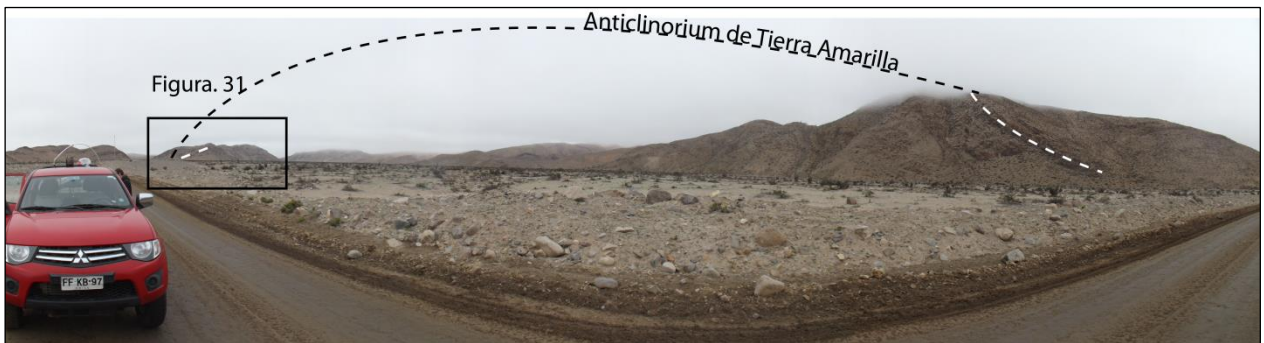


Figura 25. Imagen tomada entre las paradas P05 y P06. Se observa como los estratos del mismo Grupo Chañarcillo tienen manteos en direcciones opuestas, formando así una estructura anticlinal. El cuadrado negro sugiere ver la Figura 26 para mayor detalle. Ver Figura 22 para su ubicación en el punto P05.5

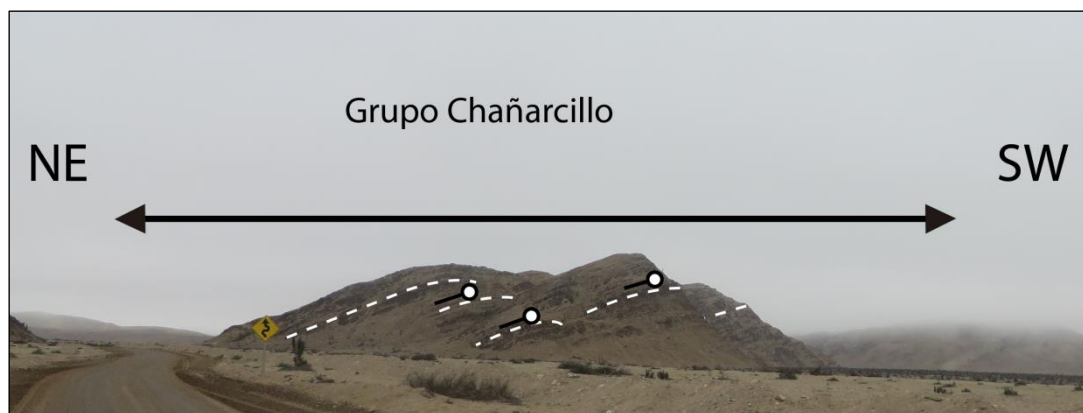


Figura 26. Imagen obtenida de la parada P04. Muestra como los estratos del Grupo Chañarcillo mantean hacia el este. Ver Figura 22 para su ubicación.

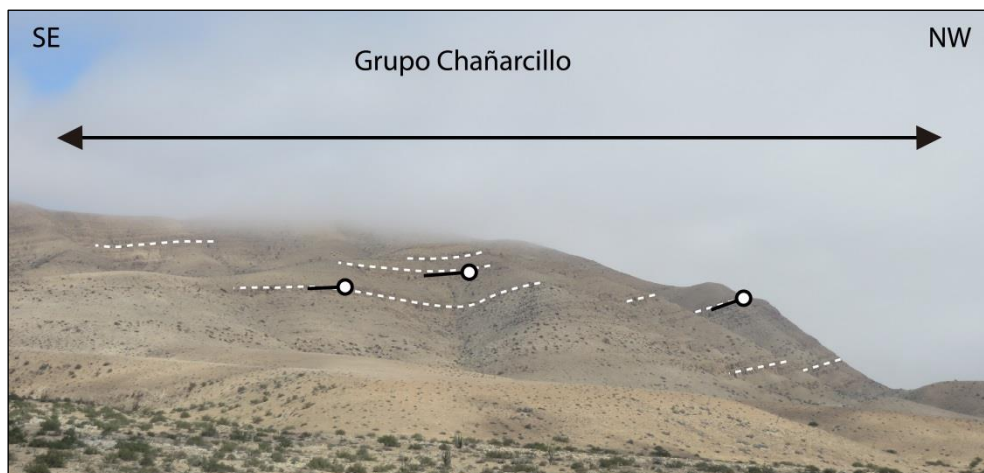


Figura 27. Imagen tomada entre las paradas P12 y P13. Se observa como hacia el este, los manteos de los estratos del Grupo Chañarcillo se suavizan, llegando a ser subhorizontales. Ver Figura 22 para su ubicación en el punto P12.5



Figura 28. Imagen obtenida de *Google Earth*. Muestra una vista hacia el Norte, desde una posición más abajo del Perfil Sur (los puntos azules representan esta transecta). De esta manera se abarca todo el espacio comprendido por las imágenes anteriores observando claramente el Anticlinorium de Tierra Amarilla.

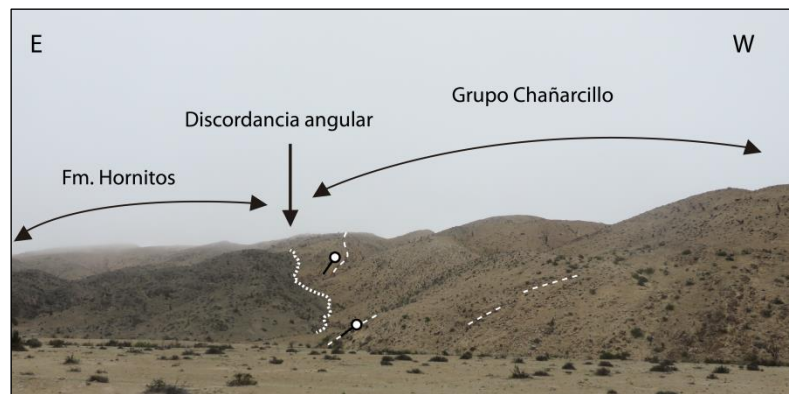


Figura 29. Imagen obtenida en la parada P03 mirando hacia el Sur. Se muestra el contacto en discordancia angular entre la Formación Hornitos y el Grupo Chañarcillo.

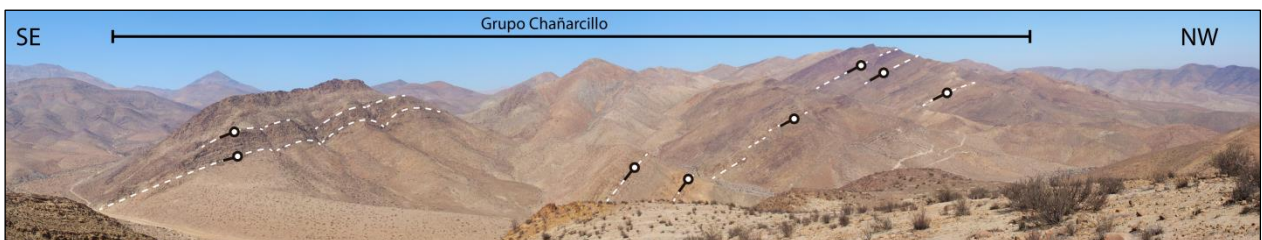


Figura 30. Imagen obtenida en Quebrada Chuschampis, en el punto B, en dirección al Suroeste. Es posible observar la deformación sufrida por los estratos del Grupo Chañarcillo cuyos manteos van de  $30^\circ$  a  $80^\circ$ , aproximadamente, definiendo así la geometría del Anticlinorium de Tierra Amarilla.

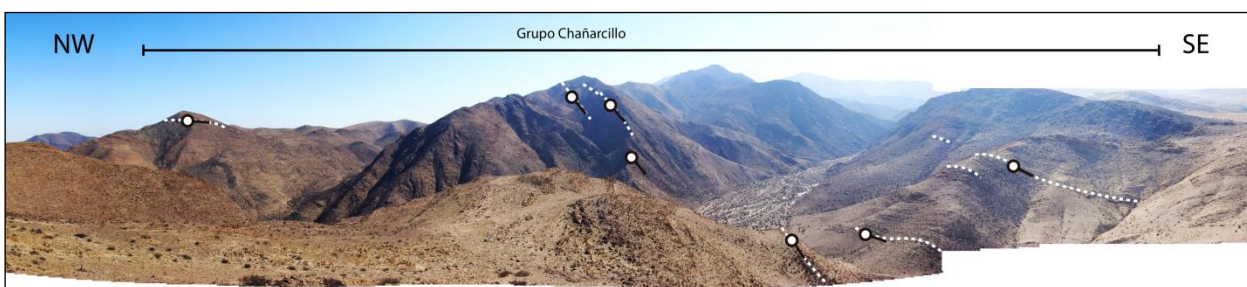


Figura 31. Imagen obtenida en la Quebrada Chuschampis en el punto A, en dirección hacia el Noreste. Es posible observar como los estratos del Grupo Chañarcillo tienen manteos subverticales, y luego como estos se van haciendo subhorizontales al oeste, definiendo así el Anticlinorium de Tierra Amarilla.

## 4.2 Densidades

Al observar un perfil de Anomalía Residual lo que se ve realmente son señales de gravedad debido a contrastes de densidades entre distintos cuerpos, de diversas geometrías ubicados en el subsuelo. Bajo esta premisa, y para realizar un modelo de este tipo es necesario definir las densidades de cada unidad. Como se mencionó en la Metodología de este trabajo, durante la campaña de terreno se recolectaron muestras de roca en cada unidad expuesta en el área de estudio para determinar su densidad. Las ubicaciones de estas muestras son ilustradas en la Figura 32 y los valores obtenidos por el Método de Arquímedes son los siguientes:

Tabla 1. Resultados de las densidades de las muestras obtenidas en terreno por el método de Arquímedes. La ubicación de las muestras está ilustrada en la Figura 32.

<b>Unidad</b>	<b>Muestras</b>	<b>Litologías principales</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Fm. Viñitas	M1, M2, M3	Volcano-sedimentaria	2.81
Grupo Chañarcillo	M4, M5, M6, M12, M13	Calizas	2.69
Diorita cuarcífera Sierra Colorada	M7	Diorita cuarcífera	2.74
Fm. La Negra	M8, M9	Andesitas	2.75
Fm. Punta del Cobre (miembro superior)	M10, M11.	Calizas	2.66



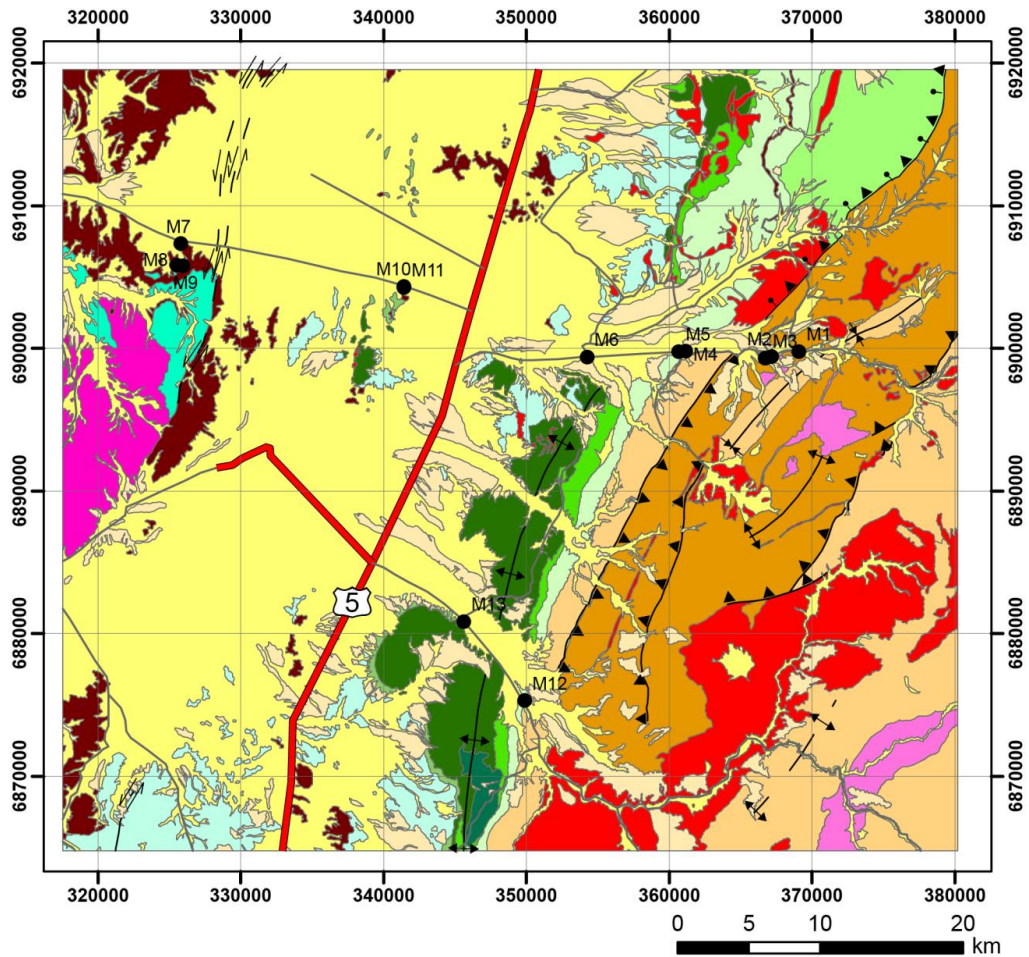


Figura 32. Mapa litológico donde se muestra la ubicación de las muestras obtenidas en terreno, para la obtención de densidades. La muestra M6 señala que hay un afloramiento de la Formación Nantoco bajo los depósitos no consolidados del Neógeno. Para conocer la simbología ver Figura 9.

De acuerdo a la metodología aplicada, los valores anteriores se consideraron máximos y fue necesaria una revisión bibliográfica para determinar valores más ciertos y ocuparlos en la creación de los perfiles gravimétricos. De la revisión bibliográfica, se obtuvo lo siguiente:

**Unidades no consolidadas:** Estas unidades están compuesta por unidades Neógenas (Gravas de Atacama) y unidades no consolidadas del Cuaternario. Aguirre (1999), realizó un trabajo hidrogeológico en el valle de Copiapó ocupando, entre sus herramientas, la gravimetría. Él utilizó un valor de  $1.97 \text{ g/cm}^3$  para modelar las unidades no consolidadas. Además, según Seiguel (1995), los rangos de densidades para gravas y arenas, se ubican entre los  $1.70\text{-}2.40 \text{ g/cm}^3$  y  $1.70\text{-}2.30 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Por lo tanto, dado que estos sedimentos son antiguos y podrían tener cierta compactación, lo que los haría más denso, se optó por considerar un valor de  $2.1 \text{ g/cm}^3$ .

**Formaciones Viñitas y Hornitos:** En términos generales, estas formaciones son descritas como unidades volcano-sedimentarias. En la tesis de Aguirre (1999), se utilizaron los siguientes valores de densidades para las areniscas: 2.27, 2.37 y 2.47 g/cm<sup>3</sup>; mientras que para las andesitas trabajó con densidades de: 2.37, 2.47 y 2.57 g/cm<sup>3</sup>. En este estudio se utilizó el promedio de las densidades antes mencionadas dando como resultado un valor de 2.42 g/cm<sup>3</sup>. Es importante mencionar que, si bien, los valores dados por Aguirre, para las andesitas y areniscas, corresponden a la Fm. Cerrillos (carta Los Loros, Arévalo, 2005b), esta es semejante en litología a las Formaciones Viñitas y Hornitos, por lo que se considera prudente interpolar este valor de densidad, a las dos Formaciones anteriores, en vez del valor 2.81 g/cm<sup>3</sup> (Tabla 1), por considerarse un valor alto.

**Grupo Chañarcillo:** Principalmente está compuesto por rocas calcáreas como calizas, calcilutitas, y calizas fosilíferas. Do Couto *et al.* (2014) realizó mediciones en 6 muestras de rocas en la Cuenca de Sorbas (en la Cordillera Bética, al sur de España), las cuales se componían de calcarenitas fosilíferas, de donde obtuvo una densidad de 2.46 g/cm<sup>3</sup>. Por otra parte, según Seigel (1995), los valores promedios para las calizas y lutitas son: 2.55 y 2.40 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Para el siguiente conjunto de litologías: areniscas, arcillas, conglomerados y calizas; Rey-Moral (2004) deduce una densidad 2.49 g/cm<sup>3</sup> para un estudio de la Cuenca de Almazán, Provincia de Soria, España. Dada esta consideración se ha tomado el promedio de los valores antes mencionados que corresponde a 2.48 g/cm<sup>3</sup>. Valor que es menor al obtenido con el método de Arquímedes en el presente estudio cuyo resultado fue 2.69 g/cm<sup>3</sup>.

**Formaciones La Negra y Punta del Cobre:** En la parte SW de la zona de estudio (Figura 37) se ubica la Mina Los Colorados, cuyos yacimientos explotables se encuentran hospedados en las rocas andesíticas de la Formación Punta del Cobre, y corresponde a los yacimientos de Fe de la Franja Ferrífera Chilena (FFCH). En la tesis de Alcalde (2000), en la cual se llevó a cabo un estudio sobre el yacimiento Los Colorados, se menciona la siguiente fórmula, proporcionada por la empresa minera, para obtener los valores de densidad de un bloque de roca (de dimensiones 12.5m x 12.5m x 15m) a partir de la ley de hierro:

$$\bar{\rho} = 2.475171 + (0.032053 \cdot \%Fe) \quad (1)$$

$\bar{\rho}$  = Densidad Media  
 $\%Fe$  = Porcentaje de hierro en la roca

Con la formula anterior se puede obtener la densidad de la Formación Punta del Cobre, para esto solo hay que asignarle un porcentaje de hierro. Como antecedente se tiene que a unos 40 km al norte de la zona de estudio, Marschik *et al.* (2001) obtuvieron datos geoquímicos de las rocas de la Formación Punta del Cobre. Utilizando los resultados de los análisis de elementos mayores de la subunidad informal *Lower Andesites*, del miembro inferior Geraldo-Negro (como él lo define) se obtiene un promedio de ley de 7.27% de Fe en la roca, lo que da una densidad de 2.71 g/cm<sup>3</sup>. Este valor no es apropiado considerarlo, porque se asemeja mucho a la densidad propuesta para el basamento (ver más abajo el texto), por lo que no se

evidenciaría un contraste de densidades entre estas. Además, si se observa la Tabla 1, la densidad de la Fm. La Negra ( $2.75 \text{ g/cm}^3$ ) es muy parecida con la que se acaba de obtener para la Fm. Punta del Cobre ( $2.71 \text{ g/cm}^3$ ), esto es de esperarse ya que son semejantes en lo que corresponde a la litología. Como se ha dicho, un valor correcto de densidad a ocupar en gravimetría tiene que incorporar características como el fracturamiento a escala regional y los espacios entre los planos fallas. Por lo tanto la ecuación propuesta por Bayer (1983) es de gran ayuda en la búsqueda de un valor apropiado para este estudio ya que relaciona la porosidad, densidad de matriz y de poro; para encontrar una densidad de roca total.

$$\rho_t = (1 - \varphi) \cdot \rho_m + \varphi \cdot \rho_\varphi \quad (2)$$

$\rho_t =$  Densidad de roca total

$\varphi =$  Porosidad de la roca expresado en valores entre 0 y 1

$\rho_m =$  densidad de la matriz

$\rho_\varphi =$  Densidad del poro

Si se considera una porosidad de la roca del 6% (valor conservador tomado de la Tabla 2), una densidad matriz de  $2.71 \text{ g/cm}^3$  y que los poros solo contengan aire ( $\rho_\varphi \sim 0$ ), aplicando la relación estándar entre la densidad total y la porosidad (Bayer, 1983), tenemos que la densidad de la andesita es de  $2.55 \text{ g/cm}^3$ . Este valor será considerado para las Formaciones La Negra y Punta del Cobre (miembro inferior).

**Basamento:** Milson (2003) señala que el valor  $2.67 \text{ g/cm}^3$  fue adoptado como estándar para representar la densidad de la corteza superior. Con este valor se obtuvo la curva de Anomalía de Bouguer Completa.

**Unidades intrusivas:** Las unidades intrusivas que afloran a lo largo de los perfiles gravimétricos corresponden a dioritas cuarcíferas y dioritas, principalmente. Según Seigel (1995) los rangos de los valores de densidades se ubican entre  $2.62$  y  $2.96 \text{ g/cm}^3$ , para las dioritas cuarcíferas y para las dioritas están entre  $2.72$  y  $2.99 \text{ g/cm}^3$ . Con el fin de obtener un valor de densidad para las unidades intrusivas se consideró modificar la densidad  $2.74 \text{ g/cm}^3$  obtenida con el método de Arquímedes de la diorita cuarcífera (Tabla 1); para esto se aplicó la ecuación (2), considerando como densidad de poro la del aire ( $\rho_\varphi \sim 0$ ), una densidad matriz de  $2.74 \text{ g/cm}^3$  y una porosidad de la roca del 1% (valor modesto obtenido de la Tabla 2) dando como resultado una densidad de  $2.71 \text{ g/cm}^3$ . Este valor se aplicará para ambas litologías.

Otro punto importante a aclarar es el siguiente, en la Figura 35 y en la Figura 36 se observa una anomalía positiva en el borde oeste, en los dos perfiles de Anomalía Residual. Esto supone un problema, debido a que para explicarlas es necesario un cuerpo con una densidad alta, pero en la zona de estudio no afloran intrusivos máficos, u otras rocas de gran densidad. Como hipótesis, en primera instancia, se cree que esta anomalía puede ser causada por un intrusivo que no aflora en superficie, y que podría estar vinculado a procesos responsables de la mineralización de hierro en la Franja Ferrífera Chilena (esto se discutirá de mejor modo en la sección 5.1), por lo tanto su valor de densidad sería alto debido a la

gran presencia de magnetita. Arbitrariamente se le ha asignado una densidad de  $2.9 \text{ g/cm}^3$ .

Tabla 2. Índices de porosidades propuestos por Freeze y Cherry (1979), para los siguientes depósitos no consolidados y rocas.

	Porosidad (%)
<b>Depósitos no consolidados</b>	
Gravas	25-40
Arena	25-50
Limo	35-50
Arcilla	40-70
<b>Rocas</b>	
Basaltos fracturados	5-50
Calizas kársticas	5-50
Areniscas	5-30
Calizas, dolomitas	0-20
Lutitas	0-10
Roca cristalina fracturada	0-10
Roca cristalina densa	0-5

A continuación se muestra una tabla resumen (Tabla 3), donde se comparan las densidades medidas en laboratorio con las obtenidas en la búsqueda bibliográfica:

Tabla 3. Tabla resumen donde se muestran las densidades de las unidades principales.

Unidades consideradas para los perfiles gravimétricos	Litología principal	Medida en laboratorio ( $\text{g/cm}^3$ )	Obtenida de revisión bibliográfica ( $\text{g/cm}^3$ )
Depósitos no consolidados	Gravas, ripios y arenas	-	2.1
Fms. Viñitas y Hornitos	Volcano-sedimentaria	2.81	2.42
Grupo Chañarcillo y miembro superior de la Fm Punta del Cobre	Calizas	2.69	2.48
Fms, Punta del Cobre (miembro inferior) y La Negra	Andesitas	2.75	2.55
Basamento	Corteza superior	2.74	2.67
Intrusivos Cretácicos inferior y superior.	Dioritas y dioritas cuarcíferas.	2.74	2.71
Intrusivo Denso	?	-	2.9

Finalmente es necesario realizar una discusión sobre los valores mostrados en la Tabla 3. Aquí se observa que los contrastes de densidades entre el Grupo Chañarcillo con la Formación Punta del Cobre y las rocas volcano-sedimentaria (Formaciones Viñitas y Hornitos) son muy pequeños, solamente son de  $0.07 \text{ g/cm}^3$  y  $0.06 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. De esto se concluye que, dado estos contrastes tan bajos, no es posible distinguir en el subsuelo el contacto y la disposición entre estas unidades utilizando los gráficos de Anomalía Residual (Figura 35 y Figura 36). Aun así, se puede obtener un promedio de estas tres unidades de  $2.48 \text{ g/cm}^3$ , que define el relleno de la cuenca. Este promedio simplifica el problema, ya que los esfuerzos se concentran solamente en obtener la profundidad del límite relleno-basamento sin considerar el cómo están en contacto entre sí estas unidades en el subsuelo. También es posible observar que la diferencia de densidades entre el basamento y los intrusivos félsicos es de  $0.04 \text{ g/cm}^3$  (Tabla 3), por lo tanto, considerando el mismo criterio, no es posible definir de una buena manera la geometría en profundidad, en consecuencia se prefiere no modelar estos intrusivos al asignarles una densidad de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ .

Resumiendo, las Unidades cuyos contrastes de densidades son importantes y necesitan ser modelados son: Depósitos no consolidados, Intrusivo Denso, Relleno de la cuenca y Basamento. La Tabla 4 muestra las unidades que efectivamente se ocuparon en la modelación, además de sus respectivas densidades.

Tabla 4. Unidades ocupadas en el modelo gravimétrico

Unidades consideradas para los perfiles gravimétricos	Litología principal	Considerada ( $\text{g/cm}^3$ )
Depósitos no consolidados	Gravas, ripios y arenas	2.1
Intrusivo Denso	?	2.9
Relleno de la Cuenca	Andesitas, calizas, rocas volcano-sedimentarias	2.48
Basamento	Corteza superior	2.67

#### 4.3 Profundidad del relleno no consolidado

Como se mencionó anteriormente, reconocer la profundidad del relleno no consolidado es fundamental para obtener un valor de profundidad confiable de la Cuenca de Chañarcillo. A modo de ejemplo un relleno sedimentario de 100 m, considerando como geometría una placa de extensión horizontal infinita, con una densidad de  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , y un basamento de densidad  $2.67 \text{ g/cm}^3$  da la siguiente anomalía negativa:

$$\Delta = 0.04192 \cdot 100 \cdot (2.1 - 2.67)$$

$$\Delta = -2.39 \text{ mgal}$$

Lo que es equivalente a 300m de espesor de calizas considerando una densidad de  $2.48 \text{ g/cm}^3$  y la misma geometría anterior.

Para tener una idea del espesor del relleno sedimentario no consolidado, se realizó un análisis de los expedientes de pozos inscritos en la DGA, extrayendo de ellos los perfiles estratigráficos con el fin de encontrar el contacto relleno-roca. La ubicación y profundidad de los perfiles estratigráficos, dentro de la zona de estudio y muy cercanos a esta, se muestran en la Figura 33 y en la Tabla 5.

Tabla 5. Expedientes obtenidos de la página web de la DGA. Las coordenadas están en el sistema WGS84, huso 19. El pozo que intercepta roca está destacado con asterisco, ver texto, para su discusión.

Código de Expediente	UTM Norte	UTM Este	Profundidad (m)
ND-0302-306	6912655.56	313335.72	39
ND-0302-758	6910306.42	322431.65	65.00
ND-0302-758	6910934.62	322500.57	72.00
ND-0303-401	6887664.58	321985.77	50.00
ND-0303-404	6857205.10	334263.83	24.00
ND-0303-414	6862361.93	328601.38	100.00
ND-0303-452	6857561.40	332291.76	34.00
ND-0303-464	6886713.84	339631.02	86.00
ND-0303-465	6882824.59	324039.78	70.00
ND-0303-688	6858953.60	325513.82	38*
ND-0303-779	6880245.58	320075.78	40.00
ND-0303-781	6880715.58	318940.78	42.00
ND-0303-988	6889249.58	323179.77	14.10
ND-0303-1329	6890342.00	324734.00	18.30
ND-0303-33	6857344.62	334145.82	17
ND-0303-34	6888624.59	328115.76	80
ND-0303-800000	6880622.61	323818.80	120
ND-0303-904	6851482.62	332099.83	25.7

Cabe señalar que según la tabla anterior, solo el pozo del expediente ND-0303-688 interceptó roca. Se duda de este resultado, ya que la roca que se menciona puede ser de un clasto tamaño bloque, debido a que pozos de profundidades mayores no interceptaron roca.

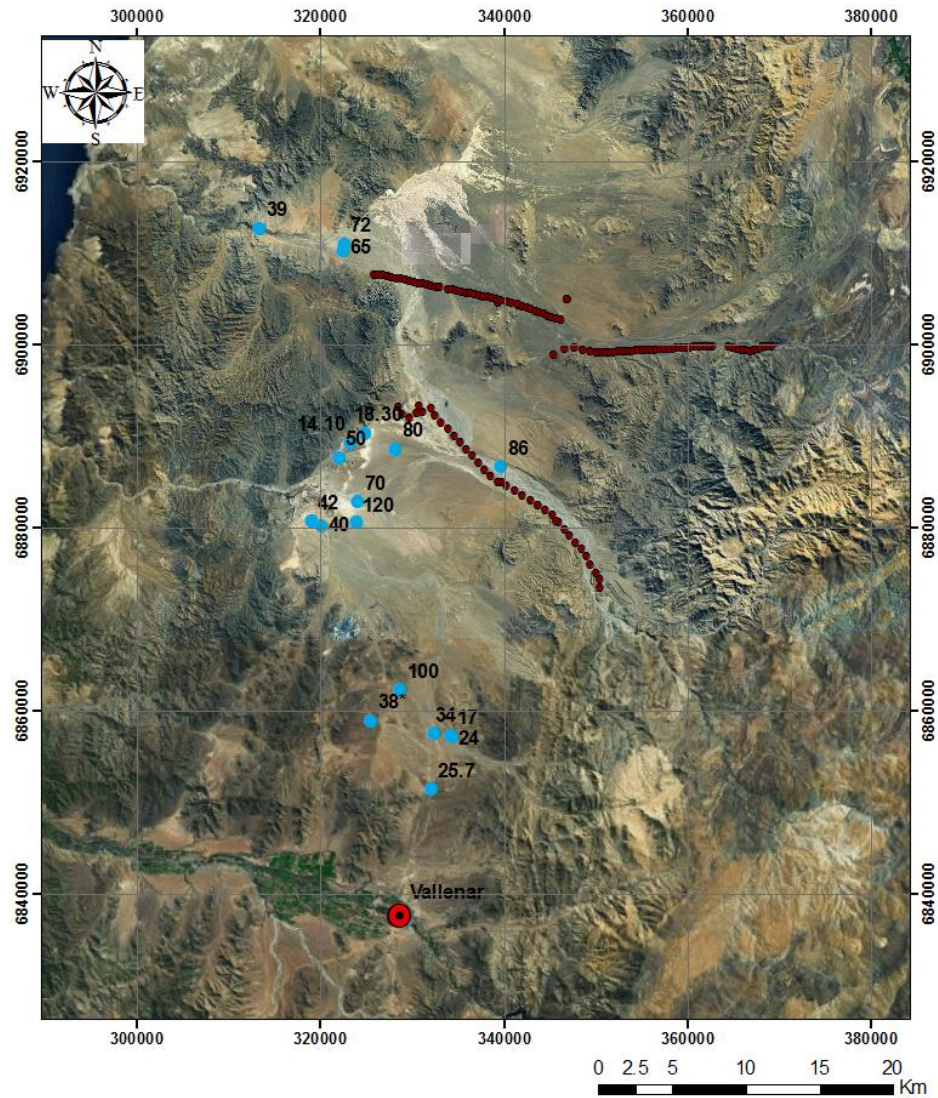


Figura 33. Mapa donde los puntos celestes muestran la ubicación de los pozos obtenidos de los expedientes de la DGA. Solamente uno de estos interceptó roca, el pozo 38\* (ver texto arriba para su discusión). Los puntos rojos señalan las estaciones gravimétricas, de los perfiles Norte y Sur.

Otra fuente de información corresponde a datos de perfiles magnetotélúricos (MT) facilitados por el profesor del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, Daniel Díaz. Estos perfiles se encuentran en el Anexo E. La Figura 34 muestra las ubicaciones de las estaciones MT, que coinciden con la traza de la transecta Norte de adquisición de datos gravimétricos.

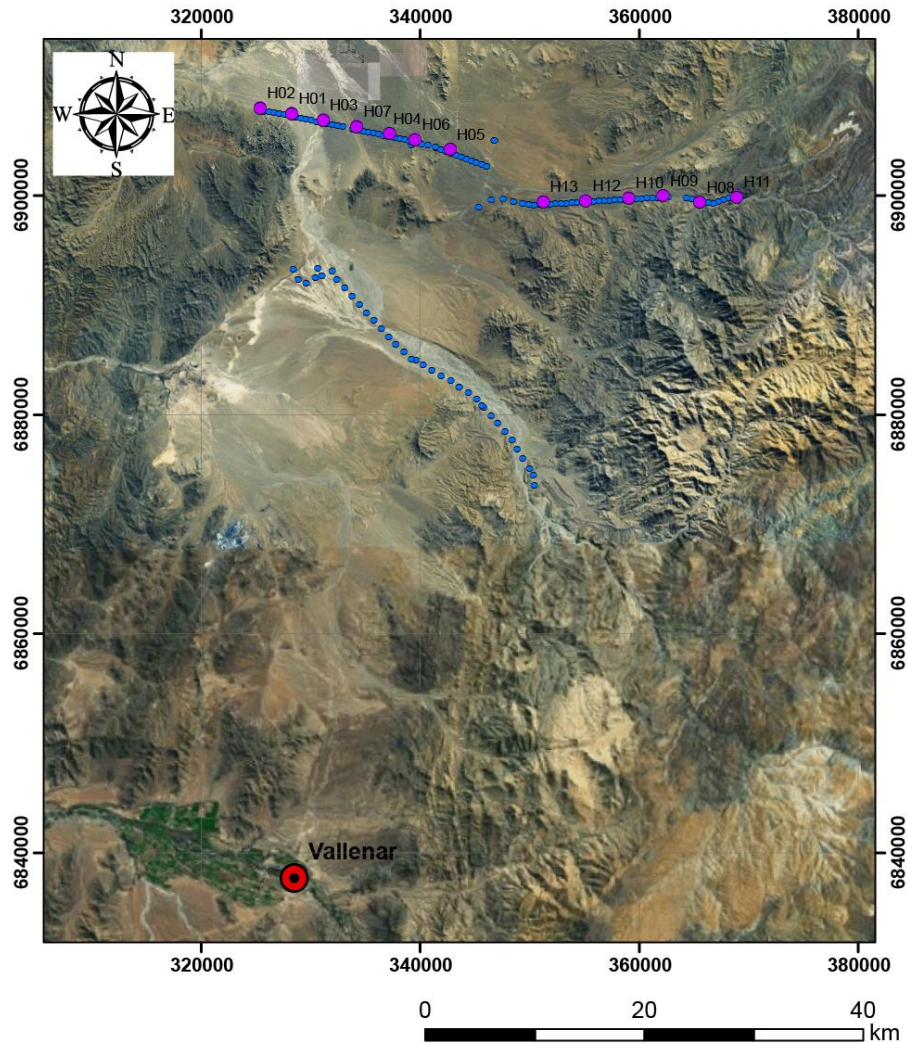


Figura 34. Vista de las ubicaciones de las estaciones de MT en puntos morados. También se observa la ubicación de los perfiles Norte y Sur en puntos azules.

Estos perfiles MT se usaron para modelar el espesor del relleno no consolidado ya que es posible extraer la profundidad de este relleno basado en los siguientes criterios. Los pozos de captaciones de aguas señalados anteriormente, indican la presencia de un acuífero hospedado en los sedimentos no consolidados, por lo tanto, el techo y la base del acuífero (y posiblemente la base del sedimento) están marcados con resistividades bajas debido a la presencia de agua. Del análisis de los perfiles de MT se obtiene lo siguiente:



Tabla 6. Los perfiles MT están ordenados de acuerdo a la dirección de oeste a este. El valor en metros corresponde a la profundidad desde la superficie. Del perfil H11 no se puede extraer una información clara.

ID	Contacto roca-relleno no consolidado (m)
H02	45-75
H01	200-280
H03	180
H07	200
H04	150
H06	90-100
H05	200
H13	140
H12	90-120
H10	90
H09	90
H08	70
H11	-

Esta información es muy importante, y por lo tanto en base a esto se fijaron las correspondientes condiciones de borde al momento de modelar en el programa *Model Vision* la base de la Unidad Depósitos no Consolidados (Tabla 4)

#### 4.4 Anomalía Residual

Luego de realizar el procesamiento de los datos gravimétricos obtenidos en terreno (Anexo B), se obtuvieron las curvas de Anomalía Completa de Bouguer ( $A_{BC}$ ) para los perfiles Norte y Sur. Adicionalmente se consideró como tendencia regional un plano para cada perfil, cuyas ecuaciones 3 y 4 corresponden a la tendencia de los perfiles Norte y Sur respectivamente.

$$R = 48.03781625 + (x - 325674.379) \cdot -0.001816438038 + (y - 6898955.672) \cdot 0.0003536561462 \quad (3)$$

$$R = 41.20303841 + (x - 328359.84) \cdot -0.0009688620026 + (y - 6873518.481) \cdot 0.0008144300156 \quad (4)$$

Finalmente, la resta entre la  $A_{BC}$  y la tendencia regional da como resultado la Anomalía Residual para cada perfil. Los resultados están expuestos en la Figura 35 y en la Figura 36. Para observar los valores de las distintas correcciones realizadas ver los Anexos C y D.

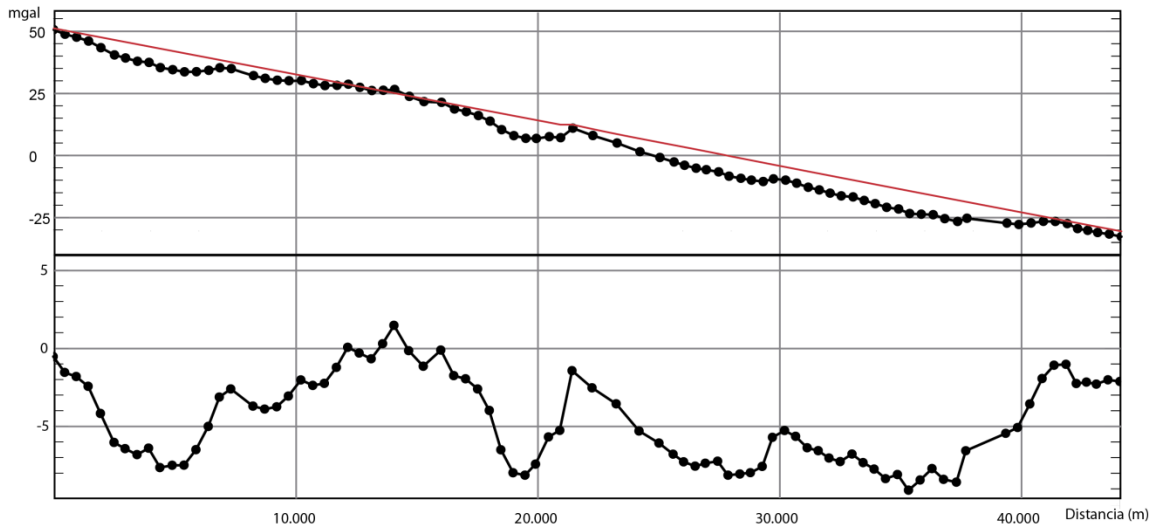


Figura 35. Perfil Norte. En la parte superior se observa la  $A_{BC}$  mostrada con puntos negros. La línea roja corresponde a la Anomalía Regional. La resta entre estas dos da como resultado la Anomalía Residual mostrada en la parte inferior de la figura.

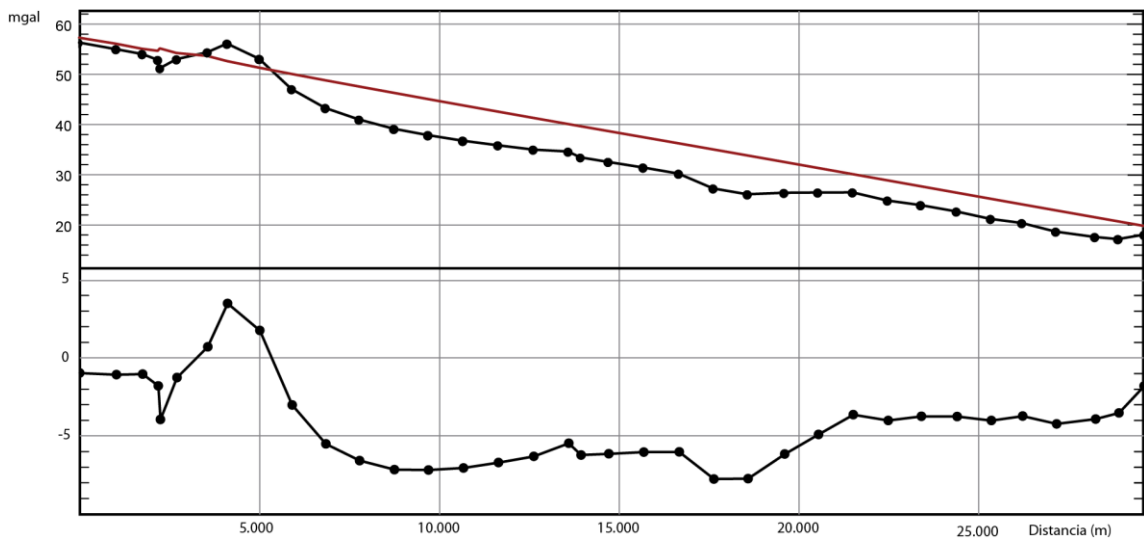


Figura 36. Perfil Sur. En la parte superior se observa la  $A_{BC}$  mostrada con puntos negros. La línea roja corresponde a la Anomalía Regional. La resta entre estas dos da como resultado la Anomalía Residual mostrada en la parte inferior de la figura.

## 5 CAPÍTULO: ANÁLISIS

### 5.1 ¿Qué produce la anomalía positiva en borde occidental de la cuenca?

Como se ha mencionado en el Capítulo 4, podrían existir cuerpos en profundidad que no alcanzan la superficie y que son evidenciados por los resultados de la Anomalía Residual, en la sección 4.4. Siguiendo con esta idea, los perfiles gravimétricos de la Figura 35 y Figura 36 permiten observar una anomalía positiva considerable en el lado oeste, cerca de la Cordillera de la Costa, que podría estar ocasionado por un importante contraste de densidad originado por un cuerpo en profundidad que no aflora en superficie. Se tiene como antecedente un alineamiento en forma longitudinal con estas dos anomalías, donde es posible encontrar las siguientes minas de hierro (Figura 37), que tienen relación con el contexto metalogénico de la Franja Ferrífera Chilena (FFCH): Adrianita, Bellavista, Los Colorados y El Algarrobo (SERNAGEOMIN, 2011). Otro antecedente es aportado por Vivallo y Henríquez (1997), que sugieren que la mayor parte de los cuerpos de mena de magnetita maciza de la FFCH fueron formados a partir del emplazamiento de un magma de mena, que desarrolló a su alrededor un halo de rocas alteradas hidrotermalmente. Estos antecedentes indican:

- Una alineación entre las minas con las anomalías positivas.
- Se sugiere que la mayor parte de los depósitos de FFCH fueron formados por un magma de mena, lo que implica un origen magmático.
- Las anomalías positivas son amplias, aproximadamente tienen un ancho de 6 km y 3 km en los perfiles norte y sur respectivamente, por lo tanto no es posible asignar estas anomalías a un solo yacimiento.

Con estas observaciones, se tiene como hipótesis que la anomalía positiva notable de los dos perfiles es debido a un intrusivo vinculado a procesos responsables de la mineralización de hierro en la Franja Ferrífera Chilena. Para apoyar esta hipótesis se tiene una imagen de magnetometría del área Chacritas realizada por Vivallo y Donoso (2013), la cual está dentro de la zona de estudio. Como se muestra en la Figura 38, la anomalía positiva gravimétrica del perfil Sur coincide con una anomalía magnética, lo cual sugiere que el cuerpo responsable tendría un valor relativamente alto de densidad en relación a las unidades adyacentes, probablemente debido a la presencia de magnetita.

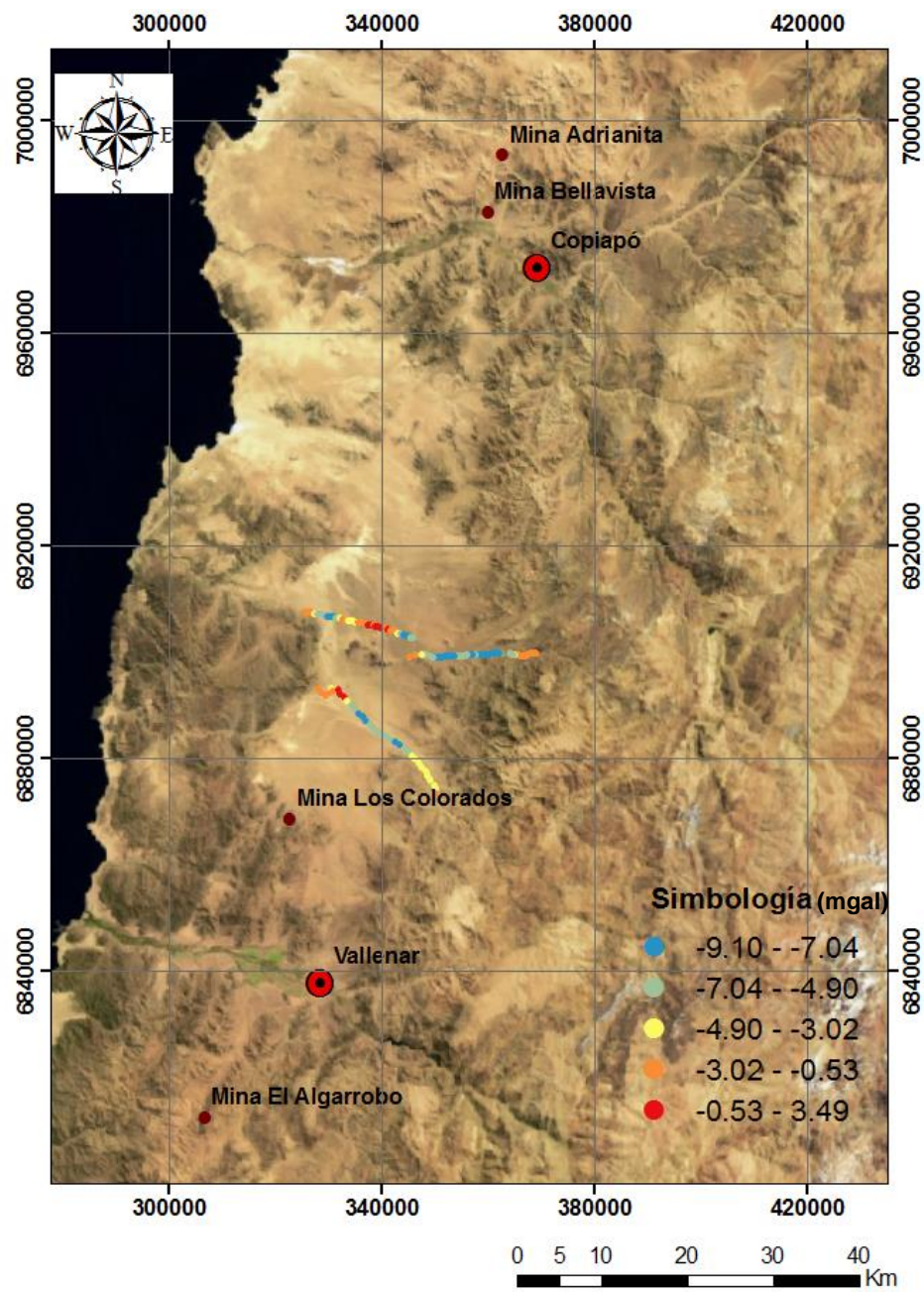


Figura 37. Mapa donde se muestra las faenas mineras más próximas a la zona de estudio. Los perfiles gravimétricos Norte y Sur están coloreados de acuerdo a su valor de la anomalía residual en mgal.

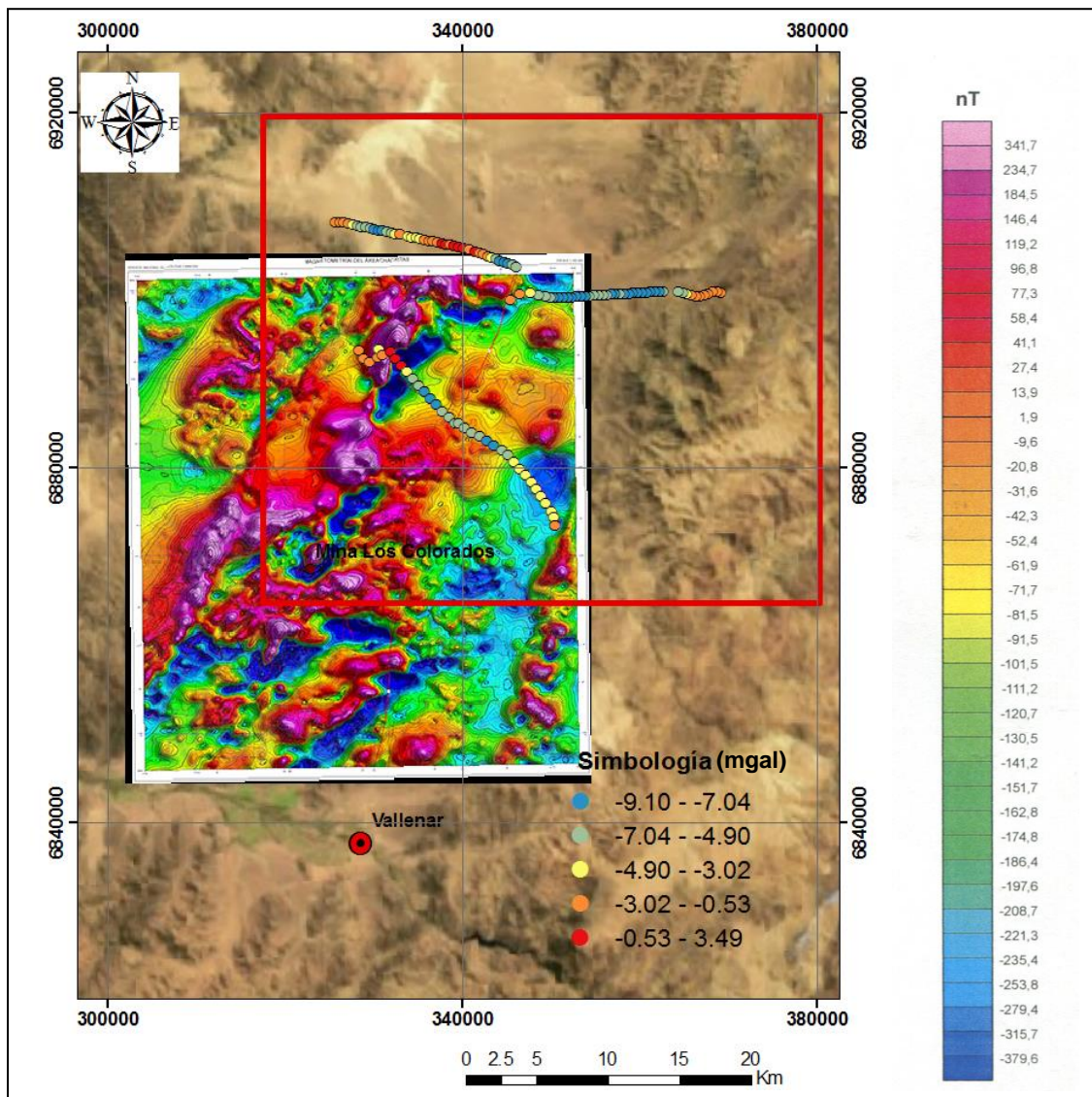


Figura 38. Magnetometría del área Chacritas realizada por Vivallo y Donoso (2013). En la imagen, la zona de estudio está marcada por un rectángulo rojo, además se muestran las ubicaciones de los perfiles de adquisición de datos gravimétricos Norte y Sur, los cuales están coloreados según sus valores en miligales. A la derecha se presenta la leyenda de la imagen magnética en valores de nanotesla. Se observa como la anomalía positiva gravimétrica del perfil Sur coincide con una anomalía positiva magnética, lo cual sugiere que el cuerpo responsable tendría una densidad alta, quizás, debido a la presencia de minerales como la magnetita.

## 5.2 Modelamiento gravimétrico

Como se ha dicho anteriormente, diferentes cuerpos pueden dar la misma señal gravimétrica, por lo tanto distintos modelos pueden ser la respuesta para una misma Anomalía Residual. Es por esto que se necesita tener la mayor cantidad de información geológica para así proponer un modelo con un mayor grado de confiabilidad. Gracias a los antecedentes ya expuestos es posible mostrar los siguientes perfiles justificando sus densidades, geometrías y profundidades.

### 5.2.1 Perfil Norte

El modelamiento del perfil comenzó con la definición de la Unidad Depósitos no consolidados (Tabla 4). Para esto se consideraron las profundidades obtenidas de los perfiles de MT mostrados en la Tabla 6, sección 4.3, como condiciones de borde (Figura 39). Inicialmente fue modelada con una base plana y con un espesor que se incrementaba hacia el oeste, pero luego, se observó que ciertas zonas estaban más cerca de los cerros que otras, lo que dio a suponer que mientras más cerca se estuviese de los cerros, menor sería el espesor del sedimento no consolidado, como se ilustra en la Figura 40. La Figura 39 da cuenta de lo anterior, ya que se observa que en el sector de la anomalía positiva hay tres *peaks*, que corresponderían a efectos de la topografía en vez de indicar la presencia de algún cuerpo denso, como lo sugiere la Figura 41, donde se muestra que estos *peaks* están ubicados cerca de tres cerros. Otros *peaks* más locales, 4 y 5 en la Figura 39, también están más cerca de altos topográficos que las demás estaciones gravimétricas.

Siguiendo con el modelamiento, al este del perfil de la Figura 39 se observaron geometrías bien particulares en relación a la curva de Anomalía Residual: bajos gravimétricos que van aumentando su valor progresivamente hacia el oeste, para luego disminuirlo abruptamente. Se interpreta que esto es debido a que las unidades estratigráficas, en subsuperficie, presentan una geometría de hemigraben, por lo tanto la Unidad Relleno de la Cuenca (Tabla 4) se modeló siguiendo esa geometría. Por otro lado, en el segmento occidental del mismo perfil, se tiene un alto gravimétrico destacable, por lo tanto si bien existe relleno de la cuenca, también existe un cuerpo denso que genera esa respuesta gravimétrica, por lo tanto en este segmento la Unidad Relleno de la Cuenca y la Unidad Intrusivo Denso (Tabla 4), como comparten un borde en común, se modelaron conjuntamente. Finalmente, como se dijo anteriormente (sección 4.1), la densidad de las unidades intrusivas del Cretácico Inferior, es semejante a la del basamento, por lo que esta no fue modelada, pero aun así se optó por dibujarla para marcar el límite oeste de la Unidad Relleno de la Cuenca (Tabla 4), cuyo contacto fue considerado a partir del mapa geológico (Figura 8). Como resultado se obtuvo el perfil mostrado en Figura 42.

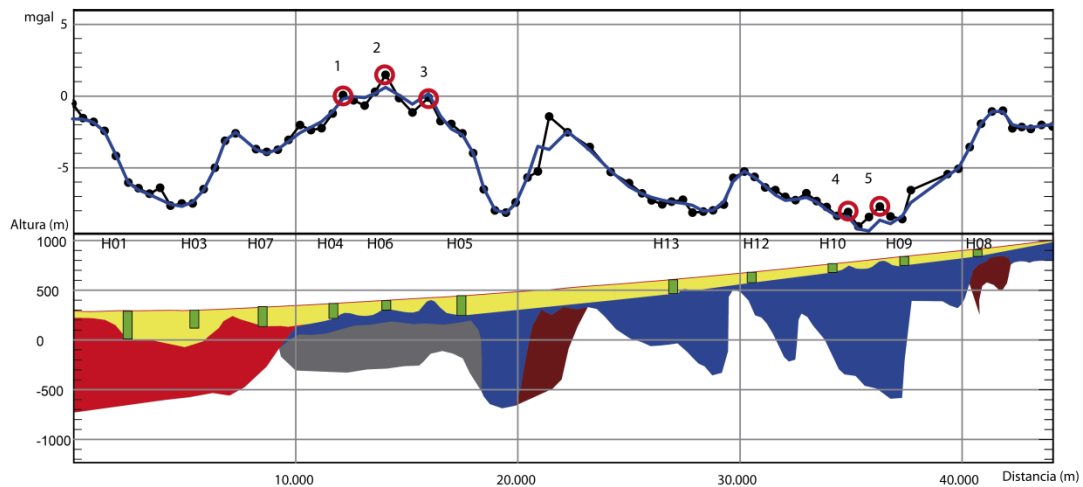


Figura 39. En el Perfil Norte están dibujadas las ubicaciones de los perfiles MT con sus respectivas profundidades según la Tabla 6 y están representadas por barras de color verde. Los círculos rojos indican ciertos *peaks* debido a la topografía, ver Figura 41.

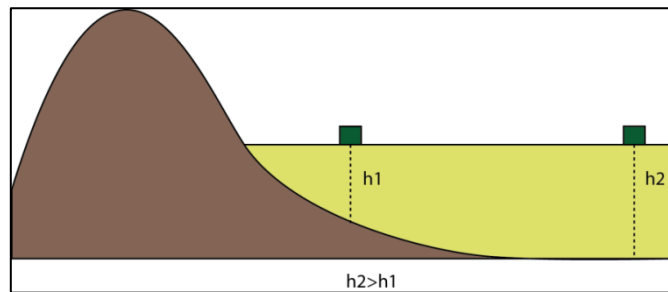


Figura 40. Se ilustra de forma esquemática un cerro y el relleno sedimentario no consolidado. Mientras más cerca se está del cerro, es más probable que el espesor del relleno sea menor.

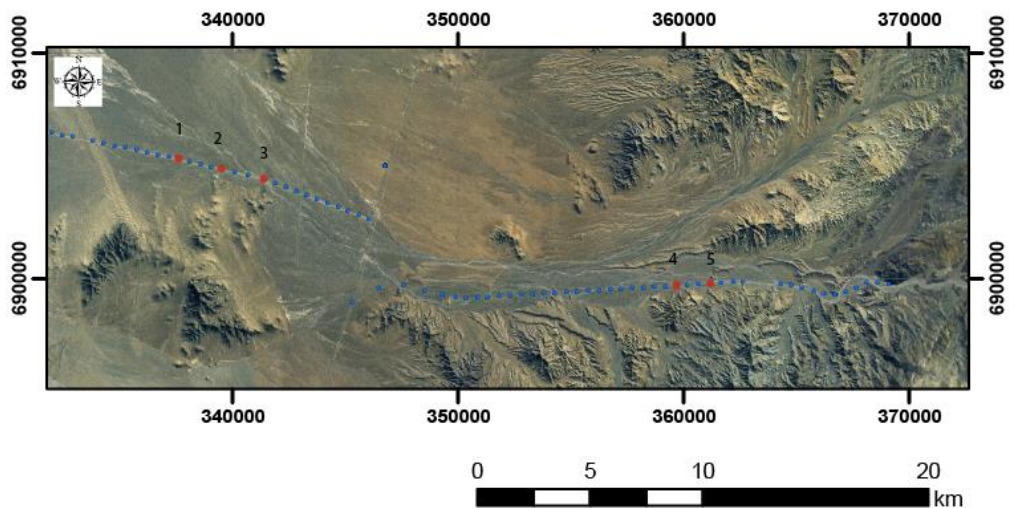


Figura 41. Se muestra la ubicación de los *peaks*, en puntos de color rojo, mostrados en la Figura 39. Notar la especial relación y cercanía que tienen estos pequeños altos gravimétricos con la topografía.

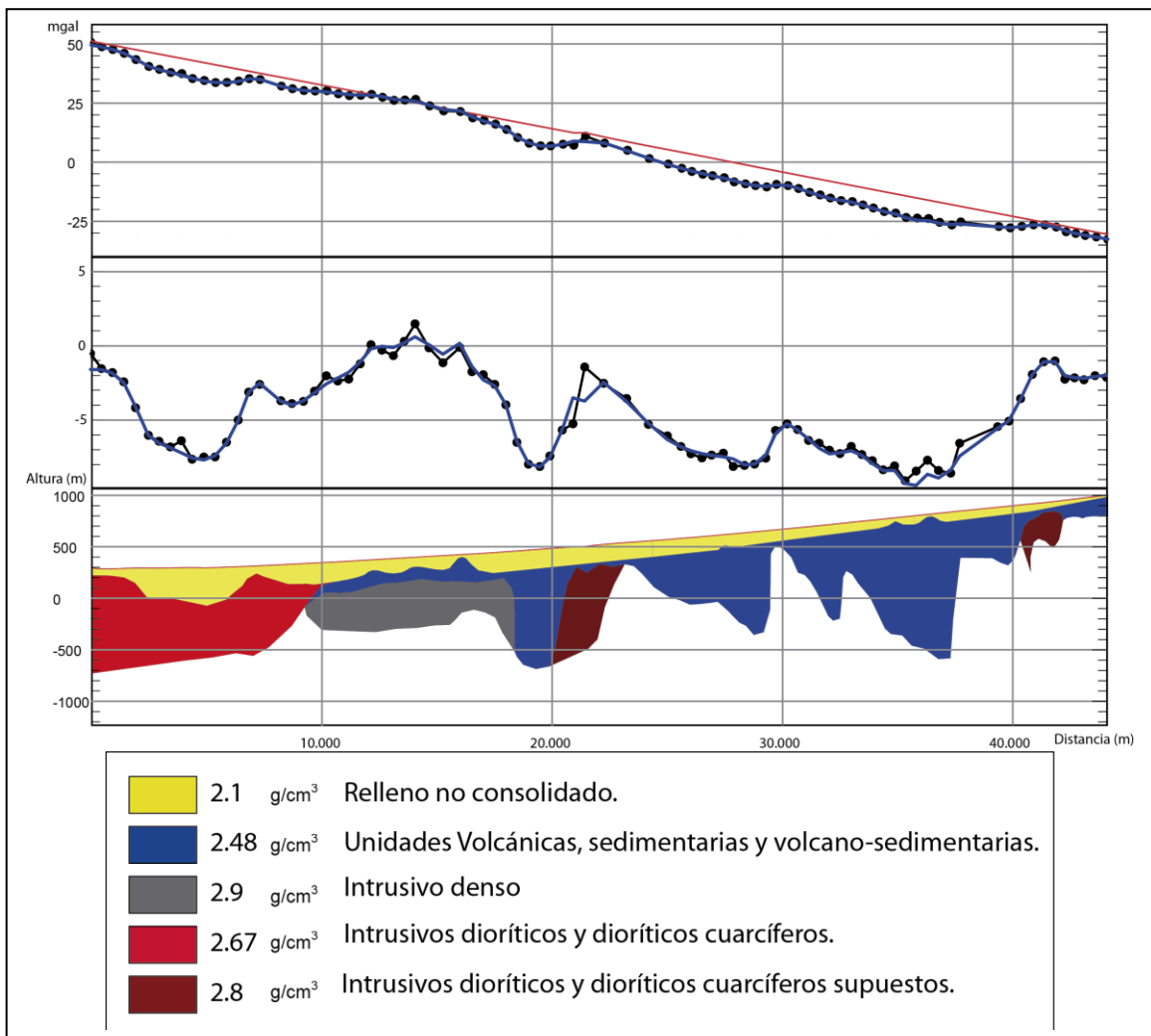


Figura 42. Perfil Norte. En la parte superior de la figura se observa la curva de Anomalía de Bouguer Completa (puntos negros) con la respectiva tendencia regional (línea roja), además de la señal modelada (línea azul). En la parte del medio, la Anomalía Residual también está representada por puntos negros y la señal modelada, por la línea azul. Luego en la parte inferior se muestran los cuerpos que producen la respectiva señal. Es importante destacar que el cuerpo rojo de densidad  $2.67 \text{ g/cm}^3$  se dibujó para destacar el contacto entre las unidades que rellenan la cuenca y los intrusivos del Cretácico, pero no genera respuesta gravimétrica ya que tiene la misma densidad que el basamento. La simbología es la misma para la Figura 44.

Analizando el perfil de la Figura 42, alrededor de la distancia 20.000 y 40.000 m, se observa que fue necesario incorporar dos cuerpos de una mayor densidad para ajustar mejor la curva, que si bien no afloran a lo largo de la transecta, si afloran a unos 10 km y 2 km más al norte, perteneciendo al grupo de intrusivos del Cretácico Inferior y Superior respectivamente. Para que la señal del cuerpo se hubiera ajustado a la curva de anomalía residual con una geometría consecuente con el modelo, se asignó arbitrariamente una densidad del  $2.8 \text{ g/cm}^3$ .



### 5.2.2 Perfil Sur

Al igual que en el perfil anterior, el modelamiento del perfil Sur comenzó con la definición de la Unidad Depósitos no consolidados (Tabla 4). Debido a que a lo largo de este perfil no se realizaron perfiles MT, el criterio utilizado fue ocupar la profundidad obtenida de los pozos de la Tabla 5, suponiendo que el espesor aumentaba hacia el oeste al igual como se hizo en el Perfil Norte; en particular se usaron los valores de 86 m y 120 m de profundidad (ver Figura 43 para su ubicación), los cuales indicarían el espesor mínimo para esta unidad. Cabe señalar, que en la parte oriental del Perfil Sur, el espesor disminuye considerablemente debido a la cercanía con los afloramientos de roca de los cerros.

Al este del perfil de la Figura 43, aunque no se observaron las geometrías bien definidas que parecen sugerir un hemigraben como se hizo en el perfil Norte, si es posible observar bajos gravimétricos que indicarían de cierta medida depocentros, por lo cual se modeló la Unidad Relleno de la Cuenca (Tabla 4) intentando que la respuesta gravimétrica se asemejará a la Anomalía Residual. Por otro lado, en el segmento occidental del mismo perfil se tiene un alto gravimétrico destacable, que sugiere que, si bien existe relleno de la cuenca, también existe un cuerpo denso que genera esa respuesta gravimétrica, por lo tanto en este segmento la Unidad Relleno de la Cuenca y la Unidad Intrusivo Denso (Tabla 4), como comparten un borde en común, se modelaron conjuntamente. Cabe destacar que, como en el Perfil Norte, la densidad de las unidades intrusivas del Cretácico Inferior (sección 4.1) se consideró semejante a la del Basamento, por lo que no fue modelada, pero aun así se dibujó para marcar el límite oeste de la Unidad Relleno de la Cuenca. Como resultado se obtiene el perfil mostrado en la Figura 44.

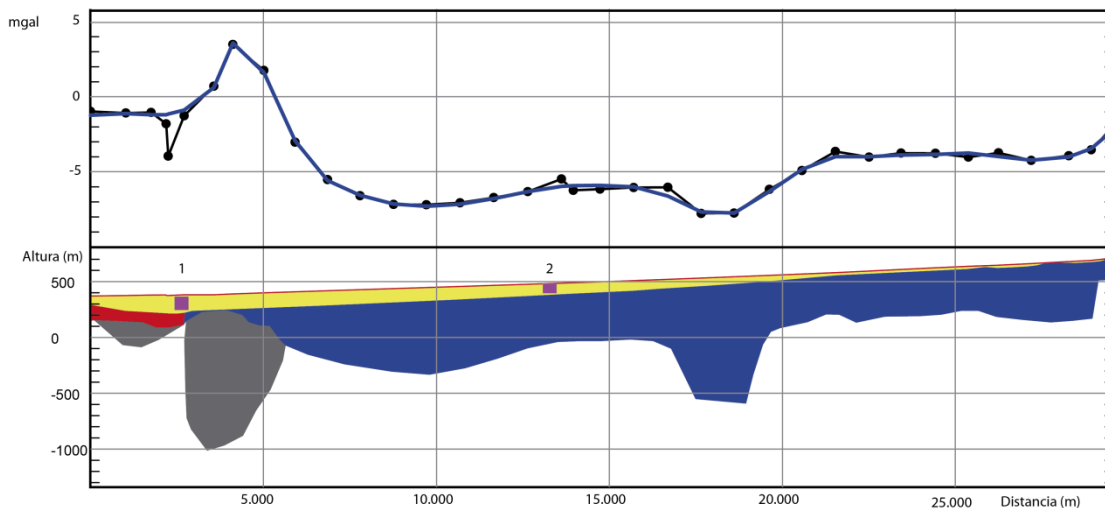


Figura 43. Las barras moradas muestran las condiciones de bordes obtenidas de los pozos de la sección 4.3 e indican las profundidades mínimas que tendría el relleno no consolidado. Los números 1 y 2 marcan la profundidad 120 y 86 metros, respectivamente.

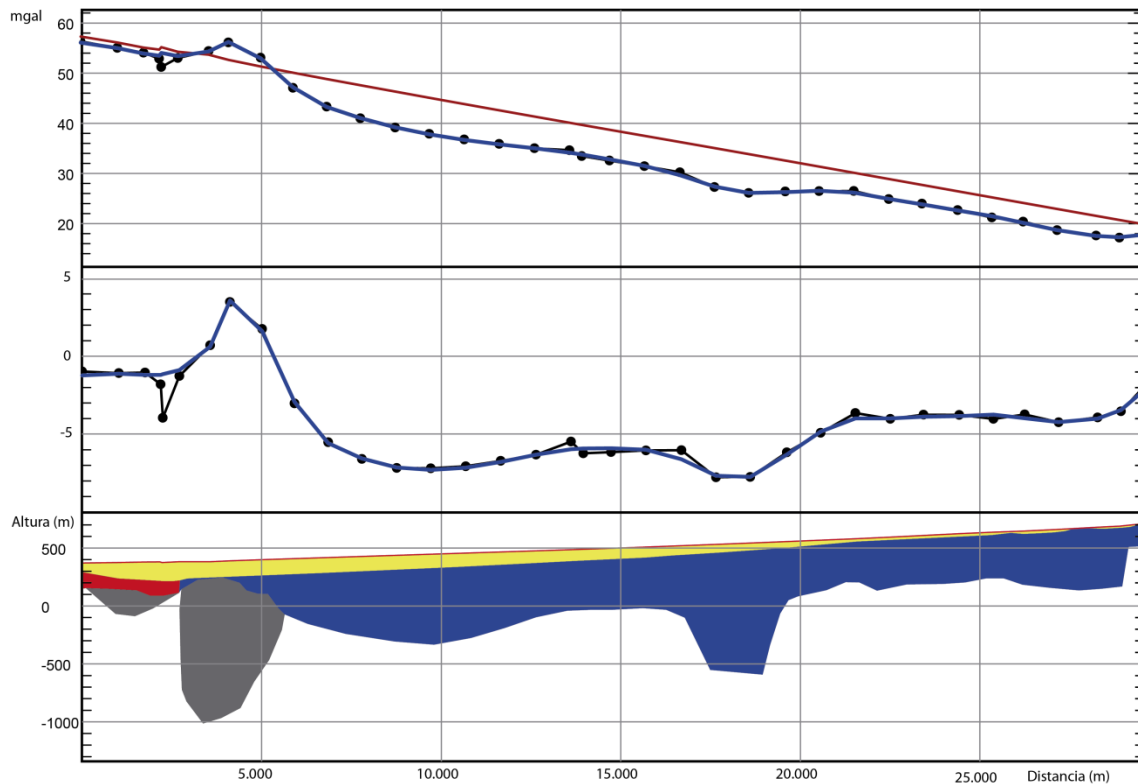


Figura 44. Perfil Sur. En la parte superior de la figura se observa la curva de Anomalía de Bouguer Completa (puntos negros) con la respectiva tendencia regional (línea roja), además de la señal modelada (línea azul). En la parte del medio, la Anomalía Residual también está representada por puntos negros y la señal modelada, por la línea azul. Luego en la parte inferior se muestran los cuerpos que producen la respectiva señal. Es importante destacar que el cuerpo rojo de densidad  $2.67 \text{ g/cm}^3$  se dibujó para destacar el contacto entre las unidades que rellenan la cuenca y los intrusivos del Cretácico, pero no genera respuesta gravimétrica ya que tiene la misma densidad que el basamento. Simbología en Figura 42.

### 5.3 Perfiles Estructurales

#### 5.3.1 Perfil Norte

Para generar un modelo estructural se integró la información obtenida por: la gravimetría, la información geológica de superficie y la recopilación bibliográfica de perfiles estructurales de la zona de estudio.

Del estudio gravimétrico del perfil Norte es importante destacar que las soluciones pueden ser variadas, por lo tanto el modelo aquí presentado puede ser ampliamente criticado, pero lo cierto, es que de la curva de Anomalía Residual se observan bajos con geometrías específicas: valores pequeños de miligales que van aumentando su valor hacia el oeste para luego disminuirlo abruptamente repitiéndose el ciclo. Una posible solución es que correspondan a depocentros. En la Figura 45 (donde la escala del eje x y el eje de la altura son iguales) es posible observar 3 de estos

depocentros cuyas profundidades máximas corresponden de este a oeste a: 1420 m, 980 m y 1154 m. A grandes rasgos, en cada depocentro, los espesores del relleno disminuyen hacia el oeste, por lo que se propone que la geometría del relleno podría corresponder a distintos hemigrábenes.

En la Figura 45 también se han puesto las condiciones de borde de la geología de superficie como lo son los manteos, las estructuras observadas y la litología. Toda esta información fue obtenida de los mapas realizados por: Blanco *et al.* (2003), Arévalo (2005b), Arévalo y Welkner (2008) y Peña *et al.* (2013); y se muestra en el mapa geológico de la Figura 8.

Con las observaciones realizadas en los distintos perfiles estructurales (Figura 7) se propone el siguiente modelo para el Perfil Norte mostrado en la Figura 47, donde se justificarán las fallas en orden este a oeste. La primera está dada por la Falla Santa María, de sentido inverso y vergencia oeste, la cual es observada en superficie y además podría explicar la presencia del Intrusivo diorítico y diorítico cuarcífero supuesto (Figura 42), obtenido de la gravimetría. Luego, se encuentra la falla invertida de borde de cuenca y de manto al oeste, llamada Elisa de Bordos; ésta no aflora en superficie a lo largo del perfil, sino que lo hace un poco más arriba (ver Figura 8). El mismo depocentro, limitado al este por la falla anterior, muestra una discontinuidad al oeste, la cual puede ser atribuida a una falla de sentido normal. El segundo depocentro tiene la misma característica, está limitado por una falla invertida y dentro posee otra discontinuidad, una falla normal la cual es observada en superficie. El tercer depocentro se explicaría por una falla normal, la cual a su vez, justificaría la presencia del intrusivo. Desde la falla de borde de cuenca hasta el SFA, las fallas son sintéticas. Se propone una geometría de fallas lítricas que, quizás, partirían desde un mismo nivel de despegue a los 9 km de profundidad; este valor fue considerado de Martínez *et al.* (2013). También fue dibujada la traza del Sistema Falla de Atacama de sentido sinistral. La presencia de esta falla será discutida en la sección 6.3.3

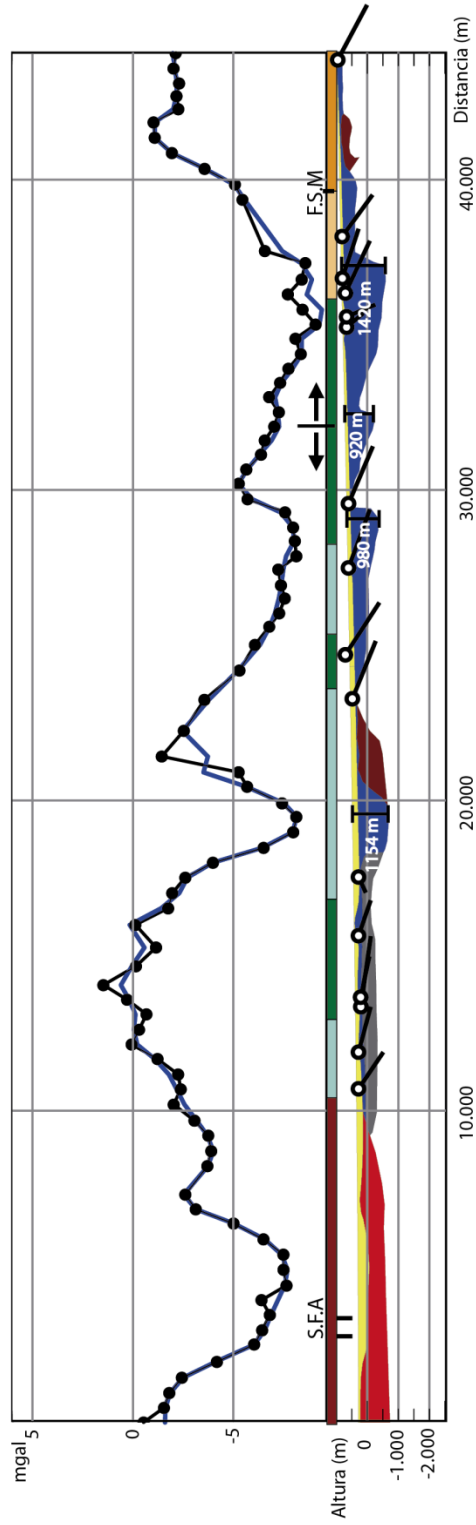


Figura 45. Condiciones de borde para elaborar un perfil estructural. La barra horizontal de colores indica la litología observada en superficie. Superpuesta a esta barra se muestran las estructuras también observadas en superficie, además a lo largo del perfil se dibujaron los manteos. Toda esta información proviene del mapa geológico de la Figura 8. Finalmente los números de color blanco indican las profundidades de los depocentros. Simbología en la Figura 46

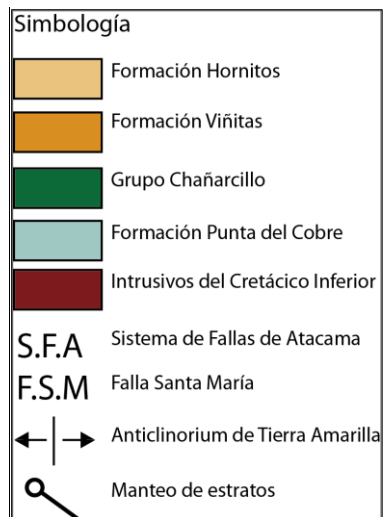


Figura 46. Simbología de la Figura 45 y de la Figura 48.

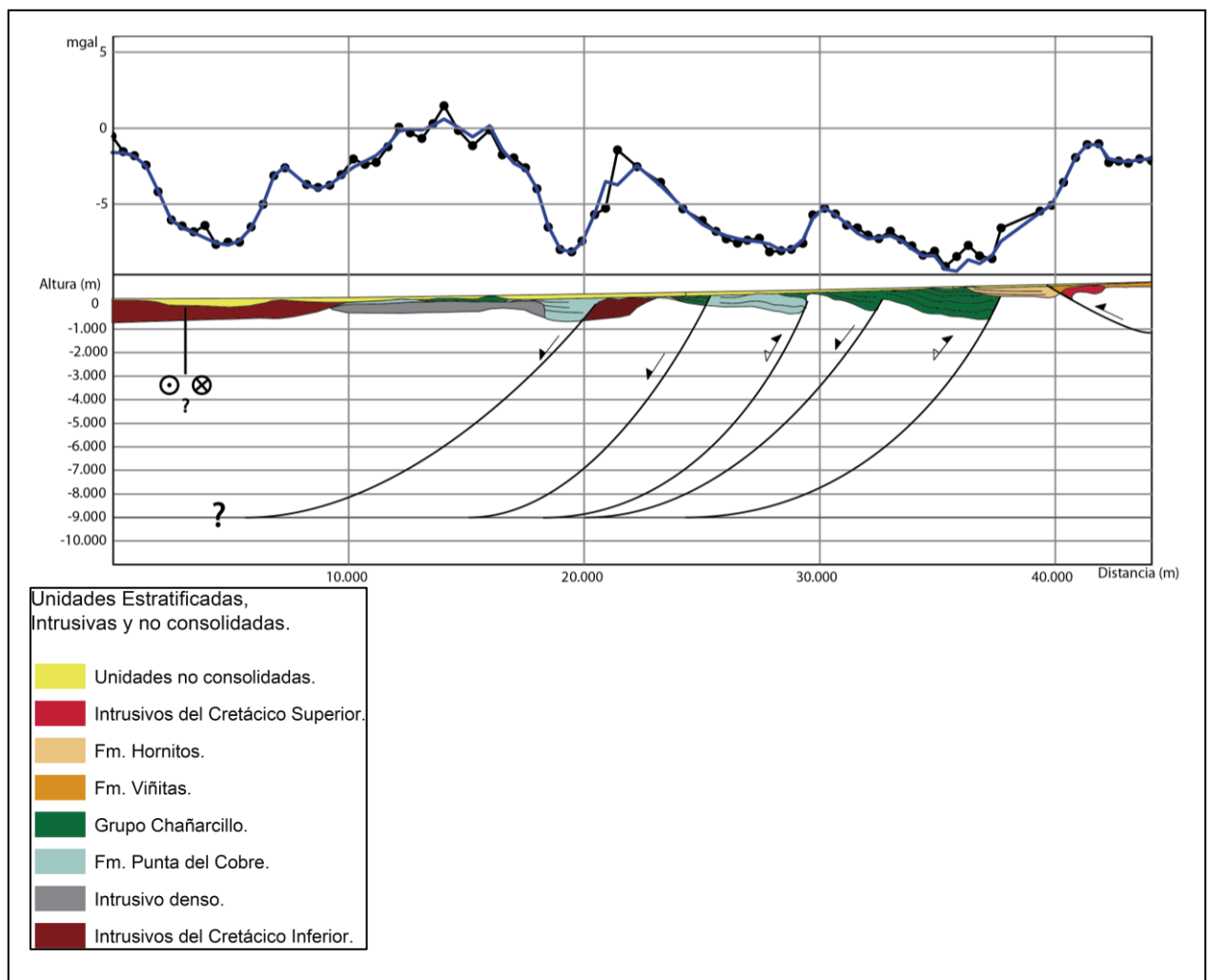


Figura 47. Perfil Estructural Norte. Se muestran los tres principales depocentros limitados por fallas listricas invertidas y normales. Dentro de dos depocentros se observan discontinuidades internas explicadas por fallas normales. También al oriente está dibujada la Falla Santa María y al occidente la traza del SFA.

### 5.3.2 Perfil Sur

Se trabajó de la misma manera que en el Perfil Norte para el Perfil Sur, es decir, se integró la información obtenida por: la gravimetría, la información geológica de superficie y la recopilación de modelos estructurales de la zona de estudio, para generar un perfil estructural.

La curva de Anomalía Residual, al parecer es más suave que la del Perfil Norte, pero aun así es posible distinguir dos bajos gravimétricos, el más oriental es muy sutil, pero el que está al medio del perfil es más marcado, los que al momento de modelar la Unidad Relleno de la Cuenca (Tabla 4), dan las siguientes profundidades: 500 m y 1170 m, respectivamente. Se consideraron geometrías de hemigraben para los depocentros a pesar de no son tan directas como se vio en el Perfil Norte, utilizando la siguiente justificación: ambos perfiles comparten las mismas características geológicas, por lo tanto se hace la suposición de que si el Perfil Norte tiene ese arreglo estructural, el Perfil Sur también.

En la Figura 48 también se han puesto las condiciones de borde de la geología de superficie como lo son los manteos, las estructuras observadas y la litología. Toda esta información fue obtenida de los mapas realizados por Blanco *et al.* (2003), Arévalo (2005b), Arévalo y Welkner (2008) y Peña *et al.* (2013); y se muestra en el mapa geológico de la Figura 8.

Finalmente, la Figura 49 muestra el resultado. El borde de la cuenca está dado por la falla invertida oriental Elisa de Bordos de vergencia este, la cual no aflora en superficie a lo largo del perfil, pero que tendría una continuidad desde del perfil Norte al sur. Luego el siguiente depocentro está limitado al este por otra falla invertida sintética, donde en el mismo evento compresivo se podría haber formado la tercera estructura de carácter inverso. Se proponen fallas lístricas que, quizás, partirían desde un mismo nivel de despegue a los 9 km de profundidad; este valor fue considerado de Martínez *et al.* (2013).

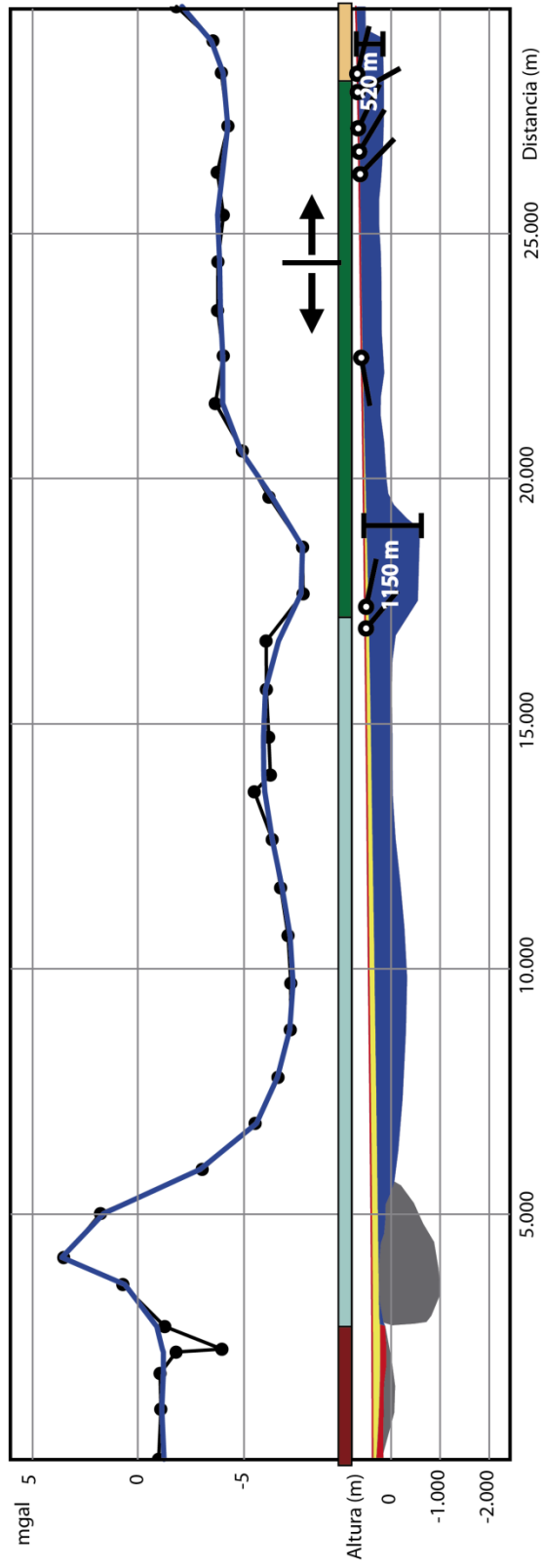


Figura 48. Condiciones de borde para elaborar un perfil estructural. La barra horizontal de colores indica la litología observada en superficie. Superpuesta a esta barra se muestran las estructuras también observadas en superficie, además a lo largo del perfil se dibujaron los manteos. Toda esta información proviene del mapa geológico de la Figura 8. Finalmente los números de color blanco indican las profundidades de los depocentros. Simbología en la Figura 46.

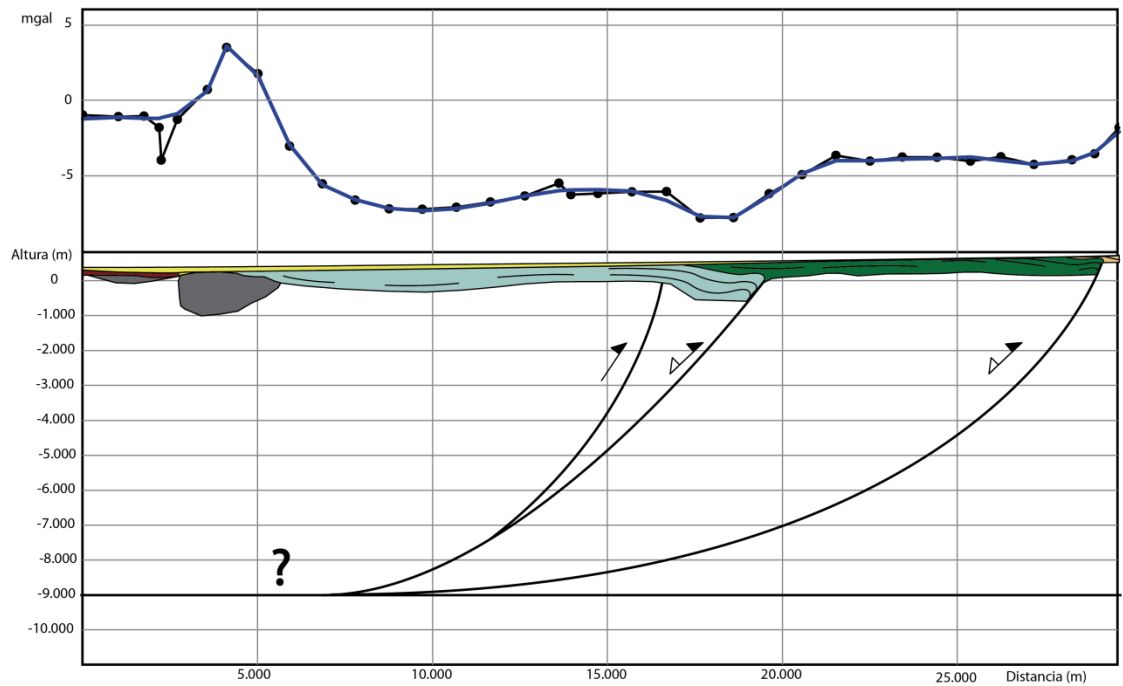


Figura 49. Perfil estructural Sur. Se muestran los dos principales depocentros limitados por fallas lístricas invertidas. La falla inversa, quizás, se desarrolló cuando ocurrió la inversión de la cuenca. Simbología en Figura 47.



## 6 CAPÍTULO: DISCUSIÓN

Este Capítulo discutirá acerca de la veracidad de los perfiles mostrados en la Figura 7, además de la elección de la tendencia regional, como también del logro de los objetivos planteados en la sección 1.2.

### 6.1 Distintos perfiles estructurales

Al contrastar los perfiles estructurales realizados por diversos autores (expuestos en la sección 2.1, en la Figura 7) con los resultados del presente estudio, se generó una discusión sobre cual modelo es más apegado a la realidad y cual no.

Lo que es destacable a primera vista son los espesores máximos para las rocas sedimentarias, considerados por Arévalo (2005a) y Amilibia (2009), donde ambos proponen prácticamente un único depocentro con profundidades superiores a 3 km y 10 km respectivamente. Esto es contrario a lo mostrado en la Figura 45 y Figura 48, ya que es posible observar 3 y 2 depocentros en los perfiles Norte y Sur con profundidades que oscilan entre los 500m y 1420 m, y esto no se explica con los modelos anteriormente mencionados. Aun así Amilibia (2009) menciona un punto importante, con el que sustenta su modelo: es el hecho de que los depósitos continentales de la Formación Cerrillos muestran clastos de calizas metamorfizadas de la Formación Nantoco, lo que trae consigo que la fuente de estos clastos debería estar en el margen oeste de la Cuenca de Chañarcillo, donde la Fm. Nantoco fue metamorfizada durante el emplazamiento de la complejos plutónicos en el Albiano. Para este autor, esto indica que tuvo que haber una inversión en el Albiano que levantó y exhumó el borde oeste de la Cuenca de Chañarcillo, pero en el estudio gravimétrico no hay evidencia para respaldar tal afirmación. Un punto a favor de este modelo es que el autor propone que el estilo estructural desarrollado durante la apertura de la Cuenca de Chañarcillo fue de hemigrábenes en dominó, lo cual es observado en este estudio.

El modelo, al parecer, menos acertado corresponde al de Arévalo y Welkner (2008) ya que afirma que la deformación del Grupo Chañarcillo es debido a *Shorcuts* que parten desde la falla principal que está en contacto con el Complejo Plutónico Los Morteros del Cretácico Superior. Esta afirmación se pone en duda debido a que el Anticlinorium de Tierra Amarilla está a lo largo de los 200 km de la Cuenca de Chañarcillo (Martínez *et al.*, 2013) y en toda esa extensión, el Complejo Plutónico representa solo a una pequeña parte, por lo tanto, si bien podría generar la deformación en las calizas que están en contacto con él, no podría generar la deformación a cabalidad que dio origen al Anticlinorium.

El modelo, quizás, más acertado corresponde a Martínez *et al.* (2013) ya que muestra la existencia de más de un depocentro con profundidades entre 2 y 3 km, proponiendo un arreglo estructural de hemigrábenes en dominó parcialmente invertidos. Aun así en el modelo no está trazado el Sistema de Falla de Atacama (SFA), el cual según Blanco *et al.* (2003), en la carta Castilla y Totoral Bajo, menciona que el intrusivo del Cretácico inferior (Diorita Cuarcifera Barros Luco) se habría emplazado en forma sintectónica a la actividad transcurrente del SFA, intrusivo que está presente en la parte oeste del perfil de Martínez *et al.* (2013).

Otro modelo, pero que no presenta perfil estructural, fue planteado por Arévalo y Mpodozis (1991). Ellos sugieren que la deformación es explicada por un arreglo estructural denominado *Antiformal Stack*, donde las Fms. Nantoco y Totoralillo corresponderían a equivalentes cronológicos y estarían sobrepuestas gracias a un cabalgamiento de vergencia hacia el oeste. Además, cabalgamientos secundarios, de la misma vergencia, producirían repeticiones internas en las Formaciones Totoralillo y Pabellón, generando así un fuerte aumento de espesor de estas secuencias.

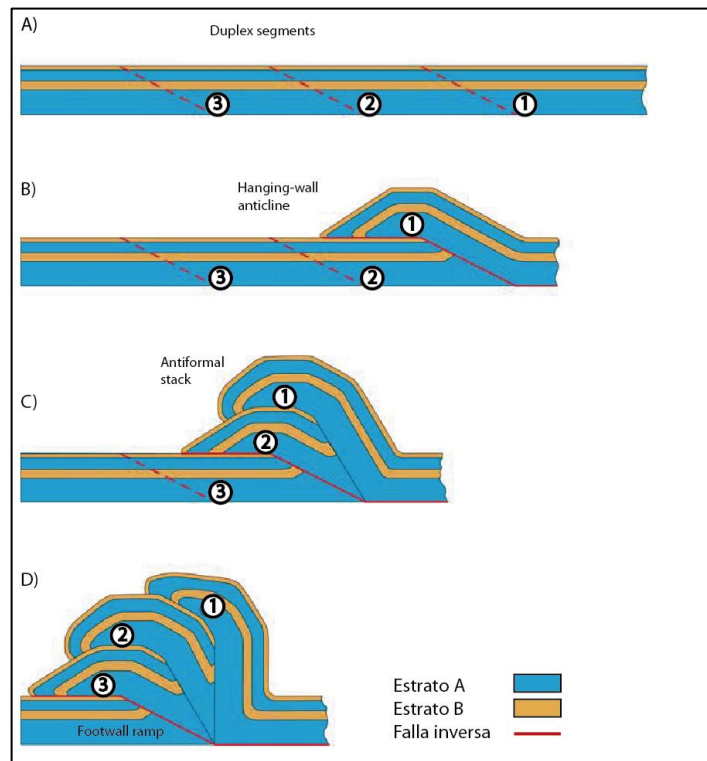


Figura 50. Se observa esquemáticamente paso a paso la creación de un *Antiformal stack* (Modificado de Pedersen, 2005).

Según lo visto en el Capítulo 2 (Marco Geológico) las Fms. Nantoco y Totoralillo tienen las siguientes edades respectivamente: Hauteriviano y Barremiano. Además las tres Formaciones del Grupo Chañarcillo están en contacto concordante. También, Peña *et al.* (2013) señala que es posible reconocer estratos de crecimiento en la Fm. Nantoco. De lo anterior se desprende que las Formaciones Nantoco y Totoralillo no estarían en contacto por falla y además, no corresponderían a equivalentes cronológicos. Asimismo, salvo Arévalo (2005b), ningún otro autor de los mapas del SERNAGEOMIN utilizados para realizar el presente estudio, pone en evidencia que existirían repeticiones internas en las Formaciones Totoralillo y Pabellón debido a cabalgamientos, los cuales serían responsables del aumento de espesor de estas secuencias hacia el este. Por otro lado, en el mapa de la Figura 8 se observa una disminución continua de la edad de las Formaciones del Grupo Chañarcillo hacia el este, lo cual no es consecuente con el esquema de *Antiformal Stack* mostrado en la Figura 50, ya que no se encuentra una intercalación de estratos de distintas edades con secuencias antiguas sobre más jóvenes. En consecuencia se sugiere que el modelo de *Antiformal stack* podría no ser el más apropiado al momento de explicar el Anticlinorium de Tierra Amarilla.

## 6.2 Elección de la Tendencia Regional

Como se mencionó en la sección 3.2.3.3, al momento de elegir la tendencia Regional se hicieron dos suposiciones importantes:

1. Se consideró una zona de una pequeña anomalía positiva en el límite este del perfil Norte, como una respuesta a que el basamento se encontraba cerca de la superficie. Haciendo suponer que allí se encontraba el borde este de la cuenca.
2. En la zona mencionada en el punto anterior, luego de realizar el modelamiento del perfil Norte, este dio un espesor de 200 m para las secuencias *syn-orogénicas* de las Formaciones Hornitos y Viñitas. Por lo tanto se hace la suposición de que en el borde este de la cuenca del perfil Sur se tendría el mismo espesor para estas unidades.

Estas incertezas nacen debido a que no fue posible encontrar el basamento en terreno al este de los perfiles, ya que está sepultado por estas unidades *syn-orogénicas* varios kilómetros hacia el este, escapando de esa manera de la zona de estudio. Por lo tanto, para asegurar el cumplimiento de los objetivos de este trabajo, es necesario conocer qué efectos puede provocar ciertas variaciones del Regional en los perfiles mostrados en la Figura 42 y en la Figura 44.

Como se dijo en el Capítulo: Metodología, para definir el Regional en un perfil 2D es necesario identificar los bordes de la cuenca. En el presente estudio el problema radica en encontrar el borde este de la cuenca, por lo que fue necesario realizar la suposición “1)” con el respaldo de que según Martínez et al. (2013) y Peña *et al.* (2013) los espesores de las Formaciones Hornitos y Viñitas eran considerablemente menores en comparación con las secuencias *syn-rift*, y como se dice en la suposición “2)”, la base de estos se encontraría a 200 m de profundidad. Pero ¿Qué sucedería si esto no fuera correcto? Entonces al cambiar la tendencia Regional ¿Cómo se verían afectadas la geometría y la profundidad de la cuenca aquí presentados? Para responder a estas preguntas se realizaron, para cada perfil, dos experiencias donde el Marcador B (sección 3.2.3.3) aumentaba su valor en la vertical en 2.5 y 5 mgal sobre su condición inicial (como por ejemplo en la zona de la mencionada pequeña anomalía positiva del perfil norte) obteniendo las configuraciones mostradas en la Figura 51 y Figura 52, para los perfiles Norte y Sur.

De todo esto se concluye que la tendencia Regional influye considerablemente en la profundidad del basamento, pero no así en la geometría propuesta para la Cuenca de Chañarcillo, la cual, a pesar de considerar distintos regionales, todavía es posible afirmar que su configuración pertenece a un sistema estructural de hemigrábenes en dominó parcialmente invertidos. Aun así, las profundidades del basamento encontradas en este trabajo pueden no ser las más acertadas, por lo tanto es necesario realizar otros estudios que permitan estimar la profundidad del basamento, como trabajos de sísmica de reflexión.

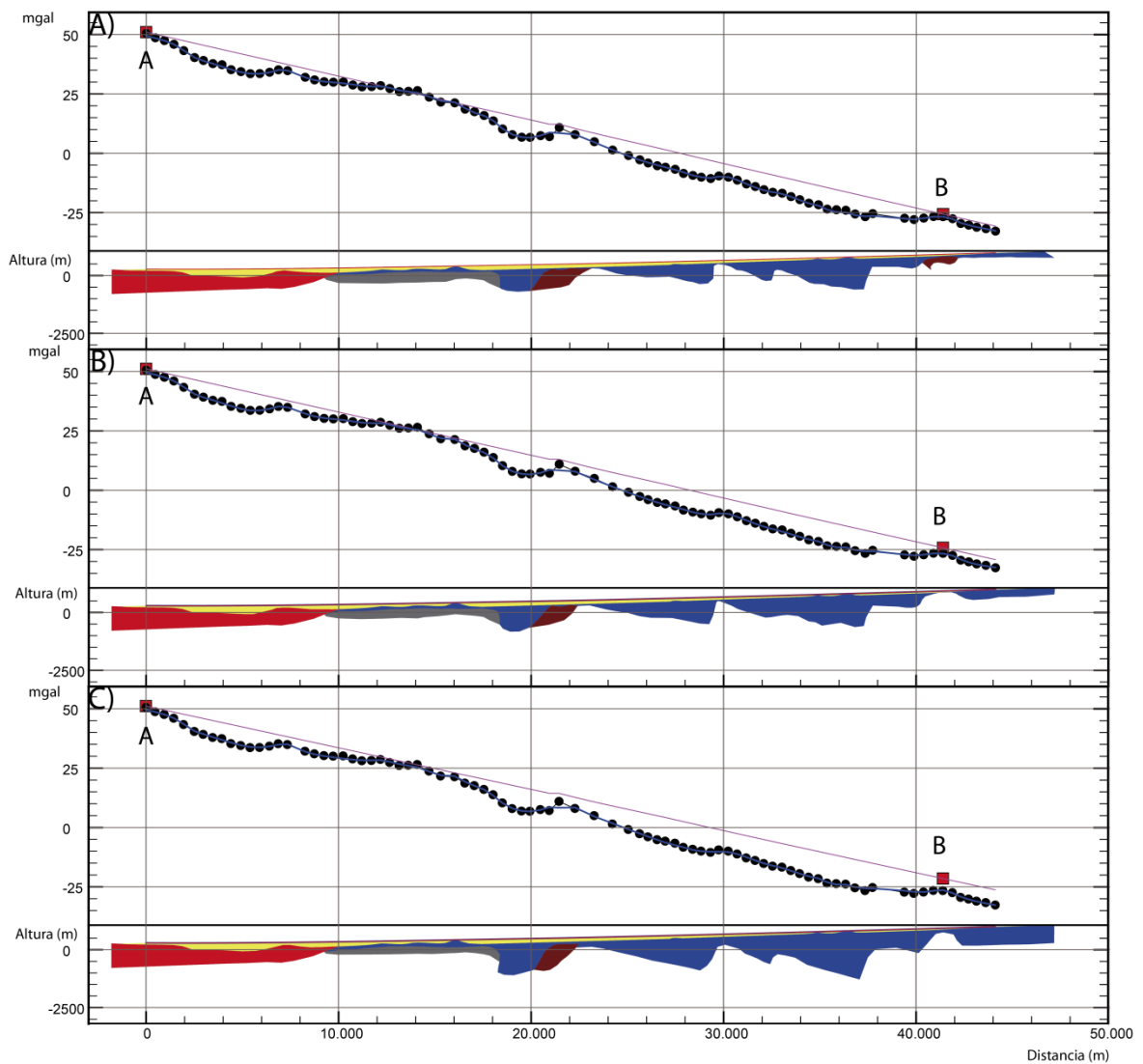


Figura 51. Perfil Norte. Se observa que el Marcador B aumenta su valor en la vertical en 2.5 mgal y 5 mgal en los perfiles B) y C) respectivamente, de acuerdo a su condición inicial (perfil A). De esta forma se pone de manifiesto que la profundidad tiene amplios grados de incerteza, pero no así la geometría propuesta para la Cuenca de Chañarcillo.

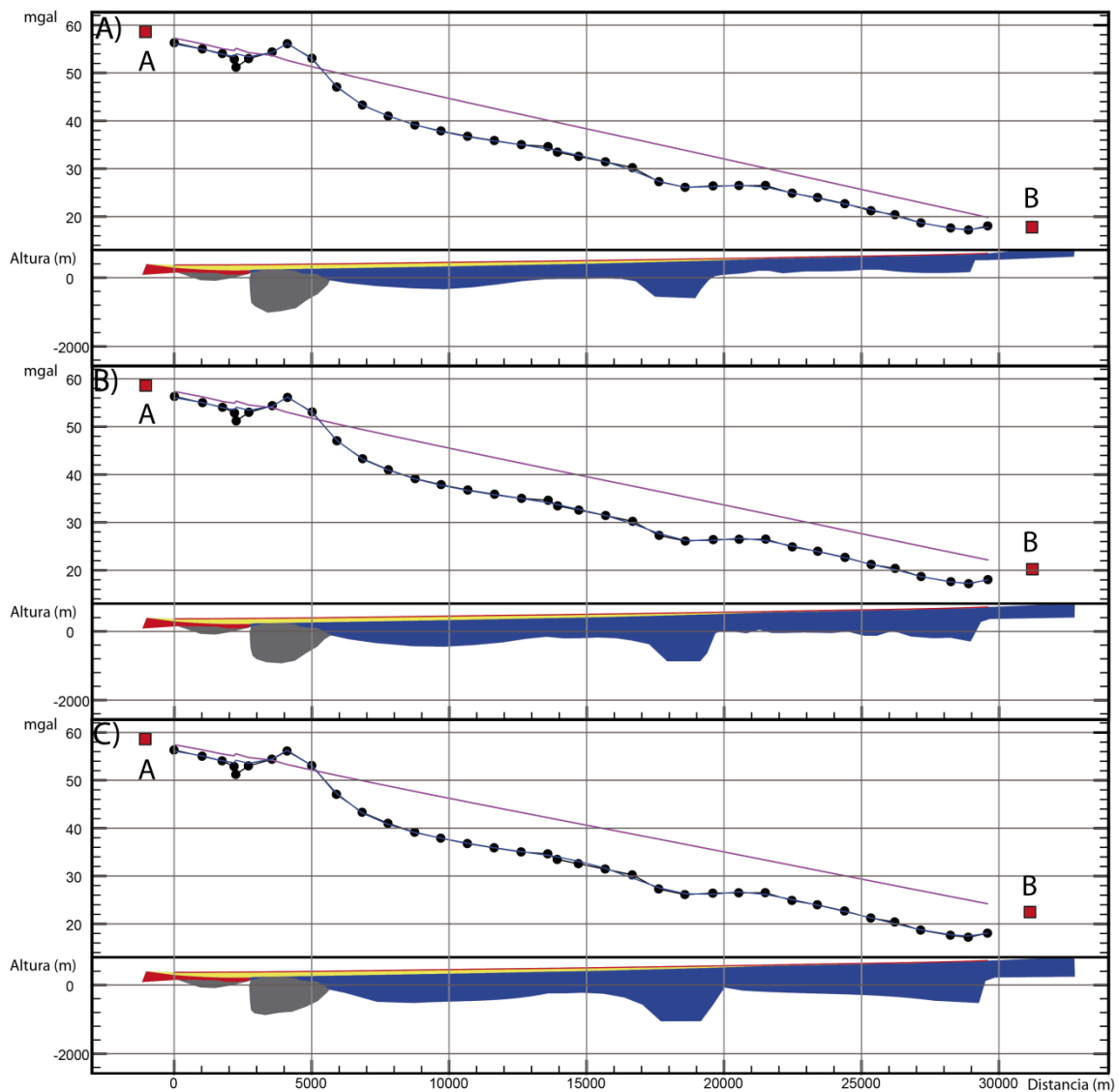


Figura 52. Perfil Sur. Se observa que el Marcador B aumenta su valor en la vertical en 2.5 mgal y 5 mgal en los perfiles B) y C) respectivamente, de acuerdo a su condición inicial (perfil A). De esta forma se pone de manifiesto que la profundidad tiene amplios grados de incerteza, pero no así la geometría propuesta para la Cuenca de Chañarcillo.

### 6.3 Logro de los objetivos propuestos

Como se define en el Capítulo: Introducción, los objetivos del presente estudio son:

“A partir de información gravimétrica 2D y de estudios geológicos-estructurales a escala de cuenca, se pretende definir:

- Posición y geometría de fallas maestras (bordes de cuenca).
- Profundidad del basamento ígneo-metamórfico.
- Espesor del relleno estratigráfico.
- Posibles zonas de emplazamiento de cuerpos intrusivos.”

Como se ha visto, la gravimetría presenta muchas ventajas y desventajas. Dentro de las primeras, es que es una herramienta que permite obtener información del subsuelo a un precio razonable, es sencilla de manipular en terreno y entrega resultados rápidos. Como desventaja se tiene que los resultados pueden ser variados, ya que dependen de la elección de la Anomalía Regional y los valores de densidad, y estos no siempre pueden ser los más correctos para una determinada zona de estudio. Además, es un hecho que muchos modelos pueden ser la solución para una misma Anomalía Residual. Todo esto indica que es de suma importancia contar con la información geológica de superficie y de ser posible, con información de sondajes u otras técnicas geofísicas (perfiles sísmicos y magnetotelúricos). A pesar de estas desventajas, hay ciertas características de los perfiles gravimétricos aquí obtenidos, que sugieren configuraciones con un mayor grado de certeza que es preciso recalcar:

- a) Perfil Norte (Figura 53): se observan dos anomalías negativas con geometrías bien definidas: se acuñan hacia el oeste. También se observa una anomalía positiva, de gran amplitud en el costado occidental del perfil. Dada la información geológica de superficie y los modelos estructurales realizados por distintos autores (Figura 7), es muy probable que las anomalías negativas señaladas correspondan a hemigrábenes. En cambio, la anomalía positiva podría indicar un cuerpo denso en profundidad, quizás, un intrusivo relacionado con los procesos mineralizadores de la Franja Ferrífera Chilena (ver sección 5.1), pero no se tienen más antecedentes.

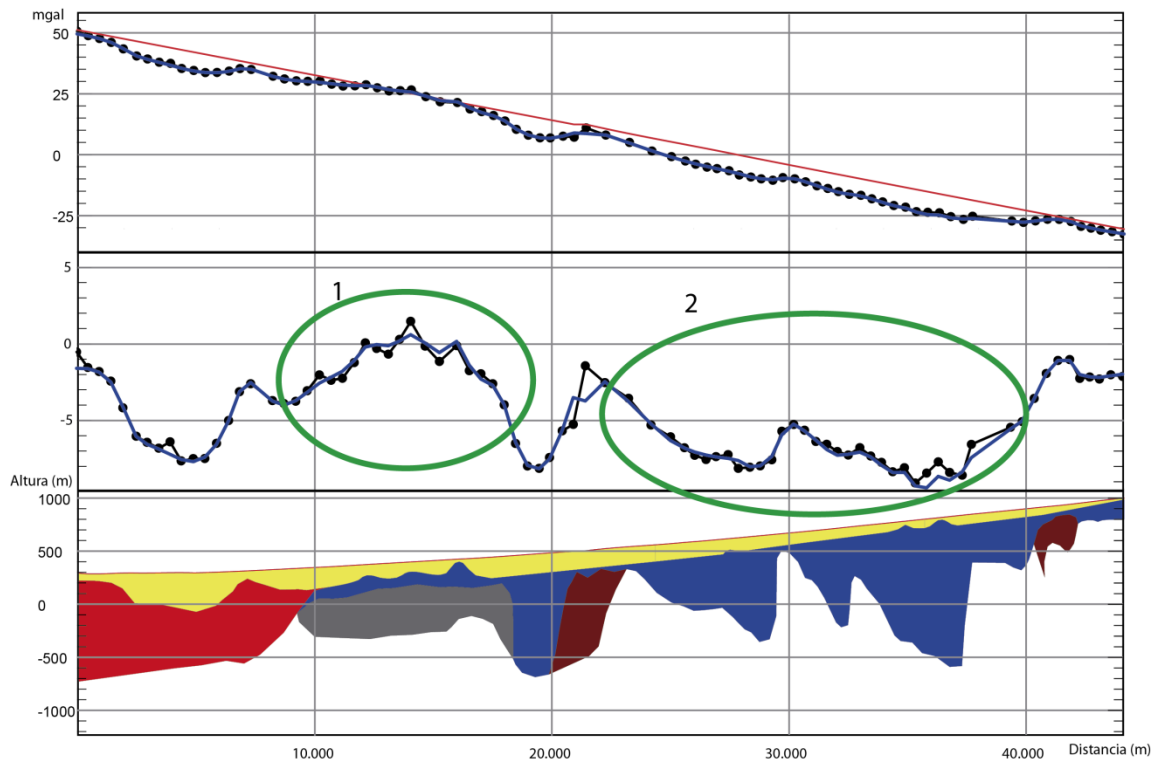


Figura 53. Se muestran las Anomalías de Bouguer Completa (parte superior) y Residual (parte del medio). En la parte inferior se observa el modelo gravimétrico que mejor se ajusta a estas curvas. El número 1 indica la anomalía positiva que posiblemente correspondería a un intrusivo relacionado con los procesos mineralizadores de la Franja Ferrífera Chilena (ver sección 5.1), y el número 2, indica dos anomalías negativas que, dada la información geológica de superficie y los modelos estructurales realizados por distintos autores, es muy probable que correspondan a hemigrábenes.

b) Perfil Sur (Figura 54): Al igual que en el Perfil Norte, se observan dos anomalías negativas, pero son más sutiles, no tan pronunciadas como las anteriores. Si el trabajo hubiera consistido en obtener resultados solamente de este perfil, no se habría justificado geometrías de hemigrábenes, pero gracias a la presencia del Perfil Norte, se supone el mismo estilo estructural ya que comparten la cercanía y con ello la geología. Otro punto importante a mencionar es la anomalía positiva que indica un cuerpo denso en profundidad, quizás, podría corresponder a un intrusivo relacionado con los procesos mineralizadores de la Franja Ferrífera Chilena (ver sección 5.1), pero, como se dijo, no se tienen más antecedentes.

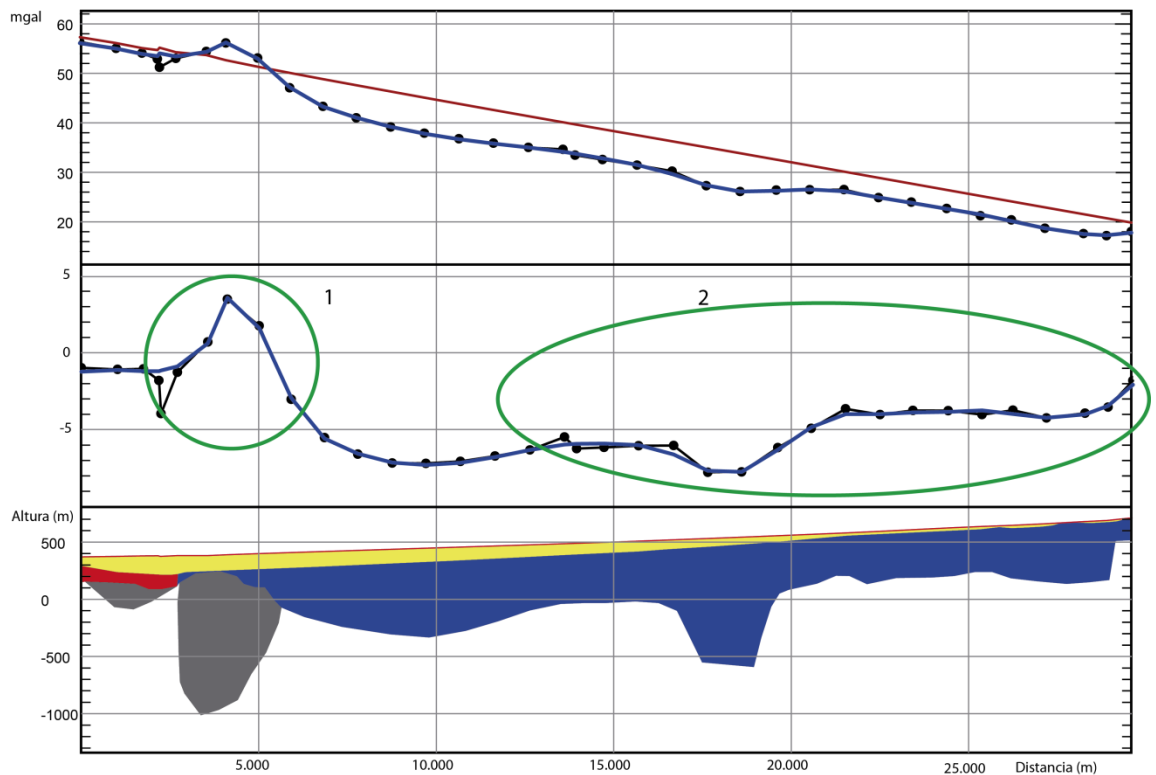


Figura 54. Se muestran las Anomalías de Bouguer Completa (parte superior) y Residual (parte del medio). En la parte inferior se observa el modelo gravimétrico que mejor se ajusta a estas curvas. El número 1 indica la anomalía positiva que posiblemente correspondería a un intrusivo relacionado con los procesos mineralizadores de la Franja Ferrífera Chilena (ver sección 5.1), y el número 2, indica dos anomalías negativas sutiles que, dada su relación con el perfil norte y la información geológica de superficie y los modelos estructurales realizados por distintos autores, es muy probable que correspondan a hemigrábenes.

Finalmente, las ventajas, desventajas y certezas determinan los resultados obtenidos, afectando positiva o negativamente el cumplimiento de los objetivos.

### 6.3.1 Posición y geometría de fallas maestras (bordes de cuenca)

El modelamiento gravimétrico también muestra que la Cuenca de Chañarcillo efectivamente mantiene un borde maestro que marca su terminación hacia el este, el cual está representado por la Falla Elisa de Bordos, sin embargo, se han podido confirmar la presencia de estructuras sintéticas a esta, las cuales yacen soterradas o “ciegas” y que conforman la arquitectura central de la cuenca. En relación a la geometría de la falla maestra, tenemos que está dada por el borde este de los hemigrábenes orientales, donde en los primeros 1420 m y 520 m de profundidad, en los perfiles norte y sur respectivamente (Figura 45 y Figura 48), presenta un manto de aproximadamente 65° al oeste.



### 6.3.2 Profundidad del basamento ígneo-metamórfico y espesor del relleno estratigráfico

Una de las incertidumbres más recurrentes en los estudios estructurales desarrollados a lo largo de una cuenca, se relaciona con la profundidad a la cual se podría localizar el basamento o su sección *pre-rift*. En este sentido, para la profundidad del basamento de la cuenca, en este trabajo se encontraron profundidades máximas de hasta 1420m y 1150m, para los perfiles Norte y Sur respectivamente, sin embargo, estos valores podrían ser ampliamente discutidos y no es recomendable tomarlos como valores exactos ya que dependen de la tendencia Regional, los valores de densidades del relleno de cuenca y del espesor del relleno no consolidado del Cuaternario. Específicamente la tendencia Regional es la principal fuente de error, debido a los supuestos con los cuales se sustenta (como se mencionó en la sección 6.2), por lo tanto, cambios en el Regional afectan considerablemente los valores de profundidad como se ilustra en la Figura 55. Basado en todos estos factores, se sugiere tener un

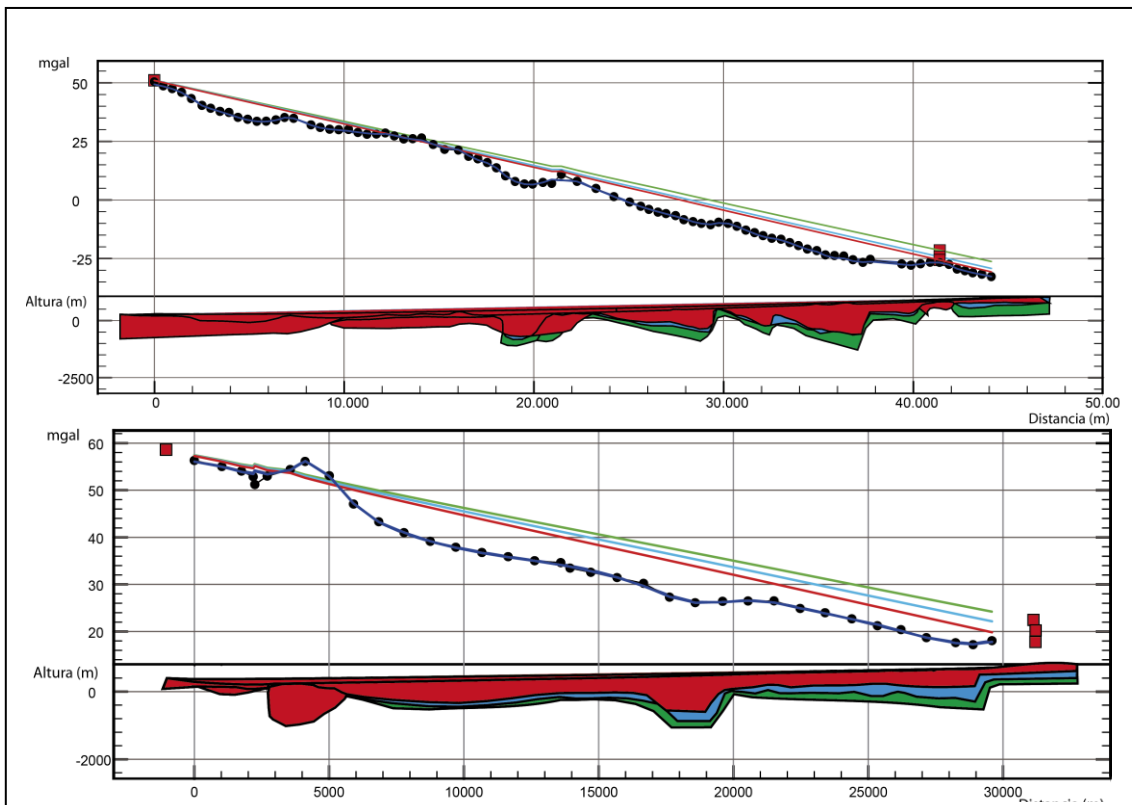


Figura 55. Se muestra un resumen de los perfiles de la Figura 51 y Figura 52. Los colores rojo, celeste y verde indican el modelo y la tendencia regional de los perfiles A), B) y C), respectivamente. Como conclusión se tiene que la profundidad del basamento para el perfil Norte y Sur varía aproximadamente, en sus partes más profundas, entre 700 m y 800 m respectivamente, pero la geometría de la cuenca sigue asemejándose a distintos hemigrábenes. Por lo tanto si bien los valores de profundidad pueden tener grandes grados de incerteza, la geometría propuesta para la Cuenca de Chañarcillo (hemigrábenes en dominó parcialmente invertidos), gracias al estudio gravimétrico, es muy acertada.

valor de profundidad con un mayor grado de certeza, por lo cual sería ideal incorporar más información disponible en la región, como perfiles magnetotélúricos, perfiles sísmicos de reflexión, estratigrafía de pozos de captación de agua que hayan llegado a la roca y sondajes mineros.

### 6.3.3 Posibles zonas de emplazamiento de cuerpos intrusivos

A lo largo de los perfiles Norte y Sur, ciertas anomalías positivas interpretadas como cuerpos intrusivos, coinciden con la posición de algunas de las estructuras interpretadas previamente en la región (Blanco *et al.*, 2003; Arévalo, 2005b; Arévalo y Welkner 2008 y Peña *et al.* 2013), así como con otras modeladas en este estudio. Aunque es prematuro asegurar que estas estructuras hayan sido responsables del emplazamiento de ellos, al menos es posible establecer una cierta relación entre ambas. En el perfil Norte, de este a oeste, los dos primeros intrusivos parecen señalar la presencia de estructuras, en la primera esto es directo: justo sobre el intrusivo se encuentra la Falla Santa María; el segundo intrusivo se encuentra al borde este, de lo que se ha modelado como un hemigraben, el cual está limitado por una falla ciega que sería la responsable del emplazamiento de este cuerpo. Pero los intrusivos del occidente, en ambos perfiles, no muestran una estructura de emplazamiento a través de los modelos gravimétricos. Una posibilidad es que su emplazamiento se deba al SFA ya que ciertos autores como Blanco *et al.* (2003), en la carta Castilla y Totoral Bajo, menciona que el intrusivo del Cretácico inferior (Diorita Cuarcífera Barros Luco) se habría emplazado en forma sintectónica a la actividad transcurrente del SFA. En relación a este sistema de fallas, Naranjo (1987) y Brown *et al.* (1993), señalan que está marcado por una zona de cizalle dúctil retrabajado por fallas frágiles, donde la deformación dúctil estuvo asociada con los emplazamientos de complejos plutónicos del Cretácico Inferior (Grocott *et al.*, 1994; Dallmeyer *et al.*, 1996), luego, en las últimas etapas del magmatismo, la mineralización de Cu (Au) y magnetita-apatito fue emplazada cuando las rocas pasaron a través de una transición dúctil-frágil (Grocott y Taylor, 2002), asociando así el SFA con depósitos de Fe-apatito. Esta afirmación es importante, ya que se podría relacionar el emplazamiento de la Unidad Intrusivo Denso (Tabla 4) con el control estructural dado por el SFA, dando mayor justificación al perfil estructural de la Figura 47.

## 7 CAPÍTULO: CONCLUSIONES

Los modelos gravimétricos aquí presentados no corresponden a una única solución. Esto es muy importante porque a la luz de nuevos datos, por ejemplo: MT, estudios de sísmica, pozos de sondajes mineros, y pozos hidrogeológicos; se pueden fijar nuevas condiciones de borde que podrían cambiar los valores de las densidades, espesores y geometrías de las distintas unidades aquí modeladas. Pese a esto, a partir de la recopilación de datos, se intentó obtener un modelo estructural para la Cuenca de Chañarillo con el mayor grado de certeza posible, lo que permite concluir lo siguiente:

1. La curva de Anomalía Residual del Perfil Norte indica que por lo menos existen 2 depocentros bien definidos (Figura 53), los cuales tienen espesores variables que se hacen más angostos hacia el oeste haciendo suponer que corresponderían a una geometría de hemigraben. Esto no es tan directo en el Perfil Sur (Figura 54), pero aun así a los dos depocentros encontrados se les atribuyó el mismo arreglo estructural.
2. A partir de las dos curvas de Anomalía Residual es posible observar que ambas tienen en común una anomalía positiva, de la cual es posible expresar lo siguiente:
  - Existe una alineación entre las minas de hierro con las anomalías positivas (Figura 37).
  - Se sugiere que la mayor parte de los depósitos de FFCH fueron formados por un magma de mena, lo que implica un origen magmático (Vivallo y Henríquez, 1997).
  - Las anomalías positivas son amplias, aproximadamente tienen un ancho de 6 km y 3 km en los perfiles norte y sur respectivamente.
  - La anomalía gravimétrica del perfil sur coincide con una anomalía magnética del Área Chacritas (Vivallo y Donoso, 2013).

Con estas observaciones, se tiene como hipótesis que la anomalía positiva notable de los dos perfiles es debido a un intrusivo vinculado a procesos responsables de la mineralización de hierro en la Franja Ferrífera Chilena y se habría emplazado gracias al SFA.

3. Debido a la geometría de los depocentros del perfil Norte, es posible descartar tres modelos estructurales mostrados en la Figura 7, aceptando así la idea de Martínez *et al.* (2013), de que la deformación observada en superficie es producto de un arreglo estructural de hemigrábenes en dominó parcialmente invertidos.
4. En relación a los objetivos específicos se tiene:
  - a) La posición de la falla maestra (bordes de cuenca) Elisa de Bordos fue determinada por los modelos gravimétricos, pero su geometría puede variar, aunque se tiene como una aproximación una falla con un manto de 65°

hacia el este, con al menos 1420 m y 520 m de profundidad en el perfil Norte y Sur, respectivamente.

- b) En este trabajo se encontraron profundidades máximas de 1420m y 1150m para el basamento ígneo-metamórfico en los perfiles Norte y Sur, respectivamente, aun así estos valores pueden ser ampliamente discutidos, ya que dependen de la tendencia regional, los valores de densidades y del espesor del relleno no consolidado del Cuaternario y del Neógeno. Específicamente la tendencia regional es la principal fuente de error debido a los grados de incerteza que se tuvieron al momento de modelarla, pero fue demostrado en la Figura 55 que la geometría, de hemigrábenes en dominó parcialmente invertidos, se mantendría a pesar de variaciones de esta tendencia.
- c) A lo largo del perfil Norte se encontraron intrusivos que pueden ser atribuidos a la presencia de estructuras que afloran en superficie como también a estructuras “ciegas”, encontradas gracias al estudio gravimétrico. En oposición, para los intrusivos occidentales de los dos perfiles no fue posible indicar un sistema de emplazamiento a través del modelamiento gravimétrico, aun así dada la presencia de Intrusivos del Cretácico inferior, que afloran en la zona de estudio: Blanco *et al.* (2003), Grocott *et al.* (1994) y Dallmeyer *et al.* (1996) sugieren que estos fueron emplazados por medio del SFA. Debido a que los intrusivos modelados y los aflorantes comparten el mismo espacio, se cree que los intrusivos occidentales de los perfiles Norte y Sur fueron emplazados gracias a este mismo sistema de fallas.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, I. 1999. Hidrogeología del Valle del Río de Copiapó entre el tranque Lautaro y Piedra Colgada. Memoria para optar al título de Geólogo, tesis para optar al grado de Magister en Geofísica. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 4.41p.
- Aguirre, M. B. 1993. Neocomian ammonite biostratigraphy of the Andean basin of Argentina and Chile. *Revista Española de Paleontología* 8: 57-74.
- Alcalde, G. 2000. Evaluación de recursos del yacimiento Los Colorados. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Almasan, R., Ayuda en Trabajo de Título [en línea] En: <www.gmail.com> miércoles 5 de Noviembre 2014 <radu.almasan@pucobre.cl> [consulta: 5 Noviembre 2014]
- Amilibia, A. 2009. Compressional deformation along the Chañarcillo basin west margin: North Chilean Late Jurassic-Early Cretaceous back-arc basin. *Trabajos de Geología* 29:78-83.
- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K.R., Muñoz, J.A., Roca, E., Chong, G. 2008. The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology* 30: 1520-1539.
- Arévalo, C. 1999. The Coastal Cordillera/Precordillera boundary in the Tierra Amarilla Area (27°20'-27°40'S/70°05'-70°20'W), Northern Chile, and the structural setting of the Candelaria Cu-Au ore deposit. Ph.D. Tesis Kingston upon Thames, U.K, Kingston University. 204 p.
- Arévalo, C. 2005a. Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Escala 1:100.000. Serie Geología Básica, 91.
- Arévalo, C. 2005b. Carta Los Loros, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, 92.
- 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. En: CONGRESO GEOLÓGICO Chileno. Viña del Mar, Chile.
- Arévalo, C. y Welkner, D. 2008. Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, 111.
- Arriagada, C., Roperch, P., Mpodozis, C., Cobbold, P.R. 2008. Paleogene building of the Bolivian Orocline: tectonic restoration of the central Andes in 2-D map view. *Tectonics* 27.

Arriagada, C., Roperch, P., Mpodozis, C., Fernández, R. 2006. Paleomagnetism and tectonics of the southern Atacama desert (25-28°), northern Chile. *Tectonics* 25.

Bayer, U. 1983. The influence of sediment composition on physical properties interrelationships. En: LUDWIG, W. J., KRASHENINIKOV, V. A. et al., *Init. Repts. DSDP*, 71, Washington. pp. 1111-1132.

Biese, W. 1942. La distribución del Cretácico Inferior al sur de Copiapó. En: CONGRESO PANAMERICANO de Ingeniería de Minas y Geología, No. 1.

Blanco, N., Godoy, E., Marquard, C. 2003. Cartas Castilla y Totoral Bajo Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, 77 y 78.

Brown, M., Díaz, F., Grocott, J. 1993. Displacement history of the Atacama fault system 25°00'S-27°00'S, northern Chile. *Geological Society of America Bulletin* 105: 1165-1174.

Charrier, R. 1979. El Triásico en Chile y regiones adyacentes de Argentina: Una reconstrucción paleogeográfica y paleoclimática. *Comunicaciones* 26: 1-47.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, P. 2007. Tectonostratographic evolution of the Andean orogen in Chile. En: MORENO, T., GIBBONS, W. (Eds.). *The Geology of Chile*. The Geological Society. pp. 24-114.

Cobbold, P.R. y Rosello, E.A. 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20: 429-443.

Cobbold, P. R., Rosello, E. A., Roperch, P., Arriagada, C., Gómez, L. A., Lima, C. 2007. Distribution, Timing, and Causes of Andean Deformation across South America. En: RIES, A., BUTLER, R., GRAHAM, R. (Eds). *Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward*. Special Publications 272. London. Geological Society. pp. 321-343.

Coira, B. L., Davidson, J. D., Mpodozis, C., Ramos, V. A. 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Science Review* 18: 303-332.

Coney, P. J., Evenchick, C. A. 1994. Consolidation of the American Cordilleras. *Journal of South American Earth Sciences* 7: 241-262.

Coney, P., Jones, D. L., Monger, J. W. H. 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature* 288: 329-333.

Cornejo, P., Matthews, S., Pérez de Arce, C. 2003. The "K-T" compressive deformation event in northern Chile (24-27°S). En: 10° CONGRESO GEOLÓGICO Chileno. Concepción, Chile.

Coutand, I., Cobbold, P., Urreiztieta, M., Gautier, P., Chauvin, A., Gapais, D., Rossello, E., Gamundi, O. 2001. Style and history of Andean deformation, Puna plateau, northwestern Argentina. *Tectonics* 20 (2): 210-234.

Cox, K.G. 1988. The Karoo Province. En: MAC-DOUGALL, J.D. (Eds.). Dordrecht. Continental flood basalts. Kluwer Academic. pp. 239-271.

Dallmeyer, R.D., Brown, M., Grocott, J., Taylor, G.K., Treloar, P.J. 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events within the Andean plate boundary zone, 26°–27°30'S, north Chile: constraints from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mineral ages. *Journal of Geology* 104: 19–40.

Delgado, F., 2010. Estructura interna de la caldera La Pacana (II Región) mediante gravimetría. Tesis para optar al grado de magister en ciencias, mención Geofísica, memoria para optar al título de geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Do Couto, D., Gumiaux, C., Augier, R., Le Bret, N., Folcher, N., Jouannic, G., Jolivet, L., Suc, J., Gorini, C. 2014. Tectonic inversion of an asymmetric graben: Insights from a combined field and gravity survey in the Sorbas basin. *Tectonics* 33: 1360–1385.

Estrada, L., 2012. Clases de Prospección Gravimétrica para alumnos de geología de la facultad de ciencias naturales de la Universidad de Tucumán. Universidad de Tucumán.

Franzese, J. R. y Spalletti, L. A. 2001. Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 257-270.

Freeze, R. y Cherry, J. 1979. Groundwater. 34<sup>a</sup> ed. Estados Unidos de América, Prentice-Hall McGraw-Hill. 37p.

Gansser, A. 1973. Facts and theories on the Andes: Twenty-sixth William Smith lecture. *Journal of the Geological Society* 129: 93-131.

Grocott, J., Brown, M., Dallmeyer, R.D., Taylor, G.K., Treloar, P.J. 1994. Mechanisms of continental growth in extensional arcs: an example from the Andean plate-boundary zone. *Geology* 22: 391–394.

Grocott, J. y Taylor, G.K. 2002. Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, north Chilean Andes (25°30'S to 27°00'S). *Journal of the Geological Society* 159: 425-443.

Gutscher, M.A. 2002. Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interpolate coupling. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 3-10.

Honores, C. 2013. Estudio de la deformación de la caldera Laguna del Maule. Tesis para optar al grado de magister en ciencias con mención Geofísica. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Horton, B. K. y DeCelles, P. 1997. The modern foreland basin system adjacent to the Central Andes. *Geology* 25 (10): 895-898.

Horton, B.K., Hampton, B. A., Waanders, G. L. 2001. Paleogene synorogenic sedimentation in the Altiplano Plateau and implications for initial mountain building in the Central Andes. *Geological Society of American Bulletin* 113 (11): 1387-1400.

Isacks, B. L., Bloom, A. L., Fielding, E. J., Fox, A., Gubbels, T. 1988. Tectonics of the central Andes. *Advances in Space Research* 9 (1): 79-84.

Jordan, T. E., Isacks, B. L., Allmendinger, R. W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Study of America Bulletin* 94: 341-361.

Jourdan, F., Féraud, G., Bertrand, H., Kampunzu, A.B., Tshoso, G., Watkeys, M.K., Le Gall, B. 2005. Karoo large igneous province: Brevity, origin, and relation to mass extinction questioned by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age data. *Geological Society of America* 33(9): 745-748.

Lamb, S. y Hoke, L. 1997. Origin of the high plateau in the Central Andes, Bolivia, South America. *Tectonics* 16 (4): 623-649.

Longman, I. 1959. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. *Journal Geophysical Research* 64 (12): 2351-2355.

Macdonald, D., Gómez Pérez, I., Franzese, J., Spalletti, L., Lawver, L., Gahagan, L., Dalziel, I., Thomas, C., Trewin, N., Hole, M. y Paton, D. 2003. Mesozoic break-up of SW Gondwana: implications for regional hydrocarbon potential of the southern South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology* 20: 287-308.

Maksaev, V. (s.f). Yacimientos de Hierro Chilenos. [en línea] <<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/YACIMIENTOS%20DE%20HIERRO%20CHILENOS.pdf>> [consulta: 30 de Octubre 2014].

Marschik, R. y Fontboté, L. 2001. The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre-Candelaria area, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 401-433.

Martínez, F. 2012. Estilos estructurales y deformación, en el margen occidental de los Andes Centrales del norte de Chile (27°-29°S). Tesis para optar al grado de doctor en ciencias, mención Geología. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Martínez, F., Arriagada, C., Peña, M., Del Real, I., 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* 42: 1-16.



Martínez, F., Maksymowicz, A., Ochoa, H., Díaz, D. En prep. The architecture of the Cretaceous Chañarcillo Basin in the Central Andes of northern Chile: a study based on 2D gravity and field data.

McClay, K. R., Buchanan, P. G. 1992. Thrust faults in inverted extensional basins. En: MCCLAY, K. R. (Ed.), Thrust Tectonics. London. Chapman & Hall. pp. 419-434.

McQuarrie, N. y DeCelles, P. 2001. Geometry and structural evolution of the central Andean backthrust belt, Bolivia. *Tectonics* 20 (5): 669-692.

Milsom, J. 2003. Field Geophysics, the geological field guide series. 3<sup>o</sup>ed. Inglaterra, Wiley. 31p.

Mira, A., Gómez, M., Tocho, C., Vives, L. 2013. 3D gravity modeling of the Corrientes province (NE Argentina) and its importance to the Guarani Aquifer System. *Tectonophysics* 608: 212–221.

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): 155-158.

Mourgues, F.A. 2004. Advances in ammonite biostratigraphy of the marine Atacama basin (Lower Cretaceous), northern Chile, and its relationship with the Neuquén basin, Argentina. *Journal of South American Sciences* 17: 3-10.

Mourgues, F. A. 2007. La transgression du Crétacé Inférieur au Nord du Chili. Biostratigraphie, Paléontologie (Ammonites) Stratigraphie Séquentielle et Tectonique Syn-sédimentaire. PhD tesis. Francia. Universidad de Toulouse III.

Mpodozis, C. y Allmendinger, R., 1993. Extensional tectonics, Cretaceous Andes, northern Chile (27°S). *Geological Society of American Bulletin* 105 (11): 1462-1477.

Mpodozis, C. y Ramos, V. 1989. The Andes of Chile and Argentina. En: ERICKSEN, G. E., CAÑAS, M. T., REINEMUND, J. A. (Eds.). *Geology of the Andes and Its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources: Circum-pacific Council for Energy and Mineral Resources. Earth Science Series* 11: 59-90.

Mpodozis, C. y Ramos, V.A., 1990. The Andes of Chile and Argentina. En: ERICKSEN, G. E., CAÑAS, M. T., REINEMUND, J. A. (Eds.). *Geology of the Andes and Its relation to Hydrocarbon and Mineral Resources: Circum-pacific Council for Energy and Mineral Resources. Earth Science Series* 11: 59-90.

Mpodozis, C. y Ramos, V. A. 2008. Tectónica jurásica en Argentina y Chile: Extensión, Subducción Oblicua, Rifting, Deriva y Colisiones. *Revista Geológica Argentina* 63: 479-495.

Naranjo, J. 1987. Interpretación de la actividad Cenozoica superior a lo largo de la zona de falla Atacama, Norte de Chile. *Revista Geológica de Chile* (31):43-55.

- Pedersen, S. 2005. Structural analysis of the Rubjerg Knude Glaciotectonic Complex, Vendsyssel, northern Denmark. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin (8).
- Peña, M., Arriagada, C., Mpodozis, C., Martínez, F., y Salazar, E. 2010. Rotaciones Tectónicas Sobreimpuestas en la Zona Centro-Sur de la Región de Atacama: Primeros Resultados de un Estudio Estructural y Paleomagnético. En: XII Congreso Geológico Chileno. Santiago.
- Peña, M., Becerra, J., Martínez, F., Arriagada, C. 2013. Geología del Área Yerbas Buenas-Tres Morros Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala: 1:100.000. Serie Geológica Básica, 155.
- Ramos, M., Folguera, A., Fennell, L., Giménez, M., Litvak, V., Dzierma, Y., Ramos, V. A. 2013. Tectonic evolution of the North Patagonian Andes from field and gravity data (39-40°S). Journal of South American Earth Sciences 51: 59-75.
- Ramos, V. A. 1986. El diatrofismo oclóyico: un ejemplo de tectónica de colisión durante el Eopaleozoico en el Noreste Argentino. Revista del Instituto de Ciencias Geológicas 6: 13-28.
- Ramos, V. A. 2009. Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. Geological Society of America Memoirs 204: 31-65.
- Ramos, V.A. y Alemán, A. 2000. Tectonic Evolution of the Andes. En: CORDANI, U. G., MILANI, E. J., THOMAZ FILHO, A., CAMPOS, D. A. (Eds.). Tectonic evolution of South America. Río de Janeiro. International Geological Congress 31: 635-685.
- Ramos, V.A. y Kay, S. M. 1991. Triassic rifting and associated basalts in the Cuyo Basin, central Argentina. En: HARMON, R.S. Y RAPELA, C.W., (Eds.). Andean Magmatism and Its Tectonic Setting. Geological Society of America Special Paper. pp. 79–91.
- Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot M., Perrin M. 1992. The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. Science 258(5084): 975-979.
- Rey-Moral, C., Gómez-Ortiz, D., Sánchez-Serrano, F., Tejero-López, R. 2004. Modelos de densidades de la corteza de la cuenca de Almazán (Provincia de Soria). Boletín Geológico y Minero 115 (1): 137-152.
- Rojas, E. A., Sellés, D., Folguera, A., Giménez, M., Ruíz, F., Orts, D., Zamora, G., Martínez, P., Bechis, F., Ramos, V. A. 2014. The origin of the Loncopué Trough in the retroarc of the Southern Central Andes from field, geophysical and geochemical data. Tectonophysics xxx: xxx–xxx.

Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. 1994. Tectonic and sedimentary evolution of the Cretaceous- Eocene Salta Group Basin, Argentina. En: SALFITY, J. (Eds.). Cretaceous Tectonics in the Andes, Vieweg, Braunschweig, Earth Evolution Sciences. pp. 266–315.

Sánchez, D. 2007. Aplicación del Método Gravimétrico (Microgravimetría de Alta Resolución). Requisito parcial para optar al título de Ingeniero Geofísico. Sartenejas, Universidad Simón Bolívar.

Schmitz, M. 1994. A balanced model of the southern Central Andes. *Tectonics* 13 (2):484-492.

Scheuber, E., Bogdanic T., Jensen, A. y Reutter, K-J. 1994. Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism Since the Jurassic. En: Reutter, K.-J., Scheuber, E. y Wigger, P. (Eds.). *Tectonics of the Southern Central Andes*, Berlin, Springer . pp 121-139.

Segerstrom, K., 1960. Cuadrángulo Quebrada Paipote, Provincia de Atacama, Carta Geológica de Chile. Santiago de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas.

Segerstrom, K. 1963. Engranaje de sedimentos calcáreos con rocas volcánicas y clásticas en el Neocomiano del Geosinclinal Andino. En: SIMPOSIO GEOLÓGICO Andino. Chile. Soc. Geol.

Segerstrom, K. y Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia De Atacama. Carta Geológica. Santiago de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas.

Segerstrom, K. 1967. Geology and Ore Deposits of Central Atacama Province, Chile. *Geological Society of America Bulletin* 78 (3): 305-318.

Seigel, H. 1995. A guide to high precision land gravimeter surveys. Canadá.

Sempere, T., Butler, R. F., Richards, D.R., Marshall, L.G., Sharp, W., Swicher, C. C. 1997. Stratigraphy and chronology of Upper Cretaceous-lower Paleogene strata in Bolivia and northwestern Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 109 (6): 709-727.

SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital, vol. 4. Publicación Digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala: 1.1000.000.

SERNAGEOMIN. 2011. Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Antofagasta y Atacama (versión actualizada). Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Seton, M., Müller, R.D., Zahirovic, S., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S. y Chandler, M. 2012. Global continental and ocean reconstructions since 200 Ma. *Earth-Science Reviews* (113): 212-270.

Sheffels, B. 1990. Lower bound on the amount of crustal shortening in the Central Bolivian Andes. *Geology* 18: 812-815.

Somoza, R. y Zaffarana, C.B. 2008. Mid-Cretaceous polar standstill of South America, motion of the Atlantic hotspots and the birth of the Andean cordillera. *Earth and Planetary Science Letters* 271: 267-277.

Spalletti, L., Franzese, J., Matheos, S., Schwarz, E. 2000. Sequence stratigraphy of a tidally-dominated carbonate-siliciclastic ramp: The Tithonian of the southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society* 157: 433-446.

Tankard, A.J., Suárez-Soruco, R., y Welsink, H.J., 1995. Petroleum Basins of South America. A.A.P.G Memoir 62. pp. 207-230.

Uliana, M. A., Biddle, K. T., Cerdan, J. 1989. Mesozoic extension and the formation of Argentine sedimentary basins. En: TANKARD, A.J. Y BALKWILL, H.R. (Eds.). *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins*, A.A.P.G Memoir, 46.

Vivallo, W. y Henríquez, F. 1997. Relación genética entre los yacimientos estratoligados de Cu ("tipo manto"), de Fe-Cu±Au y de hierro del ripo Kiruna. En: VIII CONGRESO GEOLÓGICO Chileno. Universidad Católica del Norte.

Vivallo, W y Donoso C. 2013. Magnetometría del área Chacritas, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:100.000. Serie Geofísica, 59.

Welkner, D., Arévalo, C., Godoy, E. 2006. Geología del Área Freirina-El Morado, Región de Atacama. Carta Geológica de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Escala 1:100000. Serie Geológica Básica, 100.

Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Del Pino, D., Ansa, A. 2006. Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrío fold and thrust belt. En: KAY, S.M., Y RAMOS, V.A. (Eds.). *Evolution of an Andean Margin: A Tectonic and Magmatic View from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)*. Geological Society of America, Special Paper. pp. 125-145.

## ANEXOS

Anexo A: Tabla de Equivalencias

Equivalencia en mgal	Lectura	Equivalencia en mgal	Lectura
0	0	3287.11	3100
106.02	100	3393.28	3200
212.04	200	3499.46	3300
318.05	300	3605.65	3400
424.05	400	3711.85	3500
530.05	500	3818.07	3600
636.04	600	3924.29	3700
742.03	700	4030.53	3800
848.02	800	4136.78	3900
954.01	900	4243.03	4000
1059.99	1000	4349.3	4100
1165.98	1100	4455.57	4200
1271.97	1200	4561.86	4300
1377.96	1300	4668.15	4400
1483.96	1400	4774.45	4500
1589.97	1500	4880.75	4600
1695.97	1600	4987.07	4700
1801.99	1700	5093.38	4800
1908.01	1800	5199.71	4900
2014.03	1900	5306.03	5000
2120.07	2000	5412.36	5100
2226.11	2100	5518.69	5200
2332.16	2200	5625.03	5300
2438.22	2300	5731.36	5400
2544.29	2400	5837.69	5500
2650.38	2500	5944.02	5600
2756.47	2600	6050.34	5700
2862.58	2700	6156.66	5800
2968.69	2800	6262.97	5900
3074.82	2900	6369.28	6000
3180.96	3000		

## Anexo B: Datos de gravimetría recogidos en terreno

ID	X	Y	Z	Fecha	Hora (UTC)	Medición (UL)
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	17/7/2014	13:51:00	2597.49
G01	369092.668	6899754.8	999.173	17/7/2014	15:28:00	2468.84
G02	368600.047	6899822.1	987.788	17/7/2014	15:44:00	2472.59
G03	368108.435	6899803.64	977.408	17/7/2014	15:57:00	2475.24
G04	367652.686	6899602.93	965.238	17/7/2014	16:06:00	2478.40
G05	367188.286	6899407.42	953.2	17/7/2014	16:20:00	2481.22
G06	366728.651	6899273.02	942.563	17/7/2014	16:40:00	2485.00
G07	366245.001	6899376.35	930.406	17/7/2014	16:47:00	2488.28
G08	365760.12	6899478.56	919.777	17/7/2014	16:55:00	2490.45
G09	365256.648	6899565.55	907.775	17/7/2014	17:04:00	2492.10
G10	364775.689	6899725.41	896.956	17/7/2014	18:06:00	2493.61
G11	364288.9	6899792.5	885.952	17/7/2014	18:16:00	2496.14
G12	362616.828	6899875.13	848.688	17/7/2014	18:25:00	2505.13
G13	362215.797	6899855.32	839.422	17/7/2014	18:33:00	2505.70
G14	361668.175	6899822.29	827.167	17/7/2014	18:40:00	2509.14
G15	361169.64	6899791.35	815.944	17/7/2014	18:46:00	2512.76
G16	360661.678	6899761.31	804.743	17/7/2014	18:57:00	2515.00
G17	360161.185	6899730.6	793.218	17/7/2014	19:10:00	2517.24
G18	359688.043	6899700.28	782.754	17/7/2014	19:16:00	2521.00
G19	359172.362	6899668.64	771.605	17/7/2014	19:26:00	2523.86
G20	358679.359	6899638.03	760.271	17/7/2014	19:37:00	2527.50
G21	358203.112	6899610.09	749.494	17/7/2014	19:44:00	2530.79
G22	357720.9	6899580.15	739.165	17/7/2014	19:50:00	2534.11
G23	357208.677	6899549.17	727.64	17/7/2014	20:00:00	2536.73
G24	356726.765	6899518.19	717.347	17/7/2014	20:10:00	2539.69
G25	356254.749	6899487.21	706.925	17/7/2014	20:16:00	2542.91
G26	355771.611	6899458.21	696.257	17/7/2014	20:22:00	2545.91
G27	355270.241	6899427	685.913	17/7/2014	20:29:00	2549.41
G28	354786.169	6899397.44	675.772	17/7/2014	20:36:00	2552.46
G29	354256.26	6899367.52	665.032	17/7/2014	20:44:00	2554.91
G30	353808.68	6899337.66	657.54	17/7/2014	20:52:00	2555.37
G31	353289.72	6899305.74	646.715	17/7/2014	21:00:00	2557.90
G32	352822.284	6899276.67	637.332	17/7/2014	21:07:00	2560.40
G33	352301.272	6899245.63	626.683	17/7/2014	21:15:00	2563.21
G34	351838.553	6899217.34	618.433	17/7/2014	21:22:00	2566.39
G35	351296.087	6899184.56	607.733	17/7/2014	21:29:00	2569.22
G36	350843.442	6899157.57	599.495	17/7/2014	21:38:00	2571.36
G37	350327.731	6899125.55	590.495	17/7/2014	21:44:00	2574.19
G38	349886.901	6899180.75	583.012	17/7/2014	21:47:00	2576.85
G39	348496.88	6899477.58	558.044	17/7/2014	21:55:00	2580.55

G40	349310.255	6899303.61	572.793	17/7/2014	22:01:00	2585.49
G41	347564.051	6899677.49	541.535	17/7/2014	22:09:00	2591.90
G42	346461.626	6899584.16	525.455	17/7/2014	22:15:00	2597.80
G43	345307.012	6898955.67	504.693	17/7/2014	22:28:00	2604.43
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	17/7/2014	22:42:00	2597.64
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	18/7/2014	13:29:00	2597.86
G44	325674.379	6907625.06	294.048	18/7/2014	14:49:00	2683.03
G45	326145.384	6907677.72	284.86	18/7/2014	14:59:00	2682.96
G46	326624.16	6907605.02	287.745	18/7/2014	15:10:00	2681.33
G47	327113.312	6907497.21	290.28	18/7/2014	15:17:00	2679.37
G48	327616.4	6907390.68	292.829	18/7/2014	16:15:00	2676.30
G49	328163.832	6907272.53	293.913	18/7/2014	16:25:00	2673.34
G50	328612.347	6907173.94	294.264	18/7/2014	16:36:00	2672.07
G51	329095.709	6907070.74	295.667	18/7/2014	16:44:00	2670.58
G52	329562.758	6906970.47	297.244	18/7/2014	16:49:00	2669.82
G53	330023.188	6906868.82	297.881	18/7/2014	16:57:00	2667.68
G54	330521.693	6906759.43	295.461	18/7/2014	17:03:00	2667.32
G55	330997.602	6906660.4	299.167	18/7/2014	17:06:00	2665.77
G56	331481.797	6906561.51	303.018	18/7/2014	17:15:00	2665.10
G57	331980.115	6906460.7	306.948	18/7/2014	17:22:00	2664.84
G58	332429.907	6906367.68	311.002	18/7/2014	17:30:00	2665.03
G59	332894.216	6906271.77	315.894	18/7/2014	17:37:00	2663.76
G60	333795.57	6906090.8	328.005	18/7/2014	17:46:00	2658.80
G61	334268.999	6905992.58	331.475	18/7/2014	17:55:00	2657.08
G62	334754.85	6905893.69	336.984	18/7/2014	18:01:00	2655.28
G63	335227.651	6905796.34	342.691	18/7/2014	18:10:00	2654.00
G64	335734.406	6905692	348.777	18/7/2014	18:16:00	2652.89
G65	336217.825	6905593.88	354.637	18/7/2014	18:28:00	2650.55
G66	336684.951	6905497.68	361.392	18/7/2014	18:35:00	2648.56
G67	337172.869	6905397.79	368.03	18/7/2014	18:45:00	2647.37
G68	337630.079	6905295.39	373.842	18/7/2014	18:52:00	2646.63
G69	338094.912	6905189.87	379.279	18/7/2014	18:56:00	2644.40
G70	338577.848	6905076.34	385.739	18/7/2014	19:10:00	2641.92
G71	339038.202	6904971.3	392.573	18/7/2014	19:16:00	2640.69
G72	339497.719	6904868.18	399.188	18/7/2014	19:36:00	2639.70
G73	340091.211	6904730.8	407.279	18/7/2014	19:52:00	2635.56
G74	340679.231	6904598.09	415.512	18/7/2014	20:00:00	2632.01
G75	341378.821	6904397.92	425.189	18/7/2014	20:15:00	2629.84
G76	341887.307	6904208.99	431.616	18/7/2014	20:31:00	2626.12
G77	342350.251	6904036.82	438.389	18/7/2014	20:44:00	2623.77
G78	342823.962	6903860.33	444.713	18/7/2014	20:54:00	2621.05
G79	343278.513	6903690.57	451.701	18/7/2014	21:00:00	2617.58
G80	343731.37	6903522.22	459.873	18/7/2014	21:05:00	2612.80

G81	344209.939	6903344.24	468.188	18/7/2014	21:15:00	2608.92
G82	344673.49	6903172.01	475.571	18/7/2014	21:22:00	2606.49
G83	345085.44	6903018.56	483.711	18/7/2014	21:28:00	2604.86
G84	345593.131	6902828.49	492.681	18/7/2014	21:37:00	2603.81
G85	346033.027	6902663.8	500.293	18/7/2014	21:46:00	2601.95
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	18/7/2014	22:00:00	2597.20
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	19/7/2014	13:15:00	2597.00
P01	350394.72	6873518.48	709.319	19/7/2014	14:14:00	2567.30
P02	350288.817	6874457.82	686.725	19/7/2014	14:20:00	2570.78
P03	349947.121	6875054.21	677.203	19/7/2014	14:27:00	2573.08
P04	349327.626	6876006.62	658.556	19/7/2014	14:45:00	2577.78
P05	348810.807	6876865.97	644.689	19/7/2014	15:02:00	2582.05
P06	348334.53	6877664.64	634.427	19/7/2014	15:10:00	2584.65
P07	347714.799	6878420.55	621.405	19/7/2014	15:21:00	2589.00
P08	347042.085	6879175.69	605.973	19/7/2014	15:29:00	2593.38
P09	346429.006	6879896.74	591.756	19/7/2014	15:37:00	2597.09
P10	345783.339	6880658.62	577.716	19/7/2014	15:45:00	2601.38
P11	345136.908	6881413.76	565.787	19/7/2014	16:00:00	2603.74
P12	344383.554	6881978.11	553.013	19/7/2014	16:06:00	2606.15
P13	343534.76	6882540.46	540.128	19/7/2014	16:22:00	2608.45
P14	342743.312	6883067.88	528.93	19/7/2014	16:30:00	2611.88
P15	341879.786	6883516.38	517.646	19/7/2014	16:40:00	2616.98
P16	341035.903	6884030.49	506.206	19/7/2014	16:47:00	2620.50
P17	340203.673	6884541.87	495.161	19/7/2014	17:00:00	2623.80
P18	339580.709	6884996.2	486.812	19/7/2014	17:07:00	2626.35
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	19/7/2014	17:35:00	2597.30
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	21/7/2014	13:13:00	2596.98
P21	328359.84	6893260.14	368.336	21/7/2014	14:02:00	2671.15
P22	328822.897	6892351.02	372.931	21/7/2014	14:12:00	2669.12
P23	329541.655	6891969.86	377.733	21/7/2014	14:22:00	2667.30
P24	330399.451	6892479.8	378.113	21/7/2014	14:29:00	2666.21
P25	331005.568	6892700.58	379.42	21/7/2014	14:37:00	2666.12
P26	330603.893	6893315.83	373.411	21/7/2014	14:46:00	2665.65
P27	331914.744	6893059.04	379.632	21/7/2014	15:15:00	2667.44
P28	332357.938	6892300.39	387.626	21/7/2014	15:23:00	2667.46
P29	333058.652	6891531.37	396.741	21/7/2014	15:31:00	2662.75
P30	333727.992	6890797.52	404.71	21/7/2014	15:39:00	2655.45
P31	334403.892	6890053.09	414.619	21/7/2014	15:46:00	2649.92
P32	335069.391	6889319.97	425.574	21/7/2014	15:54:00	2645.56
P33	335748.193	6888572.2	436.632	21/7/2014	16:01:00	2641.62
P34	336405.924	6887846.79	445.44	21/7/2014	16:10:00	2638.63
P35	337075.431	6887110.51	453.674	21/7/2014	16:16:00	2635.90
P36	337745.325	6886374.47	462.374	21/7/2014	16:23:00	2633.26



P37	338473.153	6885704.95	472.318	21/7/2014	16:30:00	2630.42
P38	339161.711	6885006.08	483.324	21/7/2014	16:37:00	2627.81
Base01	346754.368	6905012.13	491.561	21/7/2014	17:18:00	2596.96

## Anexo C: Correcciones: Gravedad Medida

ID	Latitud	Longitud	Conversión a mgal	Corrección por Mareas (mgal)	Corrección por Deriva instrumental (mgal)	Datos llevados al primer día (mgal)	Gravedad absoluta (mgal)
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.81	2753.74	2753.74	2753.74	977631.105
G01	-28.021017	-70.331598	2617.32	2617.26	2617.20	2617.20	977494.567
G02	-28.02036	-70.336601	2621.30	2621.24	2621.18	2621.18	977498.541
G03	-28.020478	-70.341602	2624.11	2624.05	2623.98	2623.98	977501.349
G04	-28.022244	-70.34626	2627.46	2627.41	2627.34	2627.34	977504.7
G05	-28.023962	-70.351005	2630.46	2630.41	2630.33	2630.33	977507.69
G06	-28.025129	-70.355694	2634.47	2634.43	2634.33	2634.33	977511.699
G07	-28.024148	-70.360601	2637.95	2637.91	2637.81	2637.81	977515.179
G08	-28.023177	-70.365521	2640.25	2640.22	2640.12	2640.12	977517.481
G09	-28.022341	-70.370631	2642.00	2641.97	2641.87	2641.87	977519.231
G10	-28.020849	-70.375504	2643.60	2643.61	2643.47	2643.47	977520.836
G11	-28.020194	-70.380447	2646.28	2646.30	2646.16	2646.16	977523.52
G12	-28.019277	-70.397441	2655.82	2655.84	2655.69	2655.69	977533.058
G13	-28.019414	-70.401522	2656.43	2656.45	2656.30	2656.30	977533.663
G14	-28.019655	-70.407095	2660.08	2660.11	2659.95	2659.95	977537.312
G15	-28.019882	-70.412168	2663.92	2663.95	2663.79	2663.79	977541.153
G16	-28.0201	-70.417337	2666.29	2666.33	2666.16	2666.16	977543.529
G17	-28.020325	-70.422431	2668.67	2668.72	2668.54	2668.54	977545.905
G18	-28.020548	-70.427246	2672.66	2672.71	2672.53	2672.53	977549.893
G19	-28.020779	-70.432494	2675.69	2675.75	2675.56	2675.56	977552.927
G20	-28.021003	-70.437511	2679.55	2679.61	2679.42	2679.42	977556.787
G21	-28.021205	-70.442358	2683.05	2683.11	2682.91	2682.91	977560.276
G22	-28.021423	-70.447265	2686.57	2686.63	2686.43	2686.43	977563.797
G23	-28.021648	-70.452478	2689.35	2689.41	2689.21	2689.21	977566.574
G24	-28.021876	-70.457382	2692.49	2692.56	2692.35	2692.35	977569.712
G25	-28.022104	-70.462186	2695.90	2695.97	2695.76	2695.76	977573.127
G26	-28.022313	-70.467103	2699.09	2699.16	2698.94	2698.94	977576.308
G27	-28.022541	-70.472205	2702.80	2702.87	2702.65	2702.65	977580.018
G28	-28.022754	-70.477132	2706.03	2706.11	2705.89	2705.89	977583.252
G29	-28.022966	-70.482524	2708.63	2708.71	2708.48	2708.48	977585.848
G30	-28.023187	-70.487079	2709.12	2709.20	2708.97	2708.97	977586.332
G31	-28.023418	-70.492361	2711.81	2711.88	2711.65	2711.65	977589.013
G32	-28.023628	-70.497118	2714.46	2714.54	2714.30	2714.30	977591.662
G33	-28.02385	-70.50242	2717.44	2717.52	2717.27	2717.27	977594.639
G34	-28.024054	-70.507129	2720.81	2720.89	2720.64	2720.64	977598.008
G35	-28.024289	-70.51265	2723.82	2723.89	2723.64	2723.64	977601.007
G36	-28.024482	-70.517256	2726.09	2726.16	2725.91	2725.91	977603.272
G37	-28.024713	-70.522505	2729.09	2729.17	2728.90	2728.90	977606.27
G38	-28.024165	-70.526981	2731.91	2731.99	2731.73	2731.73	977609.09

G39	-28.021329	-70.541078	2735.84	2735.91	2735.64	2735.64	977613.01
G40	-28.022991	-70.532829	2741.08	2741.15	2740.88	2740.88	977618.247
G41	-28.019418	-70.550538	2747.88	2747.95	2747.68	2747.68	977625.041
G42	-28.020133	-70.56176	2754.14	2754.21	2753.93	2753.93	977631.296
G43	-28.025671	-70.573584	2761.17	2761.24	2760.96	2760.96	977638.321
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.97	2754.03	2753.74	2753.74	977631.105
Base01	-27.971185	-70.558079	2754.20	2754.16	2754.16	2753.74	977631.105
G44	-27.945015	-70.77194	2844.57	2844.51	2844.60	2844.18	977721.546
G45	-27.944602	-70.767146	2844.50	2844.44	2844.54	2844.12	977721.481
G46	-27.94532	-70.762292	2842.77	2842.71	2842.82	2842.40	977719.763
G47	-27.946356	-70.757338	2840.69	2840.63	2840.75	2840.33	977717.691
G48	-27.947383	-70.752242	2837.43	2837.37	2837.56	2837.14	977714.504
G49	-27.94852	-70.746696	2834.29	2834.23	2834.43	2834.01	977711.377
G50	-27.949467	-70.742153	2832.94	2832.89	2833.10	2832.68	977710.045
G51	-27.95046	-70.737257	2831.36	2831.31	2831.53	2831.11	977708.475
G52	-27.951425	-70.732525	2830.56	2830.51	2830.73	2830.31	977707.676
G53	-27.952401	-70.727861	2828.29	2828.24	2828.47	2828.05	977705.417
G54	-27.953451	-70.722811	2827.90	2827.86	2828.10	2827.68	977705.044
G55	-27.954405	-70.717989	2826.26	2826.21	2826.46	2826.04	977703.404
G56	-27.955359	-70.713083	2825.55	2825.51	2825.76	2825.34	977702.707
G57	-27.956332	-70.708034	2825.27	2825.23	2825.50	2825.08	977702.441
G58	-27.957228	-70.703476	2825.47	2825.44	2825.71	2825.29	977702.656
G59	-27.958151	-70.698771	2824.13	2824.09	2824.38	2823.95	977701.319
G60	-27.959897	-70.689637	2818.86	2818.84	2819.13	2818.71	977696.071
G61	-27.960843	-70.68484	2817.04	2817.01	2817.32	2816.89	977694.26
G62	-27.961795	-70.679916	2815.13	2815.11	2815.42	2814.99	977692.36
G63	-27.962732	-70.675125	2813.77	2813.75	2814.07	2813.65	977691.017
G64	-27.963736	-70.669989	2812.59	2812.58	2812.91	2812.48	977689.849
G65	-27.964681	-70.66509	2810.11	2810.10	2810.44	2810.02	977687.386
G66	-27.965607	-70.660356	2808.00	2808.00	2808.34	2807.92	977685.286
G67	-27.966568	-70.655411	2806.73	2806.74	2807.10	2806.67	977684.04
G68	-27.967548	-70.650778	2805.95	2805.96	2806.32	2805.90	977683.266
G69	-27.968557	-70.646068	2803.58	2803.59	2803.96	2803.54	977680.907
G70	-27.96964	-70.641175	2800.95	2800.97	2801.36	2800.93	977678.299
G71	-27.970643	-70.636511	2799.65	2799.67	2800.06	2799.64	977677.004
G72	-27.971629	-70.631854	2798.60	2798.63	2799.04	2798.62	977675.986
G73	-27.97294	-70.625841	2794.20	2794.24	2794.68	2794.25	977671.62
G74	-27.974208	-70.619882	2790.44	2790.48	2790.92	2790.50	977667.866
G75	-27.976098	-70.612798	2788.13	2788.18	2788.64	2788.22	977665.587
G76	-27.977864	-70.607655	2784.19	2784.24	2784.72	2784.30	977661.665
G77	-27.979472	-70.602972	2781.69	2781.75	2782.25	2781.83	977659.191
G78	-27.981121	-70.598181	2778.81	2778.87	2779.38	2778.96	977656.32
G79	-27.982706	-70.593583	2775.12	2775.19	2775.70	2775.28	977652.647

G80	-27.984279	-70.589002	2770.05	2770.12	2770.64	2770.22	977647.582
G81	-27.985941	-70.584161	2765.94	2766.01	2766.54	2766.11	977643.48
G82	-27.987549	-70.579471	2763.36	2763.43	2763.97	2763.55	977640.911
G83	-27.988982	-70.575303	2761.63	2761.70	2762.25	2761.82	977639.19
G84	-27.990756	-70.570167	2760.51	2760.59	2761.15	2760.72	977638.088
G85	-27.992293	-70.565717	2758.54	2758.62	2759.18	2758.76	977636.126
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.50	2753.58	2754.16	2753.74	977631.105
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.29	2753.27	2753.27	2753.74	977631.105
P01	-28.255797	-70.525094	2721.78	2721.75	2721.68	2722.15	977599.511
P02	-28.247308	-70.526052	2725.47	2725.44	2725.36	2725.83	977603.194
P03	-28.241888	-70.529457	2727.91	2727.87	2727.79	2728.26	977605.625
P04	-28.233222	-70.535647	2732.90	2732.85	2732.76	2733.22	977610.586
P05	-28.225409	-70.540801	2737.43	2737.38	2737.26	2737.73	977615.093
P06	-28.218147	-70.54555	2740.19	2740.14	2740.01	2740.48	977617.841
P07	-28.211254	-70.551765	2744.80	2744.75	2744.61	2745.08	977622.442
P08	-28.204362	-70.558518	2749.45	2749.39	2749.25	2749.71	977627.078
P09	-28.197785	-70.564669	2753.38	2753.33	2753.17	2753.64	977631.004
P10	-28.190834	-70.571144	2757.93	2757.88	2757.72	2758.18	977635.546
P11	-28.183944	-70.577628	2760.44	2760.38	2760.20	2760.67	977638.033
P12	-28.178763	-70.585225	2763.00	2762.94	2762.75	2763.22	977640.583
P13	-28.173589	-70.593794	2765.44	2765.38	2765.18	2765.64	977643.006
P14	-28.168735	-70.601782	2769.08	2769.02	2768.81	2769.27	977646.637
P15	-28.164585	-70.610514	2774.49	2774.43	2774.21	2774.67	977652.038
P16	-28.159845	-70.619037	2778.22	2778.17	2777.94	2778.40	977655.766
P17	-28.15513	-70.627441	2781.72	2781.67	2781.42	2781.89	977659.255
P18	-28.150955	-70.633721	2784.43	2784.38	2784.12	2784.59	977661.954
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.61	2753.56	2753.27	2753.74	977631.105
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.27	2753.27	2753.27	2753.74	977631.105
P21	-28.07498	-70.746744	2831.97	2831.97	2831.99	2832.45	977709.817
P22	-28.083243	-70.742166	2829.81	2829.81	2829.83	2830.30	977707.665
P23	-28.086774	-70.734908	2827.88	2827.88	2827.90	2828.37	977705.735
P24	-28.082283	-70.726108	2826.73	2826.72	2826.75	2827.21	977704.579
P25	-28.080369	-70.719909	2826.63	2826.63	2826.65	2827.12	977704.485
P26	-28.074766	-70.723907	2826.13	2826.13	2826.15	2826.62	977703.987
P27	-28.07725	-70.710609	2828.03	2828.02	2828.06	2828.52	977705.887
P28	-28.084151	-70.706208	2828.05	2828.04	2828.08	2828.54	977705.909
P29	-28.091179	-70.699188	2823.05	2823.04	2823.08	2823.55	977700.911
P30	-28.097885	-70.692482	2815.31	2815.29	2815.33	2815.80	977693.165
P31	-28.104687	-70.685709	2809.44	2809.42	2809.47	2809.93	977687.297
P32	-28.111385	-70.67904	2804.81	2804.79	2804.84	2805.31	977682.671
P33	-28.118217	-70.672237	2800.63	2800.61	2800.66	2801.13	977678.49
P34	-28.124844	-70.665644	2797.46	2797.43	2797.49	2797.95	977675.318
P35	-28.13157	-70.658932	2794.56	2794.53	2794.59	2795.06	977672.421

P36	-28.138294	-70.652215	2791.76	2791.73	2791.79	2792.25	977669.62
P37	-28.144425	-70.644899	2788.75	2788.71	2788.77	2789.24	977666.606
P38	-28.150815	-70.637985	2785.98	2785.94	2786.01	2786.47	977663.837
Base01	-27.971185	-70.558079	2753.24	2753.20	2753.27	2753.74	977631.105

## Anexo D: Correcciones: Gravedad Estándar

ID	Corrección por Latitud (mgal)	Corrección De Aire Libre (mgal)	Corrección de Bouguer	Corrección Topográfica	Gravedad Teórica
Base01	977728.65	151.695725	55.0317778	0.8811	977631.105
G01	977727.655	308.3447878	111.8605148	3.9249	977527.2458
G02	977727.6681	304.8313768	110.5859287	3.2307	977530.192
G03	977727.6657	301.6281088	109.4238556	3.0705	977532.391
G04	977727.6305	297.8724468	108.0613863	2.9637	977534.8557
G05	977727.5961	294.15752	106.7136949	2.9904	977537.1619
G06	977727.5728	290.8749418	105.5228498	3.0705	977539.1502
G07	977727.5924	287.1232916	104.161836	2.8569	977541.7741
G08	977727.6118	283.8431822	102.9718865	2.7234	977544.0171
G09	977727.6285	280.139365	101.6282254	2.67	977546.4474
G10	977727.6583	276.8006216	100.4170048	2.6433	977548.6314
G11	977727.6714	273.4047872	99.18507285	2.67	977550.7817
G12	977727.6897	261.9051168	95.01325253	2.4297	977558.3682
G13	977727.687	259.0456292	93.97589511	2.3496	977560.2677
G14	977727.6822	255.2637362	92.60390987	2.2695	977562.7529
G15	977727.6776	251.8003184	91.34746023	2.2161	977565.0087
G16	977727.6733	248.3436898	90.09347355	2.2161	977567.207
G17	977727.6688	244.7870748	88.80321408	2.3496	977569.3353
G18	977727.6643	241.5578844	87.63173684	2.2695	977571.4687
G19	977727.6597	238.117303	86.38357173	2.0826	977573.8434
G20	977727.6553	234.6196306	85.11469529	1.9491	977576.2012
G21	977727.6512	231.2938484	83.90817673	1.8423	977578.4233
G22	977727.6469	228.106319	82.75181316	1.7622	977580.5302
G23	977727.6424	224.549704	81.46155368	1.6821	977582.8721
G24	977727.6378	221.3732842	80.30922043	1.6554	977584.9184
G25	977727.6333	218.157055	79.14244522	1.602	977587.0167
G26	977727.6291	214.8649102	77.94812955	1.5753	977589.137
G27	977727.6245	211.6727518	76.79008668	1.5219	977591.22
G28	977727.6203	208.5432392	75.65477029	1.5219	977593.2099
G29	977727.616	205.2288752	74.452394	1.5486	977595.291
G30	977727.6116	202.916844	73.61364137	1.4685	977596.8399
G31	977727.607	199.576249	72.40174907	1.4418	977598.9907
G32	977727.6028	196.6806552	71.35129313	1.3884	977600.8851
G33	977727.5984	193.3943738	70.15910457	1.3617	977603.0014
G34	977727.5943	190.8484238	69.23549149	1.335	977604.6464
G35	977727.5896	187.5464038	68.03759332	1.2816	977606.7992

G36	977727.5858	185.004157	67.11532368	1.2549	977608.442
G37	977727.5811	182.226757	66.10774578	1.2282	977610.2339
G38	977727.5921	179.9175032	65.27000074	1.2015	977611.7431
G39	977727.6487	176.7639198	64.12595201	1.1481	977613.8627
G40	977727.6155	172.2123784	62.47475574	1.0947	977616.7832
G41	977727.6869	167.117701	60.62652201	1.1214	977620.0743
G42	977727.6726	162.155413	58.82631616	1.0146	977623.3289
G43	977727.562	155.7482598	56.5019459	0.9345	977627.3812
G44	977729.1717	90.7432128	32.91958515	0.3738	977670.9743
G45	977729.18	87.907796	31.89096007	0.4005	977672.7626
G46	977729.1657	88.798107	32.21394476	0.3738	977672.2077
G47	977729.145	89.580408	32.49774587	0.3738	977671.6885
G48	977729.1245	90.3670294	32.78311432	0.3471	977671.1935
G49	977729.1019	90.7015518	32.90447148	0.3471	977670.9577
G50	977729.083	90.8098704	32.94376702	0.3471	977670.8698
G51	977729.0632	91.2428362	33.10083722	0.3204	977670.6008
G52	977729.0439	91.7294984	33.27738726	0.3204	977670.2714
G53	977729.0245	91.9260766	33.34870138	0.3204	977670.1267
G54	977729.0035	91.1792646	33.07777488	0.3471	977670.5549
G55	977728.9845	92.3229362	33.49267307	0.3471	977669.8071
G56	977728.9655	93.5113548	33.92380446	0.3471	977669.0308
G57	977728.9461	94.7241528	34.36378014	0.3738	977668.2119
G58	977728.9282	95.9752172	34.81763801	0.3738	977667.3968
G59	977728.9098	97.4848884	35.36531257	0.3738	977666.4164
G60	977728.875	101.222343	36.72117657	0.4005	977663.9733
G61	977728.8561	102.293185	37.10965382	0.4272	977663.2454
G62	977728.8371	103.9932624	37.72640345	0.4539	977662.1163
G63	977728.8184	105.7544426	38.36531979	0.4539	977660.9754
G64	977728.7984	107.6325822	39.04666636	0.4806	977659.7319
G65	977728.7795	109.4409782	39.70271152	0.5073	977658.534
G66	977728.7611	111.5255712	40.45895472	0.5073	977657.1871
G67	977728.7419	113.574058	41.20209939	0.534	977655.8359
G68	977728.7223	115.3676412	41.85277081	0.5607	977654.6468
G69	977728.7022	117.0454994	42.46145981	0.5874	977653.5308
G70	977728.6806	119.0390554	43.18467684	0.6141	977652.2121
G71	977728.6606	121.1480278	43.94976433	0.6408	977650.8215
G72	977728.6409	123.1894168	44.69033408	0.6408	977649.501
G73	977728.6148	125.6862994	45.59614661	0.6408	977647.8838
G74	977728.5895	128.2270032	46.51785649	0.6408	977646.2395
G75	977728.5518	131.2133254	47.60122664	0.6675	977644.2722

G76	977728.5165	133.1966976	48.32074921	0.6675	977642.9731
G77	977728.4844	135.2868454	49.07900756	0.6675	977641.6091
G78	977728.4515	137.2384318	49.78699896	0.6942	977640.3059
G79	977728.4199	139.3949286	50.56932722	0.6942	977638.9001
G80	977728.3885	141.9168078	51.48420796	0.7209	977637.235
G81	977728.3553	144.4828168	52.41509798	0.7476	977635.54
G82	977728.3232	146.7612106	53.24164772	0.7743	977634.0294
G83	977728.2946	149.2732146	54.15294595	0.7743	977632.4001
G84	977728.2592	152.0413566	55.15716526	0.8277	977630.5473
G85	977728.2285	154.3904198	56.00935226	0.8277	977629.0198
P01	977722.9525	218.8958434	79.41046094	2.0025	977581.4647
P02	977723.123	211.923335	76.8809926	2.0826	977585.9981
P03	977723.2318	208.9848458	75.81497518	2.0559	977588.0061
P04	977723.4058	203.2303816	73.72738572	2.0025	977591.9003
P05	977723.5626	198.9510254	72.17493209	2.0826	977594.7039
P06	977723.7084	195.7841722	71.02606937	2.3229	977596.6274
P07	977723.8467	191.765583	69.56821611	1.8957	977599.7536
P08	977723.9849	187.0032678	67.84055587	1.7088	977603.1134
P09	977724.1168	182.6159016	66.24891864	1.6287	977606.1212
P10	977724.2562	178.2831576	64.67709712	1.602	977609.0482
P11	977724.3944	174.6018682	63.34160859	1.5753	977611.5588
P12	977724.4983	170.6598118	61.91151969	1.5753	977614.1747
P13	977724.602	166.6835008	60.469004	1.4952	977616.8923
P14	977724.6993	163.227798	59.21535318	1.335	977619.3518
P15	977724.7825	159.7455556	57.9520744	1.1748	977621.8142
P16	977724.8775	156.2151716	56.67133094	1.0146	977624.319
P17	977724.9719	152.8066846	55.43480895	0.9078	977626.6923
P18	977725.0556	150.2301832	54.50011252	0.8277	977628.4978
P21	977726.5764	113.6684896	41.23635704	0.6408	977653.5035
P22	977726.4111	115.0865066	41.75078154	0.4272	977652.6482
P23	977726.3405	116.5684038	42.28838032	0.3738	977651.6867
P24	977726.4303	116.6856718	42.3309225	0.3738	977651.7018
P25	977726.4686	117.089012	42.4772452	0.3738	977651.4831
P26	977726.5807	115.2346346	41.80451902	0.3738	977652.7768
P27	977726.531	117.1544352	42.50097926	0.3738	977651.5037
P28	977726.393	119.6213836	43.39593234	0.3738	977649.7937
P29	977726.2524	122.4342726	44.41638485	0.4005	977647.834
P30	977726.1182	124.893506	45.3085391	0.4272	977646.106
P31	977725.9821	127.9514234	46.41788237	0.4539	977643.9946
P32	977725.848	131.3321364	47.64432858	0.4806	977641.6796



P33	977725.7112	134.7446352	48.88230596	0.5073	977639.3416
P34	977725.5786	137.462784	49.86838886	0.5607	977637.4235
P35	977725.4439	140.0037964	50.79021069	0.5874	977635.6429
P36	977725.3092	142.6886164	51.76420266	0.6408	977633.744
P37	977725.1864	145.7573348	52.87746429	0.7209	977631.5856
P38	977725.0584	149.1537864	54.1096201	0.801	977629.2132

## Anexo E: Prospección Magnetotelúrica

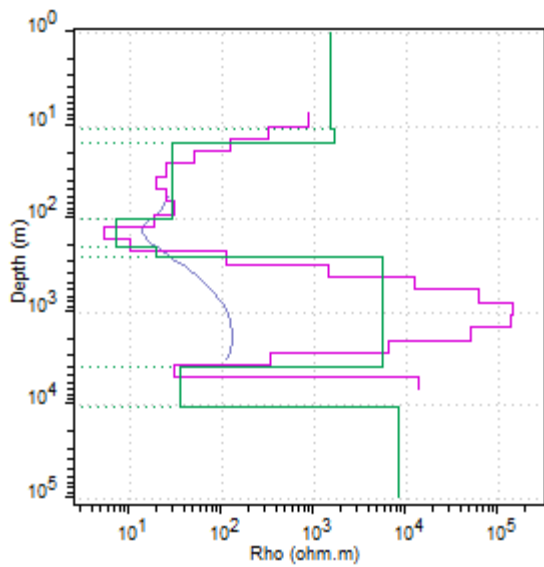


Figura 56. Nombre H01

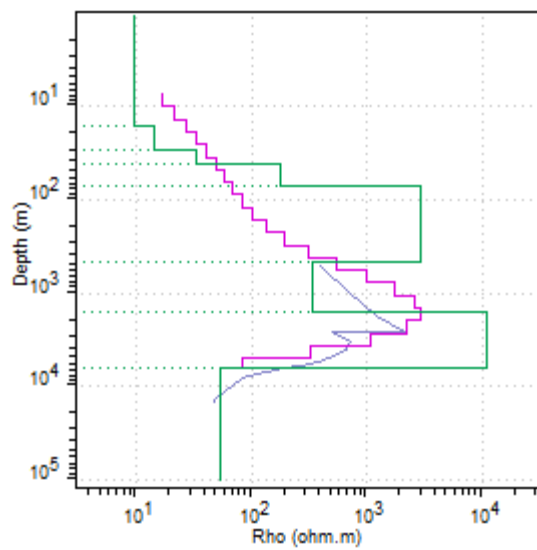


Figura 57. Nombre H02

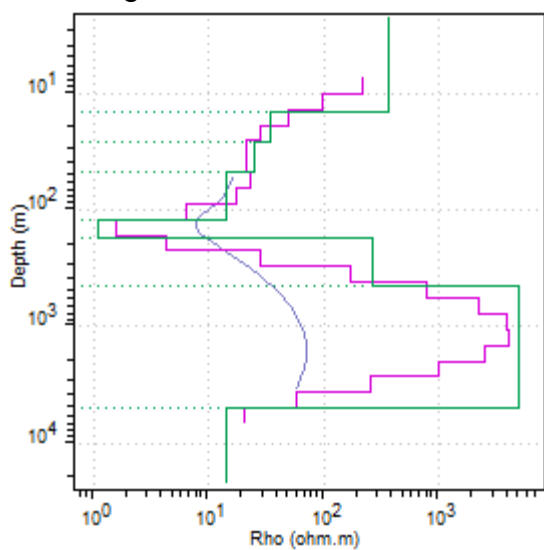


Figura 58. Nombre H03

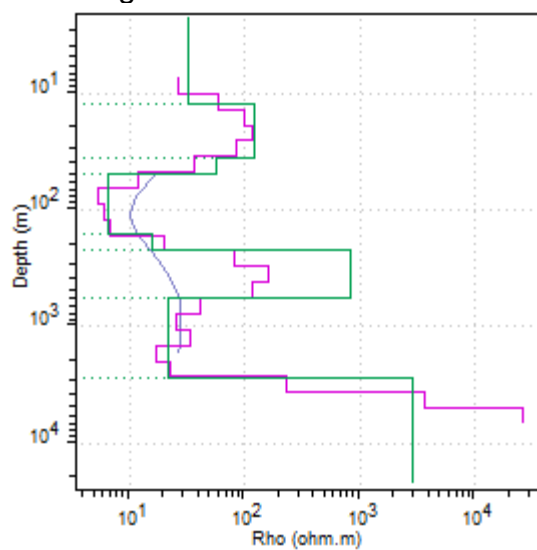


Figura 59. Nombre H04

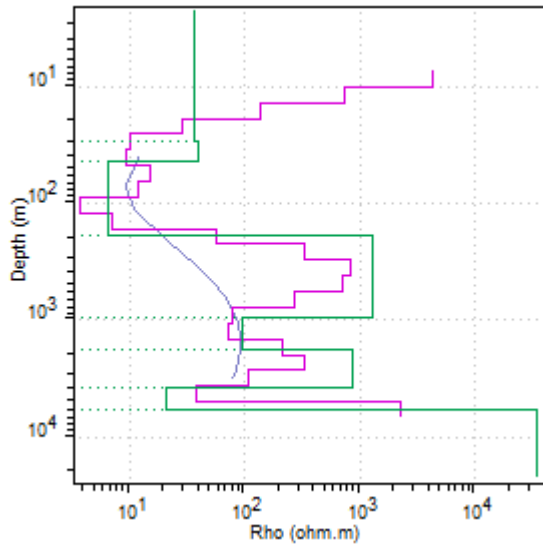


Figura 60. Nombre H05

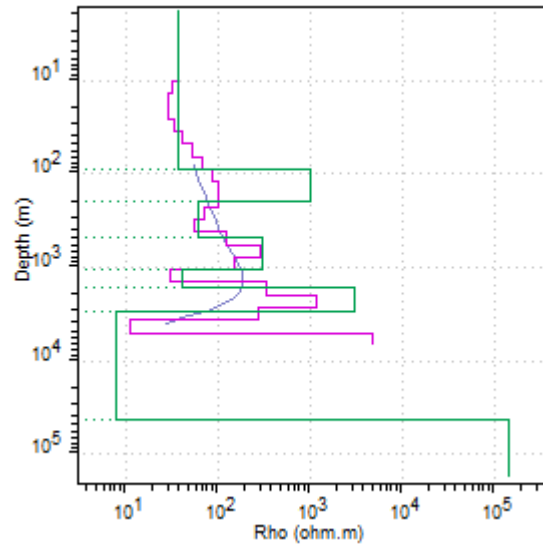


Figura 61. Nombre H06

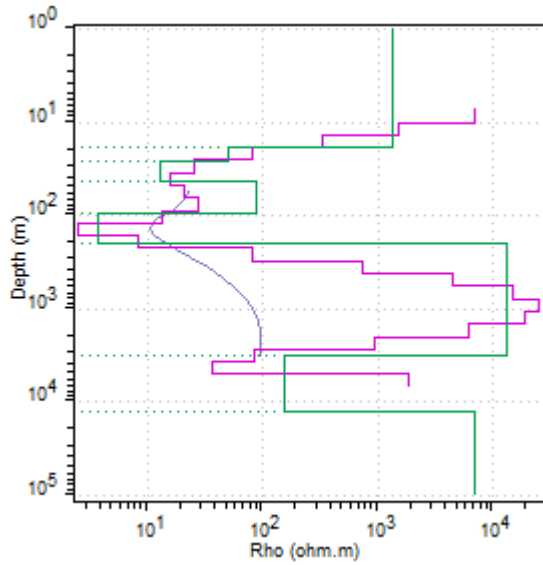


Figura 62. Nombre H07

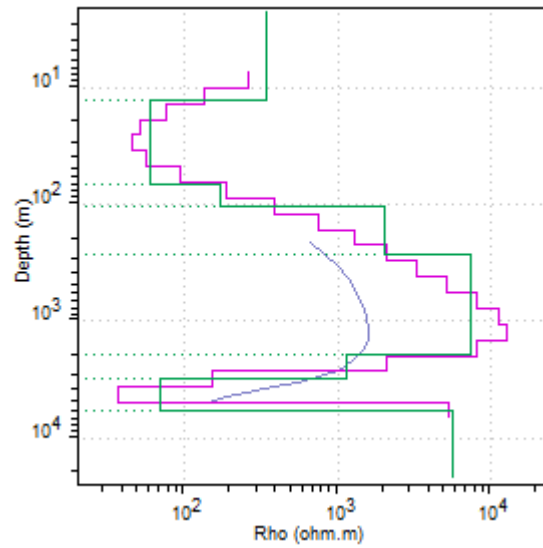


Figura 63. Nombre H08

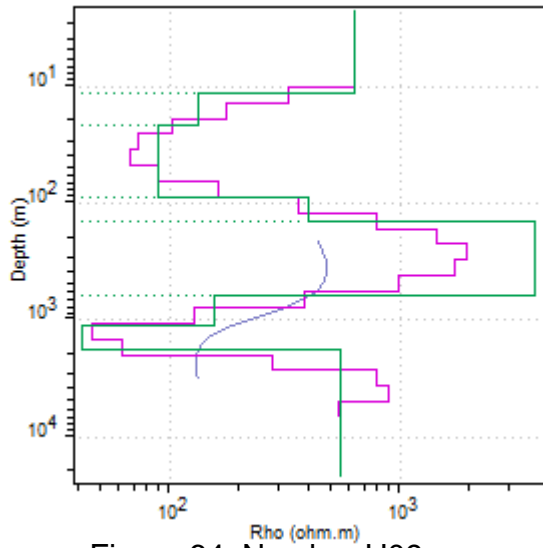


Figura 64. Nombre H09

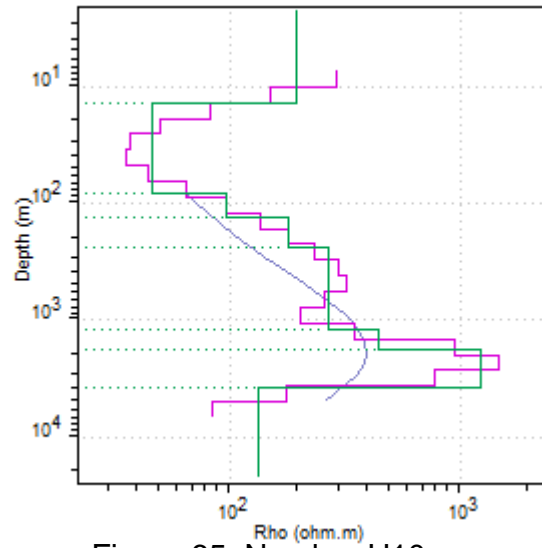


Figura 65. Nombre H10

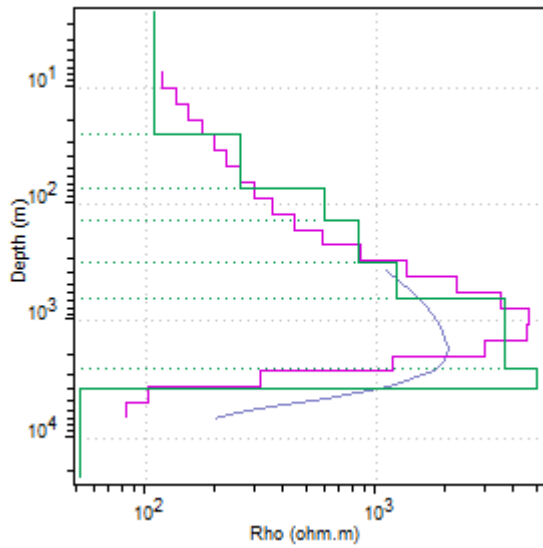


Figura 66. Nombre H11

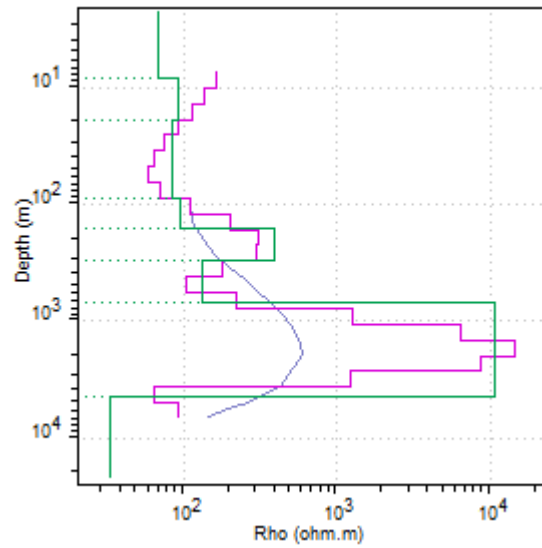


Figura 67. Nombre H12

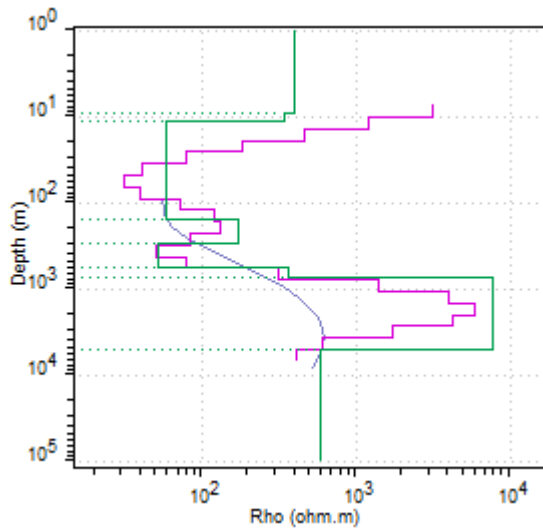


Figura 68. Nombre H13

Anexo E.1: Ubicación de los perfiles anteriores

Tabla 7. Ubicación las estaciones de MT, en datum WGS 84 UTM, huso 19.

ID	Este	Norte
H01	328238.50	6907455.74
H02	325365.66	6907993.10
H03	331107.66	6906891.84
H04	337165.80	6905640.14
H05	342706.17	6904207.05
H06	339504.21	6905091.91
H07	334171.13	6906278.97
H08	365499.89	6899395.28
H09	362168.63	6899954.92
H10	359022.42	6899757.55
H11	368903.02	6899836.32
H12	355092.45	6899518.09
H13	351212.34	6899434.87