



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

FERTILIDAD MAGMÁTICA EN EL YACIMIENTO TIPO IOA CERRO NEGRO NORTE, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

CAMILA BELÉN SOUGARRET ROLDÁN

PROFESOR GUÍA:
FERNANDO BARRA PANTOJA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARTIN REICH MORALES
SANTIAGO TASSARA

SANTIAGO DE CHILE
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Camila Belén Sougarret Roldán
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Fernando Barra Pantoja

FERTILIDAD MAGMÁTICA EN EL YACIMIENTO TIPO IOA CERRO NEGRO NORTE, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

Los yacimientos del tipo Kiruna o IOA (*Iron Oxide Apatite*) ubicados en la Cordillera de la Costa del norte de Chile constituyen la principal fuente de hierro del país. Este tipo de depósitos se caracterizan por la presencia de mineralización maciza de magnetita intercrecida con actinolita y cantidades variables de apatito y sulfuros. En Chile, estos yacimientos se relacionan espacialmente a intrusivos de edad Cretácica; sin embargo, la relación genética de dichas unidades con la mineralización de hierro aún es tema de debate. El presente trabajo de investigación se focaliza en el depósito tipo IOA Cerro Negro Norte ubicado 32 km al norte de la ciudad de Copiapó. Este depósito consiste en cinco cuerpos macizos de magnetita emplazados en rocas volcánicas de la Formación La Negra, y espacialmente relacionados con intrusivos de composición diorítica a granodiorítica. Además de abundante magnetita, este yacimiento se destaca por sus altos contenidos de pirita y cantidades reducidas de calcopirita.

La finalidad de este estudio es determinar la evolución magmática de los intrusivos asociados al yacimiento y su fertilidad metalogénica mediante el análisis geocronológico y geoquímico de circones utilizando la técnica de ablación laser conectada a un espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (LA-ICP-MS). El estudio contempló el análisis petrocronológico de cuatro intrusivos de composición diorítica a granodiorítica y un pórfido monzodiorítico. Los resultados obtenidos permiten identificar dos etapas de formación; una etapa temprana relacionada a la mineralización IOA (130–127 Ma) asociada a intrusivos de composición intermedia con temperaturas de cristalización relativamente altas ($>710^{\circ}\text{C}$), levemente reducidos ($\Delta\text{FMQ}<+0.5$) y con bajos contenidos de agua ($(\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_\text{N}<2.5$). La segunda etapa está representada por dos eventos magmáticos, el primero correspondiente a un pórfido monzodiorítico (~ 127 Ma) caracterizado por menores temperaturas de cristalización ($\sim 707^{\circ}\text{C}$), condiciones ligeramente más oxidadas ($\Delta\text{FMQ}=+0.4$) y mayores contenidos de agua ($(\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_\text{N}=3.5$). Este evento aportaría azufre y cantidades limitadas de Cu al sistema, generando la precipitación de abundante pirita con escasa calcopirita y cantidades menores de oro. El último evento (~ 113 Ma) está representado por un intrusivo cuarzo diorítico asociado espacialmente a diques aplíticos y brechas de turmalina-cuarzo. Este evento intrusivo se caracteriza por una alta temperatura de cristalización ($\sim 783^{\circ}\text{C}$), valores de $(\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_\text{N}=1.85$ y $\Delta\text{FMQ}=+2.5$, reflejando condiciones altamente oxidadas, probablemente producto de procesos de asimilación cortical relacionados con un engrosamiento cortical posterior a los principales eventos de mineralización.

Basado en los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir que la formación del yacimiento Cerro Negro Norte responde a procesos magmático-hidrotermales complejos. En particular, se concluye que el depósito se habría formado a partir de dos eventos principales; uno temprano responsable de la mineralización de Fe seguido de un evento magmático inmediatamente posterior asociado a la menor mineralización de sulfuros de Fe y Fe-Cu(\pm Au).

Estos nuevos antecedentes confirman la relación genética de intrusivos de composición intermedia, formados bajo condiciones magmáticas contrastantes, con la mineralización metálica de depósitos tipo IOA.

*A mis padres, Jorge y Karina,
A mis hermanos, Catalina y Juan Pablo
A mi abuela, mi Anita.*

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a los integrantes de la comisión: Fernando Barra, Martin Reich y Santiago Tassara. En especial agradecer al profesor Fernando Barra por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo con él, brindarme el apoyo necesario y orientarme en los diversos aspectos de este proceso. Al profesor Martin Reich por entregarme nuevas ideas y puntos de vista, mostrando entusiasmo en mi investigación. Al profesor Santiago Tassara por aceptar ser parte de la comisión y brindarme igualmente su retroalimentación, planteando nuevas ideas.

Agradezco también a Israel por brindarme apoyo en el traslado y recolección de muestras en el yacimiento, y por estar dispuesto a resolver mis dudas en diversos temas. A Rurik por su apoyo en los procesos de montaje y análisis de circones en el laboratorio de espectrometría de masas y por orientarme en diversos temas teóricos y prácticos de esta investigación. Agradecer a Pedro y Mary por su apoyo en temas de metodología y reducción de datos, siempre abiertos a ayudarme cuando lo necesite. Agradecer también a los laboratorios de Preparación de Muestras y de Espectrometría de Masas del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, utilizados en las diversas etapas de este trabajo.

De igual forma quisiera agradecer a mis padres, mis principales referentes, por siempre brindarme apoyo en todas las etapas y procesos por los que he pasado. Quiero agradecer a mi mamá, por ser mi principal compañera y confidente, por aguantarme y guiarme en los caminos recorridos impulsándome siempre a seguir creciendo. También agradecer a mi papá, por inducirme a esta carrera, por siempre orientarme y presionarme a realizar todos mis proyectos, por acompañarme siempre, sacarme una sonrisa en los momentos oportunos, y muchas veces rabias. Agradecer también a mis hermanos, Catalina y Juan Pablo, por siempre acompañarme y ser mi apoyo. A mi hermana por estar a mi lado a lo largo de todos estos años en la universidad, y a mi hermano por siempre brindarme una sonrisa y amor incondicional. Quisiera agradecer también a mi abuela, mi Anita, por siempre regalarme, apoyarme y defenderme en cualquier situación, mostrándome su amor y siendo una segunda madre para mí. Agradecer a toda mi familia por el apoyo brindado en todos estos años de carrera.

Quisiera agradecer a todos los amigos que hice en mi periodo universitario, a los de Plan Común, que me acompañaron a lo largo de mis primeros años, y a los amigos que realice en geología, gracias a quienes los terrenos se volvieron más amenos y divertidos. Quisiera agradecer en especial a mis amigas Lore, Pauli, Fran y Jo, las que han sido un gran apoyo en el último tiempo y con las que espero conservar una amistad por muchos años más. Agradecer también a toda la gente de la salita del núcleo quienes me acompañaron en todos mis “viernes de tesis”, brindando amistad y apoyo tanto personal como en ideas y diversos aspectos de la tesis. Por último, agradecer a mis amigas desde el colegio, Paula y Sofi, por siempre estar ahí para darme apoyo, cariño y ser mis eternas confidentes.

Por último, agradecer a todos los funcionarios del Departamento de Geología por su trabajo y por su apoyo a lo largo de todos mis años de estudio.

Tabla de contenido

Capítulo 1 . Introducción	1
1.1. Formulación/motivación del problema	1
1.2. Hipótesis.....	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. Ubicación y accesos	5
1.5. Metodología	6
1.5.1. Separación y Montaje de Circones	6
1.5.2. Datación U–Pb y concentración de elementos traza en circones	7
Capítulo 2 . Marco Geológico	9
2.1. Geología Regional.....	9
2.1.1. Generalidades.....	9
2.1.2. Geología Estructural	15
2.2. Geología distrital	17
2.2.1. Litología.....	17
2.2.2. Estructuras.....	18
2.2.3. Alteración.....	19
2.2.4. Mineralización	19
Capítulo 3 . Resultados	23
3.1. Intrusivos analizados.....	23
3.2. Geocronología de circones.....	24
3.3. Geoquímica de circones	26
Capítulo 4 . Discusión	34
4.1. Geocronología de circones.....	34
4.2. Geoquímica de circones: condiciones magmáticas de unidades intrusivas	35
4.3. Evolución y fertilidad magmática	38

Capítulo 5 : Conclusiones	43
Bibliografía	45
Anexos	51
A. Descripción de muestras.....	51
B. Datación U-Pb en circones.....	54
C. Elementos traza en circones.....	62

Índice de Tablas

Tabla 1. Ubicación de las muestras analizadas (Sistema de coordenadas WGS84 UTM Huso 19S).....	6
Tabla 2. Tramos de sondaje muestreados.....	6
Tabla 3. Complejos plutónicos en el entorno del depósito con su composición y edades reportadas.	14
Tabla 4. Descripción macroscópica de las muestras analizadas.....	23
Tabla 5. Resultados de edades promedio obtenidas para las muestras analizadas.	24
Tabla 6. Concentración de elementos traza en las muestras analizadas. Se muestran los valores promedio, desviaciones estándar, mediana, percentiles 5 y 95 para todas las muestras.	26
Tabla 7. Parámetros geoquímicos calculados en base a la medición de elementos traza en LA-ICP-MS. Incluyen valores promedio, desviación estándar, mediana, percentiles 5 y 95, y el número de datos tomados en cada parámetro.....	30
Tabla A - 1. Descripción macroscópica de muestra CS01.	51
Tabla A - 2. Descripción macroscópica de muestra RAMPA3.....	52
Tabla A - 3. Descripción macroscópica de muestra CS04.	53
Tabla B - 1. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CNN5.	57
Tabla B - 2. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CS01.....	58
Tabla B - 3. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CS04.....	59
Tabla B - 4. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra RAMPA3.	60
Tabla B - 5. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CNN6.	61
Tabla C - 1. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CNN5.	62
Tabla C - 2. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CS01.....	63
Tabla C - 3. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CS04.....	64
Tabla C - 4. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra RAMPA3.	65
Tabla C - 5. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CNN6.	66

Índice de Figuras

Figura 1. Franja metalogénica del Jurásico–Cretácico con la ubicación de Cerro Negro Norte. Tomado de Salazar et al. (2020).	3
Figura 2. Ubicación y accesos al depósito Cerro Negro Norte, Región de Atacama.	5
Figura 3. Ubicación de las muestras de rocas intrusivas estudiadas en el depósito Cerro Negro Norte.	8
Figura 4. Geología regional del entorno del distrito Cerro Negro Norte. Elaborado en base a Arévalo (2005).	13
Figura 5. Mapa de los principales sistemas de fallas presentes en la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Se indica además la posición del yacimiento Cerro Negro Norte (estrella amarilla). SFA/AFS: Sistema de Fallas de Atacama; CFS: Sistema de Fallas Chivato; TFS: Sistemas de Fallas Tigrillo. Modificado de Grocott y Taylor (2002).	16
Figura 6. Geología del distrito Cerro Negro Norte. Se ilustran las unidades geológicas y alteraciones hidrotermales principales presentes en el yacimiento y alrededores, además de los cuerpos de mena principales. Modificado de Salazar et al. (2020).	21
Figura 7. Secuencia paragenética del depósito Cerro Negro Norte. I, II, III y IV: tipos de magnetitas, M: masiva, D: diseminada, V: en vetillas, B: brechas, Inc: inclusiones. Extraído de Salazar et al. (2020).	22
Figura 8. Gráficos de promedio ponderado de las edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ obtenidas en circones de las muestras CNN5(A), CS01(B), CS04 (C), RAMPA3 (D) y CNN6 (E).	25
Figura 9. Diagrama de tierras raras normalizadas a condrito (McDonough y Sun, 1995).	28
Figura 10. Parámetros geoquímicos en función de la edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. (A) Anomalía de Eu en circón, (B) Temperatura de saturación en Ti de circones, (C) Fugacidad de oxígeno del fundido parental en función de la desviación del buffer Fayalita–Magnetita–Cuarzo (ΔFMQ), (D) Razón $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$ como parámetro que indica la relación entre el fraccionamiento de plagioclasa y hornblenda.	31
Figura 11. Gráfico Dy vs $(\text{Yb}/\text{Dy})_{\text{N}}$ para los intrusivos analizados que ilustra el fraccionamiento de hornblenda.	32
Figura 12. Gráfico razón $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}}$ vs ΔFMQ indicando la distribución de los datos de los intrusivos presentes en Cerro Negro Norte.	33
Figura 13. Representación gráfica de las edades U–Pb de los intrusivos analizados. Se indica además una separación de eventos en base a condiciones redox donde en una etapa I los intrusivos presentan condiciones levemente reducidas en comparación con una etapa II con características oxidadas.	34
Figura 14. Resumen de los eventos magmáticos identificados en el depósito Cerro Negro Norte con los parámetros geoquímicos principales. Se identifica una etapa temprana principal (rojo), seguido de una etapa posterior con eventos intrusivos con signatures más oxidadas (amarillo).	40
Figura 15. Gráfico $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})$ vs ΔFMQ para las muestras analizadas. La zona coloreada de rosado corresponde a los circones de intrusivos relacionados a la mineralización IOA,	

mientras la zona de naranja corresponde a los circones identificados para el intrusivo porfídico oxidado. Las líneas discontinuas corresponden a los límites establecidos para los parámetros de fertilidad propuestos por Ojeda et al.(2024) (línea verde) y los identificados para Cerro Negro Norte (línea rosada).41

Figura B - 1. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra CNN5.	54
Figura B - 2. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra CS01.....	54
Figura B - 3. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra CS04.....	55
Figura B - 4. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra RAMP3.....	55
Figura B - 5. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra CNN6.	56

Capítulo 1. Introducción

1.1. Formulación/motivación del problema

Chile es un país minero caracterizado por tener una gran variedad de depósitos minerales localizados tanto en la zona norte como centro del país. Estos depósitos minerales se agrupan en franjas metalogénicas paralelas al margen continental y de edad decreciente hacia el este. Una de las franjas más importantes es la franja metalogénica del Jurásico–Cretácico siendo esta un cinturón longitudinal de orientación N-S ubicado entre los 21°–31°S en la actual Cordillera de la Costa (Fig. 1). Esta franja metalogénica está conformada por depósitos del tipo pórfido cuprífero, óxidos de hierro-cobre-oro (*iron oxide copper-gold*: IOCG), óxidos de hierro-apatito (*iron oxide-apatite*: IOA) y estratoligados de cobre y plata (Cu–Ag) asociados espacial y genéticamente a intrusivos del Jurásico–Cretácico Temprano y al Sistema de Fallas de Atacama (SFA).

Específicamente, se reconocen en esta franja la presencia de más de 50 depósitos del tipo IOA, también llamados “tipo Kiruna” por su localidad tipo en Suecia. Estos depósitos se caracterizan por presentar mineralización maciza de magnetita intercrecida con abundante actinolita y cantidades variables de apatito, además de una presencia menor de sulfuros, principalmente pirita y localmente calcopirita (Barra et al., 2017; Palma et al., 2020; Reich et al., 2022). Diversos trabajos reconocen a los depósitos IOA como un miembro extremo pobre en Cu del clan de los IOCG debido a la proximidad espacial con este tipo de depósitos y por su similitud en estilo de mineralización, particularmente por la abundante presencia de óxidos de hierro (magnetita) (Barton, 2013; Knipping et al., 2015a,b; Barra et al., 2017; Reich et al., 2022).

Sin embargo, aunque para los depósitos IOCG existe un amplio consenso en su modelo de formación, asociado fundamentalmente a procesos hidrotermales (Barton, 2013; Barra et al., 2017), el modelo genético para los depósitos IOA aún es motivo de debate con una discusión focalizada en dos posibles modelos: uno de carácter magmático-hidrotermal, similar a los IOCG, y un segundo de origen puramente ígneo relacionado con procesos de inmiscibilidad líquida asociado a la generación de un fundido rico en Fe y P (Nyström y Henríquez, 1994; Naslund et al., 2002; Henríquez et al., 2003; Hou et al., 2018). Sin embargo, en los últimos años ha surgido un tercer modelo correspondiente al modelo de flotación, siendo este una combinación de procesos ígneos e hidrotermales (Knipping, et al., 2015a; Knipping, 2015b). Siendo estrictos, el modelo de flotación plantea una transición entre ambos estilos de mineralización, postulando una formación temprana de microlitos de magnetita en el reservorio magmático, favoreciendo en ellos la nucleación y formación de burbujas. Estas asociaciones de magnetita-burbujas ascenderían por la corteza, a través de fallas extensionales, como un fluido rico en Fe que al ir enfriándose genera la precipitación de magnetita hidrotermal sobre los microlitos de magnetita ígnea, proceso que se evidencia a partir de las texturas de las magnetitas como una zonación de núcleo a borde (Knipping et al., 2015a). Durante los últimos años, los depósitos IOA presentes en el norte y centro de Chile han sido ampliamente

estudiados por varios investigadores, focalizándose principalmente en la química mineral de magnetita y sus variaciones texturales (Knipping et al., 2015a,b; Knipping et al., 2018; Rojas et al. 2018; Simon et al., 2018; Salazar et al., 2020). Sin embargo, pocos avances e investigaciones se han centrado en los intrusivos asociados espacial y genéticamente a este tipo de depósitos y, por sobre todo, en las condiciones determinantes para su formación. Es a partir de esta problemática donde la geocronología y geoquímica de circones cobra relevancia.

El circón ($ZrSiO_4$) es un mineral accesorio común en rocas intrusivas que tiene la particularidad de ser altamente resistente a la meteorización y a las alteraciones hidrotermales. Además, es capaz de retener una gran cantidad de información tanto química como isotópica, al incorporar en su estructura una serie de elementos traza, incluyendo U, Th, Hf y tierras raras (*rare earth elements-REE*), lo que lo lleva a ser utilizado para determinar edades de cristalización de intrusivos mediante el método U–Pb y a la vez como un indicador petrogenético donde los patrones geoquímicos de REE permitan revelar las condiciones de formación del magma parental (Finch y Hanchar, 2003; Hoskin y Schaltegger, 2003; Grimes et al., 2015). Es a partir de esto último, donde surge el concepto de fertilidad magmática al demostrarse, a partir de múltiples estudios, que existirían patrones geoquímicos marcados y distintivos en aquellos magmas considerados fértiles, es decir, con el potencial de generar mineralización. Las escasas investigaciones de fertilidad magmática se han enfocado principalmente en los yacimientos del tipo pórfido cuprífero (Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Lee et al., 2017, 2021), con pocos estudios en otros tipos de depósitos como IOA e IOCG (Wade et al., 2022; Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024). Las investigaciones realizadas en los depósitos del tipo pórfido han determinado que los intrusivos asociados a la mineralización de Cu suelen presentar firmas geoquímicas que reflejan condiciones magmáticas oxidadas y ricas en H_2O (Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Lee et al., 2017, 2021). En contraste, nuevos estudios realizados en depósitos IOA-IOCG demuestran que los magmas relacionados a la mineralización principal de Fe tendrían firmas relativamente más reducidas ($\Delta FMQ < +1.0$) y con bajos contenidos de agua (Wade et al., 2022; Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024; Meng et al., 2024).

A partir de estos antecedentes, la presente investigación se centra en el yacimiento Cerro Negro Norte (CNN), siendo este un depósito del tipo IOA ubicado 32 km al norte de Copiapó (Fig. 1), perteneciente a la Compañía Minera del Pacífico (CMP). Este depósito se caracteriza por la presencia de cinco cuerpos macizos de magnetita, con bajas a escasas concentraciones de sulfuros, donde la mineralización de hierro está asociada espacialmente a cuerpos intrusivos de composición diorítica a granodiorítica (Raab, 2001; Salazar et al., 2020). Así, la principal motivación de este estudio es comprender y entregar mayores antecedentes de intrusivos relacionados a mineralización IOA, estableciendo para esto la evolución magmática y parámetros de fertilidad de los intrusivos relacionados al yacimiento Cerro Negro Norte. Para esto se analizaron los patrones geoquímicos de circones de los distintos intrusivos en el depósito, permitiendo comprender la historia evolutiva del magma parental y sus condiciones magmáticas estableciendo de esta manera firmas de fertilidad magmática las que podrán compararse con las obtenidas para otros depósitos como el distrito IOA El Algarrobo (Ojeda et al., 2024) y el IOCG Candelaria (Romero et al., 2024).

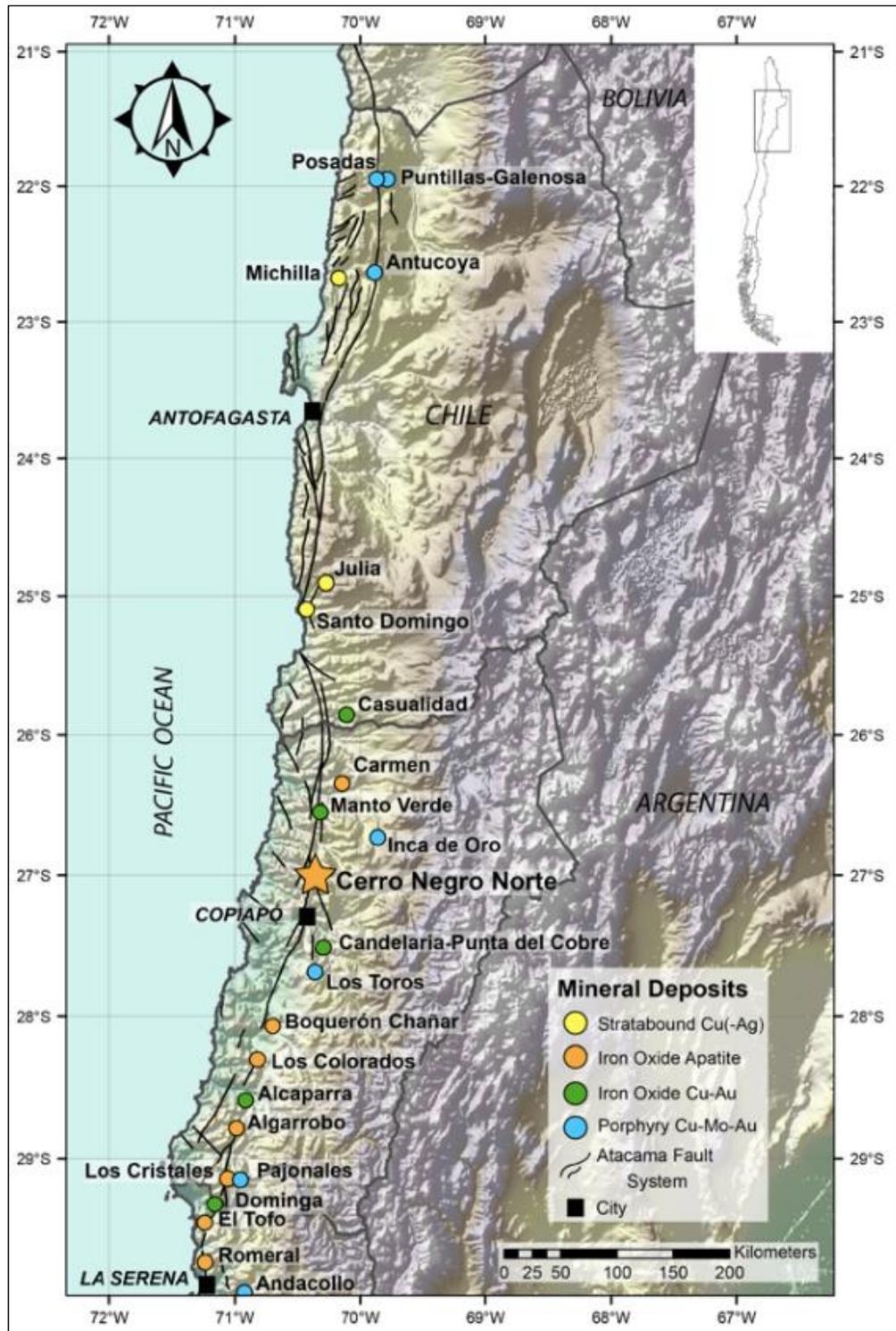


Figura 1. Franja metalogénica del Jurásico–Cretácico con la ubicación de Cerro Negro Norte. Tomado de Salazar et al. (2020).

1.2. Hipótesis

En base al estudio realizado por Ojeda et al. (2024) en el distrito minero El Algarrobo, ubicado en la Franja Ferrífera Chilena (FFC), se espera que los patrones geoquímicos en circones de intrusivos presentes en el yacimiento Cerro Negro Norte (CNN) reflejen condiciones magmáticas reducidas y con bajos contenidos de agua. Esta condición sería un parámetro singular y diferenciador de intrusivos asociados a la mineralización del tipo IOA.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar la evolución magmática de intrusivos asociados espacialmente al depósito IOA Cerro Negro Norte y evaluar su fertilidad metalogénica, mediante el análisis de parámetros geoquímicos y edades U–Pb en circones.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la temporalidad de los intrusivos presentes en el depósito, mediante dataciones radiométricas de U–Pb en circones.
2. Establecer las condiciones magmáticas que dieron origen a cada evento magmático identificado en el depósito.
3. Relacionar edades, condiciones magmáticas y mineralogía de cada intrusión para determinar la evolución magmática del yacimiento Cerro Negro Norte.
4. Evaluar los indicadores de fertilidad propuestos por Ojeda et al. (2024) para depósitos IOA, como una herramienta de exploración aplicable a este tipo de depósitos.

1.4. Ubicación y accesos

El distrito Cerro Negro Norte (CNN) se ubica en la Región de Atacama, 32 km al norte de la ciudad de Copiapó, y 50 km al este de la ciudad de Caldera, específicamente en las coordenadas 366970mE, 7001700mN (Sistema de coordenadas WGS84 UTM Huso 19S).

Las principales vías de acceso al distrito se centran en la Ruta 5 Norte desde el norte o sur de Copiapó desviándose por la Ruta C-327 o alternativamente desde Caldera ingresando desde la Ruta 5 a la Ruta C-351.

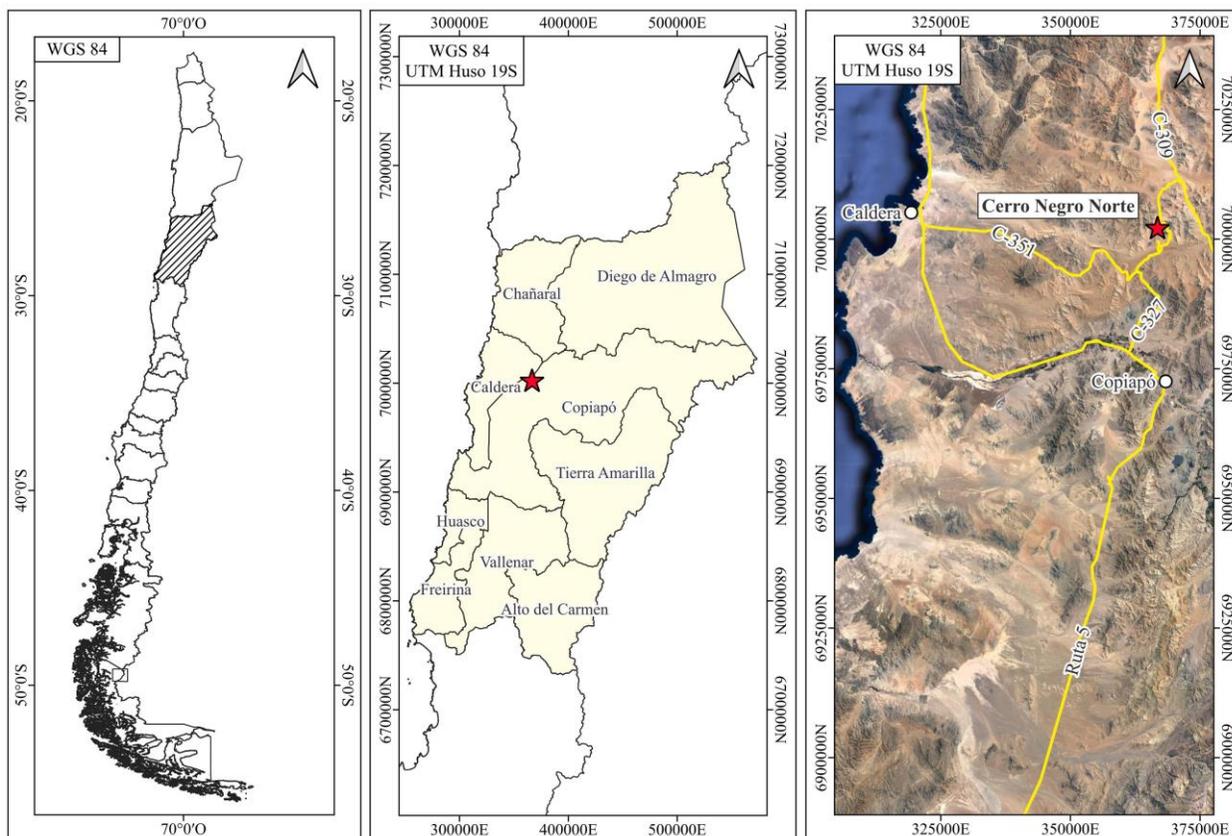


Figura 2. Ubicación y accesos al depósito Cerro Negro Norte, Región de Atacama.

1.5. Metodología

Con el fin de realizar dataciones radiométricas U–Pb y medición de elementos traza en circones, se recolectaron un total de tres muestras de distintos intrusivos presentes en el yacimiento Cerro Negro Norte: (1) Intrusivo Este (CS01), (2) Intrusivo Oeste (RAMPA3) y (3) Intrusivo Porfídico (CS04). Las dos primeras corresponden a muestras tomadas en superficie y la última a tramos de un sondaje ubicado en el sector Cata Alfaro al norte del yacimiento (Fig. 3). Además, se incluye una muestra de circones (CNN5) datada por Salazar et al. (2020) y una segunda muestra (CNN6) recolectadas por el mismo autor pero que no fue incluida en el estudio mencionado. Estas dos muestras fueron recolectadas en la zona de Veta Central, sector central del yacimiento.

Las muestras fueron descritas en primera instancia macroscópicamente como muestras de mano y posteriormente enviadas a laboratorio para la separación de circones. Las coordenadas específicas de las muestras analizadas se presentan en la Tabla 1, mientras que los tramos de sondajes de la muestra CS04 son incluidos en la Tabla 2.

Tabla 1. Ubicación de las muestras analizadas (Sistema de coordenadas WGS84 UTM Huso 19S).

Muestra	Intrusivo CNN	Coordenada Este (mE)	Coordenada Norte (mN)	Elevación (m)
CS01	Intrusivo Este	366885.863	7001345.397	1190.4
RAMPA3	Intrusivo Oeste	365256.833	7000554.986	1169.0
CS04	Intrusivo Porfídico	366650.795	7001957.951	1040.8
CNN5	Diorita Veta Central	366516.759	7001910.813	-
CNN6	Qz-Diorita Veta Central	366652.616	7001781.735	-

Tabla 2. Tramos de sondaje muestreados.

Muestra	Intrusivo CNN	Sondaje	Desde (m)	Hasta (m)
CS04	Intrusivo Porfídico	CAT0412	239.00	239.30

1.5.1. Separación y Montaje de Circones

La separación de circones se realizó en el Laboratorio de Preparación de Muestras perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad de Chile. En términos generales, se utilizaron métodos convencionales para la obtención de un separado de circones, incluyendo chancado y tamizado de las muestras, con posterior concentración utilizando Mesa Gemini, separador magnético Frantz y finalmente líquidos densos. Luego, a partir del concentrado mineral se realizó el montaje manual de 100 circones por muestra en una resina epóxica bajo una lupa binocular. Finalmente,

el montaje fue pulido con el fin de maximizar la superficie de exposición de los circones (Leisen et al., 2015).

1.5.2. Datación U–Pb y concentración de elementos traza en circones

Los procedimientos analíticos de medición de la concentración de elementos trazas y datación U–Pb fueron efectuados simultáneamente en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del Departamento de Geología. Este análisis se realiza mediante el uso de un sistema de ablación láser excimer ArF de 193nm (Teledyne Photon Machine Analyte G2) acoplado a un Espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) tipo cuadrupolo (Thermo Scientific iCAP-Q). Se ablacionaron en cada muestra entre 30 a 40 circones con un diámetro de haz de 50 μm y una energía de láser de 6 J/cm².

Para la geocronología U–Pb se utilizó el circón Plesovice (Sláma et al., 2008) como estándar primario, y el 91500 (Wiedenbeck et al., 2004) como estándar secundario. A su vez, como material de referencia para la cuantificación de elementos trazas, se utilizó el material de referencia NIST 610 (Jochum et al., 2011). El posterior proceso de reducción de datos se realizó utilizando el software Iolite (Paton et al., 2011), mientras que la confección de gráficos y los diagramas derivados de estos se desarrollaron mediante el uso del complemento de Excel Isoplot 4.15 (Ludwig, 2010).

Para la interpretación de los datos de elementos traza en circones, fueron descartados aquellos valores con concentraciones de La >6 ppm (Grimes et al., 2015), con el fin de evitar el efecto de posibles inclusiones no identificadas, descartando también aquellos valores de P, Ti, Fe, La y Ce que superan el valor promedio por más de tres desviaciones estándar en cada muestra.

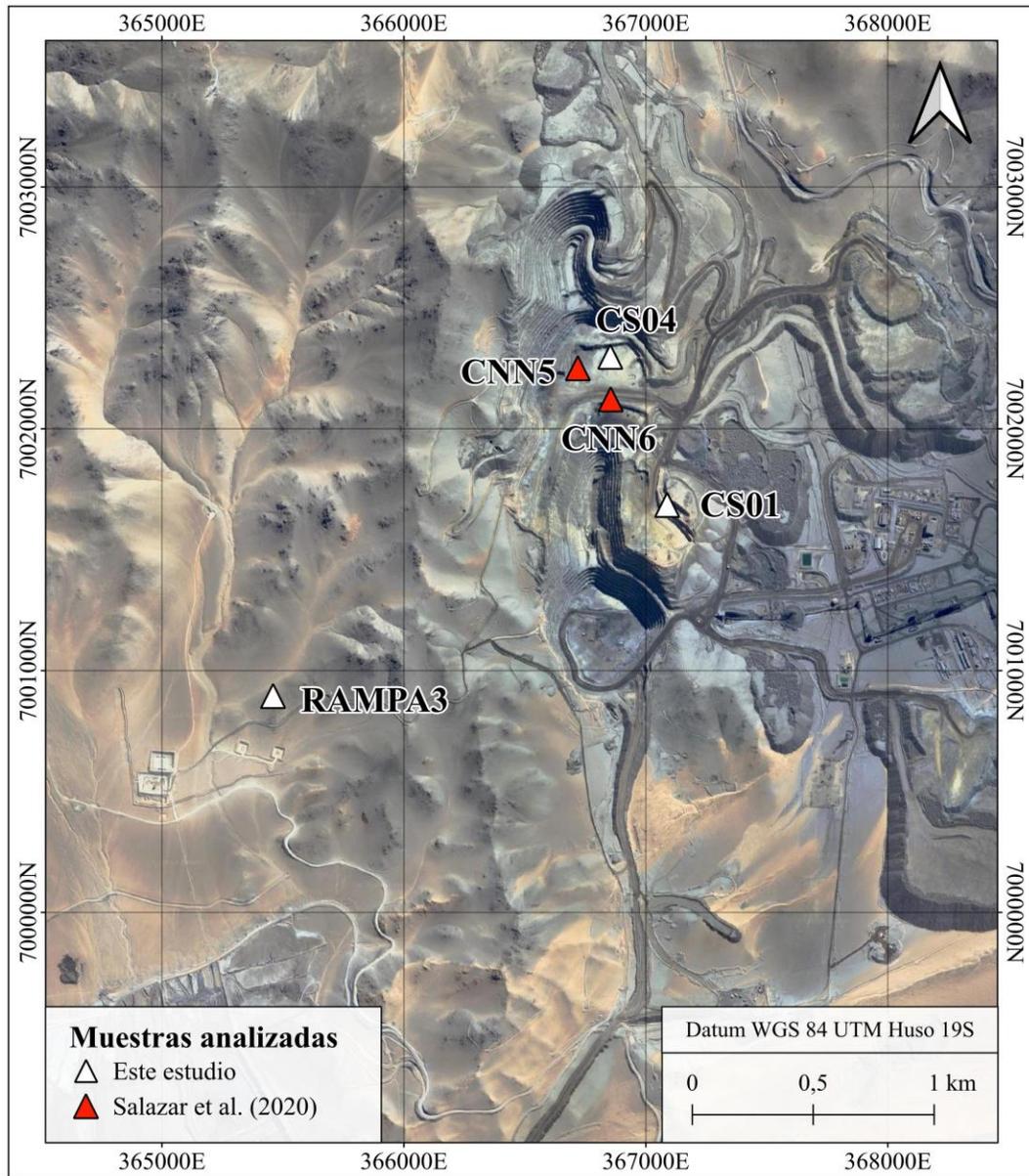


Figura 3. Ubicación de las muestras de rocas intrusivas estudiadas en el depósito Cerro Negro Norte.

Capítulo 2. Marco Geológico

2.1. Geología Regional

2.1.1. Generalidades

El margen continental occidental de Sudamérica se caracteriza por ser un margen activo, producto de una tectónica convergente donde una placa oceánica se subducta bajo una placa continental (Mpodozis y Ramos, 1989). Asociado a este proceso continuo de subducción se han desarrollado diversos eventos de sedimentación, magmatismo y deformación de edad Mesozoica–Cenozoica, sobrepuestos en un basamento Paleozoico metasedimentario originado por la antigua tectónica acrecionaria (Mpodozis y Ramos, 1989; Dallmeyer et al., 1996; Grocott y Taylor, 2002).

La zona de la actual Cordillera de la Costa del norte de Chile es una región de gran interés geológico al conservar registros de la evolución geológica del arco magmático desarrollado durante el Jurásico–Cretácico, arco que en periodos posteriores migra paulatinamente hacia el este hasta alcanzar su posición actual en la Cordillera de los Andes (Scheuber y Gonzalez, 1999; Grocott y Taylor, 2002). El desarrollo de la Cordillera de la Costa comenzó a partir de ~200 Ma, asociado a un régimen extensional producido durante la subducción de la placa Aluk (Phoenix) bajo Gondwana (Scheuber y Gonzalez, 1999; Parada et al., 2007). Relacionado a este régimen tectónico se desarrollaron una serie de fallas extensionales y cuencas de trasarco rellenas con rocas volcánicas y secuencias sedimentarias a volcano-sedimentarias (Mpodozis y Ramos, 1989). Durante el Jurásico Tardío a Cretácico Temprano, se produce una variación en el vector de convergencia de las placas lo que resulta en una subducción oblicua con dirección SE y un *roll-back* de la placa oceánica (Charrier et al., 2007). Estos cambios generaron un régimen transtensional que resultaría en el adelgazamiento de la litósfera con la formación de fallas tanto extensionales como de rumbo sinestrales correspondientes al Sistema de Fallas de Atacama (SFA) (Mpodozis y Ramos, 1989; Dallmeyer et al., 1996; Grocott y Taylor, 2002)

Durante el Cretácico Temprano el margen occidental de Gondwana se caracteriza por una subducción de alto ángulo en la que el continente se posiciona relativamente estático en referencia al manto (Grocott y Taylor, 2002). Sin embargo, a finales de este periodo (ca. 127–126 Ma.; Dallmeyer et al., 1996), se inicia la ruptura de Gondwana generando la separación de los continentes sudamericano y africano mediante la apertura del océano Sudatlántico. Como resultado comienza la deriva continental, proceso que provoca una variación en las tasas de subducción (Mpodozis y Ramos, 1989). Esta situación genera un cambio en la tectónica del margen Sudamericano hacia un régimen compresional, asociado a una subducción de menor ángulo, que causa la migración paulatina del arco magmático hacia el este (Mpodozis y Ramos, 1989; Brown et al., 1993; Dallmeyer et al., 1996; Grocott y Taylor, 2002).

A continuación, se describen brevemente las principales unidades geológicas presentes en la zona de estudio con el propósito de entregar un contexto geológico del depósito mineral estudiado.

Rocas estratificadas

Formación La Negra, Jln (Pliensbachiano–Jurásico Superior)

En el área de estudio, la Formación La Negra corresponde a una sucesión de 250 m de lavas andesíticas y brechas córneas, que se exponen en una franja de orientación NS ubicada entre milonitas asociadas a la traza principal del Sistema de Fallas de Atacama y los plutones Diorita La Brea y La Borracha (Arévalo, 2005). Estudios anteriores indican que la Formación La Negra se depositó en un ambiente continental con menores episodios subacuáticos marinos, evidenciados por la presencia de rocas calcáreas con fauna marina y lavas almohadilla (Mpodozis y Ramos, 1989; Lara y Godoy, 1998). Dentro de esta unidad se reconocen sectores con alteración hidrotermal del tipo cuarzo-sericita-caolinita, sílice-turmalina y actinolítica. Esta última presenta un intenso desarrollo en las cercanías a los cuerpos macizos de hierro (magnetita) presentes en la zona (Arévalo, 2005; Salazar et al., 2020).

Intrusivos

Plutón Cerro Morado, Kigm (140–137 Ma)

Consiste en un cuerpo plutónico tabular de aproximadamente 50 km de longitud con una orientación NNE emplazado en el lado occidental de la traza del Sistema de Fallas de Atacama. Delimita al oeste con el Plutón Cerro Moradito y al este, en un borde milonitizado, con la Formación La Negra y los plutones La Brea, La Borracha y Sierra Chicharra (Arévalo, 2005). La roca corresponde principalmente a una tonalita de piroxeno, biotita y anfíbol, con variaciones a diorita cuarcífera, monzodiorita cuarcífera y granodiorita. Aflora en el extremo occidental de la zona de estudio (Fig. 4). A esta unidad se asocian edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 138.4 ± 0.9 Ma y 139.6 ± 0.6 Ma (Dallmeyer et al., 1996), y K–Ar de 138 ± 3 Ma (Arévalo, 2005).

Diorita La Brea, Kidlb (135–121 Ma)

Corresponde a un stock de geometría romboidal con orientación NS, compuesto principalmente por dioritas de clinopiroxeno y hornblenda, con variaciones locales a monzodioritas de biotita. Las dioritas son de grano grueso con agregados de plagioclasas y minerales ferromagnesianos, granos de cuarzo y biotita intersticial (Arévalo, 2005). Las edades U–Pb en circón registradas para este intrusivo son 135.2 ± 0.5 Ma (Jara et al., 2021a), 129.6 ± 1.0 Ma (Salazar et al., 2020) y 124.6 ± 1.1 Ma (Jara et al., 2021a).

Este cuerpo se encuentra limitado al norte por el plutón La Borracha, a través de un contacto por la falla Bandurrias, mientras que al sur y este, limita con intrusivos y rocas estratificadas del Cretácico (formaciones Bandurrias, Punta del Cobre, Abundancia y Nantoco). Al oeste limita con

la Formación La Negra y el plutón Sierra Atacama a través de un contacto con presencia de milonitas sinplutónicas asociadas a la traza principal del SFA (Arévalo, 2005, Fig. 4).

Plutón La Borracha, Kimdlb (117–105 Ma)

Corresponde a un cuerpo romboidal elongado en dirección NNW compuesto por monzodioritas cuarcíferas y monzonitas cuarcíferas de colores rosados y verdosos con un tamaño de grano medio a fino (Fig. 4). Presenta variedades menores de monzogranitos con textura porfídica, incluyendo en su extremo norte a una subunidad asociada a facies de dioritas, microdioritas y gabros. Trabajos previos reportan edades K–Ar de 108 ± 3 Ma (Arévalo, 1995), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 107.4 ± 0.5 Ma (Dallmeyer et al., 1996) y, en estudios más recientes, edades de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de 116.7 ± 0.4 Ma y 111.6 ± 0.7 Ma (Jara et al., 2021a).

Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas, Kigrpc (115–110 Ma)

Esta unidad corresponde a una serie de stocks, sills y diques compuestos por microgranitos, microgranitos porfídicos y aplitas rosados a blanquecinos de extensión limitada (Arévalo, 2005). Se observan como cuerpos tabulares conformados principalmente por un agregado de ortoclasa y cuarzo, e intruyen en forma de sills los techos de los complejos plutónicos La Borracha, Diorita La Brea y la Formación La Negra (Fig. 4). Arévalo (2005) reporta edades K–Ar de 110 ± 4 Ma y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 115.0 ± 0.4 Ma (Tabla 3).

Granodioritas de Sierra Pajas Blancas, Kigdpb (110–99 Ma)

Consiste en stocks irregulares y apófisis menores de granodioritas de anfíbol y biotita, de colores gris claro a blanquecino, que presentan tamaños de granos fino a grueso, con textura seriada, y alteración argílica o propilítica (Arévalo, 2005). Estos cuerpos intruyen a la Formación La Negra, a la Diorita La Brea y al Plutón Sierra Chicharra (Fig. 4). Las edades de esta unidad corresponden a edades K–Ar de 106 ± 3 Ma (Arévalo, 1995) y U–Pb de 110.4 ± 2.8 Ma y 99.2 ± 0.7 Ma (Jara et al., 2021a).

Intrusivos hipoabisales dioríticos de anfíbol y clinopiroxeno, Kshd (~98 Ma)

Situados al NE de la zona de estudio, corresponden a una serie de pórfidos microdioríticos, microdioritas y dioritas de anfíbol y clinopiroxeno con edades K–Ar de 98 ± 3 Ma (Arévalo, 2005). Presentan generalmente un color gris oscuro a verdoso debido a su alteración a clorita y actinolita con menor presencia de epidota y calcita (Arévalo, 2005). Se encuentran intruyendo rocas de las formaciones La Negra, Punta del Cobre y Abundancia (Fig. 4).

Depósitos aluviales, coluviales y eólicos

En la zona de estudio también se identifican depósitos semiconsolidados a no consolidados de origen aluvial, coluvial y eólico (Fig. 4). Los depósitos aluviales y coluviales se dividen en

unidades de edad Miocena–Pliocena y unidades del Cuaternario, donde todas corresponden a sucesiones de gravas más seleccionadas rellenando depresiones del terreno. Los depósitos del Cuaternario se clasifican también como flujos aluviales inactivos y activos. En cuanto a los depósitos eólicos, estos se ubican en la quebrada mayor ubicada al sur del depósito en estudio, y se definen como una unidad no consolidada compuesta por arenas cuarzo-feldespáticas con alta madurez y buena selección que se presentan conformando dunas lineares, mantos de arena y dunas parabólicas (Lara y Godoy, 1998; Arévalo, 2005).

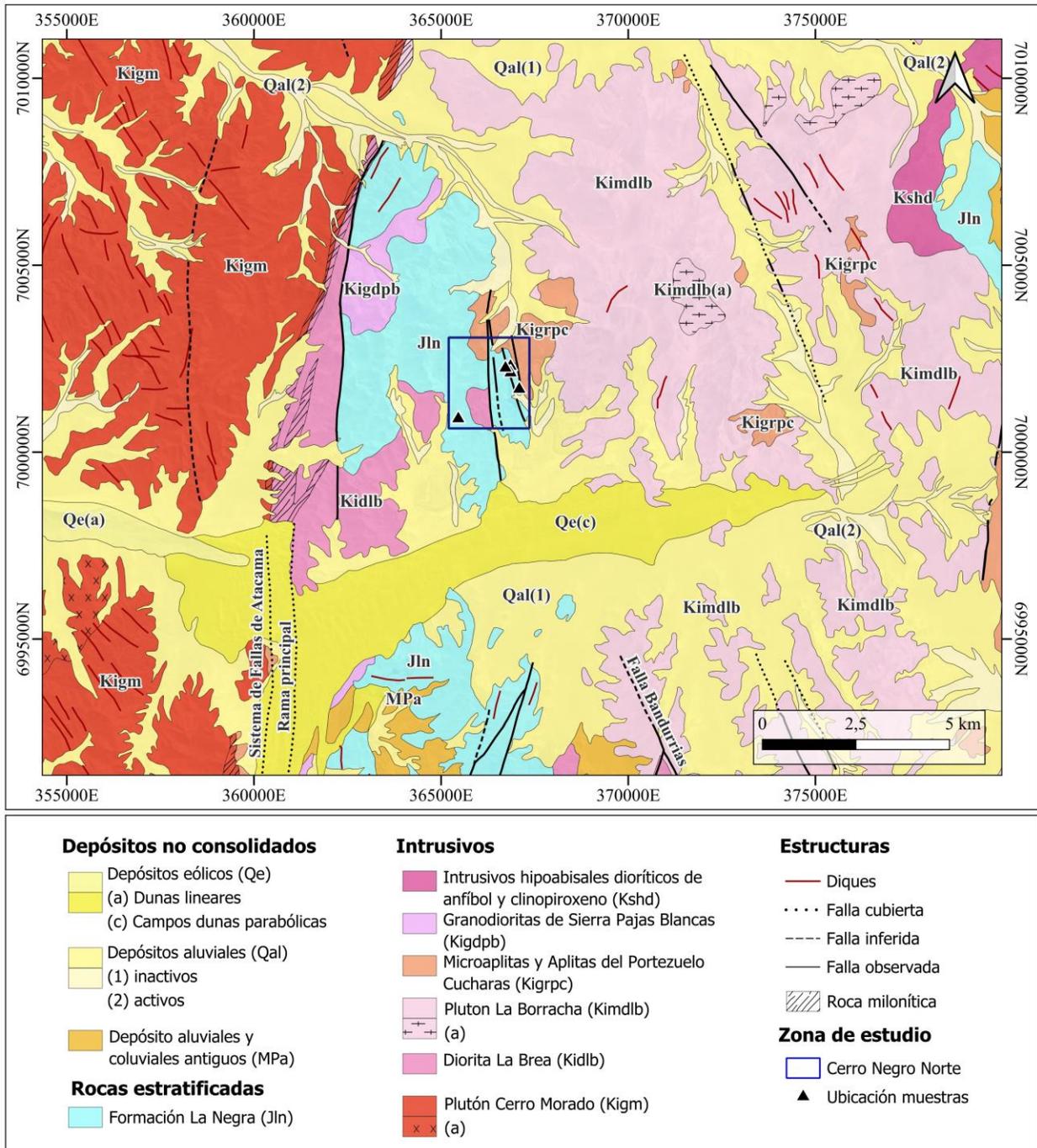


Figura 4. Geología regional del entorno del distrito Cerro Negro Norte. Elaborado en base a Arévalo (2005).

Tabla 3. Complejos plutónicos en el entorno del depósito con su composición y edades reportadas.

Complejo Plutónico	Composición	Edad (Ma)	Método analítico	Referencias
Plutón Cerro Morado	Tonalita (Bt-Px-Amp)	138.4 ± 0.9	Ar-Ar hornblenda	(Dallmeyer et al., 1996)
	Diorita cuarcífera (Bt-Px-Ol)	139.6 ± 0.6	Ar-Ar hornblenda	(Dallmeyer et al., 1996)
		138 ± 3	K-Ar biotita	(Arévalo, 2005)
Diorita La Brea	Granodiorita (Amp-Bt)	135.2 ± 0.5	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
	Diorita (Amp-Bt-Px)	124.6 ± 1.1	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
	Diorita cuarcífera (Bt-Amp-Px)	129.6 ± 1	U-Pb circón	(Salazar et al., 2020)
		122 ± 3	K-Ar biotita	(Arévalo, 1995)
		121 ± 3	K-Ar biotita	(Arévalo, 2005)
	123 ± 4	K-Ar biotita	(Arévalo, 2005)	
Plutón La Borracha	Monzodiorita cuarcífera (Amp-Bt)	116.7 ± 0.4	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
	Monzogranito/Aplita (Amp-Pz-Bt)	111.6 ± 0.7	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
	Diorita (Px-Bt)	105 ± 3	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
	Granodiorita (Amp -Bt)	108 ± 3	K-Ar biotita	(Arévalo, 1995)
	107.4 ± 0.5	Ar-Ar hornblenda	(Dallmeyer et al., 1996)	
Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas	Microgranito (Bt)	110 ± 4	K-Ar biotita	(Arévalo, 2005)
		115 ± 0.4	Ar-Ar biotita	(Arévalo, 2005)
Granodioritas de Sierra Pajas Blancas	Granodiorita (Amp -Bt)	110.4 ± 2.8	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
	Monzogranito (Bt-Px-Amp)	99.6 ± 1.5	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
		99.2 ± 0.7	U-Pb circón	(Jara et al., 2021a)
		106 ± 3	K-Ar biotita	(Arévalo, 2005)
	108 ± 3	K-Ar biotita	(Arévalo, 2005)	
Intrusivos hipoabisales dioríticos de anfíbol y clinopiroxeno	Pórfido microdioríticos	98 ± 3	K-Ar roca total	(Arévalo, 2005)

2.1.2. Geología Estructural

El rasgo estructural más relevante de la Cordillera de la Costa es el Sistema de Fallas de Atacama (SFA), una estructura de más de 1000 km de largo ubicado entre las ciudades de La Serena e Iquique (Fig. 5) (Brown et al., 1993; Scheuber y Gonzalez, 1999; Grocott y Taylor, 2002). Este sistema se caracteriza por una cinemática principalmente sinistral, paralela al margen continental y al arco magmático, con actividades asociadas al Cretácico Temprano, donde la tectónica predominante era transtensional producto de la subducción oblicua de las placas tectónicas en dirección sureste. Este movimiento de las placas sería la causal del desarrollo de los sistemas de fallas de rumbos sinestrales con componente normal (Grocott y Taylor, 2002). El Sistema de Fallas de Atacama es el rasgo más representativo de esta deformación destacándose no solo por su extensión sino por su asociación espacial con múltiples yacimientos de mineralización tipo IOCG–IOA (Dallmeyer et al., 1996). La actividad de este sistema se desarrollaría contemporáneamente al emplazamiento de los cuerpos plutónicos presentes en la zona de estudio, siendo este proceso comprobado por dataciones desarrolladas tanto en los intrusivos como en las milonitas asociadas a las trazas del sistema de fallas (Dallmeyer et al., 1996; Grocott y Taylor, 2002).

En las cercanías de la zona de estudio se identifica una de las trazas principales del Sistema de Fallas de Atacama (SFA). Esta sección del SFA es conocida como el segmento El Salado y corresponde al segmento más austral de los tres descritos para el SFA (Brown et al., 1993). Esta traza presenta una orientación NS atravesando toda la zona al oeste del yacimiento Cerro Negro Norte (Arévalo, 2005), esto evidenciado en el desarrollo de milonitas en los bordes de los complejos Plutón Cerro Morado y Diorita La Brea (Fig. 4). También se asocian a la zona de estudio, la presencia de sets de fallas de orientación NE-SW y NW-SE, donde en el último se destaca la Falla Bandurrias, estructura que pone en contacto a los plutones La Borracha y Diorita La Brea. Este tipo de fallas estarían asociadas principalmente a movimientos de rumbo sinestrales, los que habrían permanecido activos desde el Pérmico hasta el Cretácico Temprano (Grocott y Taylor, 2002; Arévalo, 2005).

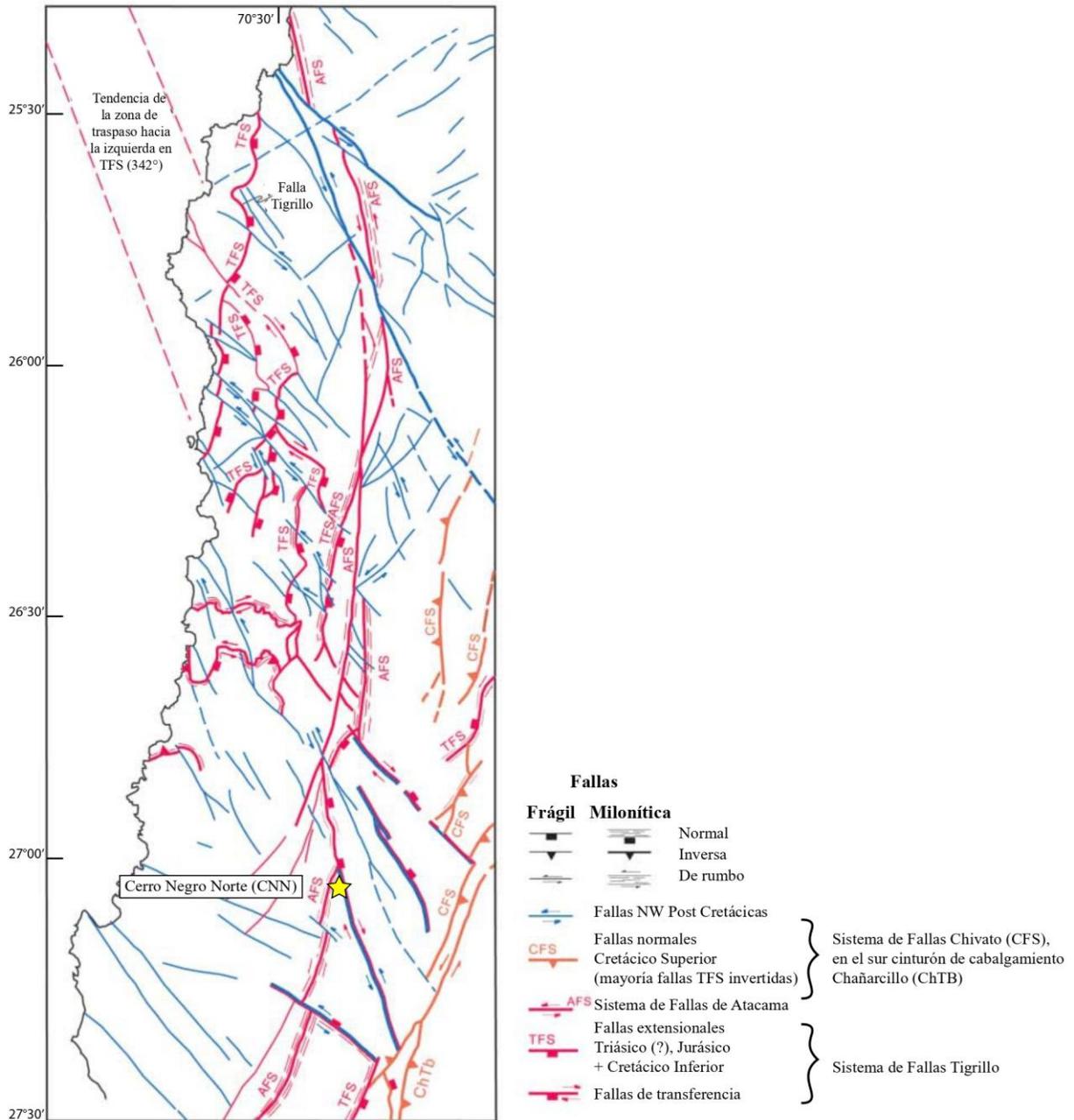


Figura 5. Mapa de los principales sistemas de fallas presentes en la Cordillera de la Costa del norte de Chile. Se indica además la posición del yacimiento Cerro Negro Norte (estrella amarilla). SFA/AFS: Sistema de Fallas de Atacama; CFS: Sistema de Fallas Chivato; TFS: Sistemas de Fallas Tigrillo. Modificado de Grocott y Taylor (2002).

2.2. Geología distrital

El depósito Cerro Negro Norte se ubica 32 km al norte de la ciudad de Copiapó en la Región de Atacama. Este yacimiento IOA o tipo Kiruna se encuentra desde el año 2010 en producción bajo la propiedad de la Compañía Minera del Pacífico (CMP). A partir de los últimos informes publicados, la CMP reporta que el yacimiento Cerro Negro Norte alcanza recursos estimados de 636.7 millones de toneladas, con una ley promedio de 29.3% de Fe (CAP, 2022).

En el contexto geológico (Fig. 6), la mineralización se encuentra albergada en rocas de caja de composición andesítica y brechas de la Formación La Negra, siendo estos afloramientos partes de un *roof pendant* que es intersectado por granitoides de edad Cretácica (Raab, 2001; Arévalo, 2005; Salazar et al., 2020). El depósito se caracteriza por presentar cinco sectores principales de mineralización maciza de Fe, que, en orden de mayor a menor tamaño, se denominan Abanderada, Augusta, Beduino, Veta Central y Cata Alfaro (Raab, 2001; Salazar et al., 2020). Los cuerpos de mena de hierro son explotados a rajo abierto y se encuentran principalmente en rocas andesíticas y localmente en intrusivos de composición diorítica a cuarzo-diorítica y monzonítica a monzodiorítica. Estos cuerpos intrusivos delimitan el yacimiento tanto en su lado oriental como occidental, identificándose como parte de los complejos plutónicos Aplitas del Portezuelo Cucharas y Plutón La Borracha, al este, y los complejos Diorita La Brea y Granodiorita de Sierras Pajas Blancas, al oeste (Arévalo, 1995). Todas las unidades presentes en el distrito poseen edades similares asociadas al periodo Cretácico.

2.2.1. Litología

Las rocas andesíticas de la Formación La Negra se presentan como una unidad lineal en la zona central del yacimiento con un ancho variable entre 300 m a 1 km y más de 2 km de extensión en dirección NS (Raab, 2001). Las rocas andesíticas albergan los cuerpos de mena (macizo, brechas, stockwork y disseminados), presentando distintos grados y tipos de alteraciones. En la zona central, la alteración hidrotermal es principalmente de actinolita, con menores cantidades de albita, clorita y feldespato potásico. En la zona norte la actinolita se manifiesta con proporciones menores de apatito y en el extremo oriental del distrito se presenta una fuerte alteración del tipo turmalina-cuarzo, llegando a exponerse como brechas hidrotermales de turmalina-cuarzo en afloramientos más pequeños al SE del yacimiento (Raab, 2001; Salazar et al., 2020).

Los intrusivos de composición diorítica a cuarzo-diorítica, localmente tonalítica, se ubican mayoritariamente en la zona occidental del depósito, bordeando las andesitas centrales y asociándose tanto espacial como temporalmente a los cuerpos de mena (Raab, 2001). Estudios anteriormente realizados en el depósito han demostrado que los cuerpos dioríticos asociados al complejo plutónico Diorita La Brea (Arévalo, 2005), tendrían un vínculo genético con la mineralización de magnetita (Salazar et al., 2020). Estos intrusivos se componen principalmente de plagioclasa, con menores proporciones de cuarzo y minerales máficos como anfíboles y piroxenos. Como minerales de alteración predominan la actinolita y en cantidad menores la epidota, con rangos variables de

titanita. Dentro de estas intrusiones, Raab (2001) reconoce zonas de ~25–75 m² de cuarzo dioritas de textura porfídica que encierran clastos de “brechas de magnetita”, estos localizados al oeste y suroeste del sector de Abanderada. El autor considera que existe una relación temporal entre estas intrusiones con la alteración calco-sódica primaria y la mineralización hidrotermal de óxidos de Fe.

En el depósito también se observan pequeños diques e intrusiones de composición monzodiorítica a granodiorítica. Los diques tienen generalmente una orientación NNE-SSW, cortando la roca caja y los cuerpos macizos de magnetita en algunos sectores (Vivallo et al., 1995; Raab, 2001). Relaciones de corte y la asociación con alteraciones hidrotermales indican la simultaneidad o posterioridad de estas unidades intrusivas con la alteración turmalina-cuarzo predominante en el extremo oriental del depósito (Raab, 2001). Acosta y Vicencio (1985) también describen una intrusión granodiorítica al noreste del sector de Augusta, unidad que varía de textura equigranular a porfídica con mayores contenidos de plagioclasa y menores de cuarzo y feldespato potásico.

Por último, afloramientos restringidos de milonitas han sido identificados en el distrito ferrífero, especialmente al noreste y sur del sector Abanderada, constituyendo unidades de no más 50 m de espesor (Raab, 2001; Salazar et al., 2020). Relaciones de contacto entre el afloramiento de milonitas ubicado al sur, con cuerpos de diorita y diques granodioríticos sugieren que la deformación asociada a estos complejos sería previa al emplazamiento de la diorita. Adicionalmente, la presencia de una alteración calco-sódica en estas milonitas indicaría que la formación de estas también antecedería al evento de mineralización de hierro y su alteración hidrotermal asociada (Raab, 2001).

2.2.2. Estructuras

La deformación en el distrito CNN se manifiesta en tres eventos principales. El evento asociado a la mineralización de magnetita se caracteriza por estructuras principalmente dúctiles como milonitas, donde la orientación es principalmente NNE-SSW. También se identifican fallas con esta misma orientación NNE con manteos de 83°NW que atraviesan el distrito y ponen en contacto a las rocas andesíticas con los cuerpos dioríticos. Estas fallas se encontrarían localmente asociadas a mineralización de Cu(±Au), caracterizado principalmente por la presencia de calcopirita y pirita, donde en la última se muestran las mayores concentraciones de Au (Vivallo et al., 1995). Por último, y evidenciado por relaciones de corte, se reconoce la presencia de fallas y zonas de cizalle de cinemática normal con orientación WNW cortando los eventos anteriores (Raab, 2001). Debido a la escasa presencia de milonitas en el depósito, Raab (2001) sugiere que el Sistema de Fallas de Atacama no se encontraría representado localmente en la zona y que varios de los cuerpos miloníticos pre-existentes han sido probablemente removidos por intrusiones y diques posteriores.

2.2.3. Alteración

El yacimiento en estudio corresponde a un claro ejemplo de la zonación mineral producida alrededor de los cuerpos macizos de magnetita, esto evidenciado por cuatro tipos distintos de alteración hidrotermal que varían en relación con la cercanía a los principales cuerpos de mena (Raab, 2001). Estas alteraciones han sido descritas en estudios anteriores, y presentadas en función de su temporalidad como: actinolitización, alteración calco-sódica, alteración turmalina-cuarzo y alteración propilítica (Fig. 7) (Raab, 2001; Salazar et al., 2020).

La primera y principal alteración presente en el yacimiento corresponde a la actinolitización. Esta se manifiesta como agregados masivos de actinolita intercrecidos con magnetita, generados en las cercanías de los cuerpos de mena. También se le observa en vetillas de hasta 10 cm de espesor y como reemplazo selectivo de hornblenda y piroxeno. Las rocas con esta alteración también presentan usualmente cantidades menores de clorita, calcita, escapolita, plagioclasa, cuarzo y sulfuros. Por otro lado, la alteración calco-sódica se caracteriza por ser rica en albita y escapolita, donde la última suele presentarse en sectores más cercanos a los cuerpos mineralizados, mientras que la albita suele formarse como un reemplazo de las plagioclasas primarias. La alteración turmalina-cuarzo, se caracteriza con la asociación mineral del mismo nombre, y con menores proporciones de sericita y clorita. Este tipo de alteración se manifiesta principalmente en el extremo oriental del yacimiento, alterando a unidades tanto andesíticas como dioríticas. La presencia de brechas hidrotermales se da en este mismo sector, al sureste, presentando clastos de rocas andesíticas y dioritas del yacimiento en una matriz de turmalina. Por último, la alteración propilítica corresponde a asociaciones de clorita, cuarzo, calcita y sericita, donde la presencia de clorita se asocia a reemplazos de actinolita en rocas andesíticas y dioríticas. Esta alteración hidrotermal es interpretada por estudios anteriores (Raab, 2001; Salazar et al., 2020) como un arreglo distal de las asociaciones ricas en albita superpuestas con las alteraciones calco-sódicas.

2.2.4. Mineralización

La mineralización presente en el depósito corresponde principalmente a cuerpo macizos de magnetita reemplazada parcialmente por hematita (martita), y menores cantidades de sulfuros (pirita ± calcopirita), con escasos niveles superficiales de óxidos de Cu y Fe (Raab, 2001). La mineralización de Fe se localiza en sectores centrales del depósito como cuerpos irregulares a tabulares generalmente verticales a sub-verticales orientados en dirección NNE. Estos cuerpos se presentan como agregados de granos de magnetita anhedrales a euhedrales, localmente con hábito cúbico, usualmente intercrecidos con actinolita, y con presencias variables de pirita, calcopirita, apatito y titanita (Vivallo et al., 1995; Raab, 2001; Salazar et al., 2020). En estudios anteriores Salazar et al. (2020) indica que existen cuatro tipos distintos de magnetita, donde todos se asocian a eventos hidrotermales de temperatura moderada a baja (<500°C).

La escasa mineralización de sulfuros está representada principalmente por pirita y calcopirita, con menores a escasas cantidades de bornita, pirrotina, covelina y digenita (Raab, 2001). Se manifiesta usualmente en vetillas y como cristales anhedrales a subhedrales diseminados en las rocas

del yacimiento. Las vetillas de pirita y calcopirita se asocian espacialmente a la alteración calco-sódica del yacimiento, mientras que las vetillas de calcita y carbonatos de cobre se asocian a la alteración propilítica. Cercano a la superficie también se encuentran cantidades menores de oxidados tanto de cobre como hierro (jarosita, goethita) (Salazar et al., 2020).

Por último, estudios realizados en el distrito ferrífero indican que existirían concentraciones variables de cobre (Cu) y oro (Au) en el yacimiento, estimando una reserva total de 550.000 toneladas con una ley promedio de 1.45 g/t de Au y 0.24 wt% de Cu (Vivallo et al., 1995). Tres de las cuatro zonas mineralizadas de Au se ubican al oeste del sector Abanderada y se asocian espacialmente a vetillas de cuarzo-calcita-carbonatos de Cu localizadas a lo largo de una zona de falla de orientación NNE (Vivallo et al., 1995). La cuarta zona se ubica al norte del mismo sector y se asocia espacialmente a andesitas alteradas a clorita-calcita-turmalina-cuarzo (Raab, 2001; Salazar et al., 2020). Estudios anteriores (Vivallo et al., 1995) sugieren que las mayores concentraciones de Au se encontrarían asociadas a la pirita (hasta 1ppm de Au) por sobre la magnetita (≤ 100 ppb de Au), así como a eventos hidrotermales tardíos, como la alteración turmalina-cuarzo, que habrían removilizado el Au de los cuerpos macizos de magnetita asociado con un incremento en la fugacidad de azufre en el sistema (Raab, 2001; Salazar et al., 2020; Vivallo et al., 1995). Adicionalmente, Raab (2001) postula que la mineralización de Cu±Au estaría asociada a vetillas tardías de calcopirita ± pirita y con la alteración turmalina-cuarzo. Además, Salazar et al. (2020) postula que estas concentraciones de Cu y Au podrían estar relacionadas con eventos magmáticos-hidrotermales tardíos, no relacionados al principal evento de formación del IOA, al observar un incremento en los contenidos de Cu entre las etapas I a III de la secuencia paragenética propuesta por estos autores para la evolución del depósito (Fig. 7).

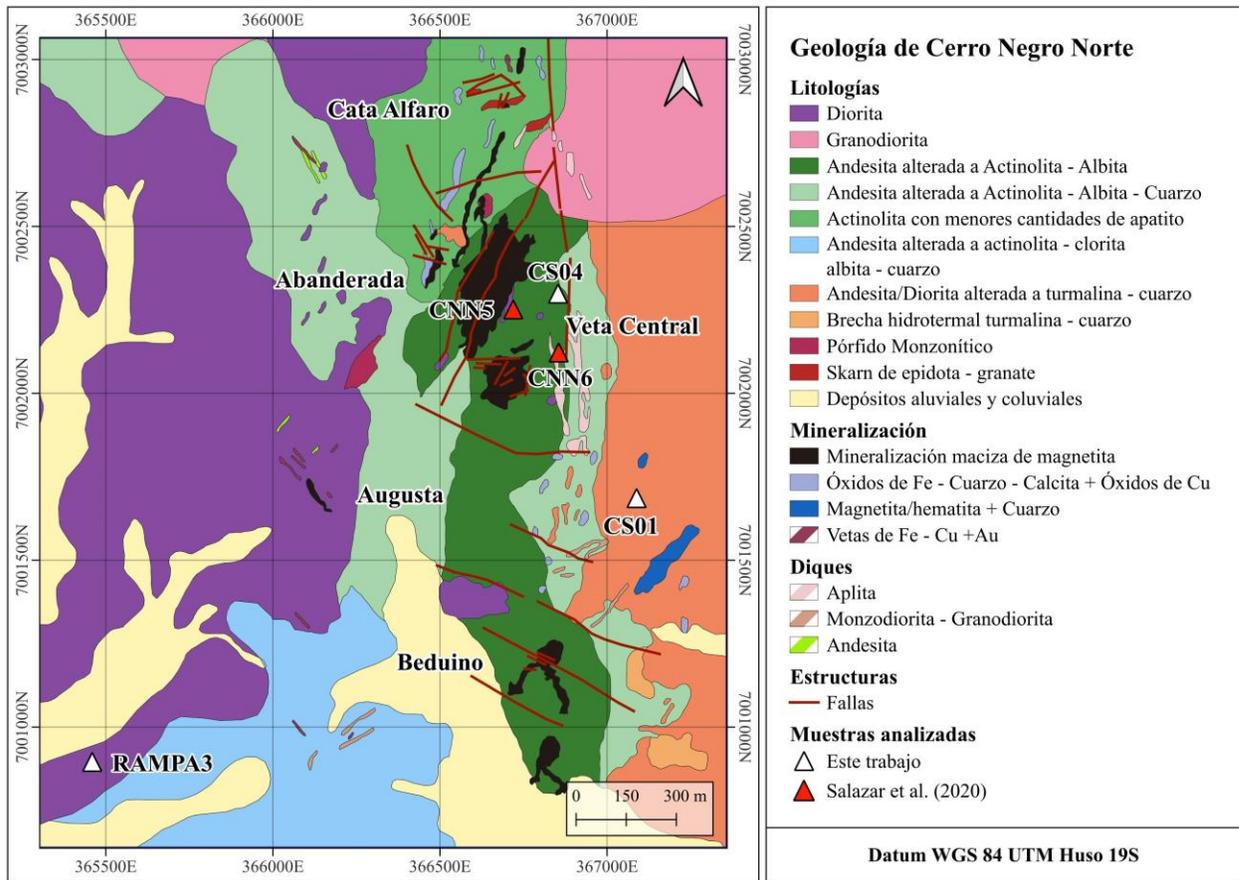


Figura 6. Geología del distrito Cerro Negro Norte. Se ilustran las unidades geológicas y alteraciones hidrotermales principales presentes en el yacimiento y alrededores, además de los cuerpos de mena principales. Modificado de Salazar et al. (2020).

Mineralogy	Main Fe oxide event		Main hydrothermal event				Supergene event
			Stage I	Stage II: Ca-Na	Stage III: Qz-tm	Stage IV: Propylitic	
Magnetite	M		M	V	D		M
Hematite	I	II	III	IV			
Pyrite		Inc		D	V	D	
Chalcopyrite		Inc		D	V		
Pyrrhotite		Inc		Inc			
Bornite				D			
Digenite							R
Covellite							R
Gold				?	Inc/D		
Cu carbonates						?	
Actinolite	M		M	V			
Apatite	D/M			V			
Scapolite				V/D			
Albite				V/M			
Epidote				V		V/D	
Biotite							
Quartz				V	B	V/D	
Tourmaline					B		
K-feldspar					B	R	
Sericite	Inc						
Titanite				V/D	V/D		
Chlorite	Inc					V	
Calcite					B	V	
Rutile	Inc					D	
Jarosite							M
Goethite							M

Figura 7. Secuencia paragenética del depósito Cerro Negro Norte. I, II, III y IV: tipos de magnetitas, M: masiva, D: diseminada, V: en vetillas, B: brechas, Inc: inclusiones. Extraído de Salazar et al. (2020).

Capítulo 3. Resultados

3.1. Intrusivos analizados

Las muestras analizadas en el presente estudio se distribuyen en cuatro zonas del yacimiento Cerro Negro Norte, las cuales fueron recolectadas con el fin de caracterizar los intrusivos asociados espacialmente al depósito y determinar sus patrones de fertilidad. Se analizaron un total de cinco muestras, siendo estas recolectadas dentro del rajo o en sus cercanías (Fig. 6). Dos de las muestras analizadas, CNN5 y CNN6, corresponden a aquellas recolectadas por Salazar et al. (2020) y corresponden a una diorita y cuarzo diorita, respectivamente, ambas ubicadas en el sector de Veta Central. Por otro lado, la muestra del Intrusivo Oeste (RAMPA3), ubicada fuera del yacimiento, correspondería, según la información recopilada, a un intrusivo de composición diorítica, similar al ubicado en el sector occidental del depósito, aunque con un tamaño de grano más fino.

En general, las muestras estudiadas corresponden a intrusivos de composición diorítica dominados por alteraciones de actinolita \pm albita y turmalina-cuarzo (Fig. 6). La Tabla 4 presenta un resumen de las características macroscópicas de las muestras analizadas para este trabajo. La descripción detallada de las muestras se presenta en el Anexo A.

Tabla 4. Descripción macroscópica de las muestras analizadas.

Muestra	Intrusivo CNN	Tipo de roca y mineralogía primaria	Alteración	Mineralización
CS01	Intrusivo Este	Granodiorita con presencia mayor de cuarzo, plagioclasa, y menor de feldespato potásico, anfíbol y biotita.	Actinolita, sericita, cuarzo y turmalina en bordes.	Sulfuros (pirita y menor calcopirita) y óxidos de Fe (jarosita y hematita).
RAMPA3	Intrusivo Oeste	Diorita de grano fino con cristales de plagioclasa, cuarzo y anfíbol, biotita.	Actinolita, epidota, clorita.	Magnetita (<1%).
CS04	Intrusivo Porfídico	Monzodiorita de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita en una masa fundamental de cuarzo y plagioclasas.	Albita, epidota, actinolita, biotita.	Pirita y calcopirita (<1%).

Mediante esta descripción se destaca la presencia del Intrusivo Porfídico, que tal como indica su nombre, presenta una textura porfírica, distintiva frente a las demás muestras, y corresponde a un intrusivo en profundidad con altos contenidos relativos de pirita.

3.2. Geocronología de circones

Los circones de las tres muestras recolectadas en este trabajo junto a aquellos de Salazar et al. (2020) fueron analizados por el método de ablación laser acoplado a un ICP-MS (LA-ICP-MS). Las nuevas edades U–Pb indican que la muestra de diorita ubicada en el sector de Veta Central (muestra CNN5), datada en el trabajo de Salazar et al. (2020), corresponde a la más antigua en el sector, con una edad de cristalización de 129.9 ± 0.8 Ma (Fig. 8a), mientras que la muestra recolectada por los mismos autores (muestra CNN6, Fig. 8e), ubicada también en el sector de Veta Central pero de manera más periférica al cuerpo de magnetita (Fig. 6), corresponde al evento intrusivo más joven (112.6 ± 0.8 Ma).

Por otro lado, las muestras recolectadas en el presente estudio presentan edades que fluctúan entre ~128 a 126 Ma (Tabla 5). En particular, el Intrusivo Este (muestra CS01) tiene una edad de 128.0 ± 1.5 Ma (Fig. 8b), seguido del Intrusivo Porfídico (muestra CS04) con 127.1 ± 0.8 Ma (Fig. 8c) y por último el Intrusivo Oeste (muestra RAMPA3) con una edad de 125.9 ± 1.3 Ma (Fig. 8d). En la Tabla 5 se resume los resultados obtenidos, mientras que en la Figura 8 se presentan los gráficos de promedio ponderado de las edades de cada muestra. Los resultados obtenidos de la datación y los respectivos diagramas de concordia normal e inversa se reportan en el Anexo B.

Tabla 5. Resultados de edades promedio obtenidas para las muestras analizadas.

Intrusivo CNN	Muestra	Tipo de roca	Edad $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Ma)	Error \pm (Ma)	n	MSWD
Diorita Veta Central	CNN5	Diorita	129.9	0.8	21	2.0
Intrusivo Este	CS01	Granodiorita	128.0	1.5	29	1.4
Intrusivo Porfídico	CS04	Pórfido monzodiorítico	127.1	0.8	29	1.1
Intrusivo Oeste	RAMPA3	Diorita	125.9	1.3	28	1.3
Qz-Diorita Veta Central	CNN6	Cuarzo diorita	112.6	0.8	27	1.2

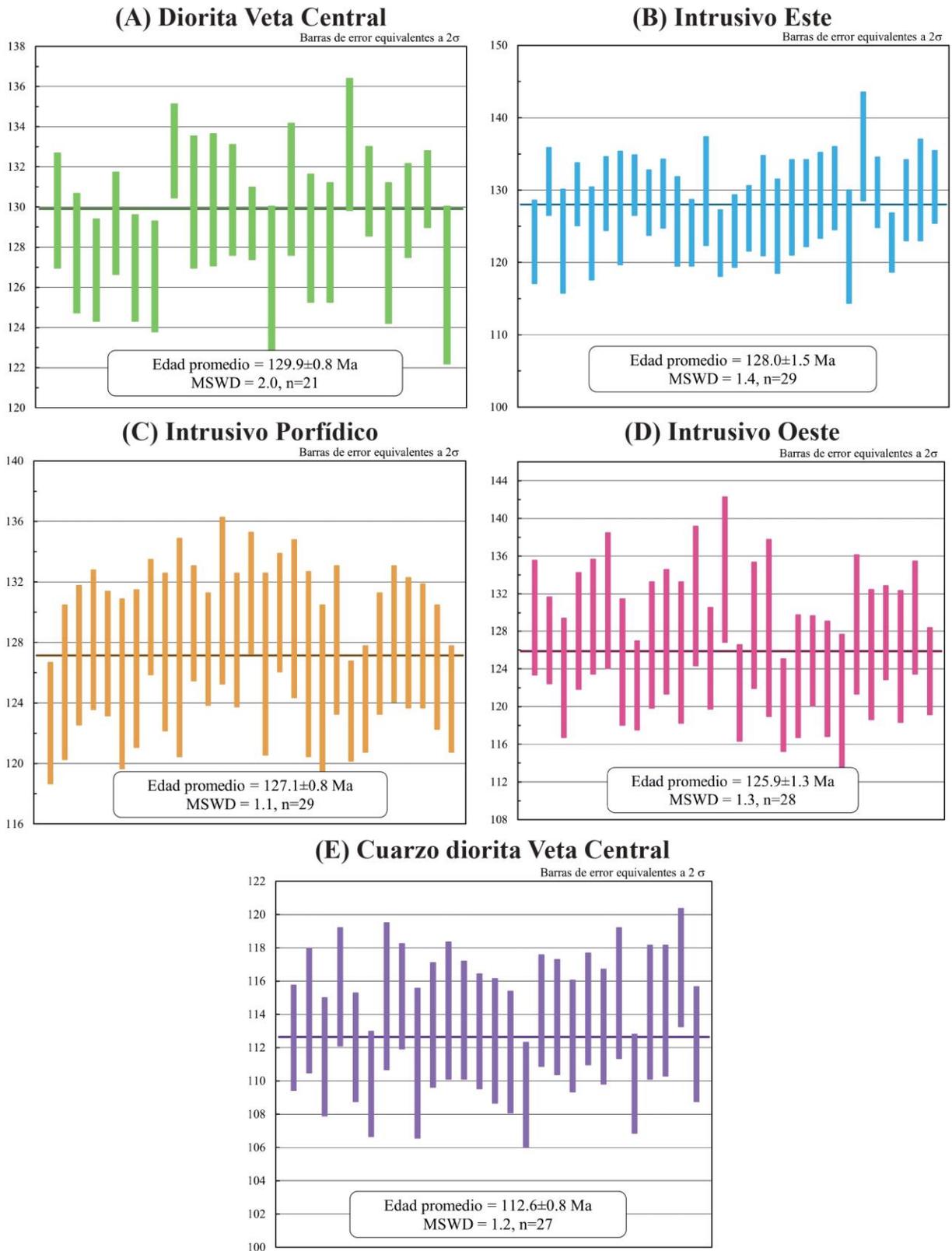


Figura 8. Gráficos de promedio ponderado de las edades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ obtenidas en circones de las muestras CNN5(A), CS01(B), CS04 (C), RAMP3 (D) y CNN6 (E).

3.3. Geoquímica de circones

La Tabla 6 presenta un resumen de las concentraciones de los principales elementos menores y trazas en circones de las muestras analizadas considerando los parámetros estadísticos generales (valores promedio, desviación estándar, mediana, percentiles 5 y 95), mientras que todos los resultados de las concentraciones medidas se reportan en el Anexo C.

Adicionalmente, la Figura 9 presenta el diagrama de tierras raras (*rare earth elements-REE*) normalizado a condrito (McDonough y Sun, 1995), donde las líneas exteriores corresponden a los percentiles 5 y 95, mientras que las interiores a las medianas de las muestras analizadas. Los diagramas de tierras raras en circón presentan un patrón que es consistente con aquellos intrusivos asociados a ambientes de arcos continentales, con marcadas anomalías de Ce y Eu, y un enriquecimiento en tierras raras pesadas (*heavy rare earth elements-HREE*) con respecto a las livianas (*light rare earth elements-LREE*).

Tabla 6. Concentración de elementos traza en las muestras analizadas. Se muestran los valores promedio, desviaciones estándar, mediana, percentiles 5 y 95 para todas las muestras.

Trazas (ppm)	P	Ti	Y	Nb	Hf	Ta	Th	U	La	Ce	Pr
CNN5 (130 Ma)											
Promedio	278.19	6.86	1695.42	2.56	8821.15	1.54	1521.27	1739.04	0.06	27.55	0.20
Desviación Estándar	65.14	1.39	579.76	0.6	1070.65	0.3	675.33	510.22	0.04	6.45	0.16
P5%	194.75	5.17	1073	1.68	7412.5	1.07	737.25	1215.25	0.01	20.13	0.05
Mediana	268	6.81	1578	2.51	8530	1.58	1362.5	1701.5	0.04	26.07	0.14
P95%	397.5	9.15	2636.5	3.48	10300	1.93	2339.5	2769.5	0.13	36.11	0.41
N	26	26	26	26	26	26	26	26	17	26	26
CS01 (128 Ma)											
Promedio	292.5	11.32	1138.15	0.76	9453.85	0.44	62.62	81.5	0.02	6.96	0.07
Desviación Estándar	46.87	3.45	399.16	0.31	892.64	0.13	39.15	42.46	0.03	2.64	0.04
P5%	237.25	7.38	656.5	0.45	8327.5	0.29	25.17	43.3	1.E-06	4.35	0.02
Mediana	280.5	10.3	1087.5	0.66	9430	0.4	50.85	68	2.E-03	6.13	0.08
P95%	387.25	18.65	1750.75	1.47	10952.5	0.68	159.35	174.6	0.07	12.96	0.12
n	26	26	26	26	26	26	26	26	12	26	24
CS04 (127 Ma)											
Promedio	387.81	4.61	1166.7	1.21	9029.26	0.56	81.61	124.59	0.23	8.55	0.1
Desviación Estándar	134	0.63	249.06	0.44	382.65	0.14	27.58	31.74	0.42	2.38	0.1
P5%	240	3.67	771.1	0.58	8457	0.37	39.59	78.73	4.E-03	5.53	0.03
Mediana	328	4.6	1139	1.23	9070	0.54	86.3	128	0.04	8.7	0.07
P95%	609.7	5.65	1531.6	1.98	9567	0.78	118.53	166.91	1	11.73	0.25
n	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
RAMPA3 (126 Ma)											
Promedio	340.19	10.3	1246.65	0.98	9293.55	0.59	84.11	115.33	0.09	8.47	0.1
Desviación Estándar	65.62	1.76	415.42	0.31	1036.63	0.16	34.41	46.95	0.13	2.16	0.08
P5%	255.00	6.3	833.5	0.47	8395	0.38	39.05	62.3	1.E-06	5.48	0.03
Mediana	334	10.6	1161	0.97	8790	0.56	76.2	105.7	0.03	8.49	0.07
P95%	462.5	12.5	2206.5	1.51	11535	0.86	144.45	199.1	0.31	12.43	0.27
n	31	31	31	31	31	31	31	31	19	31	31
CNN6 (113 Ma)											
Promedio	752.91	10.98	4347.61	6.03	6771.25	1.8	552.43	338.48	0.09	65.25	0.7
Desviación Estándar	68.58	2.98	756.75	1.59	447.08	0.42	228.59	81.52	0.04	10.01	0.23
P5%	644	7.61	3133.9	3.93	6069	1.25	310.11	255.2	0.04	49.92	0.29
Mediana	760	10.3	4368	5.8	6850	1.71	473.5	313	0.08	65.5	0.71
P95%	853.7	15.79	5540.3	8.9	7340	2.41	845.85	471.9	0.17	80.75	1.07
n	23	23	23	23	24	24	24	24	22	23	24

Continuación

Trazas (ppm)	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
CNN5 (130 Ma)												
Promedio	3.48	7.24	0.55	35.96	12.24	146.42	56.18	261.17	55.44	495.59	93.02	1195.1
Desviación Estándar	2.45	3.98	0.33	17.08	5.42	61.14	23.01	105.62	20.78	173.41	31.5	448.75
P5%	1.13	3.09	0.21	19.68	6.87	85.83	33.91	154.3	34.23	328.5	60.65	752.78
Mediana	2.58	5.89	0.44	30.7	10.75	130.75	50.6	229.65	49.00	458.5	84.15	1087.62
P95%	6.89	13.53	1.07	62.03	20.54	247.78	95.8	432.75	92.2	825.75	155.4	1989.22
n	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
CS01 (128 Ma)												
Promedio	1.41	3.29	0.69	20.53	7.42	93.84	37.67	176.42	38.07	359.80	74.17	820.33
Desviación Estándar	0.9	1.6	0.30	8.4	2.86	35.1	13.39	59.9	12.34	111.77	21.93	267.54
P5%	0.37	1.37	0.28	10.55	3.83	52.38	21.57	103.93	22.81	218.8	46.63	489.66
Mediana	1.49	3.45	0.72	19.9	7.23	91.9	35.4	165.6	35.7	337.2	71.8	775.6
P95%	2.04	4.91	1.05	32.83	11.54	148.9	58.88	276.73	60.48	574.25	118.58	1295.2
n	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
CS04 (127 Ma)												
Promedio	1.27	2.66	0.83	16.62	6.33	84.83	37.76	191.02	45.97	494.37	113.25	1003.64
Desviación Estándar	1	0.89	0.23	4.52	1.58	20.19	8.38	39.71	9.03	91.15	20.67	194.8
P5%	1	1.61	0.56	10.77	4.09	54.11	24.66	129.15	32.7	364	83.12	710.86
Mediana	1.21	2.52	0.8	16.1	6.17	82.2	38.4	190	44.8	507	114.6	1014.46
P95%	2.47	4.11	1.27	23.97	8.71	116.52	49.75	252.4	60.22	628.3	141.49	1282.38
n	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
RAMPA3 (126 Ma)												
Promedio	1.66	3.59	0.73	22.55	8.08	101.78	41.14	193.87	41.92	398.98	81.08	904.01
Desviación Estándar	0.91	1.66	0.28	8.42	2.89	35.72	14.03	61.15	12.2	104.3	20.24	259.71
P5%	1	1.84	0.29	13.75	5.07	66.15	27.36	128.55	27.95	265.5	54	598.57
Mediana	1.52	3.28	0.76	20.3	7.37	94.9	37.7	177.9	39.6	388	80.9	850.04
P95%	3.49	6.85	1.22	42.65	15.16	190.55	74.95	340.5	72.15	645	126.2	1540.75
n	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
CNN6 (113 Ma)												
Promedio	13.44	27.24	7.38	134.6	45.04	492.35	199.6	820.08	167.63	1588.42	305.28	3864.38
Desviación Estándar	4.46	7.1	1.67	27.4	9.88	94.15	44.07	160.26	30.41	299.46	57.14	726.15
P5%	6.02	15.65	4.7	90.21	29.66	334.8	137.64	582	119.06	1147.8	222.46	2772.42
Mediana	14	27.65	7.49	135.1	46.1	500	205	832	171.6	1607.5	312	3934.82
P95%	19.71	37.83	9.94	176.55	60.34	640.05	264.86	1063.2	212.47	2028.55	392.4	4979.11
n	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

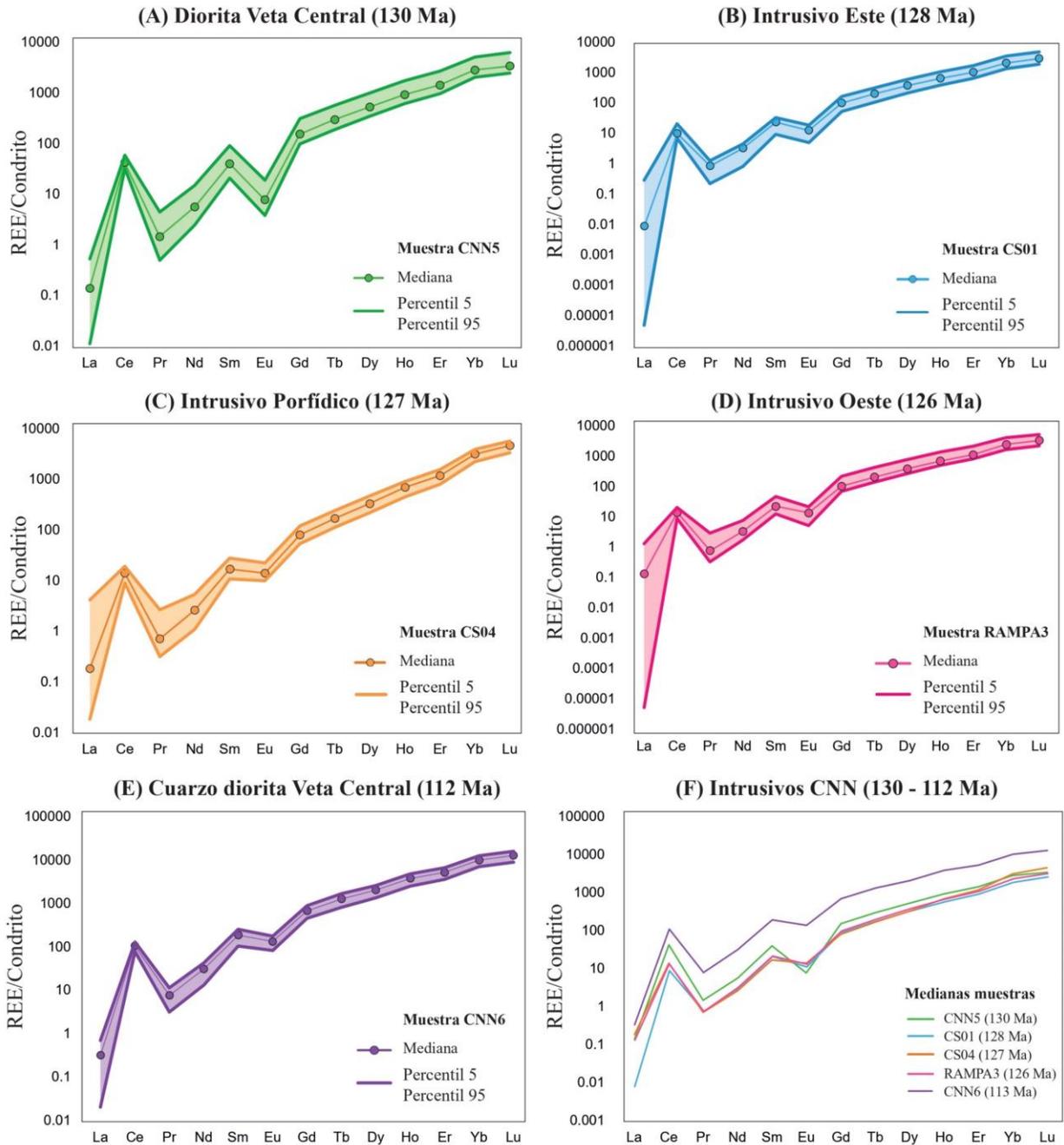


Figura 9. Diagrama de tierras raras normalizadas a condrito (McDonough y Sun, 1995).

Con respecto a los valores de las anomalías de Eu de las muestras analizadas, estas pueden ser cuantificadas mediante la ecuación (1), donde la razón Eu_N/Eu_N^* varía entre los valores 0 y 1, siendo este último cuando no existe anomalías de Eu. Estos parámetros pueden ser observados tanto en los diagramas de tierras raras (REE) presentados en la Figura 9, como en el gráfico de la Figura 10a, donde se gráfica en función de las edades U–Pb y como diagramas de caja. En estos gráficos y tablas se observa un decrecimiento en la anomalía negativa de Eu junto con el aumento del valor de Eu_N/Eu_N^* en las muestras más jóvenes variando desde de 0.1, para la mediana de la muestra CNN5 de la Diorita Veta Central (~130 Ma), a 0.37 para la mediana de la muestra CNN6

de la Qz-Diorita Veta Central (~113 Ma). Las muestras CS01 (~128 Ma) y RAMPA3 (~126 Ma) pertenecientes a los Intrusivos Este y Oeste, poseen medianas similares de 0.25 y 0.27, respectivamente, evidenciando también este aumento de la anomalía en los intrusivos más jóvenes. En el caso del Intrusivo Porfídico la razón Eu_N/Eu_N^* alcanza una mediana 0.39, muy por encima de los intrusivos Este y Oeste, y similar a la muestra CNN6 (~113 Ma).

$$\frac{Eu_N}{Eu^*} = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N * Gd_N}} \quad (1)$$

Por otro lado, las temperaturas de cristalización fueron calculadas utilizando la ecuación (2) basada en el geotermómetro de titanio en circón propuesto por Ferry y Watson (2007), donde las actividades de SiO_2 y TiO_2 fueron aproximadas a través de parámetros, como la presencia de cuarzo en las muestras y de inclusiones ricas en Ti en los circones (Ferry y Watson, 2007; Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024). Se utilizaron los valores 1.0 y 0.7 para las actividades de SiO_2 y TiO_2 , respectivamente.

$$\log(\text{ppm Ti en circón}) = 5.711 - \frac{4800}{T(K)} - \log(a_{SiO_2}) + \log(a_{TiO_2}) \quad (2)$$

Las temperaturas de cristalización calculadas (Tabla 7, Fig. 10b), presentan valores similares entre todas las muestras, con medianas entre los 783–786°C, con la excepción de los intrusivos Diorita Veta Central (CNN5) e Intrusivo Porfídico (CS04), los que muestran temperaturas de cristalización con medianas más bajas (743 y 708°C, respectivamente).

Otro parámetro importante de las condiciones magmáticas es la fugacidad de oxígeno (fO_2), que se expresa como la desviación, en unidades logarítmicas, del buffer Fayalita–Magnetita–Cuarzo (ΔFMQ) (Fig. 10c). Para el cálculo de este parámetro se utiliza la metodología propuesta por Loucks et al. (2020) que considera las concentraciones de Ce, Ti y U inicial (ecuación 3). Para este último se consideran las constantes de decaimiento y las concentraciones actuales de uranio medidas.

$$\Delta FMQ = 2.284 + 3.998 \times \log\left(\frac{Ce}{\sqrt{U_i \times Ti}}\right) \quad (3)$$

Los valores calculados de ΔFMQ para los intrusivos estudiados varían en un rango acotado con valores negativos para la Diorita Veta Central (CNN5: -0.04), el Intrusivo Este (CS01: -0.25) y el Intrusivo Oeste (RAMPA3: -0.22). Asimismo, los percentiles 95 de estas muestras no sobrepasan los +0.26. Por otro lado, el Intrusivo Porfídico (CS04) y la Qz-Diorita Veta Central (CNN6) presentan valores positivos con medianas de +0.40 y +2.49, respectivamente (Tabla 7, Fig. 10c).

Por último, en función de la edad y como un parámetro que permitirá analizar el fraccionamiento de plagioclasa y hornblenda, se presenta el gráfico de la razón $(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$ vs edad $^{206}Pb/^{238}U$ y el diagrama de cajas visualizando la distribución de valores de cada muestra (Fig. 10D). En este gráfico los parámetros poseen medianas entre 1.51–1.85 para las muestras CS01, RAMPA 3 y CNN6, mientras que la muestra CNN5 (~130 Ma), los valores son notoriamente menores, distribuidos entre 0.38 y 0.69 (percentiles 5 y 95, respectivamente) con una mediana de 0.57. Por otro lado, la muestra del Intrusivo Porfídico (muestra CS04) presenta valores significativamente mayores entre 2.75 y 4.29, con una mediana de 3.49. Este valor coincide con los valores determinados de $(Yb/Dy)_N$, donde se observa que las medianas de la mayoría de las muestras varían entre 4.9 y 6.2, excepto para la muestra del Intrusivo Porfídico (CS04: 9.2).

Tabla 7. Parámetros geoquímicos calculados en base a la medición de elementos traza en LA-ICP-MS. Incluyen valores promedio, desviación estándar, mediana, percentiles 5 y 95, y el número de datos tomados en cada parámetro.

Parámetros	Eu_N/Eu_N^*	$(Yb/Dy)_N$	T(°C)	ΔFMQ	$(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$
CNN5 (130 Ma)					
Promedio	0.10	5.30	742	-0.08	0.54
Desviación Estándar	0.02	0.46	20.1	0.17	0.10
P5%	0.07	4.69	718	-0.41	0.38
Mediana	0.10	5.24	743	-0.04	0.57
P95%	0.14	6.04	772	+0.08	0.69
N	26	26	26	19	26
CS01 (128 Ma)					
Promedio	0.26	6.01	790	-0.24	1.54
Desviación Estándar	0.05	0.70	29.3	0.34	0.35
P5%	0.20	5.08	751	-0.77	1.17
Mediana	0.25	5.96	783	-0.25	1.51
P95%	0.32	7.06	847	+0.23	2.32
n	26	26	26	22	26
CS04 (127 Ma)					
Promedio	0.39	9.02	707	+0.44	3.49
Desviación Estándar	0.04	0.84	12.3	0.28	0.49
P5%	0.33	7.43	688	+0.08	2.75
Mediana	0.39	9.22	708	+0.40	3.49
P95%	0.44	10.19	726	+0.90	4.29
n	27	27	27	27	27
RAMPA3 (126 Ma)					
Promedio	0.26	6.15	782	-0.20	1.59
Desviación Estándar	0.06	0.70	19.8	0.30	0.44
P5%	0.14	5.09	736	-0.70	0.81
Mediana	0.27	6.17	786	-0.22	1.69
P95%	0.33	7.31	803	+0.26	2.14
n	31	31	31	26	31
CNN6 (113 Ma)					
Promedio	0.37	4.95	787	+2.41	1.84
Desviación Estándar	0.02	0.38	26.7	0.35	0.15
P5%	0.35	4.33	754	+1.75	1.67
Mediana	0.37	4.94	783	+2.48	1.85
P95%	0.40	5.46	828	+2.86	2.12
n	24	24	23	20	24

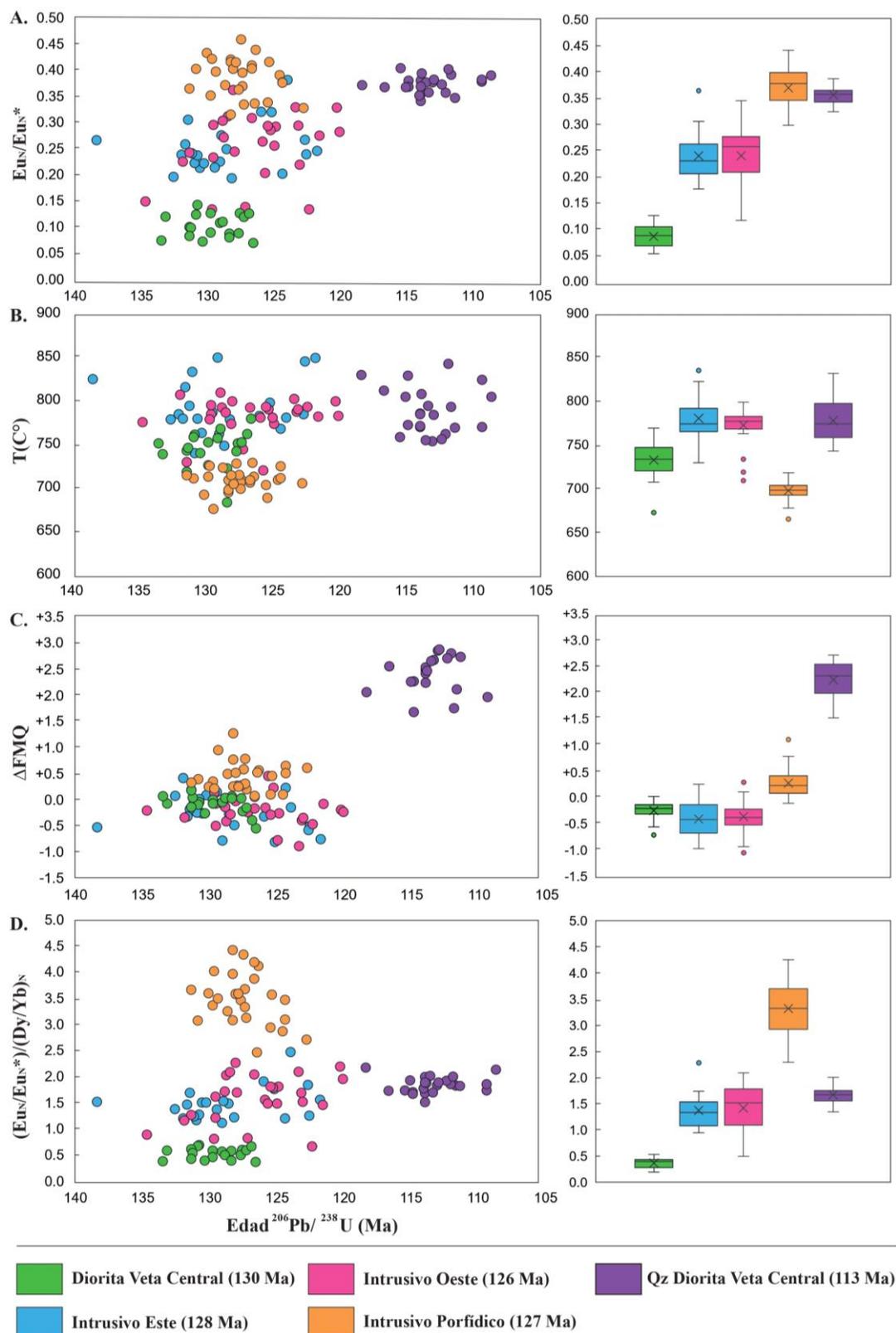


Figura 10. Parámetros geoquímicos en función de la edad $^{206}Pb/^{238}U$. (A) Anomalía de Eu en circon, (B) Temperatura de saturación en Ti de circones, (C) Fugacidad de oxígeno del fundido parental en función de la desviación del buffer Fayalita–Magnetita–Cuarzo (ΔFMQ), (D) Razón

$(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ como parámetro que indica la relación entre el fraccionamiento de plagioclasa y hornblenda.

Con el objetivo identificar el fraccionamiento de hornblenda previo a la cristalización de circón, se utiliza el gráfico Dy_N vs $(Yb/Dy)_N$ (Fig. 11). En este gráfico, la cristalización (fraccionamiento) de hornblenda con anterioridad al circón se manifiesta en un aumento de la razón $(Yb/Dy)_N$ debido a una disminución de la concentración de Dy_N en el magma residual (Fig. 11).

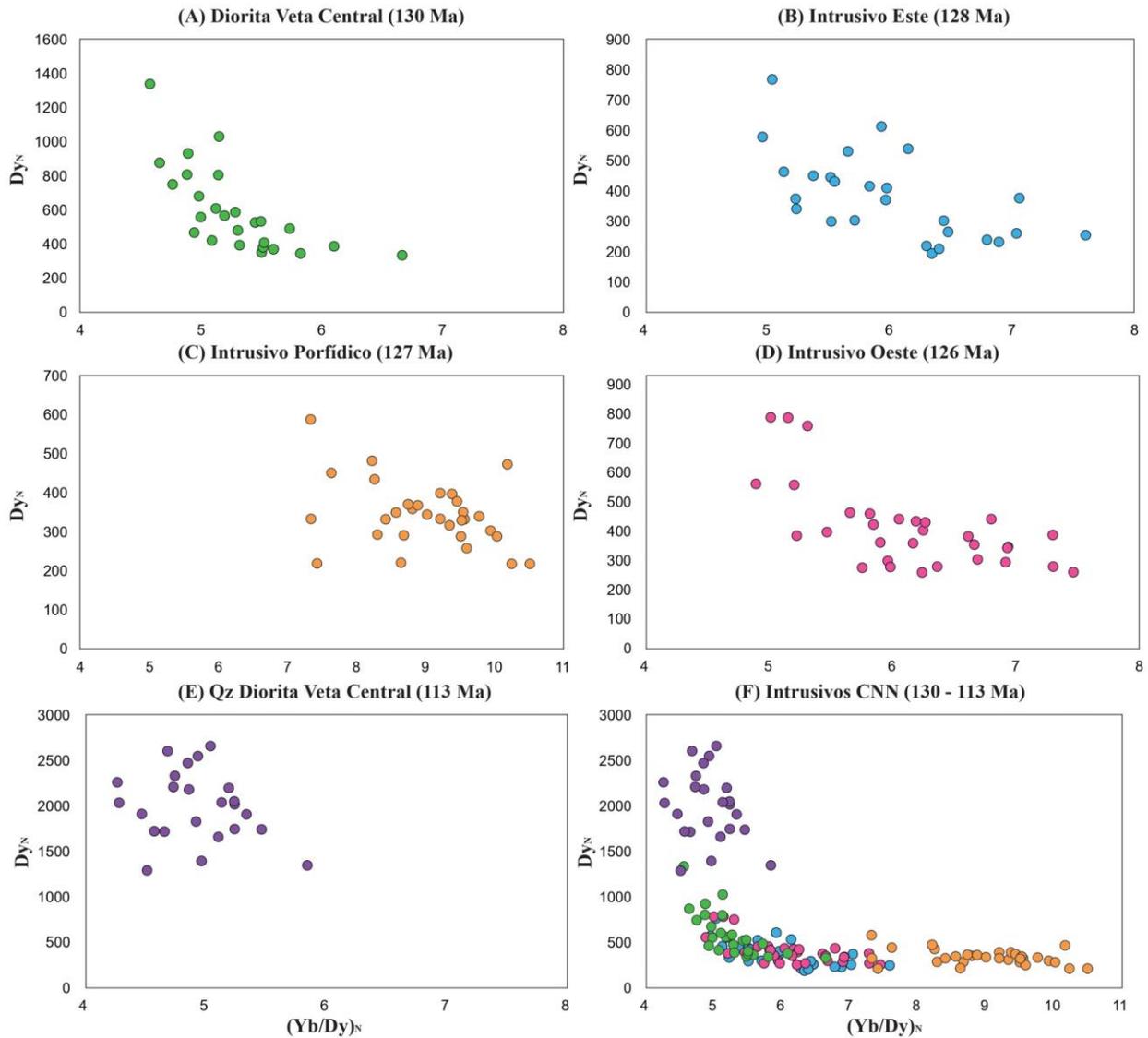


Figura 11. Gráfico Dy vs $(Yb/Dy)_N$ para los intrusivos analizados que ilustra el fraccionamiento de hornblenda.

Finalmente, con el fin de evaluar los parámetros de fertilidad propuestos por Ojeda et al. (2024) para intrusivos relacionados a mineralización IOA, se gráfica la razón $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ vs ΔFMQ (Fig. 12). En esta figura es posible observar que la mayoría de los valores de los intrusivos tempranos (130–125 Ma) se distribuyen entre 0.4 y 2.5 para la razón $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$, y entre -1.0 y $+0.5$ para los valores de ΔFMQ , con la excepción de la muestra del Intrusivo Porfídico

(CS04), la cual presenta valores mayores de $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ y de ΔFMQ . La muestra más antigua, asociada al intrusivo Diorita Veta Central (CNN5), datada en ~130 Ma, presenta parámetros más acotados, distribuyéndose entre 0.4–0.7 para la razón $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ y entre -0.6 y +0.3 para ΔFMQ . Por otro lado, la muestra CNN6 (~113 Ma), presenta valores entre 1.5–2.2 para la razón $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ y 1.75–2.86 para ΔFMQ .

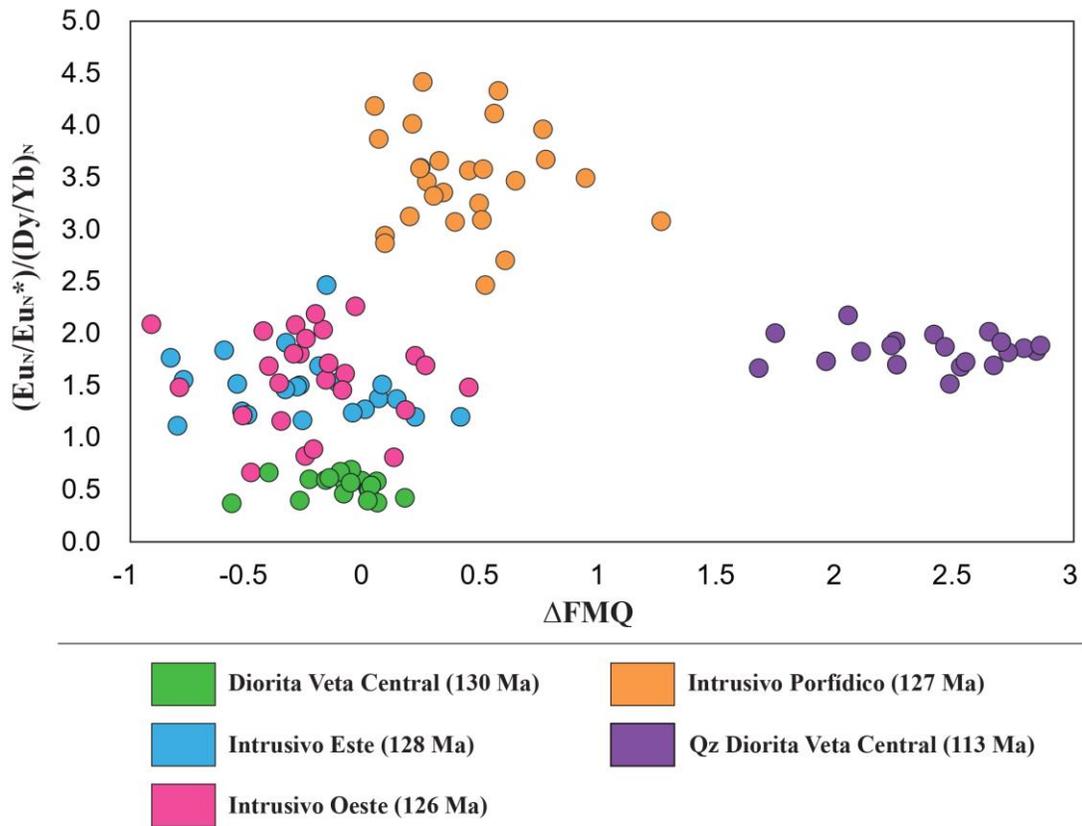


Figura 12. Gráfico razón $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ vs ΔFMQ indicando la distribución de los datos de los intrusivos presentes en Cerro Negro Norte.

Capítulo 4. Discusión

4.1. Geocronología de circones

Las muestras analizadas en el presente trabajo corresponden a rocas intrusivas de composición intermedia variando de diorita a granodiorita que en edad se distribuyen en un rango de 130–126 Ma, con la excepción de la muestra CNN6 que tiene una edad de ~113 Ma (Fig. 13). Cabe señalar que la muestra CNN5 presenta una edad de 129.9 ± 0.8 Ma, que es idéntica dentro de error a aquella edad reportada por Salazar et al. (2020) para esta misma muestra (129.6 ± 1.0 Ma).

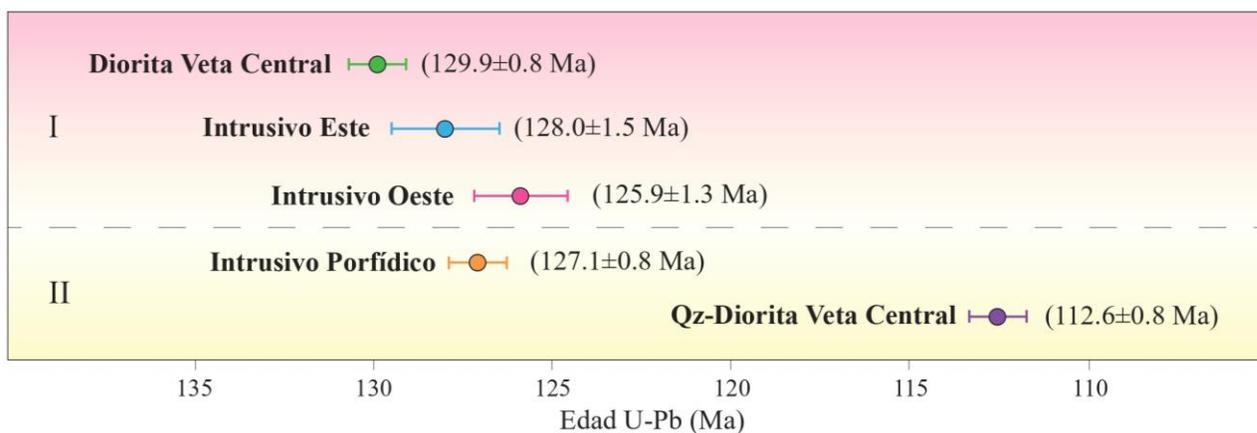


Figura 13. Representación gráfica de las edades U–Pb de los intrusivos analizados. Se indica además una separación de eventos en base a condiciones redox donde en una etapa I los intrusivos presentan condiciones levemente reducidas en comparación con una etapa II con características oxidadas.

Bajo un contexto regional y de acuerdo con las nuevas edades U–Pb de circones reportadas en este trabajo, los intrusivos analizados se asocian a dos complejos plutónicos, siendo el más antiguo la unidad Diorita La Brea descrita por Arévalo (2005). Esta unidad coincide en edad con las muestras asociadas a los intrusivos Este (CS01), Oeste (RAMPA3), Porfídico (CS04) y Diorita Veta Central (CNN5), estableciéndose un rango de edad para La Brea en torno a los 130–126 Ma en el área de estudio. Por otro lado, para el intrusivo Qz-Diorita Veta Central (CNN6) de edad ~113 Ma, se identifican dos posibles opciones en base a su edad: el Plutón La Borracha (117–105 Ma; Jara et al., 2021a), o los Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas (115–110 Ma; Arévalo, 2005). La ubicación de la muestra CNN6 próxima a diques aplíticos (Fig. 6; Salazar, comunicación personal) sugiere que correspondería a las Aplitas del Portezuelo Cucharas. Esta interpretación es consistente además con una alta concentración de algunos elementos traza en circón (por ejemplo, P, Y, Nb, Th y REE; Tabla 4). Particularmente, se destaca el alto contenido de REE en esta muestra con una sumatoria total de REE de ~3800 ppm en promedio. El diagrama araña de REE normalizadas presenta una tendencia típica para circones de arco para esta muestra al igual que las demás (Fig. 9) por lo que se descarta la presencia de inclusiones en los circones, y por lo tanto se puede

concluir que estos valores anómalos reflejarían la composición original de un magma parental probablemente contaminado por unidades altamente diferenciadas. Esta interpretación es consistente con la ubicación de la muestra en el depósito cercana a los diques aplíticos y la unidad de brecha de turmalina-cuarzo, junto con la zona de alteración con la misma asociación mineral (Fig. 6). Adicionalmente, no se descarta que los valores anómalos de algunos elementos traza (por ejemplo, el fósforo) pudieran reflejar contaminación con cantidades variables de apatito asociados a la etapa anterior.

4.2. Geoquímica de circones: condiciones magmáticas de unidades intrusivas

Las edades de los intrusivos estudiados junto a la geoquímica de circones permite constreñir la evolución magmática del yacimiento y las variaciones temporales en los parámetros magmáticos incluyendo temperatura de cristalización, estado redox y razones de Eu_N/Eu_N^* y Yb_N/Dy_N .

Los intrusivos analizados muestran una variación en la temperatura de cristalización determinada mediante el geotermómetro de Ti en circón (Ferry y Watson, 2007). Se obtuvo como resultado que los intrusivos Este (CS01), Oeste (RAMPA3) y Qz-Diorita Veta Central (CNN6) muestran temperaturas relativamente altas con medianas cercanas a los 780°C (Tabla 5, Fig. 9B), valores ligeramente mayores a los registrados por Ojeda et al. (2024) para intrusivos relacionados a mineralización tipo IOA (mediana de 740–760°C), pero consistente con las determinadas por Romero et al. (2024) en Candelaria y con las tendencias regionales identificadas por Jara et al. (2021a,b) donde a partir de los 130 Ma se observa un aumento general de las temperaturas de cristalización, tendencia que se mantiene hasta los 105 Ma desde donde comienzan a decaer. Por otro lado, la muestra más antigua, perteneciente a la diorita ubicada en Veta Central (muestra CNN5), tiene temperaturas ligeramente menores (mediana de 740°C), coincidente con lo registrado para mineralizaciones del tipo IOA (Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024; Meng et al., 2024). Al contrario, la muestra perteneciente al Intrusivo Porfídico (~127 Ma), tiene temperaturas calculadas distintivamente menores (CS04 = 688–726°C, mediana = 708°C), similares a las registradas para eventos asociados a pórfidos de Cu (Dilles et al., 2015; Lee et al., 2017).

En cuanto a los diagramas de tierras raras normalizados a condrito (Fig. 9) se observa que los gráficos son consistentes con los patrones de intrusivos asociados a ambientes de arcos magmáticos, mostrando un enriquecimiento en tierras raras pesadas (HREE) con respecto a las livianas (LREE), con marcadas anomalías de Ce y Eu. La anomalía negativa de Eu muestra un decrecimiento en relación con la edad de las muestras, proceso que también se observa mediante la razón Eu_N/Eu_N^* , donde la muestra más antigua (CNN5) de 130 Ma tiene una mediana de 0.10 mientras que la más joven de 113 Ma (CNN6) tiene una mediana de 0.37. En este sentido los intrusivos presentes en el depósito muestran anomalías que decrecen lentamente, con la excepción de la muestra del Intrusivo Porfídico (127 Ma), la cual exhibe anomalías negativas menos marcadas, con medianas de Eu_N/Eu_N^* en 0.39 (CS04: 0.33–0.44, percentiles 5 y 95, respectivamente).

Estudios anteriores sugieren que la disminución o aumento de esta razón se encuentra controlada principalmente por el fraccionamiento o supresión de plagioclasa, respectivamente, previo a la cristalización del circón. La plagioclasa es una fase mineral que incorpora preferentemente Eu^{+2} en su estructura cristalina, por lo que su fraccionamiento temprano empobrece el magma residual en dicho elemento, generando marcadas anomalías de Eu en los circones (Hoskin y Ireland, 2000; Hoskin y Schaltegger, 2003; Lee et al., 2017). Estudios anteriores han relacionado las magnitudes de dichas anomalías con parámetros como el contenido de agua, fugacidad de oxígeno y el estado redox del magma (Hoskin y Schaltegger, 2003; Burnham y Berry, 2012; Loucks y Fiorentini, 2023). En el caso de las muestras analizadas, se observa que en Cerro Negro Norte los intrusivos presentan anomalías negativas de Eu moderadas a altas ($\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^* \sim 0.1\text{--}0.2$, Figs. 9 y 10A), lo que indica un alto grado de fraccionamiento de plagioclasa previo a la cristalización de circones. Estas anomalías son menores en las muestras CS04 (0.39) y CNN6 (0.37), indicando una reducción o inhibición del fraccionamiento temprano de plagioclasa asociado potencialmente a un mayor contenido de agua en los magmas (Fig. 10A, Tabla 7).

Otro mineral cuyo fraccionamiento o supresión está directamente relacionado con el contenido de agua de los magmas parentales es el anfíbol, fase que suele incorporar preferentemente tierras raras medianas (MREE) sobre las pesadas (HREE), motivo por el que la razón Yb_N/Dy_N es usada y comparada con el valor de Dy_N (Wotzlaw et al., 2013; Buret et al., 2016; Rezeau et al., 2019). La teoría indica que en el caso que exista fraccionamiento (cristalización) temprana de hornblenda, los valores de Yb_N/Dy_N en circón aumentan debido a una disminución en la concentración de Dy_N en el magma (Fig. 11). Esta tendencia se puede observar para la mayoría de las muestras entre 130 y 126 Ma (Fig. 11A–D), sin embargo, es el Intrusivo Porfídico el que presenta valores de la razón Yb_N/Dy_N más altos (mediana en 9.22) en comparación con las otras unidades en este rango de edad. Esto indicaría que el Intrusivo Porfídico tendría los mayores contenidos de agua en comparación con los demás. Por otra parte, la muestra CNN6 (~113 Ma) tiene valores bajos de la razón Yb_N/Dy_N , (mediana ~5.0) asociado a valores altos de Dy_N , lo que se interpreta como un retardo en el fraccionamiento de hornblenda con relación a la cristalización de circón, probablemente debido a menores contenidos de agua (Fig. 9E).

Otro parámetro relevante en la determinación de las condiciones de formación de los intrusivos es el estado redox o fugacidad de oxígeno ($f\text{O}_2$) de los magmas, reportado comúnmente como la desviación en unidades logarítmicas con relación al buffer Fayalita–Magnetita–Cuarzo (ecuación 3) (Loucks et al., 2020; Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024; Meng et al., 2024). En este estudio se reconocen tres unidades intrusivas, i.e., Diorita Veta Central (~130 Ma), Intrusivo Este (~128 Ma) e Intrusivo Oeste (~126 Ma), con valores de ΔFMQ menores a +0.25 (Tabla 5, Fig. 9). Estos valores son similares a aquellos reportados por Ojeda et al. (2024) para los complejos intrusivos Infiernillo y Retamilla (medianas de -0.02 y -0.2, respectivamente) en el distrito IOA El Algarrobo, consistentes con la hipótesis planteada respecto a la relación de la mineralización tipo IOA con intrusivos relativamente reducidos (Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024).

Por otro lado, la muestra del Intrusivo Porfídico (CS04, ~127 Ma) y la muestra perteneciente a la Qz-Diorita en Veta Central (CNN6, ~113 Ma) presentan valores positivos de ΔFMQ con medianas de +0.44 y +2.48, respectivamente (Tabla 7, Fig. 10). Estos valores indican condiciones relativamente más oxidadas en comparación con las otras unidades intrusivas, aunque en el caso del Intrusivo Porfídico con estados de oxidación levemente menores a aquellos intrusivos relacionados a pórfidos cupríferos (Dilles et al., 2015; Lee et al., 2017; Lee y Tang, 2020). Por otra parte, la muestra CNN6 presenta un enriquecimiento en sus elementos traza, en especial en sus tierras raras, incluyendo el Ce (Fig. 9F). La ecuación 3 utilizada para el cálculo de ΔFMQ (Loucks et al., 2020), considera la concentración de Ce. Por esta razón, los valores obtenidos para este parámetro reflejan condiciones altamente oxidadas ($\Delta FMQ = +2.48$), producto posiblemente del proceso de contaminación cortical. Este mecanismo sería daría en ambientes donde la corteza engrosada permitiera la permanencia del magma durante un tiempo suficientemente prolongado para permitir la asimilación de rocas circundantes. Esto coincidiría con las observaciones realizadas por Jara et al. (2021b), donde registra mediante análisis de roca total, un engrosamiento de la corteza continental en el periodo de 120–108 Ma.

Por último, en relación con todos estos parámetros descritos, Loucks y Fiorentini (2023) proponen que un mecanismo de oxidación de los magmas corresponde a la misma hidratación de ellos. Este proceso coincide con los parámetros obtenidos anteriormente para las anomalías de Eu y razones Yb_N/Dy_N , indicadores geoquímicos de que el magma parental del intrusivo porfídico tenía contenidos comparativamente mayores de H_2O que los magmas parentales de los otros intrusivos en el depósito estudiado. Siguiendo esta hipótesis, surge la razón $(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$ como un método para cuantificar los efectos del fraccionamiento de plagioclasa y anfíbol (Fig. 10d), donde un valor alto para esta razón puede estar asociado, por un lado, a una alta razón Eu_N/Eu_N^* , debido a la supresión o inhibición en el fraccionamiento de plagioclasa, o, por otro lado, un valor bajo de la razón $(Dy/Yb)_N$, asociado a altos grados de fraccionamiento de hornblenda. Las razones de estos valores pueden residir tanto en mayores contenidos de agua en el magma (Loucks, 2014; Richards, 2011) y/o debido a procesos de diferenciación magmática a niveles profundos de la corteza (Loucks, 2014; Loucks et al., 2021). Al contrario, cuando hay una menor razón $(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$ puede asociarse tanto a valores bajos de la razón Eu_N/Eu_N^* , lo que indica el fraccionamiento de plagioclasa, como a altos valores de $(Dy/Yb)_N$ en circón asociado a la supresión o inhibición del fraccionamiento de hornblenda. La causa de estos bajos valores en la razón $(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$ residen en menores contenidos de agua en el magma (Loucks, 2014; Richards, 2011) y/o a menores profundidades de diferenciación magmática (Loucks, 2014; Loucks et al., 2021).

Para el caso de las muestras analizadas, cuatro de ellas presentan valores en la razón $(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$ menores a 2.5 (Fig. 9D), siendo estas la Diorita Veta Central (CNN5: 0.57), el Intrusivo Este (CS01: 1.51), el Intrusivo Oeste (RAMPA3: 1.69) y la Qz-Diorita Veta Central (CNN6: 1.85). La única muestra con valores sobre 2.5 corresponde al Intrusivo Porfídico (~127 Ma), con valores distribuidos entre 2.8 y 4.3 (percentil 5 y 95, respectivamente). Esto indica que para las primeras muestras existe un mayor fraccionamiento de plagioclasa asociado a menores contenidos de agua y/o ambientes de diferenciación magmática menos profundos (Richards, 2011;

Loucks, 2014; Loucks et al., 2021). En cambio, la muestra del Intrusivo Porfídico indica un mayor fraccionamiento de hornblenda asociado a mayores contenidos de agua o ambientes de diferenciación más profundos (Richards, 2011; Loucks, 2014; Loucks et al., 2021). Sin embargo, considerando que la muestra de este intrusivo presenta edades de cristalización muy cercanas a las demás muestras (CS01: ~128 Ma, CS04: ~127 Ma, y RAMPA3: ~126 Ma), se descarta la diferenciación a diferentes profundidades, y se concluye que los cambios observados serían principalmente un reflejo de las diferencias en los contenidos de agua de los magmas parentales. En este sentido, el Intrusivo Porfídico se formaría a partir de un magma más rico en H₂O y por ende más oxidado (Loucks y Fiorentini, 2023), mientras que los demás intrusivos muestreados se derivaron de magmas con menores contenidos de H₂O, coincidente con lo observado por Ojeda et al. (2024) y Romero et al. (2024) para magmas asociados con mineralización tipo IOA.

4.3. Evolución y fertilidad magmática

En resumen, en base a los resultados obtenidos, los intrusivos del depósito Cerro Negro Norte, tanto en su zona oriental como occidental, reflejan el arco magmático presente en la Cordillera de la Costa en el periodo Cretácico Temprano entre los 130 y 113 Ma. Los parámetros identificados en estos intrusivos permiten distinguir un evento principal— desarrollado tempranamente entre los 130 y 127 Ma (asociado a una etapa I)— de dos eventos posteriores asociados a edades de 127 y 113 Ma (etapa II; Fig. 14).

La primera etapa, representada por los intrusivos Oeste (RAMPA3), Este (CS01) y Diorita Veta Central (CNN5), presentan temperaturas de cristalización altas (>710°C), con firmas relativamente reducidas asociadas a valores de ΔFMQ menores a +0.5. A la vez, reflejan bajos contenidos de H₂O, lo que incide en el alto grado de fraccionamiento de plagioclasa produciendo marcadas anomalías de Eu, y suprimiendo el fraccionamiento de hornblenda. Estos procesos coinciden con una tectónica extensional caracterizada por una subducción de alto ángulo, que produce el adelgazamiento de la corteza continental, permitiendo el rápido ascenso de los magmas y profundidades de diferenciación menores (Mpodozis y Ramos, 1989; Dallmeyer et al., 1996; Grocott y Taylor, 2002; Ojeda et al., 2024). En coincidencia, los tres intrusivos descritos se asocian tanto por sus firmas geoquímicas, como por su ubicación y relación temporal, con la mineralización del tipo IOA presente en el depósito, mostrando concordancia tanto con lo concluido por Salazar et al. (2020) para la muestra CNN5, como con las condiciones magmáticas identificadas por Ojeda et al. (2024) y Romero et al. (2024) para intrusivos asociados a mineralización tipo IOA (Fig. 13). En el caso de Cerro Negro Norte, se observa que las muestras se distribuyen en un rango más acotado que el identificado por Ojeda et al. (2024) en El Algarrobo y por Romero et al. (2024) en Candelaria. En este caso los intrusivos tienen valores de ΔFMQ que fluctúan entre -1 y +0.5, mientras que para la razón $(\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_N$ los valores se distribuyen en el rango 0.3–2.5. En este sentido, las muestras presentan firmas menos reducidas que las identificadas en el distrito El Algarrobo para el complejo plutónico La Higuera, aunque semejantes a las observadas para los complejos Retamilla e Infiernillo del mismo distrito (Ojeda et al., 2024).

La etapa II se desarrolla a partir de los ~127 Ma con una rápida transición desde la etapa I. Los eventos intrusivos de esta etapa presentan firmas químicas distintivas, que sugieren un magma parental con condiciones ligeramente a altamente oxidadas. Por un lado, el primer evento de ~127 Ma se asocia a valores de ΔFMQ positivos, razones de $\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*$ de 0.39 (CS04 = 0.33–0.44, percentil 5% y 95%), y razones $\text{Yb}_\text{N}/\text{Dy}_\text{N}$ de 9.22 (CS04 = 7.43–10.19, percentil 5% y 95%). En concordancia con esto, la edad del Intrusivo Porfídico coincide con las edades propuestas en estudios anteriores para el cambio tectónico sufrido por el margen continental sudamericano, producto de la ruptura de Gondwana (Dallmeyer et al., 1996), lo que explicaría la variación en las firmas geoquímicas con respecto a la etapa I. Este cambio también es explicado por Ojeda et al. (2024), donde se distinguen diferencias en el complejo plutónico La Higuera a partir de los 123 Ma, donde los intrusivos analizados para La Higuera B (122–123 Ma), subunidad separada de La Higuera A (123–127 Ma), muestran firmas similares a las observadas para la muestra CS04 en Cerro Negro Norte.

El último evento intrusivo (Qz-Diorita Veta Central, ~113 Ma) es consistente en edad con la unidad de Microgranitos y Aplitas del Portezuelo Cucharas (110–115 Ma; Arevalo, 2005). La geoquímica de elementos traza de este intrusivo, particularmente enriquecimiento en tierras raras— lo que incide en la obtención de valores altos de ΔFMQ (CS04=+2.48)— reflejaría condiciones de contaminación o asimilación de unidades altamente diferenciadas (aplititas, zonas y/o brechas de turmalina-cuarzo). Por otro lado, las anomalías de Eu y la razón $(\text{Yb}/\text{Dy})_\text{N}$ indica que a los 113 Ma las condiciones magmáticas en cuanto al contenido de agua habrían sufrido solo ligeros cambios en comparación a los magmas de 130–127 Ma, mostrando que existe una ligera supresión del fraccionamiento de plagioclasa, con similares grados de cristalización de hornblenda. La razón de los altos valores de ΔFMQ para este intrusivo no estaría asociada a un alto contenido de agua del magma, sino posiblemente a contaminación del magma parental en una corteza relativamente más engrosada (Loucks, 2014; Loucks et al., 2021). Cabe recalcar también que los diques aplíticos descrito como posible fuente de contaminación han sido relacionados, por contacto de unidades, a la alteración turmalina-cuarzo y/o a procesos más tardíos post-mineralización, lo que indicaría que la Qz-Diorita Veta Central (CNN6, ~113 Ma) sería un evento posterior a los principales eventos de mineralización del yacimiento.

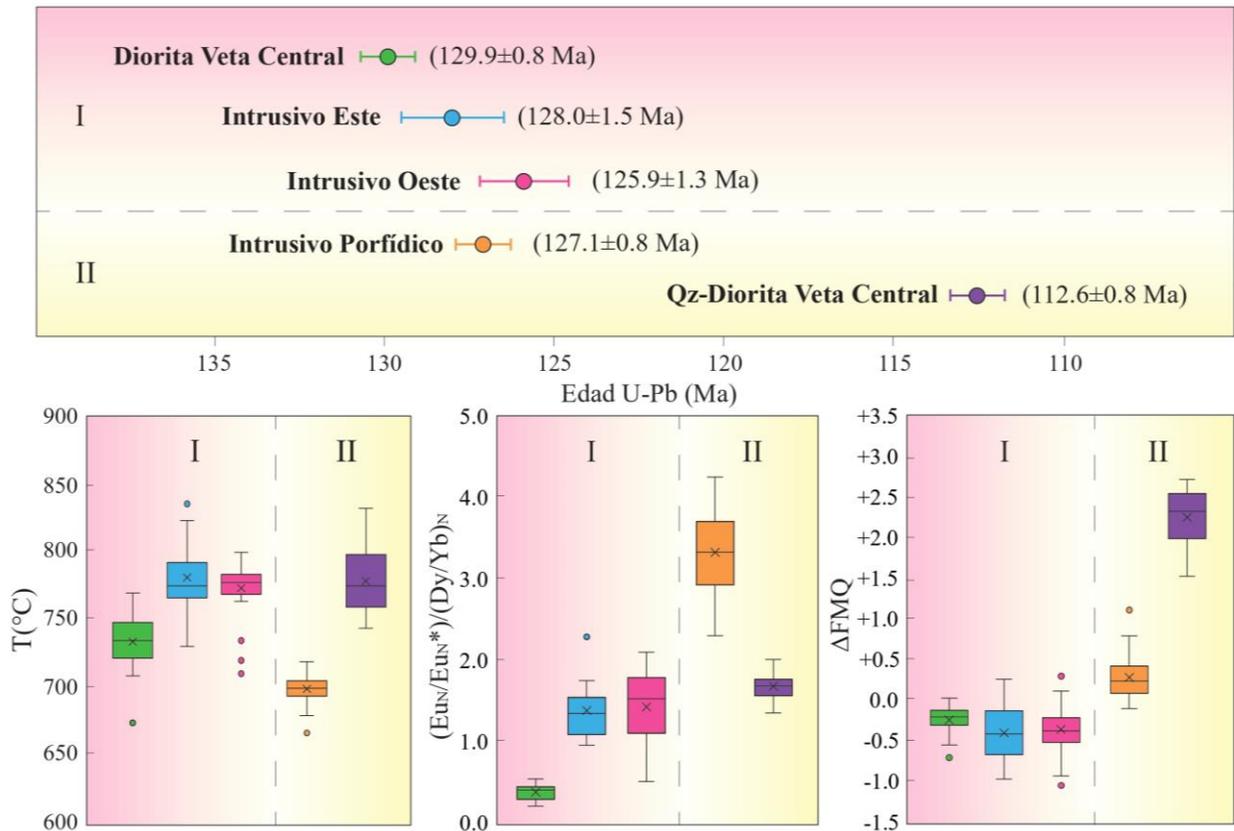


Figura 14. Resumen de los eventos magmáticos identificados en el depósito Cerro Negro Norte con los parámetros geoquímicos principales. Se identifica una etapa temprana principal (rojo), seguido de una etapa posterior con eventos intrusivos con signatures más oxidadas (amarillo).

En conclusión, la primera etapa se asocia directamente a la mineralización tipo IOA presente en el depósito, mostrando signatures geoquímicas con parámetros de $(Eu_N/Eu_N^*)/(Dy/Yb)_N$ entre 0.3 y 2.5 y valores de ΔFMQ entre -1 y $+0.5$ (Fig. 15), siendo más restringidos que aquellos identificados para el distrito El Algarrobo (Ojeda et al., 2024). Para el caso del Intrusivo Porfídico (muestra CS04), las características tanto texturales y mineralógicas como las signatures geoquímicas, conllevan a la hipótesis sobre una posible relación entre este intrusivo con la mineralización de sulfuros presente en el yacimiento, principalmente con una alta presencia de pirita. Estudios anteriores desarrollados por del Real et al. (2023) y Romero et al. (2024) en el distrito Candelaria, han postulado que los depósitos IOCG (*Iron Oxide Copper Gold*), ricos en Cu–Au a diferencia de los IOA, se habrían formado como resultado de la superposición de dos eventos magmáticos-hidrotermales con características geoquímicas diferenciadas. En primer lugar, un evento magmático temprano con características reducidas y empobrecidas en agua asociados con la mineralización tipo IOA, y un evento magmático tardío que se superpone al evento anterior, con características oxidadas y ricas en agua, asociados a la mineralización de sulfuros de Cu. Este último evento posee características de fertilidad magmática similares a la de sistemas del tipo pórfidos de Cu (Dilles et al., 2015; Lu et al., 2016; Lee et al., 2017, 2021; Romero et al., 2024).

En el caso de los parámetros medidos para el Intrusivo Porfídico (~127 Ma), estos reflejan condiciones magmáticas que se diferencian de los demás intrusivos analizados, siendo más oxidadas y con mayores contenidos de agua (Fig. 15). Sin embargo, las condiciones magmáticas de este último evento son menos oxidadas que las determinadas por Romero et al. (2024) y las observadas en depósitos tipo pórfido cuprífero (Dilles et al., 2015; Lee et al., 2017; Lee y Tang, 2020; Meng et al., 2024). A pesar de esto, no se descarta la relación de esta intrusión con la mineralización de sulfuros, al considerarse que podría corresponder a un evento posterior que dada sus condiciones es capaz de removilizar elementos como S, Cu y Au de los magmas, en menores grados a los que se asocian en los depósitos tipo IOCG y pórfidos cupríferos, razón que explicaría la predominancia de mineralización de pirita por sobre calcopirita. Este modelo también coincidiría con las observaciones realizadas por Salazar et al. (2020) y Palma et al. (2021), al comprobar que existiría un evento tardío diferente al de formación de la mineralización tipo IOA, al que podrían asociarse la presencia de Cu±Au en algunos sectores del depósito (Vivallo et al., 1995; Rabb, 2001).

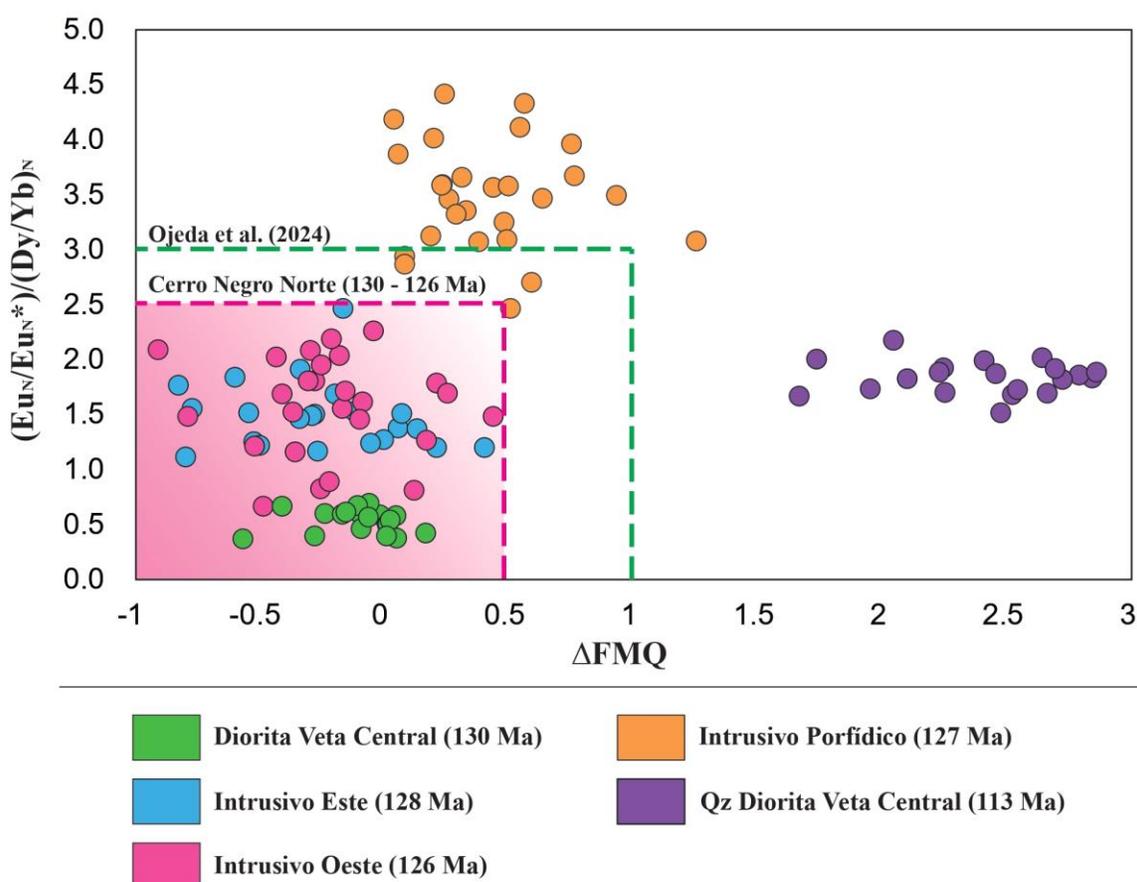


Figura 15. Gráfico $(Eu/Eu^*)/(Dy/Yb)_N$ vs ΔFMQ para las muestras analizadas. La zona coloreada de rosado corresponde a los circones de intrusivos relacionados a la mineralización IOA, mientras la zona de naranja corresponde a los circones identificados para el intrusivo porfídico oxidado. Las líneas discontinuas corresponden a los límites establecidos para los parámetros de fertilidad propuestos por Ojeda et al. (2024) (línea verde) y los identificados para Cerro Negro Norte (línea rosada).

El modelo propuesto se sustenta en base a las mediciones obtenidas en este estudio de cinco intrusivos ubicados en diferentes sectores del depósito. Este modelo necesita ser validado mediante el análisis de una mayor cantidad de muestras, con especial atención en las que posean una textura porfídica similar a la del Intrusivo Porfídico (muestra CS04). Sería de especial interés, investigar el sector de Abanderada donde autores como Raab (2001) reconocen la presencia de intrusivos con esta textura y Vivallo et al. (1995) reconoce la mayor presencia de mineralización de $\text{Cu}\pm\text{Au}$.

Capítulo 5: Conclusiones

El depósito Cerro Negro Norte, ubicado en la Cordillera de la Costa al norte de Chile, se encuentra genéticamente ligado al complejo plutónico Diorita La Brea, unidad intrusiva que se aloja en rocas andesíticas pertenecientes a la Formación La Negra. El presente estudio utilizó la geocronología y geoquímica de elementos traza en circones como un método para evaluar las condiciones magmáticas que habrían dado origen a la mineralización del tipo IOA presente en el depósito.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto, se analizaron circones de cuatro diferentes intrusivos cuyas edades U–Pb fluctúan entre los 130 a 126 Ma, coincidentes con las edades reportadas del complejo plutónico Diorita La Brea. Por otro lado, los análisis de elementos traza en circones de las unidades intrusivas situadas en distintas zonas del depósito evidencian que los eventos intrusivos más tempranos (~130–127 Ma) reflejan condiciones magmáticas levemente reducidas, con valores de $\Delta\text{FMQ} < +0.5$, y bajos contenidos de agua, $(\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_\text{N} < 2.5$. Estas condiciones serían distintivas de los magmas asociados a mineralización IOA y serían consistentes con lo propuesto por Ojeda et al. (2024) para el distrito El Algarrobo y por Romero et al. (2024) para el depósito IOCG Candelaria. Coincidente con esto, se demuestra a partir de este estudio que los límites propuestos por Ojeda et al. (2024) como parámetros de fertilidad en depósitos del tipo IOA, se cumplen para los intrusivos del depósito Cerro Negro Norte en el rango de 130–127 Ma. Adicionalmente, en este estudio se analizó una muestra de sondaje correspondiente a un intrusivo granodiorítico de textura porfídica (Intrusivo Porfídico) datado en ~127 Ma. Este intrusivo refleja condiciones magmáticas ligeramente oxidadas ($\Delta\text{FMQ} \sim +0.4$) y con mayores contenidos de H₂O ($(\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^*)/(\text{Dy}/\text{Yb})_\text{N} = +3.49$, máximo = 4.29). Estas condiciones no coinciden con aquellas definidas para los intrusivos asociados a mineralización del tipo IOA, sino más bien son cercanas a las esperadas para intrusivos asociados a pórfidos de Cu–Mo ($\text{Eu}_\text{N}/\text{Eu}_\text{N}^* \sim 0.4$). Cabe señalar que el depósito estudiado tiene una baja presencia de sulfuros de Cu, pero se caracteriza por una alta presencia de pirita. Finalmente, el intrusivo cuarzodiorítico (~113 Ma) se caracteriza por un enriquecimiento en REE, P, Nb, Y y Th, y un estado de oxidación muy alto ($\Delta\text{FMQ} = +2.4$), además de una alta temperatura de cristalización (~790°C). Los datos obtenidos para esta muestra, especialmente el alto valor de ΔFMQ , sugieren que este intrusivo asimiló rocas de caja— posiblemente aplitas, brechas de turmalina-cuarzo y/o niveles ricos en apatito, unidades que han sido descritas en ese sector del yacimiento.

En resumen y de manera similar a lo propuesto para otros depósitos IOA e IOCG (Ojeda et al., 2024; Romero et al., 2024), se postula un modelo de formación para CNN mediante dos etapas magmáticas principales, donde la primera se caracteriza por condiciones de alta temperatura, de carácter reducido y con bajo contenido de agua, siendo está asociada directamente a la mineralización de magnetita predominante en el depósito. Seguido de esta etapa, se reconoce un evento magmático más restringido de menor temperatura ($T = 688\text{--}726^\circ\text{C}$), levemente oxidado y con mayores contenidos de agua. Este evento aportaría azufre y cantidades limitadas de cobre, generando la

precipitación de abundante pirita y cantidades menores de calcopirita y oro, como ha sido descrito por Vivallo et al (1995). Un tercer evento post-mineralización se asociaría a procesos de contaminación cortical favorecido por una corteza moderadamente engrosada.

Este modelo de superposición de eventos magmáticos-hidrotermales es consistente con las observaciones realizadas en otros sistemas IOA-IOCG presentes en la Cordillera de la Costa, sin embargo, es necesario realizar estudios adicionales tanto en otros depósitos IOA-IOCG como dentro del mismo yacimiento Cerro Negro Norte— particularmente de los intrusivos profundos, como el Intrusivo Porfídico (CS04), junto con aquellos asociados al sector de Abanderada donde se identificó la presencia de otros intrusivos con textura porfírica y donde se ha reportado una mayor presencia de mineralización de Cu±Au.

Bibliografía

Arévalo, C. (1995). Mapa Geológico de la Hoja Copiapó (1:100.000): Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo No. 8.

Arévalo, C. (2005). Carta Copiapó. Carta Geológica de Chile Serie Geología Básica, 91.

Barra, F., Reich, M., Selby, D., Rojas, P., Simon, A., Salazar, E., & Palma, G. (2017). Unraveling the origin of the Andean IOCG clan: A Re-Os isotope approach. *Ore Geology Reviews*, 81, 62–78.

Barton, M. D. (2013). Iron Oxide(-Cu-Au-REE-P-Ag-U-Co) Systems. In: *Treatise on Geochemistry: Second Edition*, Vol. 13, pp. 515–541.

Brown, M., Diaz, 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.

Buret, Y., von Quadt, A., Heinrich, C., Selby, D., Wälle, M., & Peytcheva, I. (2016). From a long-lived upper-crustal magma chamber to rapid porphyry copper emplacement: Reading the geochemistry of zircon crystals at Bajo de la Alumbrera (NW Argentina). *Earth and Planetary Science Letters*, 450, 120–131.

Burnham, A. D., & Berry, A. J. (2012). An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 95, 196–212.

CAP (2022). Memoria Integrada. Descargada de <https://www.cap.cl/cap2023/es/index.html>

Charrier, R., Pinto, L., & Rodriguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *Geology of Chile*, pp. 21–114.

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 ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages. *Journal of Geology*, 104, 19–40.

Del Real, I., Reich, M., Simon, A. C., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafa, M. A., ... & Roberts, M. P. (2023). Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed episodic hydrothermal pulses. *Scientific reports*, 13(1), 12041.

Dilles, J. H., Kent, A. J. R., Wooden, J. L., Tosdal, R. M., Koleszar, A., Lee, R. G., & Farmer, L. P. (2015). Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Economic Geology*, 110, 241–251.

- Ferry, J. M., & Watson, E. B. (2007). New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154, 429–437.
- Finch, R. J., & Hanchar, J. M. (2003). Structure and Chemistry of Zircon and Zircon-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Vol. 53, pp. 1–25.
- Grimes, C. B., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., & John, B. E. (2015). “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170, 1–26.
- Grocott, J., & 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.
- Henríquez, F., Naslund, H. R., Nyström, J. O., Vivallo, W., Aguirre, R., Dobbs, F. M., & Lledó, H. (2003). New field evidence bearing on the origin of the El Laco magnetite deposit, northern Chile—A discussion. *Economic Geology*, 98, 1497–1502.
- Hoskin, P. W. O., & Ireland, T. R. (2000). Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28, 627–630.
- Hoskin, P. W. O., & Schaltegger, U. (2003). The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Vol. 53, pp. 27–62.
- Hou, T., Charlier, B., Holtz, F., Veksler, I., Zhang, Z., Thomas, R., & Namur, O. (2018). Immiscible hydrous Fe-Ca-P melt and the origin of iron oxide-apatite ore deposits. *Nature Communications*, 9(1).
- Jara, J. J., Barra, F., Reich, M., Morata, D., Leisen, M., & Romero, R. (2021a). Geochronology and petrogenesis of intrusive rocks in the Coastal Cordillera of northern Chile: Insights from zircon U-Pb dating and trace element geochemistry. *Gondwana Research*, 93, 48-72.
- Jara, J. J., Barra, F., Reich, M., Leisen, M., Romero, R., & Morata, D. (2021b). Episodic construction of the early Andean Cordillera unraveled by zircon petrochronology. *Nature Communications*, 12(1), 4930.
- Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., Jacob, D. E., Stracke, A., Birbaum, K., Frick, D. A., Günther, D., & Enzweiler, J. (2011). Determination of reference values for NIST SRM 610-617 glasses following ISO guidelines. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 35, 397–429.
- Knipping, J. L., Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Lundstrom, C., Bindeman, I., & Munizaga, R. (2015a). Giant Kiruna-type deposits form by efficient flotation of magmatic magnetite suspensions. *Geology*, 43, 591–594.

Knipping, J. L., Bilenker, L. D., Simon, A. C., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Wälle, M., Heinrich, C. A., Holtz, F., & Munizaga, R. (2015b). Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 171, 15–38.

Knipping, J. L., Fiege, A., Simon, A. C., Oeser, M., Reich, M., & Bilenker, L. D. (2019). In-situ iron isotope analyses reveal igneous and magmatic-hydrothermal growth of magnetite at the Los Colorados Kiruna-type iron oxide-apatite deposit, Chile. *American Mineralogist*, 104, 471–484.

Lara, L., & Godoy, E. (1998). Hoja Quebrada Salitrosa, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos No.4, 1 Mapa Escala 1:100.000.

Lee, C. T. A., & Tang, M. (2020). How to make porphyry copper deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 529, 115868.

Lee, R. G., Byrne, K., D'Angelo, M., Hart, C. J. R., Hollings, P., Gleeson, S. A., & Alfaro, M. (2021). Using zircon trace element composition to assess porphyry copper potential of the Guichon Creek batholith and Highland Valley Copper deposit, south-central British Columbia. *Mineralium Deposita*, 56, 215–238.

Lee, R. G., Dilles, J. H., Tosdal, R. M., Wooden, J. L., & Mazdab, F. K. (2017). Magmatic Evolution of Granodiorite Intrusions at the El Salvador Porphyry Copper Deposit, Chile, Based on Trace Element Composition and U/Pb Age of Zircons. *Economic Geology*, 112, 245–273.

Leisen, M., Barra, F., Romero, R., & Reich, M. (2015). Geocronología U-Pb de Circones Mediante Ablación Láser Acoplado a un ICP-MS Multicolector. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, pp.559-562.

Loucks, R. R. (2014). Distinctive composition of copper-ore-forming arc magmas. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61, 5–16.

Loucks, R. R. (2021). Deep entrapment of buoyant magmas by orogenic tectonic stress: Its role in producing continental crust, adakites, and porphyry copper deposits. *Earth-Science Reviews*, 220, 103744.

Loucks, R. R., & Fiorentini, M. L. (2023). Oxidation of magmas during gain and loss of H₂O recorded by trace elements in zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 622, 118377.

Loucks, R. R., Fiorentini, M. L., & Henriquez, G. J. (2020). New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. *Journal of Petrology*, 61, egaa034.

Lu, Y.-J., Loucks, R. R., Fiorentini, M., Campbell McCuaig, T., Evans, N. J., Yang, Z.-M., Hou, Z.-Q., Kirkland, C. L., Parra-Avila, L. A., & Kobussen, A. (2016). Zircon Compositions as a Pathfinder for Porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. In: SEG Special Publication 19, pp. 329–347.

- Ludwig, K. (2010). Isoplot/Ex version 4.1, a geochronological toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 4.
- McDonough, W. F., & Sun, S. s. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- Meng, X., Mao, J., Simon, A., Duan, C., Xie, G., Su, H., Hou, T., Shi, K., & Chen, N. (2024). Contrasting Tectonomagmatic Conditions for Coexisting Iron Oxide-Apatite Deposits and Porphyry and Skarn Cu ± Au Deposits in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt, China. *Economic Geology*, 119, 1059–1087.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. A. (1989). The Andes of Chile and Argentina. In: *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. Ericksen, G. E., Cañas Pinochet, M. T., & Reinemund, J. A. (Eds.) *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. Earth Sci. Ser. Circum-Pacific Council Energy Miner. Resour, pp. 59–90.
- Naslund, H. R., Henriquez, F., Nyström, J. O., Vivallo, W., & Dobbs, F. M. (2002). Magmatic iron ores and associated mineralisation: Examples from the Chilean High Andes and Coastal Cordillera. *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, 2, pp. 207–226.
- Nyström, J. O., & Henríquez, F. (1994). Magmatic Features of Iron Ores of the Kiruna Type in Chile and Sweden: Ore Textures and Magnetite Geochemistry. *Economic Geology*, 89, 820–839.
- Ojeda, A., Barra, F., Reich, M., Romero, R., & Tapia, M. J. (2024). Evolution and fertility of magmas associated with iron oxide-apatite (IOA) deposits, Coastal Cordillera, Northern Chile: A zircon petrochronology perspective. *Gondwana Research*, 131, 38–56.
- Palma, G., Barra, F., Reich, M., Simon, A. C., & Romero, R. (2020). A review of magnetite geochemistry of Chilean iron oxide-apatite (IOA) deposits and its implications for ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 126, 103748.
- Parada, M. Á., López-Escobar, L., Oliveros, V., Fuentes, F., Morata, D., Calderón, M., Aguirre, L., Féraud, G., Espinoza, F., Moreno, H., Figueroa, O., Muñoz, J., Troncoso, R., & Stern, C. (2007). Andean magmatism. In: *Geology of Chile*, Moreno, T. & Gibbons, W. (Eds), pp. 115–154.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., & Hergt, J. (2011). Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26, 2508–2518.
- Raab, A. K. (2001). *Geology of the Cerro Negro Norte Fe-Oxide (Cu-Au) District, Coastal Cordillera, northern Chile*. MSc Thesis, Oregon State University.
- Reich, M., Simon, A. C., Barra, F., Palma, G., Hou, T., & Bilenker, L. D. (2022). Formation of iron oxide-apatite deposits. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3, 758–775.

- Rezeau, H., Moritz, R., Wotzlaw, J. F., Hovakimyan, S., & Tayan, R. (2019). Zircon petrochronology of the Meghri-Ordubad pluton, Lesser Caucasus: Fingerprinting igneous processes and implications for the exploration of porphyry Cu-Mo deposits. *Economic Geology*, 114, 1365–1388.
- Richards, J. P. (2011). High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: just add water. *Economic Geology*, 106, 1075–1081.
- Rojas, P. A., Barra, F., Deditius, A., Reich, M., Simon, A., Roberts, M., & Rojo, M. (2018). New contributions to the understanding of Kiruna-type iron oxide-apatite deposits revealed by magnetite ore and gangue mineral geochemistry at the El Romeral deposit, Chile. *Ore Geology Reviews*, 93, 413–435.
- Rojas, P. A., Barra, F., Reich, M., Deditius, A., Simon, A., Uribe, F., Romero, R., & Rojo, M. (2018). A genetic link between magnetite mineralization and diorite intrusion at the El Romeral iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 53, 947–966.
- Romero, R., Barra, F., Reich, M., Ojeda, A., Tapia, M. J., del Real, I., & Simon, A. (2024). Contrasting magma chemistry in the Candelaria IOCG district caused by changing tectonic regimes. *Scientific Reports*, 14, 10793.
- Salazar, E., Barra, F., Reich, M., Simon, A., Leisen, M., Palma, G., Romero, R., & Rojo, M. (2020). Trace element geochemistry of magnetite from the Cerro Negro Norte iron oxide-apatite deposit, northern Chile. *Mineralium Deposita*, 55, 409–428.
- Scheuber, E., & Gonzalez, G. (1999). Tectonics of the Jurassic-Early Cretaceous magmatic arc of the north Chilean Coastal Cordillera (22°-26°S): A story of crustal deformation along a convergent plate boundary. *Tectonics*, 18, 895–910.
- Simon, A. C., Knipping, J., Reich, M., Barra, F., Deditius, A. P., Bilenker, L., & Childress, T. (2018). Kiruna-Type Iron Oxide-Apatite (IOA) and Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits Form by a Combination of Igneous and Magmatic-Hydrothermal Processes: Evidence from the Chilean Iron Belt. In: *Metals, Minerals, and Society*, Arribas, A.M. & Mauk, J.L. (Eds), Society of Economic Geologists Special Publication 21, pp. 89–114.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N., & Whitehouse, M. J. (2008). Plešovice zircon - A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249, 1–35.
- Vivallo, W., Espinoza, S., & Henríquez, F. (1995). Metasomatismo y alteración hidrotermal en el Distrito Ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 22, 75–88.

Wade, C. E., Payne, J. L., Barovich, K., Gilbert, S., Wade, B. P., Crowley, J. L., Reid, A., & Jagodzinski, E. A. (2022). Zircon trace element geochemistry as an indicator of magma fertility in iron oxide copper-gold provinces. *Economic Geology*, 117, 703–718.

Wiedenbeck, M., Hanchar, J. M., Peck, W. H., Sylvester, P., Valley, J., Whitehouse, M., Kronz, A., Morishita, Y., Nasdala, L., Fiebig, J., Franchi, I., Girard, J. P., Greenwood, R. C., Hinton, R., Kita, N., Mason, P. R. D., Norman, M., Ogasawara, M., Piccoli, P. M., ... Zheng, Y. F. (2004). Further characterisation of the 91500 zircon crystal. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28, 9–39.

Wotzlaw, J. F., Schaltegger, U., Frick, D. A., Dungan, M. A., Gerdes, A. G., & Günther, D. (2013). Tracking the evolution of large-volume silicic magma reservoirs from assembly to supereruption. *Geology*, 41, 867–870.

Anexos

Anexo A: Descripción de muestras

Tabla A - 1. Descripción macroscópica de muestra CS01.

			
ID Memoria	CS01		
Nombre	Intrusivo Este (“Brecha de Turmalina”)		
Coordenadas (WGS84 UTM Zona 19S)	Este	366885.863	
	Norte	7001345.397	
	Z	1190.4	
Descripción	Textura	Fanerítica, grano fino – medio	
	Mineralogía primaria	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, anfíboles (máficos en menor cantidad)	
	Mineralogía alteración	Actinolita, sericita, cuarzo, turmalina	
	Mineralización	Sulfuros (pirita y calcopirita), óxidos de Fe (Hematita, Jarosita, Goethita)	
Tipo de roca	Granodiorita c/ alteración supérgena pervasiva		

Descripción general: Roca intrusiva en su mayoría con una textura parcial a totalmente obliterada. Las muestras presentan en su mayoría un color rosado gradando a rojizo, y son atravesadas o delimitadas por vetas de cuarzo y en casos turmalina. La roca parece tener composición granodiorítica, con fenocristales de cuarzo (3–4 mm), plagioclasa, anfíbol. La muestra ha sufrido una alteración del tipo supérgena, presentando principalmente hematita (lo que le da el color rojizo), jarosita (asociada a vetillas de cuarzo) y goethita, estas principalmente en vetillas y zonas de fractura. Además, presenta zonas con menor alteración donde se reconocen sulfuros en gran cantidad (5–10%) predominando la pirita con menor presencia de calcopirita. La muestra no posee magnetismo por lo que se intuye que hay presenta de magnetita en ella.

Tabla A - 2. Descripción macroscópica de muestra RAMPA3.

		
ID Memoria	RAMPA3	
Nombre	Intrusivo Oeste	
Coordenadas (WGS84 UTM Zona 19S)	Este	365256.833
	Norte	7000554.986
	Z	--
Descripción	Textura	Fanerítica, de grano fino
	Mineralogía primaria	Cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, minerales máficos (hornblenda).
	Mineralogía alteración	Epidota, clorita, máficos alterados.
	Mineralización	No se observa a simple vista, pero la vetilla presenta leve magnetismo por lo que se estima la presencia de magnetita.
	Estructuras	Vetas de cuarzo.
Nombre	Monozodiorita o diorita/gabro de hornblenda y biotita.	

Descripción general: Roca intrusiva de textura fanerítica, presenta un color oscuro y granos finos (cercano a 1-2mm). A simple vista no se observa mineralización y posee un leve magnetismo en cristales intercrecidos en la veta de cuarzo. Presenta como mineralogía primaria: cuarzo, plagioclasa, minerales máficos. Como alteración se observa un poco de epidota, clorita y posiblemente minerales máficos siendo alterados. Parte de esta muestra comprende un macizo de cuarzo, probablemente perteneciente a alguna veta. Posee un color lila leve hacia blanco, y minerales máficos intercrecidos en ella. Algunos de los minerales oscuros presentan leve magnetismo. Probablemente corresponde a una monzodiorita o diorita/gabro.

Tabla A - 3. Descripción macroscópica de muestra CS04.

		
ID Memoria	CS04	
Sondaje	CTA0412	
Desde (m) – Hasta (m)	239.00–239.30	
Nombre	Intrusivo porfídico (ubicado en profundidad de sector Cata Alfaro)	
Coordenadas (WGS84 UTM Zona 19S)	Este	366650.795
	Norte	7001957.951
	Z	1040,8
Descripción	Textura	Porfídica
	Mineralogía primaria	Plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíbol.
	Mineralogía alteración	Epidota, albita, actinolita y clorita.
	Mineralización	Magnetita, Pirita, Calcopirita.
	Estructuras	Vetillas de albita (1–2 mm espesor), cuarzo, epidota y sulfuros, presentan halos de alteración con presencia de magnetismo, probablemente magnetita.
Tipo de roca	Pórfido monzodiorítico de biotita y anfíbol	

Descripción general: Roca ígnea intrusiva de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa (probablemente albitizados), cuarzo, biotita y anfíboles (probablemente con alterados a actinolita y biotita, clorita). Presencia de minerales de alteración como epidota, albita, actinolita y clorita. Presencia de vetillas de albita-cuarzo-epidota-sulfuros, con halos de alteración que presentan magnetismo, por lo que se intuye la presencia de magnetita en ellos. La principal mineralización presente es pirita y calcopirita, con magnetita asociada solo a las vetillas. Fenocristales de tamaño milimétrico, que llegan a hasta 1 cm de tamaño máximo en una masa fundamental grisáceo, compuesta principalmente de cuarzo, albita, minerales máficos y magnetita, pirita, calcopirita.

Anexo B: Datación U-Pb en circón

B.1. Diagramas de Concordia y Tera-Wasserburg

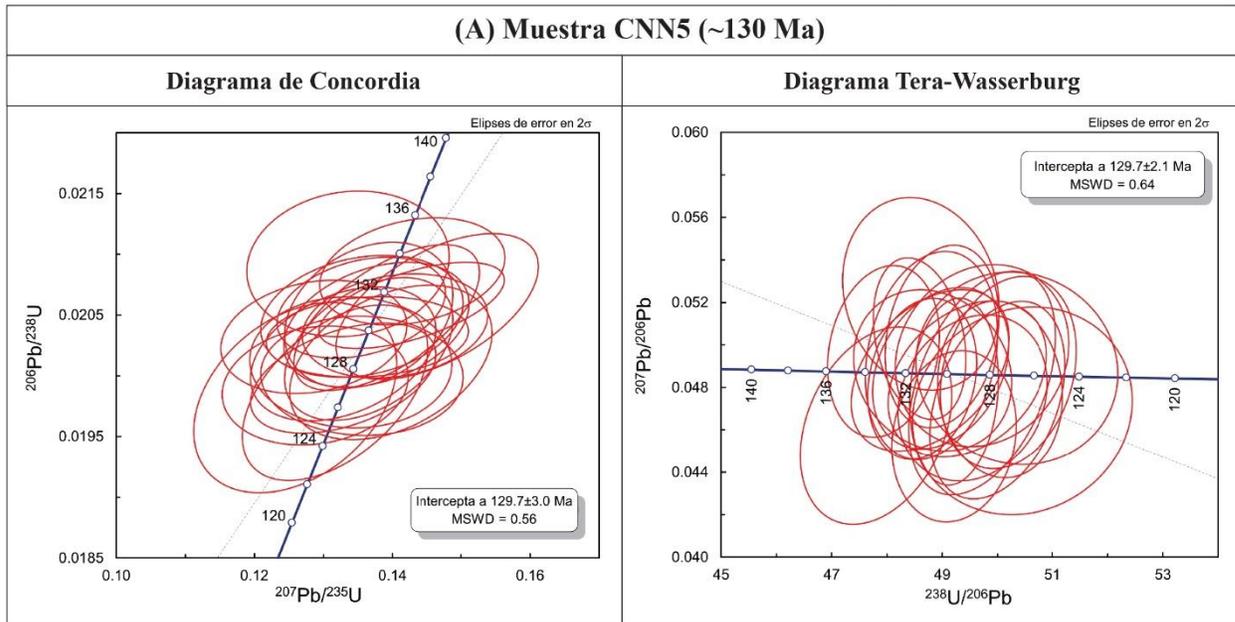


Figura B - 1. Diagramas de concordia y Tera-Wasserburg para muestra CNN5.

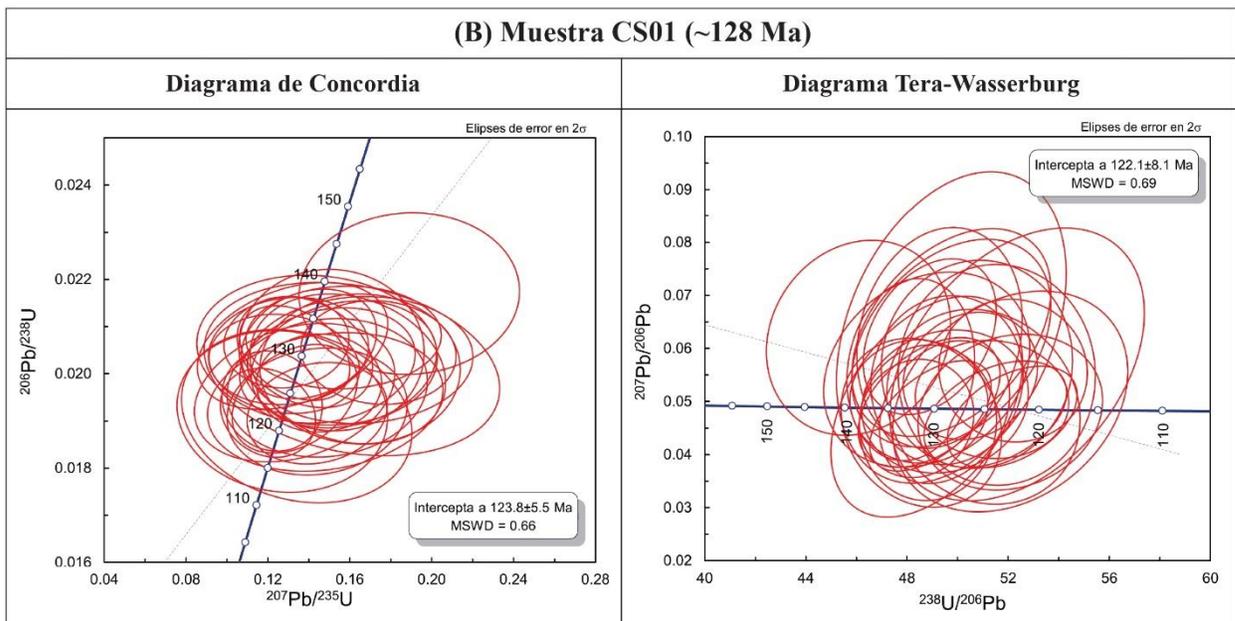


Figura B - 2. Diagramas de concordia y Tera-Wasserburg para muestra CS01.

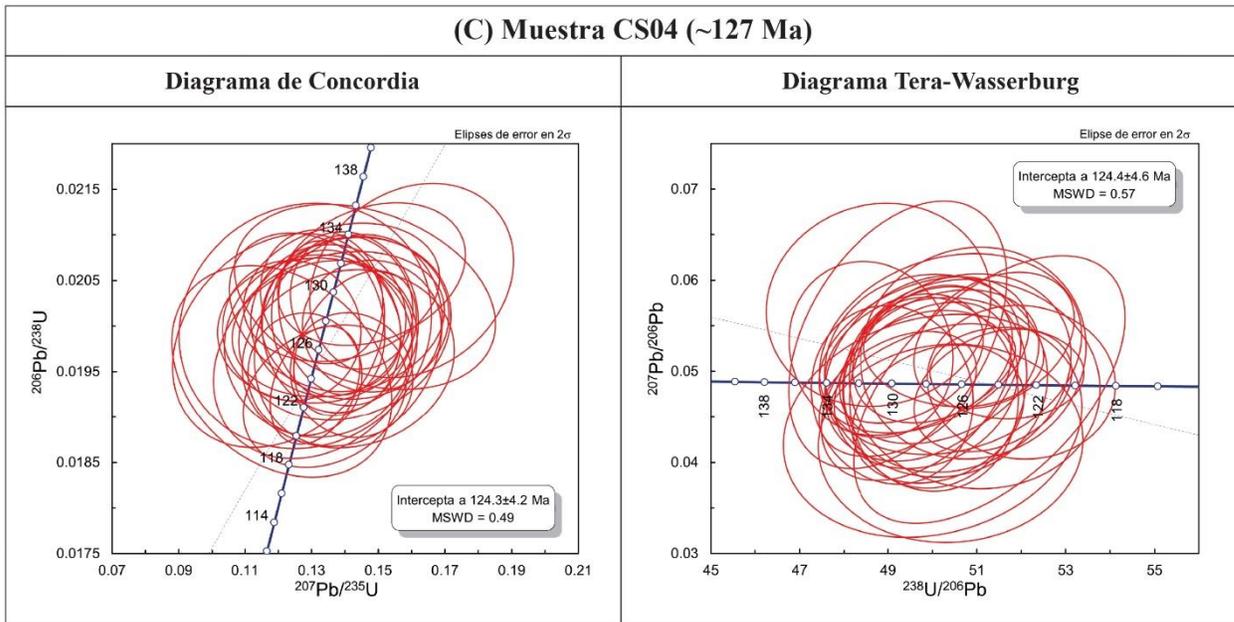


Figura B - 3. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra CS04.

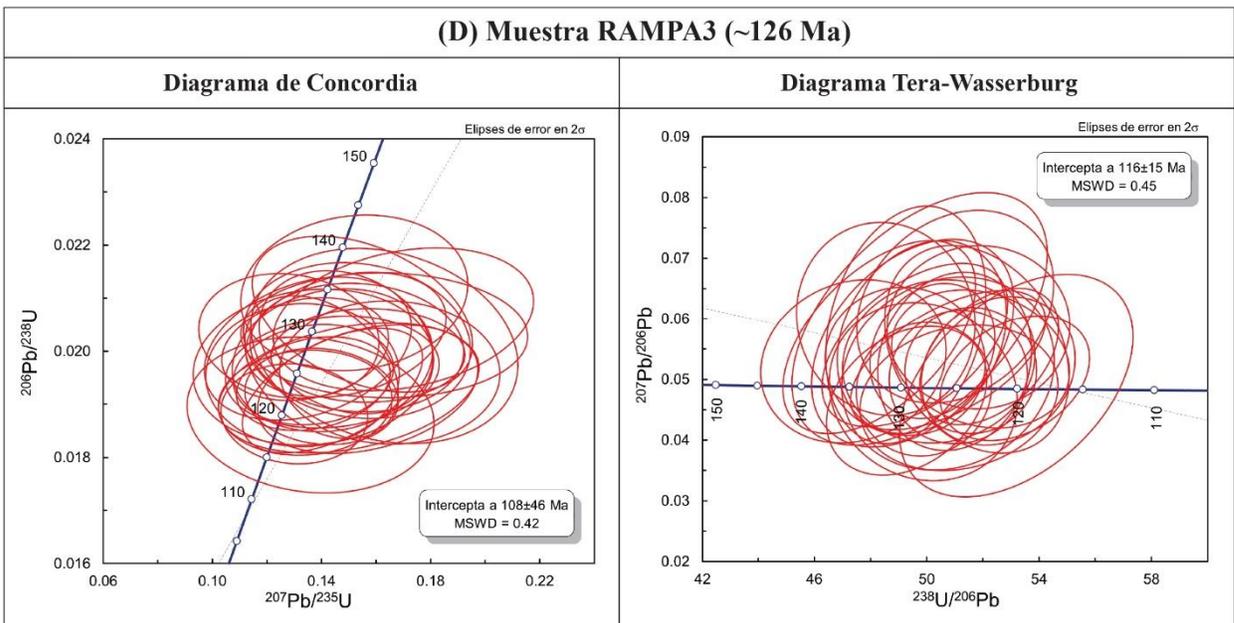


Figura B - 4. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra RAMPA3.

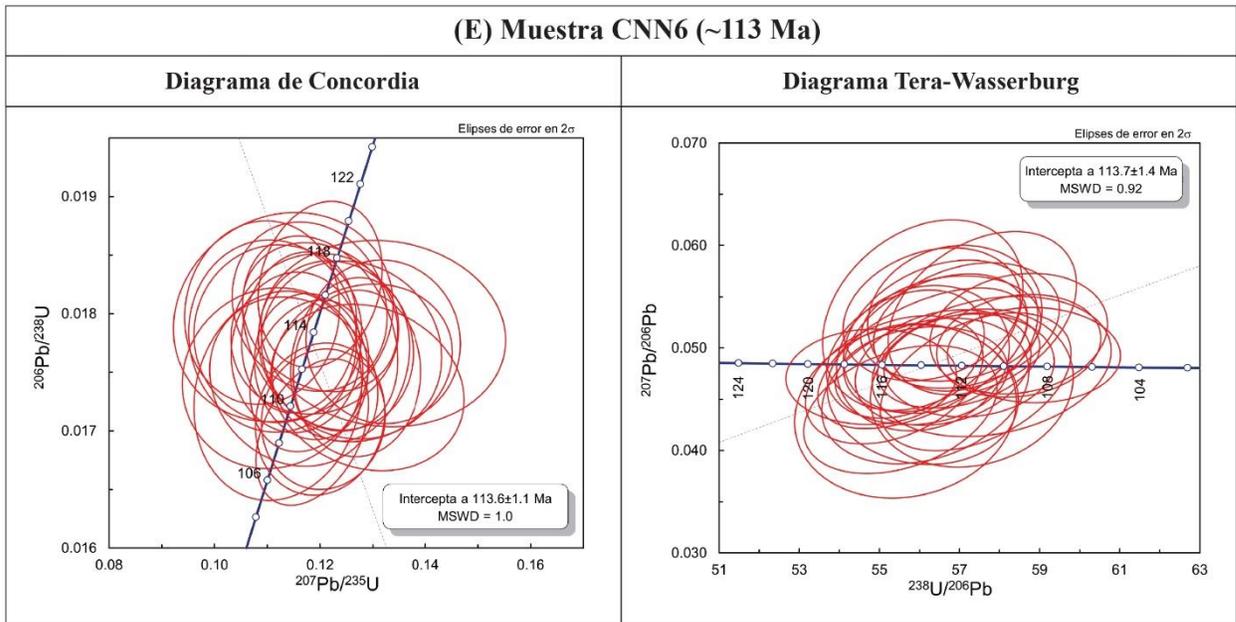


Figura B - 5. Diagramas de concordia y Tera–Wasserburg para muestra CNN6.

B.2. Resultados análisis LA-ICP-MS

Tabla B - 1. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CNN5.

Muestra Circón	Radios Isotópicos						Correlación de errores		Edades U-Pb (Ma)					
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2σ	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	2σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}}$	$\frac{^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}}{^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2σ
X_CNN5_1	0.1377	0.011	0.02042	0.00042	48.9716	1.007251	0.0489	0.0031	0.33616	0.29197	130.9	9.5	130.3	2.7
X_CNN5_4	0.134	0.012	0.02011	0.00044	49.7265	1.087999	0.0482	0.0043	-0.033047	0.41848	127.4	11	128.3	2.8
X_CNN5_5	0.1329	0.011	0.01998	0.00037	50.05005	0.9268528	0.0479	0.0034	0.43581	-0.077056	126.6	10	127.5	2.4
X_CNN5_6	0.1286	0.011	0.02032	0.00038	49.2126	0.9203143	0.0457	0.0033	0.20344	0.12607	122.7	9.6	129.7	2.4
X_CNN5_7	0.1356	0.012	0.02	0.0004	50	1	0.0474	0.0038	-0.028623	0.35518	128.9	10	127.6	2.5
X_CNN5_8	0.1288	0.011	0.01992	0.0004	50.2008	1.008048	0.0487	0.0037	0.15001	0.22264	124.4	11	127.2	2.6
X_CNN5_9	0.1429	0.011	0.02086	0.00036	47.93864	0.8273207	0.0497	0.0033	0.25614	0.17772	135.5	10	133.1	2.2
X_CNN5_10	0.1392	0.011	0.02048	0.00049	48.82812	1.168251	0.0488	0.0031	0.61811	-0.15361	132.2	10	130.7	3.1
X_CNN5_12	0.1366	0.01	0.0205	0.00049	48.78049	1.165973	0.0488	0.0031	0.27845	0.40424	129.9	9.4	130.8	3.1
X_CNN5_13	0.1356	0.012	0.02049	0.00041	48.80429	0.9765623	0.0495	0.004	0.21793	0.21026	128.9	11	130.8	2.6
X_CNN5_15	0.1364	0.012	0.02032	0.00027	49.2126	0.6539076	0.0478	0.0036	0.14035	0.12491	129.7	11	129.7	1.7
X_CNN5_19	0.1259	0.012	0.01982	0.00064	50.45409	1.629194	0.0469	0.004	0.3546	0.098936	120.2	11	126.5	4
X_CNN5_21	0.1465	0.012	0.02057	0.00049	48.61449	1.15805	0.0524	0.0037	0.54831	-0.13843	138.7	11	131.3	3.1
X_CNN5_22	0.1366	0.01	0.02022	0.00048	49.45598	1.174029	0.0484	0.003	0.41715	0.31175	130	9.1	129	3
X_CNN5_23	0.1329	0.011	0.02018	0.00045	49.55401	1.10502	0.0475	0.0032	0.36383	0.17836	126.6	9.6	128.8	2.8
X_CNN5_24	0.1336	0.012	0.02092	0.00049	47.80115	1.119625	0.0462	0.0038	0.10318	0.30546	127.2	11	133.4	3.1
X_CNN5_25	0.1355	0.01	0.02056	0.00034	48.63813	0.8043271	0.0484	0.0031	0.30747	0.20156	128.9	9.3	131.2	2.1
X_CNN5_26	0.1398	0.012	0.02011	0.00052	49.7265	1.285817	0.0495	0.0035	0.38378	0.13362	132.7	11	128.3	3.3
X_CNN5_28	0.1404	0.011	0.02041	0.00035	48.99559	0.8401988	0.0504	0.0035	0.20273	0.21036	133.3	10	130.3	2.2
X_CNN5_29	0.1428	0.011	0.02058	0.00029	48.59086	0.6847109	0.0503	0.0031	0.59015	-0.2589	135.4	9.6	131.3	1.8
X_CNN5_30	0.1317	0.011	0.01986	0.00059	50.35247	1.495869	0.0489	0.0037	0.49991	-0.058993	125.5	10	126.8	3.7

Tabla B - 2. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CS01.

Muestra Circón	Radios Isotópicos								Correlación de errores		Edades U-Pb (Ma)			
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}}$	$\frac{^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}}{^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2 σ
X_CS01_0	0.144	0.036	0.0192	0.0011	52.08333	2.983941	0.048	0.012	0.10945	0.14905	131	32	122.5	6.9
X_CS01_1	0.157	0.039	0.02077	0.00089	48.14636	2.063084	0.056	0.014	0.042252	0.11845	143	33	132.5	5.6
X_CS01_2	0.127	0.042	0.0192	0.0014	52.08333	3.797743	0.05	0.017	-0.073518	0.27156	115	38	122.6	8.6
X_CS01_3	0.133	0.022	0.02044	0.00082	48.92368	1.962692	0.0473	0.0085	-0.33923	0.54209	125	20	130.4	5.2
X_CS01_4	0.148	0.047	0.0194	0.0012	51.54639	3.188437	0.055	0.017	0.17924	-0.0072975	132	40	123.9	7.7
X_CS01_5	0.138	0.027	0.02046	0.00096	48.87586	2.293295	0.0498	0.01	-0.27059	0.44553	129	24	130.5	6.1
X_CS01_6	0.161	0.059	0.0201	0.0015	49.75124	3.712779	0.064	0.024	-0.22467	0.34427	145	51	128.1	9.4
X_CS01_7	0.129	0.025	0.02067	0.00079	48.37929	1.849039	0.0468	0.0091	0.066586	0.071173	122	23	131.9	5
X_CS01_8	0.128	0.03	0.02021	0.00086	49.48046	2.105551	0.048	0.011	-0.12313	0.24311	119	26	129	5.4
X_CS01_9	0.174	0.031	0.02045	0.0009	48.89976	2.152067	0.0622	0.012	-0.072517	0.33688	161	27	130.5	5.7
X_CS01_10	0.149	0.04	0.0197	0.0012	50.76142	3.092066	0.057	0.016	0.098073	0.034457	136	35	125.9	7.4
X_CS01_11	0.122	0.02	0.01942	0.00087	51.49331	2.306858	0.0476	0.0082	-0.10375	0.40475	116	18	124	5.5
X_CS01_13	0.151	0.037	0.0205	0.0014	48.78049	3.33135	0.056	0.015	-0.022487	0.22674	139	33	130.9	9
X_CS01_14	0.144	0.028	0.01916	0.00088	52.19207	2.39713	0.0558	0.011	0.15484	-0.034331	135	25	122.3	5.5
X_CS01_15	0.133	0.025	0.01947	0.00094	51.36107	2.479682	0.0504	0.0091	0.33812	-0.048853	125	22	124.3	6
X_CS01_16	0.145	0.025	0.0198	0.00085	50.50505	2.168146	0.0548	0.0098	0.011002	0.13777	137	22	126.4	5.4
X_CS01_17	0.165	0.04	0.0201	0.0013	49.75124	3.217742	0.063	0.016	-0.0077727	0.40756	151	34	128.5	8.3
X_CS01_18	0.133	0.04	0.0196	0.0012	51.02041	3.123698	0.049	0.015	0.27178	-0.126	123	35	125.1	7.8
X_CS01_20	0.159	0.039	0.0201	0.0013	49.75124	3.217742	0.061	0.016	-0.18846	0.35712	147	34	128.2	7.9
X_CS01_21	0.157	0.037	0.0202	0.0011	49.50495	2.695814	0.05	0.011	0.18012	0.12363	144	32	128.9	7.2
X_CS01_22	0.149	0.035	0.02017	0.001	49.57858	2.458036	0.054	0.013	0.19552	0.059876	137	30	130.2	7.1
X_CS01_23	0.132	0.038	0.02059	0.0011	48.56727	2.594657	0.046	0.013	0.34208	-0.15416	120	34	131.4	6.9
X_CS01_24	0.134	0.046	0.0191	0.0015	52.35602	4.111729	0.057	0.021	-0.19449	0.37706	122	40	121.7	9.4
X_CS01_25	0.189	0.044	0.0217	0.0014	46.08295	2.973094	0.062	0.015	0.03018	0.1417	169	38	138.3	9
X_CS01_26	0.13	0.032	0.02048	0.00093	48.82812	2.217293	0.046	0.012	0.10349	0.031001	120	29	130.7	5.8
X_CS01_27	0.12	0.019	0.01917	0.00077	52.16484	2.095301	0.0471	0.0078	-0.1741	0.43669	114	17	122.4	4.9
X_CS01_29	0.165	0.045	0.02029	0.0011	49.28536	2.671952	0.062	0.017	0.053137	0.16456	149	39	129.4	6.7
X_CS01_30	0.144	0.048	0.0205	0.0013	48.78049	3.093397	0.049	0.017	-0.090074	0.41158	130	41	131.1	8.4
X_CS01_32	0.14	0.027	0.02063	0.00095	48.4731	2.232159	0.05	0.0095	0.22317	-0.024628	131	23	131.6	6

Tabla B - 3. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CS04.

Muestra Circón	Radios Isotópicos								Correlación de errores		Edades U-Pb (Ma)			
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	2 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}}$	$\frac{^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}}{^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2 σ
X_CS04_0	0.134	0.02	0.01923	0.00064	52.00208	1.730698	0.0488	0.0069	0.23488	-0.041188	126	18	122.7	4
X_CS04_1	0.141	0.026	0.01964	0.0008	50.9165	2.073992	0.052	0.0095	0.09534	0.062451	132	22	125.4	5.1
X_CS04_2	0.136	0.017	0.01994	0.00073	50.15045	1.835999	0.0505	0.0069	-0.077481	0.28963	128	16	127.2	4.6
X_CS04_3	0.143	0.023	0.02009	0.00073	49.77601	1.808685	0.0503	0.0083	0.043023	0.26987	134	20	128.2	4.6
X_CS04_4	0.131	0.024	0.01995	0.00065	50.12531	1.633156	0.0483	0.0091	0.026489	0.1238	123	22	127.3	4.1
X_CS04_5	0.131	0.025	0.01963	0.00089	50.94244	2.309667	0.0486	0.0094	0.21584	-0.050116	122	22	125.3	5.6
X_CS04_6	0.132	0.023	0.01978	0.00082	50.55612	2.095855	0.0498	0.0089	0.01317	0.18302	125	20	126.3	5.2
X_CS04_7	0.133	0.015	0.02032	0.0006	49.2126	1.453128	0.0475	0.0056	-0.089828	0.39519	126	13	129.7	3.8
X_CS04_8	0.14	0.026	0.01997	0.00082	50.07511	2.056164	0.0495	0.0091	0.14502	-0.0068866	132	23	127.4	5.2
X_CS04_9	0.128	0.031	0.02	0.0011	50	2.75	0.044	0.01	0.083777	0.17231	118	27	127.7	7.2
X_CS04_10	0.142	0.015	0.02026	0.0006	49.35834	1.461748	0.0514	0.0058	-0.12127	0.31332	134	14	129.3	3.8
X_CS04_11	0.148	0.017	0.02	0.00059	50	1.475	0.0518	0.0061	-0.0037792	0.23418	140	15	127.6	3.7
X_CS04_12	0.16	0.025	0.0205	0.00087	48.78049	2.070196	0.0573	0.0091	0.20702	0.072131	149	22	130.8	5.5
X_CS04_13	0.136	0.013	0.02009	0.00069	49.77601	1.709579	0.0491	0.005	-0.21269	0.51966	132.1	9.6	128.2	4.4
X_CS04_14	0.148	0.023	0.02057	0.00064	48.61449	1.512556	0.0524	0.0079	0.26713	-0.097162	138	20	131.3	4
X_CS04_15	0.141	0.023	0.01984	0.00095	50.40323	2.413461	0.0519	0.009	0.17147	0.18729	132	20	126.6	6
X_CS04_16	0.139	0.024	0.02037	0.00062	49.0918	1.494203	0.0474	0.008	0.21103	-0.069718	131	21	130	3.9
X_CS04_17	0.146	0.032	0.02032	0.00083	49.2126	2.01016	0.054	0.012	-0.29479	0.4248	136	28	129.6	5.2
X_CS04_18	0.12	0.026	0.01984	0.00096	50.40323	2.438866	0.0421	0.0089	0.24498	0.035596	114	23	126.6	6.1
X_CS04_19	0.121	0.027	0.0195	0.00095	51.28205	2.498356	0.048	0.012	-0.27938	0.53986	114	24	124.5	6
X_CS04_20	0.14	0.018	0.02008	0.00078	49.8008	1.934493	0.0518	0.007	-0.04198	0.34426	132	16	128.2	4.9
X_CS04_21	0.131	0.011	0.01935	0.00053	51.67959	1.415513	0.0498	0.0041	0.32123	-0.0055554	125	10	123.5	3.3
X_CS04_22	0.128	0.014	0.01947	0.00055	51.36107	1.450878	0.0479	0.0055	-0.013238	0.30453	121	13	124.3	3.5
X_CS04_23	0.124	0.017	0.01995	0.00063	50.12531	1.582905	0.0453	0.0062	-0.023541	0.23092	117	15	127.3	4
X_CS04_24	0.131	0.021	0.02015	0.00071	49.62779	1.748672	0.0478	0.008	-0.28959	0.41376	123	19	128.6	4.5
X_CS04_25	0.135	0.019	0.02006	0.00068	49.85045	1.689846	0.048	0.0071	0.011967	0.2062	127	17	128	4.3
X_CS04_26	0.138	0.026	0.02002	0.00065	49.95005	1.621755	0.0475	0.0087	0.19471	-0.039008	129	23	127.8	4.1
X_CS04_27	0.143	0.015	0.01981	0.00065	50.47956	1.656321	0.0521	0.0049	0.3656	-0.075877	135	13	126.4	4.1
X_CS04_28	0.142	0.015	0.01946	0.00056	51.38746	1.478776	0.0534	0.0061	-0.068194	0.3166	134	14	124.3	3.5

Tabla B - 4. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra RAMPA3.

Muestra Circón	Radios Isotópicos								Correlación de errores		Edades U-Pb (Ma)			
	²⁰⁷ Pb ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb ²³⁸ U	2σ	²³⁸ U ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb ²⁰⁶ Pb	2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb ²³⁵ U	2σ	²⁰⁶ Pb ²³⁸ U	2σ
X_RAMPA3_0	0.128	0.027	0.02029	0.00096	49.28536	2.331885	0.0465	0.01	-0.11104	0.29644	120	24	129.5	6.1
X_RAMPA3_1	0.157	0.029	0.01992	0.00072	50.2008	1.814487	0.0547	0.0091	0.013846	0.19322	147	25	127.1	4.6
X_RAMPA3_2	0.157	0.033	0.01929	0.00099	51.84033	2.660546	0.0586	0.011	0.30465	0.019233	144	28	123.1	6.3
X_RAMPA3_3	0.153	0.032	0.02007	0.00099	49.82561	2.457766	0.057	0.013	-0.065012	0.23851	142	28	128.1	6.2
X_RAMPA3_4	0.149	0.03	0.02031	0.00096	49.23683	2.327295	0.053	0.01	0.2628	-0.028004	139	26	129.6	6.1
X_RAMPA3_5	0.17	0.039	0.0206	0.0011	48.54369	2.592139	0.06	0.013	0.25662	-0.057327	156	33	131.3	7.2
X_RAMPA3_6	0.133	0.029	0.01955	0.0011	51.1509	2.878055	0.047	0.0098	0.011266	0.16528	125	25	124.8	6.7
X_RAMPA3_7	0.14	0.023	0.01915	0.00074	52.21932	2.017875	0.0538	0.0092	-0.10619	0.4243	132	21	122.3	4.7
X_RAMPA3_8	0.144	0.03	0.01983	0.0011	50.42864	2.797353	0.053	0.011	0.13358	0.077576	134	26	126.6	6.7
X_RAMPA3_10	0.135	0.031	0.02005	0.0011	49.87531	2.736301	0.048	0.012	0.3028	-0.10645	126	27	128	6.6
X_RAMPA3_12	0.137	0.036	0.0197	0.0012	50.76142	3.092066	0.051	0.013	0.095133	0.13499	127	32	125.8	7.5
X_RAMPA3_13	0.155	0.033	0.0207	0.0012	48.30918	2.800532	0.057	0.013	-0.38722	0.53386	143	29	131.8	7.4
X_RAMPA3_14	0.144	0.032	0.01961	0.00086	50.99439	2.236368	0.053	0.012	0.14019	0.12306	134	29	125.2	5.4
X_RAMPA3_15	0.152	0.034	0.0211	0.0012	47.39336	2.695357	0.053	0.011	0.10774	0.13912	140	30	134.6	7.7
X_RAMPA3_16	0.134	0.026	0.01903	0.00081	52.54861	2.236698	0.0514	0.01	0.069651	0.16476	126	23	121.5	5.1
X_RAMPA3_17	0.149	0.026	0.02017	0.0011	49.57858	2.703839	0.0557	0.011	-0.21522	0.50996	139	23	128.7	6.7
X_RAMPA3_21	0.163	0.04	0.0201	0.0015	49.75124	3.712779	0.06	0.017	-0.19692	0.51369	151	35	128.4	9.4
X_RAMPA3_22	0.13	0.022	0.01882	0.00077	53.13496	2.17396	0.0502	0.0084	-0.061979	0.32217	123	19	120.2	4.9
X_RAMPA3_23	0.15	0.039	0.01931	0.001	51.78664	2.681856	0.055	0.014	0.30678	-0.27307	138	34	123.3	6.5
X_RAMPA3_25	0.137	0.024	0.01956	0.00077	51.12474	2.012579	0.0504	0.009	0.13456	0.044232	129	21	124.9	4.8
X_RAMPA3_26	0.144	0.027	0.01926	0.00096	51.92108	2.587967	0.0534	0.0093	0.5282	-0.19078	135	24	123	6.1
X_RAMPA3_27	0.136	0.037	0.0188	0.0012	53.19149	3.395201	0.049	0.015	-0.11587	0.43861	129	33	120	7.7
X_RAMPA3_29	0.153	0.034	0.0202	0.0012	49.50495	2.940888	0.056	0.014	-0.11802	0.39588	143	30	128.8	7.4
X_RAMPA3_30	0.14	0.023	0.0197	0.0011	50.76142	2.834394	0.0532	0.0094	-0.35114	0.57094	132	21	125.6	6.9
X_RAMPA3_33	0.134	0.025	0.02004	0.00079	49.9002	1.967124	0.0484	0.009	0.21061	0.049268	126	22	127.9	5
X_RAMPA3_34	0.165	0.033	0.0196	0.0011	51.02041	2.86339	0.062	0.013	-0.019947	0.2359	153	28	125.4	7
X_RAMPA3_35	0.163	0.043	0.0203	0.00096	49.26108	2.329588	0.059	0.016	-0.021331	0.25975	149	38	129.5	6
X_RAMPA3_36	0.137	0.023	0.01939	0.00072	51.57298	1.915036	0.0515	0.0085	0.23216	0.0067525	130	20	123.8	4.6

Tabla B - 5. Resultados datación U–Pb mediante LA-ICP-MS en circones muestra CNN6.

Muestra Circón	Radios Isotópicos								Correlación de errores		Edades U-Pb (Ma)			
	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2σ	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	2σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}}{^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}}$	$\frac{^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}}{^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2σ
CNN6_0	0.1183	0.0088	0.01755	0.00051	-0.071614	56.98006	1.655831	0.0488	0.0038	0.30035	113.2	8	112.2	3.3
CNN6_1	0.112	0.013	0.01783	0.00062	0.011013	56.08525	1.950244	0.0455	0.0056	-0.071565	106	12	113.9	3.9
CNN6_2	0.129	0.015	0.01737	0.00058	-0.15009	57.57052	1.922332	0.0534	0.0065	0.34822	122	13	111	3.7
CNN6_3	0.118	0.012	0.01806	0.00059	-0.12118	55.37099	1.808908	0.0469	0.0051	0.36545	114	11	115.4	3.7
CNN6_4	0.118	0.0092	0.01747	0.00053	0.20763	57.24098	1.736561	0.0483	0.0041	0.080377	112.8	8.4	111.6	3.4
CNN6_5	0.12	0.01	0.0171	0.00053	0.097598	58.47953	1.812524	0.0514	0.0048	0.15564	115	9.4	109.3	3.3
CNN6_6	0.113	0.017	0.01797	0.00073	0.11219	55.6483	2.260616	0.0438	0.0069	0.12134	107	16	114.8	4.6
CNN6_7	0.12	0.012	0.01797	0.00052	-0.18747	55.6483	1.610301	0.0494	0.0051	0.30759	116	11	114.8	3.3
CNN6_8	0.112	0.013	0.0173	0.00073	0.11054	57.80347	2.439106	0.0482	0.0056	0.22429	108	12	110.6	4.7
CNN6_10	0.126	0.014	0.01769	0.00062	-0.085824	56.52911	1.981235	0.0511	0.0061	0.29067	120	12	113	3.9
CNN6_11	0.12	0.012	0.01783	0.00068	-0.27579	56.08525	2.138978	0.049	0.0056	0.54809	115	11	113.9	4.3
CNN6_12	0.123	0.012	0.01773	0.00059	-0.088172	56.40158	1.876872	0.0505	0.0055	0.37525	119	12	113.3	3.7
CNN6_13	0.1257	0.0092	0.01761	0.00057	0.15408	56.78592	1.838045	0.0519	0.0042	0.15226	121.3	8.7	112.6	3.6
CNN6_14	0.111	0.014	0.01745	0.00063	0.06462	57.30659	2.068949	0.0461	0.0063	0.13818	108	12	112	3.9
CNN6_15	0.115	0.013	0.01742	0.00059	-0.1388	57.40528	1.944266	0.0467	0.0055	0.4172	109	11	111.3	3.8
CNN6_16	0.1185	0.0087	0.01699	0.00051	0.38403	58.85815	1.766784	0.0493	0.0038	-0.01277	113.4	7.9	108.6	3.3
CNN6_17	0.119	0.013	0.01783	0.00056	0.060475	56.08525	1.761511	0.049	0.0058	0.14281	113	12	113.9	3.5
CNN6_19	0.132	0.012	0.01776	0.00057	-0.023223	56.30631	1.807128	0.0533	0.0053	0.23265	126	11	113.5	3.6
CNN6_20	0.128	0.014	0.01758	0.00055	0.13347	56.88282	1.77961	0.0529	0.0058	0.10175	121	12	112.3	3.5
CNN6_21	0.116	0.0089	0.01784	0.00056	0.12365	56.05381	1.759537	0.0473	0.0039	0.15644	111.1	8.1	114	3.5
CNN6_22	0.1154	0.01	0.01767	0.00056	0.026517	56.5931	1.793556	0.0481	0.0046	0.23582	110.4	9.5	112.9	3.6
CNN6_23	0.109	0.012	0.01801	0.00064	0.054114	55.52471	1.973116	0.044	0.0051	0.34408	104	11	115	4.1
CNN6_25	0.1206	0.0096	0.0171	0.00049	0.05291	58.47953	1.675729	0.0502	0.0041	0.15074	115.3	8.6	109.3	3.1
CNN6_26	0.111	0.013	0.01781	0.00067	-0.039229	56.14823	2.112258	0.0458	0.0058	0.27397	106	12	113.8	4.2
CNN6_27	0.132	0.019	0.01783	0.00065	-0.072277	56.08525	2.044611	0.0532	0.0076	0.29053	124	17	113.9	4.1
CNN6_28	0.12	0.0096	0.01825	0.00058	0.18291	54.79452	1.741415	0.0472	0.0038	0.041767	114.6	8.7	116.6	3.7
CNN6_29	0.127	0.0099	0.01749	0.00058	0.020065	57.17553	1.896044	0.0522	0.005	0.26778	122.7	9.3	111.8	3.6

Anexo C: Elementos traza en circones

Tabla C - 1. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CNN5.

	P31	Ti49	Y89	Zr90	Nb93	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu153	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er166	Yb172	Lu175	Hf178	Pb204	Pb206	Pb207	Pb208	Th232	U235	U238
X_CNN5_0	194	5.56	1585	353000	2.16	B-LOD	23.52	0.117	2.64	6.73	0.531	33.3	11.61	139.9	53.4	244	476	86.7	10270	1.7	117.6	5.94	12.63	1329	5190	1568
X_CNN5_3	170	6.02	1088	321000	1.71	0.03	16.37	0.049	1.11	3.21	0.289	19.2	6.77	86.8	34.18	150.8	312.8	58.2	8250	2.3	63	3.06	6.16	603	2645	891
X_CNN5_4	214	3.4	1068	347000	2.51	B-LOD	21.67	0.025	1.18	2.86	0.208	18.58	6.76	82.7	33.82	160.6	361	70.3	11110	1.31	130.3	7.14	7.01	700	5960	1725
X_CNN5_5	250	7.3	2111	332000	1.67	0.126	25.8	0.314	5.74	11.67	1	50	16.05	185.2	69	308.1	578	105.3	8190	0.98	120.4	6.15	16.5	1559	5500	1584
X_CNN5_6	305	7.4	2370	320000	2.5	0.109	32.04	0.427	7.01	11.9	1.07	56.3	18.53	216.1	79.6	352.8	659	119.5	7690	1.8	142.8	7.19	19.91	1948	6470	1866
X_CNN5_7	279	6.63	1444	352000	3.05	0.026	30.57	0.139	2.23	5.33	0.351	28	9.92	120.9	46.9	223.1	454	82.8	9040	0.65	135.9	7.18	13.79	1405	6440	1837
X_CNN5_8	234	7.4	1577	353000	2.2	0.081	25.6	0.22	3.88	7.16	0.63	36.5	11.51	137.8	51.7	234.3	451	84.3	9630	1.5	95.3	5.33	10.83	1180	4360	1420
X_CNN5_9	287	6.4	2530	326000	2.13	0.021	32.9	0.373	6.52	12.4	1.06	59.1	19.31	229.4	87.4	387	735	134.4	8110	1.2	201.4	10.36	22.8	2063	8820	2480
X_CNN5_10	270	8.1	2090	347000	2.54	0.129	32.9	0.364	6.05	10.02	1.04	49.8	16.94	199.1	76.2	334	637	112.6	8130	B-LOD	153.4	7.86	20.1	1820	6690	1890
X_CNN5_11	245	6.4	1124	340000	2.32	B-LOD	20.82	0.122	1.33	4.05	0.213	21.1	7.23	91.6	35.5	160.3	336	64.1	7730	1.7	97.3	5.02	10.05	966	4120	1265
X_CNN5_13	266	7.9	1582	334000	3.35	0.0031	30.1	0.126	2.59	5.77	0.543	31	10.62	129.8	50	225	463	84	7890	0.35	136.5	7.23	16.81	1636	5840	1714
X_CNN5_14	197	6	1047	350000	2.4	B-LOD	19.9	0.079	1.39	3.62	0.276	21.5	7.15	85.5	33.4	152.3	326	59.5	8560	B-LOD	89.8	4.57	8.54	849	4070	1216
X_CNN5_15	294	5.58	2357	348000	2.17	0.02	29.11	0.284	4.97	10.69	0.683	50.9	16.62	198.6	76.1	367	669	126.5	9970	1.25	160.8	8.71	20.2	2081	7560	2226
X_CNN5_16	209	5.6	1168	353000	1.88	B-LOD	21.35	0.045	1.07	3.05	0.226	21.7	7.61	94.3	38.2	183.8	340.5	67.4	10310	1.01	82.4	4.87	8.29	932	3860	1353
X_CNN5_18	288	9.3	1425	340000	3.37	0.107	28.3	0.197	2.93	4.62	0.52	27	9.33	115.2	42.6	213	373	71.2	8160	0.66	92.5	5.31	12.55	1353	4290	1386
X_CNN5_19	341	9.8	1467	342000	3.05	B-LOD	23.22	0.166	2.38	5.98	0.296	28.4	9.83	118.3	44.4	218.3	411	81.3	8380	1.3	95.2	5.39	12.59	1372	4440	1394
X_CNN5_21	243	6.7	1230	351000	2.75	B-LOD	24.7	0.101	1.71	4.3	0.326	23	8.03	95.6	38.4	192.2	382	73	9010	1.17	98	6.01	9.35	1082	4710	1435
X_CNN5_22	401	7.8	1811	324000	3.78	0.075	33.9	0.242	3.51	7.63	0.57	34.1	11.86	145.1	55.8	273	502	95.8	7300	0.81	149	8.27	23.7	2370	6990	2090
X_CNN5_23	448	8.7	3257	325000	3.14	0.107	45.6	0.74	11.45	19.1	1.48	88.9	29.2	330	126.1	603	989	183.8	7450	B-LOD	228.7	12.57	39.2	3790	10590	3100
X_CNN5_24	387	7.3	1881	325000	3.52	0.024	34.47	0.098	3.03	7.33	0.389	35.3	12.37	150.2	56.7	276.6	504	97.4	7400	0.93	151.3	8.18	21.92	2248	6840	2025
X_CNN5_25	315	6.92	1579	349000	3.06	B-LOD	31.98	0.137	2.56	5.79	0.428	30.4	10.87	131.7	51.2	243.7	474	90.6	8500	1.84	140.1	7.59	15.73	1686	6290	1899
X_CNN5_26	259	5.36	1990	333000	1.51	B-LOD	26.33	0.114	2.57	7.44	0.45	40	14.25	167.6	65.1	296	547	103.1	10060	1.5	125.4	6.91	12.04	1260	5450	1689
X_CNN5_27	261	7	1207	335000	2.29	0.049	20.93	0.135	2.24	5.09	0.396	23	8.62	103.8	39.9	182.6	346	65.6	8670	1.15	84.1	4.56	9.93	1008	3720	1215
X_CNN5_28	273	6.5	1256	342000	2.6	0.012	25.16	0.074	1.53	3.89	0.218	22	8.25	100.9	39.7	188.1	365	72.5	10250	0.44	129.5	6.77	11.12	1183	5600	1771
X_CNN5_29	337	5.11	2672	340000	2.93	0.024	36.65	0.343	6.5	13.9	0.8	63	20.95	253.9	98.6	448	856	162.4	9760	1.51	218.1	11.91	21.39	2113	9510	2866
X_CNN5_30	266	8.2	1165	333000	2.04	0.036	22.53	0.12	2.4	4.63	0.424	22.9	8.17	97	36.8	172.9	338	66.3	9530	0.55	87.8	4.77	9.19	1017	3850	1310

Tabla C - 2. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CS01.

	P31	Ti49	Fe57	Y89	Zr90	Nb93	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu153	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er166	Yb172	Lu175	Hf178	Pb204	Pb206	Pb207	Pb208	Th232	U235	U238
X_CS01_0	247	18.2	15	1087	471000000	0.68	0.00001678	6.3	0.044	1.41	3.33	0.66	21.3	7.59	92.4	35.3	162.6	317	64.1	10150	0.94	3.8	0.194	0.65	46.7	174	52.7
X_CS01_1	260	9.7	1	854	425000000	1.06	0.00002335	9.24	0.042	0.6	1.62	0.29	12.6	4.87	64.2	28	134.2	295.9	64.4	9570	1.7	8.88	0.6	0.9	72.6	340	108.8
X_CS01_2	263	10.3	4	739	451000000	0.71	0.00001529	4.09	0.062	0.66	1.9	0.4	11	4.47	57.3	24.26	120	258.7	57	8410	B-LOD	3.34	0.201	0.323	24.5	130	42.8
X_CS01_4	281	9.9	9	808	444000000	0.64	0.00001123	5.32	0.04	1.09	2.7	0.8	15.2	5.09	65.4	26.76	127.3	277.5	60.5	8560	2	3.42	0.199	0.378	30.57	141.7	45.7
X_CS01_6	259	9.7	B-LOD	667	432000000	0.64	0.000001742	4.3	0.046	0.63	1.72	0.268	10.4	3.97	54.1	22.66	106.1	223.3	50	8930	0.21	3.48	0.241	0.362	26.1	139	44.8
X_CS01_7	305	10.3	B-LOD	2262	470000000	1.06	0.000000463	13.81	0.195	4.82	8.51	1.53	45.1	15.36	189.3	74.8	336	626	123.5	10420	2.1	10.8	0.71	1.78	165.1	484	153.9
X_CS01_8	293	18.9	11	1626	432000000	0.65	B-LOD	7.46	0.12	1.86	5.01	0.96	33.9	11.26	142.6	55.2	246.9	464	92.8	9650	1.5	7.57	0.397	0.95	84.3	295	97.1
X_CS01_9	344	9.8	9.3	1243	451000000	1.6	0.0042	8.6	0.037	0.91	2.77	0.5	18.5	7.23	93	39.6	196.3	430	92.3	9750	0.61	10.39	0.68	1.15	90.1	411	137.2
X_CS01_10	236	10.1	B-LOD	1088	428000000	0.47	B-LOD	5.55	0.091	1.58	3.69	0.93	21.3	7.22	91.4	35.5	168.6	357.4	74.5	7990	2.1	4.43	0.285	0.63	50.7	172	59.4
X_CS01_12	271	11.2	B-LOD	1199	446000000	0.4	B-LOD	4.49	0.081	1.32	3.56	0.83	23.4	8.31	102.5	40.23	188.2	392	78.9	9090	B-LOD	4.81	0.33	0.6	49.8	204	66.1
X_CS01_13	307	16.3	2.4	977	455000000	0.45	B-LOD	6.73	0.099	1.96	3.66	0.6	18.5	6.73	84.1	32.01	145.5	288.8	56.7	10280	0.41	3.62	0.226	0.476	43.8	140	49.8
X_CS01_15	388	8.7	22	1789	413000000	1.57	0.018	12.8	0.091	1.69	4.6	0.77	29.4	11.63	151	60.1	284	587	122.7	8300	B-LOD	14.75	0.78	1.72	164.3	562	195.2
X_CS01_17	280	7.1	B-LOD	1235	449000000	0.52	B-LOD	5.68	0.078	1.53	3.56	0.72	21.9	8.28	101.2	41.7	194.6	396.3	80.9	9920	1.35	6.16	0.336	0.647	61.1	257	83.9
X_CS01_18	269	11.7	3	1282	442000000	0.6	B-LOD	5.03	0.085	1.83	4.11	1.07	25.4	8.62	110	43.2	199.6	398	81.2	8830	2.5	5.59	0.299	0.771	59.9	227	74
X_CS01_19	299	10.5	6.9	1636	448000000	1.17	0.058	13.01	0.09	1.91	4.54	0.92	26.7	10.36	133	53.8	254.9	536	106.2	11130	2	13.9	0.92	1.69	144.5	563	181.5
X_CS01_21	385	8.2	16	1272	426000000	0.46	B-LOD	6.11	0.063	1.71	4.1	0.86	22.2	8.21	106.3	42.8	197.2	386.8	79.2	9400	0.7	5.24	0.309	0.68	55.2	212	68.9
X_CS01_22	252	8.3	B-LOD	768	440000000	0.88	B-LOD	7.79	B-LOD	0.36	1.34	0.288	11.7	4.54	59.1	24.97	120.1	263	54.9	11670	0.98	7	0.411	0.589	52.8	273	89.1
X_CS01_23	257	13.9	4.8	882	451000000	0.5	B-LOD	6.15	0.082	1.52	2.72	0.71	18.5	6.27	74.1	30.1	134.4	268.3	54.2	9620	B-LOD	3.57	0.185	0.455	34.8	122	45
X_CS01_24	233	18.8	16	601.8	438000000	0.63	B-LOD	4.64	B-LOD	0.36	1.36	0.3	10.24	3.58	47.9	19.67	95.5	199.1	40.7	9330	1.4	2.7	0.163	0.315	24.86	120	36.72
X_CS01_25	312	15.1	32	916	439000000	0.67	0.081	5.51	0.11	1.45	2.55	0.57	16.8	6	75	30.39	139.4	280.9	57.7	8790	1.8	3.92	0.31	0.558	38.5	134	49.6
X_CS01_26	241	6.5	B-LOD	1318	435000000	0.52	B-LOD	5.84	0.062	1.65	4.47	0.81	24.4	9.24	111.2	44.3	203.6	392	79.8	9460	0.22	5.49	0.271	0.611	51	204	69.3
X_CS01_28	350	11.1	3	934	441000000	0.8	B-LOD	5.59	0.016	0.89	1.81	0.471	14.1	5.41	74.6	30.08	145.4	314.9	66.1	8720	0.8	4.7	0.235	0.427	36.6	183	59.9
X_CS01_29	257	10.5	1.2	653	436000000	0.75	0.0046	7.42	0.02	0.4	1.41	0.276	11	3.78	51.8	21.2	103.2	217.3	45.5	10100	1.4	4.55	0.286	0.55	39.6	171	59.5
X_CS01_30	316	11.3	B-LOD	1326	471000000	0.62	0.051	7.35	0.105	1.93	4.11	0.84	27.5	9.82	114.3	44.2	201.1	385	74.2	10400	0.9	4.47	0.292	0.609	58.8	195	67.1
X_CS01_31	309	8.5	B-LOD	861	431000000	0.88	B-LOD	5.23	0.024	0.46	1.64	0.49	13.1	5.13	63	27.6	140.1	313.6	69.4	8650	0.64	6.83	0.328	0.63	46.6	263	86.6
X_CS01_32	391	9.8	21	1568	433000000	0.8	B-LOD	6.89	0.08	2.07	4.62	0.99	29.6	9.91	131	51.1	242.2	486	100.9	8680	1.6	7.61	0.413	0.93	75.4	266	94.4

Tabla C - 3. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CS04.

	P31	Ti49	Fe57	Y89	Zr90	Nb93	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu153	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er166	Yb172	Lu175	Hf178	Pb204	Pb206	Pb207	Pb208	Th232	U235	U238
X_CS04_0	574	4.4	6.5	1435	381000	0.85	0.072	9.18	0.122	2.04	3.78	0.99	22.5	7.95	107	46.1	226	579	134.8	8100	0.9	10.4	0.58	1.11	100	383	128
X_CS04_1	325	4.3	0.5	974	399900	0.57	0.0044	5.68	0.073	1.23	2.91	0.74	15.3	5.58	71.9	32.4	160.9	409	96.2	9200	0.56	7.47	0.413	0.705	61.2	272	90
X_CS04_2	410	4.6	6.4	1071	400600	1.01	B-LOD	6.69	0.068	1.08	2.65	0.7	15.4	5.9	78.1	36	180.6	478	113.6	8790	0.43	8.63	0.449	0.8	66	321	103.6
X_CS04_3	322	3.9	1	790	402100	0.82	B-LOD	5.51	0.027	0.5	1.53	0.556	10.63	4.08	53.9	26.2	130.2	371	88.5	8830	0.5	6.23	0.316	0.462	41.2	247	77.8
X_CS04_4	548	4.47	5.2	1078	420500	1.44	B-LOD	10.36	0.196	1.22	1.99	0.63	13.6	5.38	74.8	35.8	180.1	487	114.6	9430	0.05	10.6	0.451	0.813	86.3	397	131.5
X_CS04_5	532	3.62	4.9	1134	392800	0.85	0.153	6.97	0.129	1.51	2.93	0.99	18	6.65	86.2	38.7	187.7	484	116.7	8870	B-LOD	9.09	0.433	0.761	73.7	313	107.3
X_CS04_6	465	4.8	B-LOD	1370	394000	1.41	B-LOD	9.93	0.073	1.37	2.67	1.04	19.6	7.31	97.8	47.1	227.1	601	142.9	8860	B-LOD	12.56	0.51	1.07	101.6	431	144.7
X_CS04_7	498	4.8		1139	399200	1.38	B-LOD	8.7	0.049	0.86	2.52	0.74	16.4	6.06	81.9	38.9	190	513	124.1	9040	0	12.62	0.549	1.15	104.1	440	142.5
X_CS04_8	557	4.91	3	1329	432100	1.96	B-LOD	11.82	0.02	0.81	1.94	0.84	16.1	6.91	93.2	45.5	224.5	577	138.2	9410	B-LOD	15.47	0.79	1.59	155.5	587	196.3
X_CS04_10	685	3.1	B-LOD	1212	390300	0.98	0.63	9.45	0.271	2.5	3.33	0.99	17.4	6.84	88.4	40.1	198.9	510	118.5	9360	B-LOD	10.38	0.57	1.02	93.2	404	129.8
X_CS04_11	472	5.7	2.7	1262	398300	1.69	B-LOD	9.22	0.067	0.89	2.52	0.75	15.8	6.43	86.4	41.9	201.7	540	127	8810	B-LOD	11.94	0.58	1.07	92	456	146.2
X_CS04_12	387	4.7	4.3	1425	396100	0.67	B-LOD	8.29	0.139	2.04	4.01	1.31	24.6	8.72	111.2	48.7	226.5	556	128.9	8430	B-LOD	10.35	0.6	1.05	94.2	394	124.8
X_CS04_13	625	4.04	5.7	1190	423900	2.05	1.3	13.95	0.49	2.61	2.2	0.593	15	5.89	83.7	38.4	200.2	536	125	9570	B-LOD	11.45	0.63	1.04	99.5	440	150.4
X_CS04_14	426	4.9	1.6	1044	393700	1.29	0.073	7.74	0.063	0.92	1.8	0.58	13.1	5.2	71.2	33.4	171.5	468	110.3	8800	B-LOD	9.24	0.431	0.73	62.8	338	112.6
X_CS04_15	271	4.44	B-LOD	763	433800	1.04	B-LOD	5.41	0.035	0.46	1.49	0.53	10.5	3.93	53.8	24	128.7	361	82.1	9560	1.3	6.35	0.326	0.454	37.8	250	83.2
X_CS04_16	286	3.78	B-LOD	967	402000	0.77	B-LOD	5.75	0.055	1.31	2.54	0.87	14.8	5.46	72.3	29.71	156.7	393	90.7	9070	B-LOD	6.64	0.382	0.652	54.9	265	88.2
X_CS04_17	240	5.52	B-LOD	1020	404400	1.23	B-LOD	8.02	0.05	1	2.16	0.73	12.9	5.15	71.1	32.1	168	443	101	9080	B-LOD	9.18	0.55	0.86	70.9	375	122.5
X_CS04_18	309	4.6	1	908	409400	1	B-LOD	5.99	0.042	0.51	2.01	0.63	11.3	4.53	63.8	28	149.4	401	91.5	9120	B-LOD	7.45	0.407	0.509	46.3	299	96.7
X_CS04_19	240	4.61	3	1031	404300	0.555	0.0043	5.57	0.082	1.27	3.57	0.98	16.4	6.41	82.2	33	163.5	395	85.5	8740	B-LOD	5.84	0.301	0.598	55.2	241	80.9
X_CS04_20	266	4.59	9	1202	398700	1.8	B-LOD	11.41	0.046	0.84	1.91	0.71	14.2	5.94	81.3	35.5	193.9	507	113.6	9190	1.4	11.9	0.681	1.11	100.4	485	157.5
X_CS04_22	306	4.72	B-LOD	1403	410200	1.99	B-LOD	10.75	0.066	1.21	2.31	0.8	18.2	7.16	98.3	44	236.3	593	133.9	9070	B-LOD	11.3	0.602	0.876	85	485	155.7
X_CS04_23	313	4.08	B-LOD	1093	401700	0.94	0.011	6.71	0.066	1.24	2.64	0.88	17.5	6.17	81.8	33.7	175.4	451	97.5	8850	0.14	7.78	0.398	0.782	70.4	325	104.5
X_CS04_24	328	5.4	2.3	1254	395400	1.4	0.01	10.03	0.054	1.18	2.62	0.82	17.3	6.55	91.3	38.7	204.1	523	114.2	8590	1.13	11.08	0.542	1.26	94.9	431	141.2
X_CS04_25	266	4.9	3.1	1265	412400	1.54	B-LOD	9.79	0.036	1.16	2.47	0.88	18	6.62	90.7	39.7	203.9	528	116.9	9340	B-LOD	10.77	0.568	0.933	86.3	440	145.3
X_CS04_26	163	4.37	2.8	737	418800	0.613	B-LOD	5.61	0.038	0.59	1.85	0.617	11.11	4.1	54.6	23	120.3	309	67.2	9620	0.79	5.25	0.284	0.489	38.9	220	73
X_CS04_27	321	5.74	11.4	1832	402800	1.39	0.016	11.52	0.16	2.41	5.34	1.41	30.7	11.24	144.7	58.6	292.1	695	150.5	8520	0.01	12.83	0.728	1.37	123	527	170
X_CS04_28	336	5.5	B-LOD	1573	435000	1.41	B-LOD	10.83	0.082	1.57	4.15	1.19	22.5	8.68	118.8	50.2	259.3	640	133.9	9540	0.34	11.46	0.72	1.16	108.1	477	159.7

Tabla C - 4. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra RAMPA3.

	P31	Ti49	Fe57	Y89	Zr90	Nb93	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu153	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er166	Yb172	Lu175	Hf178	Pb204	Pb206	Pb207	Pb208	Th232	U235	U238
X_RAMPA3_0	310	10.3	6	1161	434000	0.46	0.016	6.86	0.078	1.77	3.73	0.89	22.7	7.99	97.9	37.7	173.3	350.9	71.3	8510	1.3	5.46	0.295	0.645	54.6	179	66.7
X_RAMPA3_1	246	6.8	26	909	455000	1.59	0.000001636	10.15	0.056	0.8	2.24	0.28	17	5.78	73.7	29.8	133.7	287.9	55.7	11240	0.7	18.9	1.13	1.27	117	839	268.1
X_RAMPA3_2	264	10.6	11	824	426000	0.46	0.000001806	5.26	0.049	0.8	2.34	0.57	15	5.51	67.9	27.2	124.2	256.1	53.3	8790	1.5	4.47	0.302	0.439	38	176	55.2
X_RAMPA3_4	492	9.7	11	1404	426000	1.13	0.000001332	9.45	0.057	1.1	3.59	0.4	23.2	8.44	108.9	44.2	203.7	432	88.7	12380	0.8	8.33	0.455	1.46	119.7	331	105.7
X_RAMPA3_5	233	5.8	B-LOD	1100	420000	0.48	0.000000478	6.31	0.059	1.58	3.46	0.69	21.9	7.62	94.9	35.8	162.6	325	65.9	8750	1	6.04	0.386	0.7	54.8	226	74.4
X_RAMPA3_6	363	9.2	9	1351	428800	1.1	0.007	7.55	0.062	1.86	3.23	0.85	24.5	8.73	107	43.2	208.1	434	91	8440	B-LOD	8.67	0.436	1	81.9	372	112.7
X_RAMPA3_7	414	11.2	B-LOD	2480	428700	1.19	0.007	9.57	0.306	4.67	8.6	0.83	42	15.37	194.4	80	360	639	126	8780	1	14.2	0.86	1.93	172	565	189
X_RAMPA3_8	337	11.1	2	1209	433200	0.99	B-LOD	8.49	0.072	1.45	2.92	0.76	19.4	7.34	94.4	38.6	188.8	409	86.3	8670	1.8	8.24	0.496	0.718	72.9	329	105.5
X_RAMPA3_9	338	9.7	B-LOD	1311	423100	1.4	B-LOD	11.73	0.07	1.16	3.28	0.73	20	7.06	95.6	41.2	205.1	457	97.8	8390	2.4	9.97	0.5	1.04	94.9	392	129.6
X_RAMPA3_10	364	9.2	0	1220	413200	1.22	0.039	9.87	0.031	1.29	2.25	0.82	21.2	7.37	99.4	39.2	187	407	84.4	8670	1.1	11.7	0.64	1.17	94.1	434	147
X_RAMPA3_12	284	9.9	5	1087	444400	0.63	0.015	7.1	0.055	1.56	3.42	0.72	20.3	7.37	89.2	36	166.1	345	68.3	9460	1.2	6.09	0.36	0.659	59.5	239	81.7
X_RAMPA3_13	410	12.8	3.7	2253	449000	0.91	B-LOD	9.24	0.141	3.26	7.09	1.3	43.8	15.32	194.1	75.9	343	656	126.4	9400	0.35	9.85	0.57	1.41	130.2	408	132.7
X_RAMPA3_14	390	10.9	66	1319	429200	0.87	0.5	10.8	0.293	2.6	4.23	0.93	23.4	8.59	106.2	42.6	200.2	436	89.9	8720	2	8.45	0.46	0.94	85	354	110.8
X_RAMPA3_15	286	9.4	6	843	426100	0.78	0.195	6.62	0.085	1.14	2.01	0.258	13.9	5.38	68.6	27.7	131.4	269	53.6	10270	1.5	6.49	0.364	0.53	46.9	235	79.2
X_RAMPA3_16	318	10	B-LOD	2160	427900	0.97	0.032	10.24	0.249	3.71	6.6	1.52	43.3	15	187	74	338	651	131	8400	B-LOD	11.5	0.74	1.61	148	471	155
X_RAMPA3_17	348	11.1	9	845	450800	0.89	B-LOD	6.14	0.031	0.42	1.76	0.422	12.8	4.91	64.4	27.51	136.1	314.8	65.2	9270	1.9	5.6	0.295	0.45	39.9	222	73.7
X_RAMPA3_19	433	11.4	1	1547	442300	1.69	B-LOD	12.9	0.215	2.08	6.1	0.78	34.3	11.76	138.3	53.5	234.5	444	84.5	9500	1.2	11.87	0.66	1.44	140.9	522	157.3
X_RAMPA3_20	296	10.7	0.5	771	440400	0.81	0.026	5.7	0.053	0.97	2.57	0.57	13.7	5.07	64.1	26.5	125.7	262	54.4	9350	B-LOD	4.88	0.184	0.49	38.2	165	57.9
X_RAMPA3_21	282	10.5	8	923	412800	1.22	B-LOD	7.24	0.014	1.11	1.91	0.58	16.9	6.08	75.1	29.9	147.1	329	69.2	8120	B-LOD	7.37	0.41	0.682	61.6	259	92.8
X_RAMPA3_22	338	11.9	0	1070	454100	1.01	B-LOD	8.89	0.047	1.53	2.75	0.77	18.6	7.16	87.3	36.6	176.3	381	77	9440	B-LOD	8.19	0.45	0.94	78.3	338	112.1
X_RAMPA3_23	377	12.2	B-LOD	844	427900	0.64	B-LOD	4.86	0.039	0.99	2.03	0.57	13.8	5.4	68.8	28.15	137.9	286.7	60.6	8530	1.7	5.47	0.34	0.49	42.7	223	72.7
X_RAMPA3_25	322	9.9	B-LOD	1401	435900	0.99	0.08	7.95	0.168	2.1	3.85	0.83	25.6	8.87	113.3	47.2	223.9	431.9	88.1	9930	1.3	16.09	0.91	1.222	104.8	626	209.2
X_RAMPA3_26	522	10.9	40	1101	482200	1.17	0.29	9.16	0.094	1.14	3.79	0.63	20.3	6.74	85.4	36.1	177.9	388	81.7	10520	1.9	11.7	0.75	0.95	76.1	487	155
X_RAMPA3_27	278	10.1	24	927	456800	1.21	B-LOD	7.56	0.031	0.89	2.53	0.59	16.1	5.87	72.4	29.26	148.1	328	67.6	9650	1.3	7.52	0.406	0.68	59.9	298	100.1
X_RAMPA3_28	358	11	B-LOD	1375	465400	1.43	0.033	12.54	0.099	1.57	3.39	0.78	22.7	8.36	108.9	45.5	223.9	485	98.1	9480	0.51	11.08	0.57	1.13	106.9	418	140.6
X_RAMPA3_29	290	13.1	30	1298	464000	0.85	0.048	8.95	0.167	1.43	4.8	1.13	27	9.14	114.1	44.4	203	423	79.3	9540	1	6.67	0.44	0.97	86.9	308	96.8
X_RAMPA3_30	325	5.2	B-LOD	888	449000	0.96	0.23	8.78	0.112	0.86	1.37	0.299	14.7	5.06	68.8	28.8	144.5	329	66.7	11830	B-LOD	8.93	0.501	0.85	72.8	369	118.5
X_RAMPA3_31	308	10.1	6	1242	432400	0.85	B-LOD	7	0.091	1.83	4.46	0.96	23.5	8.31	104.4	41.2	201.4	400	82	8490	1.5	5.95	0.3	0.81	69.5	242	80.3
X_RAMPA3_33	373	11.9	4	1090	430100	1.08	0.18	12.31	0.115	1.75	3.05	0.58	17.2	6.8	84.6	35.7	176.7	384	80.9	8710	1.1	9.91	0.506	0.96	118	373	125.7
X_RAMPA3_34	334	11.2	2	1085	433700	0.78	B-LOD	7.22	0.051	1.52	3.21	0.76	19.5	6.97	88.6	36.5	172.8	358	73.9	8430	0.21	6.75	0.348	0.731	65.3	260	87.4
X_RAMPA3_35	313	11.4	B-LOD	1608	431400	0.66	B-LOD	6.23	0.16	2.62	4.85	0.93	30.6	11.03	137.5	55.5	255	469	94.6	8440	0.9	6.5	0.42	0.866	76.2	253	81.8

Tabla C - 5. Resultados de medición de elementos traza mediante LA-ICP-MS en circones de muestra CNN6.

	P31	Ti49	Y89	Zr90	Nb93	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu153	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er166	Yb172	Lu175	Hf178	Pb204	Pb206	Pb207	Pb208	Th232	U235	U238
X_CNN6_1	824	8.9	4519	361400	4.38	0.076	59.2	0.773	15.12	30.6	7.93	152.8	46.1	558	192.6	837	1564	290.5	6960	0.23	18.72	1	3.73	360.3	929	301.2
X_CNN6_3	774	7.9	4073	357800	3.73	0.079	51.9	0.776	13.6	27.5	7.97	131.9	41.1	502	170.3	755	1412	268.3	7060	0.2	18.09	0.95	3.42	326.6	868	279.9
X_CNN6_4	821	11.2	3614	360100	6.08	0.051	59.4	0.474	8.07	18.1	5.71	109.5	33.7	424	149.2	669	1297	250.6	7120	0.5	22.83	1.25	4.57	437.3	1129	372.4
X_CNN6_5	857	15	3580	355100	8.24	0.113	71.5	0.487	8.76	19.77	5.89	114.4	34.5	425	149.1	667	1277	251	7030	1.2	29.2	1.87	7.75	759	1440	477
X_CNN6_6	698	9.1	3946	362800	3.88	0.076	49.7	0.69	12.17	25.9	7.21	129.6	39.56	472	162.6	722	1386	263.1	6850	1.5	17.29	0.97	2.99	307.2	859	269
X_CNN6_7	766	15.7	3090	303000	6.32	0.135	57.7	0.46	7.3	16.5	4.65	90	27.4	319	113.6	502	946	184.5	6390	B-LOD	27	1.39	8.82	811	1265	413
X_CNN6_10	760	7.5	4822	356700	5.14	0.106	65.5	0.86	17	32	8.5	148.2	51	538	219.5	889	1717	334	6930	0.6	20.05	1.04	3.89	436	832	287.6
X_CNN6_11	626	9	4320	333000	5.03	0.055	57	0.594	12.68	26.4	6.34	121.9	43	452	187.3	747	1460	276	6000	B-LOD	18.1	0.97	3.24	386	756	262
X_CNN6_12	763	11.3	5090	323500	5.76	0.093	71.3	0.92	17.7	34.9	8.59	154.3	52.5	545	226.1	894	1694	332	6120	B-LOD	19.82	0.96	4.1	465	839	278
X_CNN6_14	749	8.2	5020	362100	5.75	0.061	69.6	0.754	14.3	31.5	7.93	146	52.1	542	231.1	915	1848	334.1	6850	0.23	21.03	1.1	4.03	474	926	315
X_CNN6_15	682	8.8	4620	350700	5.8	0.15	65.1	0.726	13.9	28.2	7.09	138.1	48.7	498	224.9	876	1713	338	7200	1.4	20.17	0.98	4.03	473	808	277.4
X_CNN6_16	751	12.5	3980	366000	8.02	0.053	70.8	0.508	10.75	22.6	6.47	113.6	40.4	430	195.4	772	1542	300.2	6740	1.3	27.5	1.42	5.96	733	1118	390.3
X_CNN6_17	669	10.4	4460	368900	5.12	0.079	60	0.81	15.6	29.6	7.98	138.9	48.6	506	222.2	855	1740	326	6690	B-LOD	19.6	1.07	3.63	433	829	286.5
X_CNN6_19	662	7.6	4368	350600	4.51	0.065	55.2	0.62	14.1	27.3	7.45	133.5	46.1	471	214.6	827	1651	323.8	7340	0.3	19.48	1.07	3.23	394	753	254
X_CNN6_20	642	7.7	4570	352100	4.79	0.054	58.8	0.693	14.6	27.8	7.53	136.7	47.7	503.5	219.9	871	1697	333.5	7340	0.2	19.5	0.97	3.63	415.8	798	267.6
X_CNN6_22	821	10.2	5560	345000	6.1	0.17	81.2	1.09	22.6	38.2	10.29	177.1	61.1	629	267.5	1065	2038	394	6730	0.5	22.47	1.02	5	539	940	318
X_CNN6_23	743	12.5	4040	326000	7.89	0.042	69.3	0.546	10.1	21.9	6.14	118.9	41.2	431	182.6	751	1483	281	6060	0	27.5	1.19	7.41	783	1154	384
X_CNN6_24	723	15.8	3223	331300	9.46	B-LOD	69.9	0.239	5.79	14.7	4.32	85.7	29.6	333	145.2	616	1277	248.3	6150	0.49	28.8	1.59	5.82	602	1139	389
X_CNN6_25	807	8.9	5363	346400	6.3	0.091	76.7	0.823	15.6	32	9.03	162.9	55.5	610	247.9	1031	1944	376.2	7320	0.9	23.95	1.27	4.72	542	1057	355
X_CNN6_26	804	12.9	5160	334000	5.83	0.09	71.5	1.12	19.9	35.7	9.94	166	54.1	575	231.1	950	1791	347	6170	B-LOD	21.5	1	4.89	509	901	311
X_CNN6_27	700	10.3	3773	332400	4.46	0.041	48.3	0.606	11.07	23.3	6.17	111.8	37.6	410	167.6	705	1374	262.1	6350	B-LOD	16.14	0.77	2.87	304	695	230.6
X_CNN6_28	870	13.4	5680	353100	7.05	0.178	86.6	0.915	17.9	33.4	9.17	173.4	56	642	249.9	1053	1975	383.3	7420	B-LOD	27.8	1.5	5.7	611	1180	397
X_CNN6_29	805	17.7	3124	341200	8.97	0.032	74.6	0.265	5.28	15.5	4.96	91.4	30	345	136.3	576	1125	217.9	6640	0.8	38.7	2.07	12.28	1305	1670	565