

TABLA DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 Presentación y formulación del estudio propuesto	1
2. ANTECEDENTES GENERALES	6
2.1 Modelos genéticos de los depósitos IOCG y su posible conexión con depósitos IOA	6
2.2 Marco geológico	11
2.2.1 Depósitos y rocas estratificadas.....	13
2.2.2 Rocas intrusivas.....	15
2.3 Geología del depósito de Dominga.....	19
2.3.1 Litología, alteración hidrotermal y mineralización.....	21
2.3.2 Geología Estructural.....	25
3. OBJETIVOS, HIPÓTESIS, UBICACIÓN Y METODOLOGÍAS	27
3.1 Objetivo general.....	27
3.2 Objetivos Específicos.....	27
3.3 Ubicación y accesos	28
3.4 Hipótesis de trabajo	29
3.5 Métodos Analíticos	30
3.5.1 Compilación bibliográfica	30
3.5.2 Obtención y preparación de muestras.....	30
3.5.3 Microscopía Óptica.....	33
3.5.4 Microscopía Electrónica de Barrido.....	33
4. RESULTADOS	34
4.1 Asociaciones mineralógicas de mena, ganga y patrones texturales de magnetitas	34
4.1.1 Mineralogía de mena.....	34
4.1.2 Mineralogía de ganga.....	41
4.2 Química mineral semi-cuantitativa de las magnetitas.....	43
4.3 Mapas elementales mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS)	45
5. DISCUSIÓN	47
5.1 Secuencia paragenética	47
5.2 Caracterización de los fluidos en el depósito de Dominga.....	49
5.2.1 Evento I	49
5.2.2 Evento II	50
5.2.3 Evento III	50

5.2.4 Evento IV.....	51
5.3 Síntesis e interpretaciones.....	52
6. CONCLUSIONES.....	58
7. CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES	61
8. BIBLIOGRAFÍA	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Código de sondajes, ubicación y profundidad de las muestras utilizadas en análisis petrográficos-calcográficos, y microscopía electrónica de barrido (SEM) en granos de magnetita. Las coordenadas corresponden a los collares.....	32
Tabla 2: Principales asociaciones mineralógicas y tipos de alteración para el Depósito de Dominga.....	42
Tabla 3: Secuencia paragenética preliminar de mineralización y principales eventos de alteración en el depósito de Dominga. El grosor de la línea representa aproximadamente la abundancia relativa del mineral en particular pero no tiene implicancias cuantitativas sobre otras especies minerales. Abreviaciones: D=diseminaciones, Loc = local, M = masiva, P = alteración pervasiva, R = reemplazo, V = vetillas, ? = incierto. Modificado de Veloso et al. (2017).	48

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Ubicación de las principales provincias IOCG y óxidos de Fe hidrotermales a escala mundial. Las provincias son indicadas con diferentes colores, diferenciados según su edad. Para cada provincia, símbolos circulares de tres partes indican la intensidad de ocurrencia de metales y principales tipos de alteración hidrotermal. Modificado de Williams et al.(2005).....	2
Figura 2: Mapa mostrando ubicación de los principales depósitos minerales Cretácicos tipo IOCG e IOA dentro de la Franja Ferrífera Chilena. También se muestra la traza de la Zona de Falla Atacama. Modificado de Maksaev y Zentilli (2002). La estrella roja señala la ubicación aproximada del depósito en estudio.	3
Figura 3: Arquitecturas y orígenes hidrotermales alternativos para sistemas IOCG ilustrando posibles fuentes de fluidos, recorridos del flujo hidrotermal, y distribución de alteraciones y menas (Figura modificada de Barton, 2014).	7
Figura 4: Modelo propuesto por Knipping et al. (2015): (A) Nucleación preferencial de burbujas en microlitos de magnetita (Mt) cristalizados desde un fundido silicatado (naranja); (B) Ascenso de pares magnetita-burbuja debido a la fuerza de flotación positiva; (C) Posterior ascenso, crecimiento, coalescencia, y acumulación de magnetita primaria, así como la incorporación de Fe en los fluidos de alta salinidad; (D) Formación de fracturas hidráulicas (debido a cambios de esfuerzos tectónicos) permitiendo una segregación rápida y eficiente del fluido rico en magnetita, además del eventual crecimiento de magnetita hidrotermal durante el enfriamiento progresivo. Paneles representan escenarios volviéndose más someros desde A hasta D. Cambio de color en D implica incremento en la cristalinidad.	9
Figura 5: Química de magnetitas de Los Colorados graficada en el diagrama discriminante de Dupuis y Beaudoin (2011) y Nadoll et al. (2014). Se muestra la distribución de las muestras desde valores elevados hasta menores concentraciones.	

La estrella representa el promedio de todas las magnetitas analizadas en el depósito de Los Colorados.10

Figura 6: Modelo esquemático ilustrando la evolución de la configuración tectonomagmática a lo largo del margen del norte de Chile entre los 25°S y 34°S durante el Cretácico, y su relación con la formación de depósitos IOCG..... 12

Figura 7: Extracto modificado de la carta geológica regional (tomada de Creixell et al., 2012). El recuadro rojo indica la localización aproximada del área de Dominga. Además, se muestra la traza de la sección transversal AA' ilustrada en la figura 7. 17

Figura 8: Extracto del perfil esquemático AA' de la carta geológica regional en el cual se muestra la situación estructural de la zona de estudio, junto con las principales estructuras que delimitan el depósito Dominga. Modificado de Creixell et al. (2012)..... 18

Figura 9: Ejemplos de la variedad de elementos estructurales en Dominga. a) ultracataclasita foliada, dextral con textura S-C; b) ultracataclasita con cristales grandes de magnetita. c) vista frontal hacia el NW de un conjunto de elementos estructurales (cataclasitas, brechas de falla) formando el elemento estructural compuesto Banda de Deformación El Tofo; d) vista frontal hacia el SE de la brecha hidrotermal con matriz de magnetita > actinolita (>> apatito?), que incluye grandes clastos alterados de la Formación Punta del Cobre; e) brecha hidrotermal con matriz rica en magnetita y clastos grandes del Complejo Diorítico Porfídico (andesita); f) estrías en superficie de deslizamiento con rumbo NW hospedada en el Complejo Diorítico Porfídico; g) vista frontal hacia el SE de fibras de deslizamiento de hematita (especular) en una falla-veta; h) vetas de cuarzo con dos texturas diferentes mostrando relaciones de cortes. i) vista frontal hacia el NW de vetas de magnetita subverticales y de ancho centimétrico cortando estratos de la Formación Punta del Cobre. Tomado de Veloso et al. (2017).....20

Figura 10: Mapa simplificado de la geología del distrito de Dominga. Se muestran las principales litologías junto a los distintos elementos que conforman los sistemas estructurales. Modificado de Veloso et al. (2017).....26

Figura 11: Mapa de ubicación del depósito de Dominga mostrando los dominios morfoestructurales. Adicionalmente, se indican otros depósitos tipo IOA cercanos pertenecientes a la Franja Ferrífera Chilena Cretácica. Modificado de Albers (2012). ..28

Figura 12: Mapa simplificado de la geología distrital del depósito de Dominga. Círculos indican la ubicación en superficie de los sondajes examinados. Cuadrados representan muestras de mano cuyas secciones delgadas fueron estudiadas. Tomado de equipo geológico Proyecto Dominga (2014).31

Figura 13: Fotomicrografías de secciones delgadas documentando las relaciones paragenéticas del primer evento de alteración/mineralización en el depósito de Dominga. Se muestran andesitas y dioritas porfídicas examinadas a luz transmitida y reflejada. **A y B** corresponden a fotomicrografías de la muestra DG0102 (superficie). **A**) Asociación magnetita I-biotita I subidiomorfos, de grano fino ($\leq 10 \mu\text{m}$) diseminadas en masa fundamental compuesta por microlitos de plagioclasas. Luz transmitida, aumento 10x, nícoles paralelos. **B**) "Martita" desarrollada en cristal de magnetita a lo largo de planos cristalográficos preferenciales. Luz reflejada, aumento 40x, nícoles paralelos. **C**) Muestra DG0103 (superficie). Magnetita I asociada espacialmente con biotita I, ambas diseminadas y alterando intensamente la masa fundamental de andesita porfídica hospedante. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles paralelos. **D**) Muestra DG0106 (superficie). Cristal de actinolita I atravesado y rodeado por biotita I de grano fino. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles paralelos. **E y F** corresponden a fotomicrografías de

muestra DG0203 (superficie). **E)** Reemplazo pseudomorfo de plagioclasa por actinolita que a su vez es sucedida por epidota anhedral desarrollándose en el centro de cristal. Notar los diminutos cristales cúbicos y equigranulares de magnetita que ocurren diseminados en la masa fundamental de la roca huésped. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles paralelos. **F)** Fenocristal grueso de plagioclasa parcialmente reemplazado por asociación epidota-magnetita. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles cruzados. Abreviaciones minerales: Act=actinolita, Bt=biotita, Ep=epidota, Hm=hematita, Mt=magnetita, Plg= plagioclasa.35

Figura 14: Imágenes SEM de electrones retro-dispersados (BSE) mostrando reemplazos y ocurrencias minerales indetectables mediante microscopía óptica en las muestras DG0205 y DG0206 **A)** Aspecto general de la sección delgada DG0205. Microfractura truncando finas laminaciones de magnetita y silicatos **A₁)** Acercamiento de la foto anterior **B)** Pequeña inclusión alargada de baritina dentro de magnetita. **C)** Cristales de magnetita II corroídos y reemplazados por hematita fibrosa tardía. Además se observa biotita fracturando cristal de magnetita. **C₁)** Acercamiento de la fotografía anterior. Granos de magnetita significativamente reemplazados por hematita con núcleos fibrosos **D)** Ilmenita anhedral con pequeñas inclusiones subhedrales de monazita.....37

Figura 15: Fotomicrografías de secciones delgadas documentando las relaciones paragenéticas del segundo evento de alteración/mineralización en el depósito de Dominga. **A)** Muestra DG0206 (superficie). **B)** Muestra DS12-231(17) (235.57 m). Vetilla de magnetita II con halo de biotita II cortando masa fundamental de pórfido andesítico alterada por finos cristales de biotita I y magnetita I diseminadas. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles paralelos. **C)** Muestra DS12-231(17) (235.57 m). Magnetita II rellenando vetilla que presenta exsoluciones lamelares de ilmenita en tres orientaciones preferenciales. Luz reflejada (polarizadores cruzados y desajustados 40°). **D)** Cristales subhedrales de pirita I englobados por magnetita II cortada por cúmulo tardío de actinolita II con hábito acicular. **E)** Muestra DN11-136 (11B) (308.8 m). Magnetita II y pirita II masivas reemplazadas y truncadas por vetilla tardía de calcopirita. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **F)** Muestra DN11-136 (11A) (308,7 m). Fotomicrografía de cuerpos semi-masivos de hierro. Se muestra un reemplazo total de la roca huésped por pirita (Py) subsecuentemente cortada y englobada por magnetita maciza (Mt). Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **G)** Muestra DS11-140 (276.95 m) Asociación magnetita III-apatito-actinolita II-escapolita mostrando intercrecimiento de cristales gruesos. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles paralelos. **H)** Muestra DS12-231 (251.7 m). Brecha de magnetita III+actinolita II+apatito±calcopirita. Se observan cristales gruesos de magnetita III soportando cristales de actinolita II, también se muestran cristales de calcopirita anhedral sobreimpuesta a la actinolita, indicando que es el mineral más tardío. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **I)** Muestra DS12-231 (251.7 m). Imagen de electrones retrodispersados (BSE). Inclusiones micrométricas de rutilo e ilmenita contenidas en magnetita III. Abreviaciones minerales: Act=actinolita, Ap= apatito, Bt= biotita Ccp=calcopirita, Ilm= ilmenita, Mt= magnetita, Py= pirita, Rt= rutilo, Scp= escapolita.38

Figura 16: Variaciones texturales y mineralógicas en profundidad para el sondaje DS12-231 (230-250 m). **A₁)** Reemplazo pervasivo de roca volcánica alterada por magnetita II cortada por vetilla tardía rellena con pirita y calcopirita. **A₂)** Vista general de la sección delgada. Vetilla rellena por magnetita II con halo de biotita II. **A₃)** Vetilla de magnetita II

en contacto con vetilla de pirita-calcopirita, ambas cortando masa fundamental. **A₄**) Vetilla rellena con magnetita II. Notar la textura reticular de las exsoluciones lamelares de ilmenitas muy finas en la magnetita II. **B₁**) Aspecto macroscópico del tramo 232.2 m del sondaje **B₂**) Detalle de vetilla rellena con magnetita maciza penetrada por biotita y reemplazada en sus bordes por rutilo-ilmenita-titanita. **B₃**) Circunferencia mostrando zona rica en inclusiones de ilmenita. **B₄**) Detalle de zona rica en finas inclusiones aciculares de ilmenita orientadas en 3 direcciones preferenciales. **C₁**) Gruesos cristales de actinolita intercrecidos y soportados por magnetita masiva. **C₂**) Aspecto general de la sección delgada. **C₃**) Actinolita masiva intercrecida con cristales subhedrales de clorapatito soportadas/cementadas por magnetita gruesa masiva. **C₄**) Textura de intercrecimiento vermicular entre rutilo e ilmenita desarrollado en hospedado en magnetita maciza. imagen de electrones retro-dispersados (BSE) de diferentes granos de magnetita y sus asociaciones minerales. Abreviaciones minerales: Ap=apatito, Bt=biotita, Ccp=calcopirita, Ilm=ilmenita, Mt=magnetita, Py=pirita, Rt= rutilo.39

Figura 17: Fotomicrografías de secciones delgadas documentando las relaciones paragenéticas del tercer evento de alteración/mineralización en el depósito de Dominga. **A, B y C** corresponden a fotomicrografías de la muestra DS11-134 (19) (853.44 m). **A**) Calcopirita tardía reemplazando cristal de magnetita III contenido en vetilla de anhidrita. Adicionalmente, se observa menor pirita reemplazando los bordes del mismo cristal. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **B**) Magnetita IV en contacto con pirita III mediante borde recto simple, indicando co-precipitación. Además presenta inclusiones diminutas de calcopirita, todos contenidos en vetilla de anhidrita. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **C**) Vetilla de magnetita IV con pequeñas inclusiones de pirita III y calcopirita, indicando precipitación sincrónica. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **D**) Muestra DS11-134 (21) (863.64 m). Feldespato potásico junto con epidota y anhidrita relleno vetilla que trunca la asociación magnetita-actinolita. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **E**) Muestra SD-18 (109.7 m). Magnetita III y pirita II soportadas por calcopirita tardía intersticial. Luz reflejada, aumento 5x, nícoles paralelos. **F**) Muestra DN12-194 (357.25 m). Amígdala rellena por asociación cuarzo-epidota-magnetita IV. Luz transmitida, aumento 5x, nícoles paralelos. Abreviaciones minerales: Act=actinolita, Anh=anhidrita, Aln=allanita, Bt=biotita, Ccp=calcopirita, Ep=epidota, K-fsp=feldespato potásico Mt=magnetita, Py=pirita, Qz=cuarzo.....40

Figura 18: Diagrama discriminante Ti+V vs. Al+Mn en el cual se grafican las concentraciones obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en diferentes cristales de magnetitas del depósito Dominga. Los campos de referencia están tomados de Dupuis y Beaudoin (2011). El área sombreada representa muestras con contenidos de Al+Mn y Ti+V bajo el límite de detección.....44

Figura 19: Imágenes de electrones retrodispersados (BSE) y mapas elementales EDS de diferentes texturas de exsolución/re-equilibrio observadas en magnetitas masivas del sondaje DS12-231. **(A)** Crecimientos vermiculares entre ilmenita y rutilo. **(B)** Exsoluciones lamelares orientadas en tres direcciones preferenciales. Abreviaciones minerales: Mt = magnetita, Ilm = ilmenita, Rt = Rutilo.46

Figura 20: Varios gaps de miscibilidad para el sistema magnetita-ülvoespinela (Fe_3O_4 - Fe_2TiO_4): V= Vincent et al. (1957); P= Price (1981); L= Lindsley (1981); T-M= Trestman-Matts et al. (1983); ON1, ON2= curvas (1) y (2) en Figura 13 de O'Neil y Navrotsky (1984). La línea recta discontinua conecta $Tc(Fe_3O_4)$ con $Tc(Fe_2TiO_4)$. Círculos sólidos son datos de $Tc(X)$ de Akimoto y Katsura (1959), y los círculos abiertos son datos de

Yama-ai et al. (1961; en Nagata, 1962). De estos, solo V y L están basados en experimentos de equilibrios de fase. V utilizó muestras naturales y L sintéticas.....53

Figura 21. **Izquierda:** Modelo de zonación vertical para depósitos tipo IOCG propuesto por Barra et al. (2017). El recuadro rojo refleja el estilo de mineralización dominante en el depósito de Dominga, además de las asociaciones de alteración y mineralización predominantes. **Derecha:** Ilustración de las posibles configuraciones de depósitos tipo IOCG. Zonación de alteraciones en depósitos IOCG son resumidas de Williams et al., 2005. Alteración regional Na-Ca comúnmente precede la mineralización, mientras que alteraciones potásica e hidrolítica (sericita-clorita) usualmente están relacionadas a la mineralización. 1) Metasomatismo-Ca domina en el distrito Candelaria-Punta del Cobre. 2) Extensa alteración Na-Ca en el distrito de Cloncurry, mientras que alteración-Na domina en los IOCG Andinos Centrales. NB. Bajo condiciones de elevados gradientes termales, el eje Y se comprimirá. Los grosores de las flechas indican las contribuciones relativas de diferentes fuentes de fluidos. Salmueras de cuenca o agua marina probablemente están más oxidadas que los fluidos magmáticos y metamórficos. Modificado de Chen et al., 2013.....56

Figura 22: Bosquejo esquemático idealizado de la zonaciones verticales y laterales de los sistemas de vetas IOCG. Se muestran las características principales: a la izquierda tipos de alteración, nivel de exposición a la derecha, envoltura (patrón), mineralización (sólidos) y brechas (triángulos). Modificado de Kreiner y Barton (2009).57

Figura 23: Perfil esquemático mostrando la transición de estilos de mineralización y alteración desde el Complejo Plutónico El Tofo hasta el extremo norte del depósito de Dominga.57