



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

DOCUMENTO SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS XII: VOLÁTILES EN FLUIDOS  
HIDROTERMALES MINERALIZADORES EN VETAS DEL DISTRITO MINERO  
ALHUÉ, CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS MENCIÓN  
GEOLOGÍA

NICOLÁS IGNACIO ÁVALOS SOTOMAYOR

PROFESOR GUÍA:  
JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
BRIAN KEITH TOWNLEY CALLEJAS  
GREGORY PAUL DE PASCALE

SANTIAGO DE CHILE  
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOLOGÍA  
POR: NICOLÁS IGNACIO ÁVALOS SOTOMAYOR  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA

DOCUMENTO SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS XII: VOLÁTILES EN FLUIDOS  
HIDROTERMALES MINERALIZADORES EN VETAS DEL DISTRITO MINERO  
ALHUÉ, CHILE

En los últimos años ha crecido el interés por comprender el papel de los volátiles en la génesis de los yacimientos minerales debido a su capacidad para transportar y precipitar metales. Sin embargo, no se usa con frecuencia para investigar y explorar metales o depósitos. Particularmente, existe un gran potencial, esto se puede lograr estableciendo las características geológicas del yacimiento junto con descripciones de inclusiones fluidas en sus muestras.

El caso del distrito minero Alhué presenta un escenario ideal para trabajar estos dos temas. Cuenta con sectores bien definido como yacimientos epitermales y vetas polimetálicas ricas en oro, plata, plomo, zinc.

Se ha establecido una relación entre la partición de los metales de Au, Ag, Pb, Zn, con respecto a la fase gaseosa y el fundido. El oro y la plata poseen mayor afinidad que el plomo con respecto a la fase gaseosa, y el plomo mayor que el Zn. El Zinc es el ultimo en preferir la fase gaseosa. Entre el oro y la plata el comportamiento depende de si se esta sobre o bajo los 450°C, y si se esta en un sistema con H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>, por lo tanto, si se transportan como complejos bisulfurado sobre los 450°C el oro tiene mayor partición hacia la fase gaseosa que la plata, y si se transportan como complejos clorurados, la plata posee mayor afinidad a la fase gaseosa que el Au.

Por otra parte, las inclusiones fluidas apoyan en gran medida el reconocimiento de las condiciones fisicoquímica del fluido hidrotermal representado. Esto tanto a nivel petrográfico como a nivel analítico mediante técnicas aplicadas para estudiarlas. Sumado a esto, en las ultimas décadas se han presentado estudios sobre las texturas minerales como evidencias para reconocer procesos que ha sufrido el sistema, en particular: ebullición y/o intensa desgasificación por despresurización (*flashing*).

El trabajo de estos conocimientos aplicado en dos vetas polimetálicas del distrito minero Alhué (Patagua y Don Leopoldo) produce: (i) Estructuras mayores conectadas a las vetas son participe de una configuración tectónica de carácter orogénica. (ii) Marcada presencia de volátiles evidenciado por abundantes inclusiones fluidas ricas en vapor y/o líquidas coexistiendo con vapor. (iii) Marcada distribución de texturas que indican procesos de separación de fase gaseosa (ebullición y/o *flashing*). (iv) Relación espacial positiva entre punto (ii), (iii), y las concentraciones de metales. (v) Se mantiene la relación de partición de metales entre Pb y Zn, también entre Au y Ag. (vi) La presencia de esfalerita indica mayor concentraciones de plata y metales bases. (vii) El sector presenta 3 procesos principales. 1ero rico en líquido (alteración), 2do rico en volátiles (mineralización) y 3ero rico en volátiles (remueve o aporta nueva mineralización). Se concluye la importancia de los volátiles. Se postula veta con característica de oro mesotermal, aunque falta mayor información para más exactitud.



ABSTRAC OF TESIS TO GET  
TITLE OF MASTER OF SCIENCE, MENTION GEOLOGY  
POR: NICOLÁS IGNACIO ÁVALOS SOTOMAYOR  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: JORGE DANIEL MONCADA DE LA ROSA

DOCUMENT ON FLUID INCLUSIONS XII: VOLATILES IN HYDROTHERMAL  
MINERALIZING FLUIDS IN VEINS OF THE ALHUÉ MINING DISTRICT, CHILE

In recent years, the interest of understanding the role of volatiles in the genesis of mineral deposits has grown due to their ability to transport and precipitate metals. However, it is not frequently used to investigate and explore metals or deposits. Particularly, there is a great potential, this can be achieved by establishing the geological characteristics of the deposit along with descriptions of fluid inclusions in its samples.

The case of the Alhué mining district presents an ideal scenario to work on these two issues. It has well-defined sectors such as epithermal deposits and polymetallic veins rich in gold, silver, lead, and zinc.

A relationship has been established between the partition of the metals Au, Ag, Pb, Zn, with respect to the gas phase and the melt. Gold and silver have greater affinity than lead with respect to the gas phase, and lead greater than Zn. Zinc is the last to prefer the gas phase. Between gold and silver, the behavior depends on whether it is above or below 450°C, and if it is in a system with HS and SO, therefore, if they are transported as bisulfurized complexes above 450°C, the gold has a greater partition towards the gas phase than silver, and if they are transported as chlorinated complexes, silver has a higher affinity to the gas phase than Au.

On the other hand, results from a fluid inclusion analysis supports the understanding of the physic-chemical conditions of the hydrothermal fluid from a petrographic and analytical perspective. In addition, including mineral textures analysis on recognizing the undergone system processes, such as boiling and depressurization degassing, has benefits the fluid inclusions analyses.

Resulting from applying fluid inclusion analysis on the Alhué mining district (Patagua and Don Leopoldo) produces: I. Large structures connected to the veins belong to the tectonic setting with an orogenic nature. II. Strong presence of volatiles evidence by abundant fluid inclusions rich in vapor and/or liquid, coexisting with vapor. III. Remarkable distribution of textures that indicates gas phase separation processes (boiling and flashing). IV. Positive spatial relationship between the previous point (ii), point (iii) and metal concentration. V. The ratio between Pb and Zn and the ratio between Au and Ag are mostly constant. VI. The presence of sphalerite indicates high concentration of silver and base metals. VII. The entire sector has three main processes: a. Rich in liquid – Alteration. b. Rich in volatiles – Mineralization. c. Rich in volatiles – Removing or adding new minerals. Lastly, the importance of volatiles is conclude, and a vein with mesothermal gold characteristic is postulated. However, we encourage extended this analysis to improve the accuracy on the defined areas.



*Dedicado a todo aquel que quiera comenzar a saber sobre la relación entre los volátiles y los metales en fluidos hidrotermales. Dedicado a mi familia, a mis amigos, a la vida y a mí.*



# Agradecimientos

Este trabajo no podría haberse llevado a cabo sin la ayuda inicial del Proyecto N° 11170210 CONICYT. Agradezco a mi mentor Daniel Moncada por su paciencia, flexibilidad y guía tanto al inicio cuando no sabía cómo resolver problemáticas y presentarlas, como también al final cuando se tuvo que adaptar el trabajo ante la contingencia sanitaria mundial. De la misma forma, agradezco a los profesores Brian Townley y Gregory P. de Pascale por sus feedback y disposición, que ayudaron a enfocar y concretar el trabajo de tesis. Agradezco las muestras y la base de datos compartida por YAMANA GOLD, Minera Florida. Al Departamento de Geología de la Universidad de Chile, Laboratorio de corte de roca de la Universidad de Chile (a Julio) por el apoyo administrativo y/o práctico para avanzar en el magister. Al grupo de expertos pertenecientes a Armadillo Lab, en especial a Sebastián Sepúlveda Díaz; con quien puede trabajar la escritura de mi tesis. Sin su ayuda hubiera sido muy difícil para mí aprender a presentar por escrito mis ideas.

Agradezco a mi padre y madre por su apoyo en todo momento, a mi hermano mayor por las conversaciones compartiendo experiencias y perspectivas a pesar de la distancia mientras ambos, paralelamente, recorríamos nuestro post grado y nuestra senda personal/profesional. A mi hermano menor por demostrar perseverancia y consecuencia, recordándome que la vida tiene valor, él sabe. Un abrazo hermanos.

Agradezco a mis amigos: *Pelao, Pinkynats, Owcko, ThePelinn, Palmex, Mono, Alito, Blas, Jovy, Cesar, Bruno, Act not react, Brembox, MDM, Cristobal, Palma, Tiopapa*; con quienes compartí mi vida durante el proceso del magister, y espero seguir compartiendo después del mismo así como pasaba antes de iniciarlo. Gracias.

Agradezco a todas las personas que conocí; con quienes aprendí a procesar la importancia social y el significado de compartir, estudiar y trabajar. Destacar en esto último a los grupos de discord *La hermandad, La emboscada* y por supuesto *Los Temporera*. No leerán el trabajo pero compartiremos la felicidad del término, logro y/o de dejar escrito esto.

Muchas palabras más me reservaré. Antes de terminar, doy gracias a la vida y compartiré tres frases: *(i) Solo los que se atreven a fracasar a lo grande, llegan a realizar grandes logros. (ii) Para desembarcar en la isla de la sabiduría hay que navegar en un océano de aflicciones. (iii) Es mejor ser rey de tu silencio que esclavo de tus palabras.* Jhon Kennedy, Sócrates y William Shakespeare, respectivamente



# Tabla de Contenido

<b>Lista de figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>1. Motivación, Ubicación, Objetivos, Metodología</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Ubicación y acceso . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivos específicos . . . . .	2
1.4. Metodologías . . . . .	4
1.4.1. Etapa 1: Recopilación teórica . . . . .	4
1.4.2. Etapa 2: Preparación y selección de muestras . . . . .	4
1.4.3. Etapa 3: Base de datos . . . . .	6
1.4.4. Etapa 4: Permutación para la validación de datos . . . . .	6
1.4.5. Etapa 5: Relación entre teoría y datos reales: Discusiones/Conclusiones	6
<b>2. Los volátiles en el transporte de metales en sistemas hidrotermal</b>	<b>8</b>
2.1. Volátiles: Composición, distribución y relación con respecto al manto, corteza, magma y fluidos hidrotermales . . . . .	9
2.2. Revisión del agua como volátil y su relación con el magma y los metales . . .	14
2.3. Volátiles en los fluidos hidrotermales y los metales . . . . .	23
2.3.1. Complejos y solubilidad en medios de transporte: Au . . . . .	27
2.3.2. Complejos y solubilidad en medios de transporte: Ag . . . . .	33
2.3.3. Complejos y solubilidad en medios de transporte: Pb y Zn . . . . .	36
<b>3. Estudios de volátiles en depósitos de oro</b>	<b>38</b>
3.1. Técnicas Analíticas . . . . .	38
3.1.1. Técnicas no destructivas . . . . .	38
3.1.2. Técnicas destructivas . . . . .	41
<b>4. Revisión Geológica del distrito minero Alhue</b>	<b>44</b>
4.1. Geología distrital . . . . .	44
4.1.1. Rocas estratificadas . . . . .	44
4.1.2. Rocas Intrusivas . . . . .	46
4.1.3. Estructuras - Morfoestructuas . . . . .	47
4.2. Geología local . . . . .	49

4.2.1. Rocas Estratificadas . . . . .	49
4.2.2. Rocas Intrusiones . . . . .	50
4.3. Relación entre la geología estructural y la alteración hidrotermal y mineralización. . . . .	53
<b>5. Caso de estudio</b>	<b>58</b>
5.1. Texturas de mineral de ganga y sus relaciones con la mineralización de mena en deposito epitermal . . . . .	58
5.1.1. Texturas primarias . . . . .	60
5.1.2. Texturas de recristalización . . . . .	61
5.2. Veta Don Leopoldo y Patagua . . . . .	65
5.2.1. Catastro y selección de muestras . . . . .	65
5.2.2. Distribución de metales . . . . .	71
5.2.3. Correlación de metales . . . . .	80
5.2.4. Distribución de inclusiones fluidas y texturas . . . . .	81
5.2.5. Estimación de recursos . . . . .	97
<b>6. Discusiones y Conclusiones</b>	<b>108</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>113</b>
<b>Anexos</b>	<b>122</b>
<b>Anexo A: Descripción de eventos</b>	<b>123</b>
<b>Anexo B: Texturas de mineral</b>	<b>127</b>
<b>Anexo C: Breves antecedentes de estudios en el distrito minero Alhué</b>	<b>131</b>
<b>Anexo D: Tabla con ubicación espacial y datos geoquímicos</b>	<b>133</b>
<b>Anexo E: Tabla de Inclusión Fluida presente</b>	<b>139</b>
<b>Anexo F: Tabla de texturas</b>	<b>145</b>
<b>Anexo G: Tabla mini drill</b>	<b>151</b>
<b>Anexo H: Modelo de la zona de estudio</b>	<b>161</b>
<b>Anexo I: Permutación de las concentraciones de metales</b>	<b>165</b>

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Mapa referencial para orientarse en la ubicación y acceso al distrito minero Alhué. Se enmarca con un rectángulo rojo la zona donde se hallan las vetas Las Pataguas y Don Leopoldo. Desde Santiago: Ruta 78 luego 66 luego G-680 y finalmente G-692 H. <i>Indicaciones para conducir desde Santiago a Alhue, Chile. Google Maps, 2021.</i> . . . . .	3
1.2.	Imagen que ilustra el código utilizable para realizar permutaciones y exportar los histogramas gráficos. . . . .	7
2.1.	Representación gráfica de los diagramas de fases del sistema H <sub>2</sub> O-NaCl y H <sub>2</sub> O - CO <sub>2</sub> . La zona amarilla en ambos diagramas representa la zona de inmiscibilidad bajo las condiciones de Presión, Temperatura y Concentración correspondiente. Para la figura a se tiene 50wt % de NaCl y la figura b 0,5 de concentración de CO <sub>2</sub> , con líneas de densidad. L: liquido, V: vapor, C: punto crítico, T: punto triple, CP: punto crítico del sistema. Tomado y modificado de ( <a href="#">Yardley and Bodnar, 2014</a> ) . . . . .	16
2.2.	Representación gráfica del diagramas de fase del sistema H <sub>2</sub> O-NaCl- CO <sub>2</sub> a presión constante y variables temperaturas. Bajo los 300°C las fronteras se han calculado a partir de ecuaciones de estado. Tomado y modificado de <a href="#">Duan et al. (1995)</a> . . . . .	18
2.3.	Diagramas de fase P-T del sistema H <sub>2</sub> O-NaCl- CO <sub>2</sub> con diferentes concentraciones de estos tres componentes. Unión entre resultados empíricos y teóricos. Los teóricos se han calculado a partir de ecuaciones de estado. Estos últimos son representado por la línea punteada en los diagramas (a),(b),(c) y (d). Bajo esta línea se halla la zona bifásica L-V y sobre ella fluido de una sola fase. Líneas solidas son isócronas. Tomado de <a href="#">Duan et al. (1995)</a> . . . . .	19
2.4.	Esquema simplista del proceso hidrotermal para generar un deposito mineral. Un fluido proveniente de una fuente extrae de ella cierta composición y transporta los metales como complejos hasta que logra llegar a un nivel de concentración que forma el deposito mineral. Modificado de <a href="#">Ding et al. (2018)</a> . . . . .	25
2.5.	Distribución de los complejos de oro hidro-sulfurado en fase liquida en función del pH. Se observa el dominio de uno sobre el otro en condiciones reducidas u oxidantes, siendo similares a pH cercano al 4.5 <a href="#">Pokrovski et al. (2008)</a> . . . . .	26

2.6.	Se modela la concentración de oro medidas mediante analisis de LA-ICP-MS (ablación láser - plasma acoplado inductivamente - espectrometría de masas) en inclusiones fluidas de vapor de un pórfido Cu-Au. Tanto (A),(B) y (c) representan la evolución desde un sistema porfídico a 450°C a un epitermal de 150°C, con concentraciones iniciales de SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S y FeCl <sub>2</sub> ; las que son representadas con sus curvas comenzadas a los 450°C. El sistema se encuentra modelado a 500bar. Se ilustra le influencia de las proporciones S/Fe; en (A)Fe>S, en (B) y (C) S>Fe. indicadas en el titulo. Las elevadas concentraciones de Fe permiten que la fase vapor concentre 10ppm de Au en sus inicios. El transporte es eficiente solo en el escenario C, donde hay exceso de S y pH controlado por reacción fsp+mus, en (A) y (B) no se logra transportar Au a temperaturas <200°C. Situacion (A) es el menos eficiente, dado el exceso de Fe. Tomada y modificada de <a href="#">Heinrich et al. (2004)</a> . fsp:feldespato, mus: moscovita . . . . .	30
2.7.	La distribución de SO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S (a) y las concentraciones de complejos sulfurados de oro en el vapor (b) en función de la fugacidad de H <sub>2</sub> . En ellos se puede observar como se correlacionan los niveles más altos de oro según presiones de 100bar o 400bar con la distribución de los gases que hace referencia al porcentaje de S en el sistema a 350°C. Tomado de <a href="#">Zezin et al. (2011)</a> . . . . .	32
2.8.	(A)Gráfica de las concentraciones de plata como complejo clorurado en la fase vapor. Se observa que este prioriza en un rango acotado de100°C la fase gaseosa, con un máximo entorno a los 450°C. (b) Gráficas del oro concentrado en el vapor según condiciones de temperatura y porcentaje de ácido clorhídrico. Se aprecia como a temperaturas mayores se tienen más concentración de oro en el fluido, con un máximo cercano a los 700°C . Modificado de <a href="#">Seward et al. (2014)</a> . . . . .	35
4.1.	Franja metalogénica de yacimientos de vetas polimetálicas epitermales y mezozonales del Cretácico Superior. Tomado y modificado de <a href="#">Gröpper (2011)</a> . . . . .	48
4.2.	Resultado de la evolución geológica andina que representaría la geología a nivel regional del distrito minero Alhué. En rojo los granitoides, en azul la falla. Tomado de <a href="#">Gröpper (2011)</a> . . . . .	49
4.3.	Mapa local de la distribución litológica. En rojo zonas mineralizadas. Tomado de <a href="#">Hanna Castro (2017)</a> . . . . .	52
4.4.	Esquema de la situación estructural en un sector de vetas polimetalicas a unos cientos de metros al NE con respecto a las vetas del estudio. Una relación mas especifica puede verse en Apéndice H. . . . .	54
4.5.	Edición de mapa realizado por Yamana para exponer la ubicación de las vetas Patagua y Don Leopoldo y su relación con respecto a las estructuras del sector. Una relación mas especifica puede verse en Apéndice H. Tomado y Modificado de reporte anual Yamana Gold . . . . .	55
5.1.	Imágenes esquemas de texturas que representan condiciones del fluido <a href="#">Adams (1920)</a> ; <a href="#">Dong et al. (1995)</a> ; <a href="#">Moncada et al. (2012)</a> . . . . .	64
5.2.	Foto representativa de texturas que indican no ebullición como condición del fluido. (a) Dominio con textura de cuarzo Comb. (b) calcita rombica. (c) Dominio con textura de cuarzo masivo. (d) Dominio con textura de cuarzo zonal . . . . .	65

5.3. Foto representativa de texturas que indican ebullición como condición del fluido. (a) Dominio con textura de cuarzo coloforme. (b) Cuarzo con textura plumosa/feathery. (c) Cuarzo con textura extrambayante/flomboyant. (d) Dominio con textura de cuarzo jigsaw. (e) Textura de calcita bladed remplazada. (f) Zonas con textura ghos sphere . . . . .	66
5.4. Permutación entre Patagua y Don Leopoldo de la concentración de sus metales de Plata y Oro en escala logarítmica. En amarillo de observa la linea vertical en el limite de hallarse fuera del 95 por ciento del histograma, representando el rechazo de la hipótesis del mismo origen e indicando que son comparables. . . . .	69
5.5. Permutación entre Patagua y Don Leopoldo de la concentración de sus metales de Cobre, Plomo y Zinc en escala logarítmica. En amarillo de observa la linea vertical fuera del histograma para los tres casos, representando el rechazo de la hipótesis del mismo origen e indicando que son comparables. . . . .	70
5.6. Distribución de las concentraciones de cada metal con respecto a la profundidad para veta Las Pataguas. (a) distribución oro y plata. (b) distribución metales bases. . . . .	72
5.7. Distribución de las concentraciones de cada metal con respecto a la profundidad para veta Don Leopoldo. (a) distribución oro y plata. (b) distribución metales bases. . . . .	73
5.8. Distribución de las concentraciones de cada metal con respecto a la profundidad para veta Intersección. (a) distribución oro y plata. (b) distribución metales bases . . . . .	74
5.9. Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Mini drill de valores altos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases. . . . .	75
5.10. Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Mini drill de valores bajos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases. . . . .	76
5.11. Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Doble Pulido con valores altos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases. . . . .	77
5.12. Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Doble Pulido con valores bajos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases. . . . .	78
5.13. Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Doble Pulido con esfalerita. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases. . . . .	79
5.14. Correlación entre oro y plata grupo 1: <b>Patagua</b> . . . . .	81
5.15. Correlación entre oro y plata, grupo 1: <b>Don Leopoldo</b> . En las figuras se aprecia una correlación directa positiva. . . . .	82
5.16. Correlación entre oro y plata, grupo 1: <b>Intersección</b> . En las figuras se aprecia una correlación directa positiva. . . . .	83
5.17. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 1: <b>Patagua</b> . . . . .	84

5.18. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 1: <b>Don Leopoldo</b> . . . . .	85
5.19. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 1: <b>Intersección</b> . . . . .	86
5.20. Correlación entre oro y plata, para el grupo 2: (a) Mini drills valores alto. (b) valores bajos. En las figuras se aprecia una mayor dispersión. . . . .	87
5.21. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 2: <b>Mini drills valores alto</b> . En las figuras se aprecia una gran dispersión en las concentraciones de metales bases y concentraciones de oro y plata, pero con leve relación directa positiva. . . . .	88
5.22. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 2: <b>Mini drills valores bajos</b> . En las figuras se aprecia una menor dispersión en las concentraciones de metales bases y concentraciones de oro y plata, con casi indiferencia entre las concentraciones de metales bases con respecto a la plata. . . . .	89
5.23. Correlación entre oro y plata, para el grupo 3: <b>Doble pulidos de valores altos</b> (D.P.a). En las figuras se aprecia una indiferencia en los valores de oro para D.P.a con respecto a la plata. . . . .	90
5.24. Correlación entre oro y plata, para el grupo 3: <b>Doble pulidos de valores bajos</b> . . . . .	90
5.25. Correlación entre oro y plata, para el grupo 3: <b>Doble pulidos con esfalerita</b> . En las figuras se aprecia un intervalo acotado de concentraciones de plata y oro. . . . .	91
5.26. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 3: <b>Doble pulidos de valores altos</b> (D.P.a). En las figuras se aprecia una indiferencia entre los metales bases con respecto a la plata. . . . .	92
5.27. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 3: <b>Doble pulidos de valores bajos</b> . Los metales se distribuyen en concentraciones acotadas de oro. . . . .	93
5.28. Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el Grupo 3: <b>Doble pulidos con esfalerita</b> . Los metales se distribuyen en concentraciones acotadas de oro y plata . . . . .	94
5.29. Correlación adimensional entre las razones de Au/Ag y la concentración de Au. (a) muestra los valores asignados para el Grupo 1. (b) Muestra los valores asignados a mini drills de valore altos, mini drills de valores bajos, y doble pulidos (D.P.) con esfalerita. El cuadrante superior derecho indica altas concertaciones de oro y plata, y el inferior derecho indica altas concentraciones de oro y plata, pero con mayor cantidad de plata que de oro. En este ultimo se ubican las 5 muestras D.P. con esfalerita. . . . .	95
5.30. Correlación adimensional entre la suma de las concentraciones de oro(Au) y plata(Ag) versus las suma de las concetracion de metales bases cobre(Cu), zinc(Zn) y plomo(Pb). (a) muestra los valores asignados para el Grupo 1. (b) Muestra los valores asignados a mini drills de valore altos, mini drills de valores bajos, y doble pulidos (D.P.) con esfalerita. Se observa para ambos grupos una linealidad positiva en la correlación de las concentraciones. Se observa como existe un sector donde los valores bajo de la suma oro + plata son indiferente a las concentraciones de metales bases. . . . .	96

5.31. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 1: <b>Patagua</b> . Se destaca en Patagua la zona de los 600m.s.n.m. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	98
5.32. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 1: <b>Don Leopoldo</b> . Se destaca en Don Leopoldo sector de 650m.s.n.m., y la zona alta en Intersección. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura	99
5.33. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 1: <b>Intersección</b> . Se destaca la zona alta. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	100
5.34. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 2: <b>Mini drills valores altos</b> . Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	101
5.35. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 2: <b>Mini Drills valores bajos</b> . Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	102
5.36. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 3: <b>Doble Pulidos valor alto</b> . Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición, y la presencia de inclusiones ricas en vapor y/o liquido coexistiendo con vapor. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	103
5.37. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 3: <b>Doble Pulidos valor bajos</b> . Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición, y la presencia de inclusiones ricas en vapor y/o liquido coexistiendo con vapor. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	104
5.38. Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 3: <b>Doble Pulidos con esfalerita</b> . Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición, y la presencia de inclusiones ricas en vapor y/o liquido coexistiendo con vapor. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura . . . . .	105
5.39. Perfil de transversal a la estructura que contiene Patagua y Don Leopoldo de las concentraciones de oro. Muestra enriquecimiento entre los 850 y 700m.s.n.m.	106
5.40. Perfil de transversal a la estructura que contiene Patagua y Don Leopoldo de las concentraciones de plata. Muestra enriquecimiento entorno a los 800m.s.n.m., seguido de zonas secundarias cada 100m en profundidad. . . .	107

6.1.	Lado izquierdo representa la recopilación de valores de coeficientes de partición entre vapor y magma obtenido para cada elementos químico expuesto.Las mediciones se tomaron en las fumarolas condensadas, rocas o lavas del volcán Kudryaby .Gráfica derecha se trafican mediciones del coeficiente de partición de metales y metaloides entre dos fases (vapor y liquido) en equilibrio bajo un sistema H <sub>2</sub> O-NaCl-KCl-HCl en función de la temperaturas entre 250 y 450°C representada mediante la razón de densidad entre vapor y liquido.Tomadas y modificadas de <a href="#">Pokrovski et al. (2013, 2008)</a> . . . . .	111
6.2.	Configuraciones geológicas de depósitos de oro Orogénico. (a) Perfil interno en su formación vertical del deposito oro orogénico. (b) perfil esquemático de la configuración tectónica y la ubicación donde se originan estos depósitos. Tomado y modificado de <a href="#">Goldfarb and Groves (2015)</a> . . . . .	128
6.3.	Tipo de inclusión fluidas. (a) ricas en vapor. (b) ricas en liquido. (c) inclusiones ricas en liquido coexistiendo con ricas en vapor. (d) inclusiones ricas en liquido coexistiendo con ricas en halita con o sin solido. . . . .	144
6.4.	Gráfica comparativa de los elementos de Plata y Oro entre la veta Patagua y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se esta en un caso de aceptar la hipótesis de considerarse no comparativo, por lo tanto <b>no</b> son comparables las concentraciones de estos elementos en estas dos zonas. . . . .	166
6.5.	Gráfica comparativa de los elementos de Cobre, Plomo y Zinc entre la veta Patagua y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se esta en un caso de rechazar la hipótesis de considerarse indiferente, no comparativo, misma situación, y por lo tanto son comparables las concentraciones de estos elementos en estas dos zonas para estudiar la influencia de los volátiles en cada escenario. . . . .	167
6.6.	Gráfica comparativa de los elementos de Plata y Oro entre la veta Don Leopoldo y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se esta en un caso de aprobar la hipótesis de considerarse indiferente, no comparativo, misma situación. . . . .	168
6.7.	Gráfica comparativa de los elementos de Cobre, Plomo y Zinc entre la veta Don Leopoldo y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se esta en un caso de aprobar la hipótesis de considerarse indiferente, no comparativo, misma situación. . . . .	169

# Índice de Tablas

5.1.	Contabilidad del muestreo y de muestras preparadas. . . . .	67
5.2.	Estadística descriptiva de metales en veta Patagua. . . . .	67
5.3.	Estadística descriptiva de metales en veta Don Leopoldo. . . . .	68
5.4.	Conteo de inclusiones fluidas y tipo de texturas presentes. . . . .	97
6.1.	Descripción de eventos (Parte 1). L: Liquido; V: Vapor; H: Halita; S: solido; Txt: textura; Qz: cuarzo; spl: esfalerita; hmt: hematita; act: actinolita; ept: epidota; calc: calcita; grt: granate; gn: galena; py: pirita; ccp: calcopirita; vt: veta; prop: propilítica; alt: alteración; Dpa: Doble pulido con valor alto; DPb: Doble pulido con valor bajo; DPe: Doble pulido con esfalerita. . . . .	124
6.2.	Descripción de eventos (Parte 2). L: Liquido; V: Vapor; H: Halita; S: solido; Txt: textura; Qz: cuarzo; spl: esfalerita; hmt: hematita; act: actinolita; ept: epidota; calc: calcita; grt: granate; gn: galena; py: pirita; ccp: calcopirita; vt: veta; prop: propilítica; alt: alteración; Dpa: Doble pulido con valor alto; DPb: Doble pulido con valor bajo; DPe: Doble pulido con esfalerita. . . . .	125



# Capítulo 1

## Motivación, Ubicación, Objetivos, Metodología

### 1.1. Motivación

Chile es reconocido como país minero, principalmente como exportador de Cobre debido a sus abundantes yacimientos de pórfidos cupríferos distribuidos en lo que se conoce como franjas metalogénicas con dirección Norte-Sur desde Arica hasta la zona central. La minería del país en las últimas décadas ha aumentado su interés por la exploración y explotación del oro y en menor medida plata y otros metales bases, debido a diferentes presencias de pórfidos tipo cobre-oro. Esto ha conllevado un creciente interés por el entendimiento no tan solo de sistemas porfídicos, sino que de distintos sistemas hidrotermales relacionado a la generación de depósitos de oro como epitermales de alta y baja sulfuración, depósitos de oro vetiforme u incluso la posibilidad de sectores con yacimientos de oro orogénico.

Paralelo al desarrollo del entendimiento de los yacimientos metálicos, se ha avanzado en las últimas décadas en la aplicación y/o desarrollo de diferentes técnicas analíticas para entender y dar respuesta a problemáticas geológicas. En esta perspectiva, las técnicas analíticas han avanzado en su aplicación en inclusiones fluidas con el fin de obtener información de propiedades fisicoquímicas, las cuales pueden relacionarse directamente con las propiedades de los fluidos generadores de los sistemas hidrotermales, o de un proceso geológico en el que tuvo lugar dicho fluido estudiado.

Ante el escenario anterior, existe de manera dispersa la aplicación de técnicas analíticas en inclusiones fluidas para apoyar el entendimiento de sistemas hidrotermales, lo que conlleva también a mejorar el entendimiento del transporte, precipitación, atrapamiento o entrapado de oro. Simultáneamente existe el interés por apoyar con dicho conocimiento la prospección, exploración y explotación de oro ante los distintos tipos de yacimiento presentes en Chile. Con la presente investigación se busca establecer el escenario teórico necesario con el cual comprender las técnicas analíticas, el transporte y precipitación de metales en los fluidos hidrotermales, la importancia de los volátiles en dichos mecanismos, la aplicación de las técnicas analíticas en inclusiones fluidas para reconocer información fisicoquímica, y

en particular, establecer la teoría sobre los yacimientos de oro orogénico tipo mesotermal para finalmente en conjunto a todo lo anterior, establecer concretamente patrones de reconocimiento, prospección, exploración de oro orogénico en Chile. Para ello se toma el caso de estudio de las vetas Don Leopoldo y las Pataguas, del distrito minero Alhué, de la compañía minera La Florida, para poder aplicar los conocimientos anteriormente establecidos y poder abordar los siguientes problemas: discriminar el tipo de yacimiento, es decir, si corresponde a vetas o sistema orogénico u oro mesotermal, y distinguir criterios de exploración de oro y plata bajo el estudio de inclusiones fluidas.

## **1.2. Ubicación y acceso**

El distrito minero Alhué está ubicado en la provincia de Melipilla en la Región Metropolitana de Chile, a 145 kilómetros al suroeste de la ciudad de Santiago.

Para acceder desde Santiago a la zona de estudio se debe tomar la ruta 78 camino a Melipilla hasta intersectarse con la ruta G-60 hacia el sur-oeste por 34 Km hasta el cruce Las Arañas. Continuando por la ruta G-66 hacia el sur hasta el cruce “Santa Inés” en donde se debe continuar por la ruta G-692H hacia el este en dirección a la Villa Alhué. Una vez alcanzada la Villa Alhué se debe continuar hacia el este por la misma ruta hasta la localidad “El Asiento”, desde ahí, 7 kilómetros hacia el este se llegará a la quebrada Las Ánimas en donde se encontrará la entrada a la mina. Todas las rutas anteriormente señaladas se encuentran pavimentadas (Para mayor orientación ver la Figura 1.1

## **1.3. Objetivos**

El contexto geológico del distrito minero Alhué, donde ha sido evidenciada la existencia de mineralización en diferentes lugares, de diferentes metales y con diferentes características de alteración y distribución, y con diferentes condiciones de transporte y precipitación, genera que esta investigación, desarrollada entorno a las vetas Don Leopoldo y Patagua las cuales han presentado mineralización de oro y plata, tenga como objetivo general evidenciar y comprender la capacidad de los volátiles para transportar metales y el mecanismo o proceso asociado. Para lograr este entendimiento se plantean objetivos específicos y metodologías.

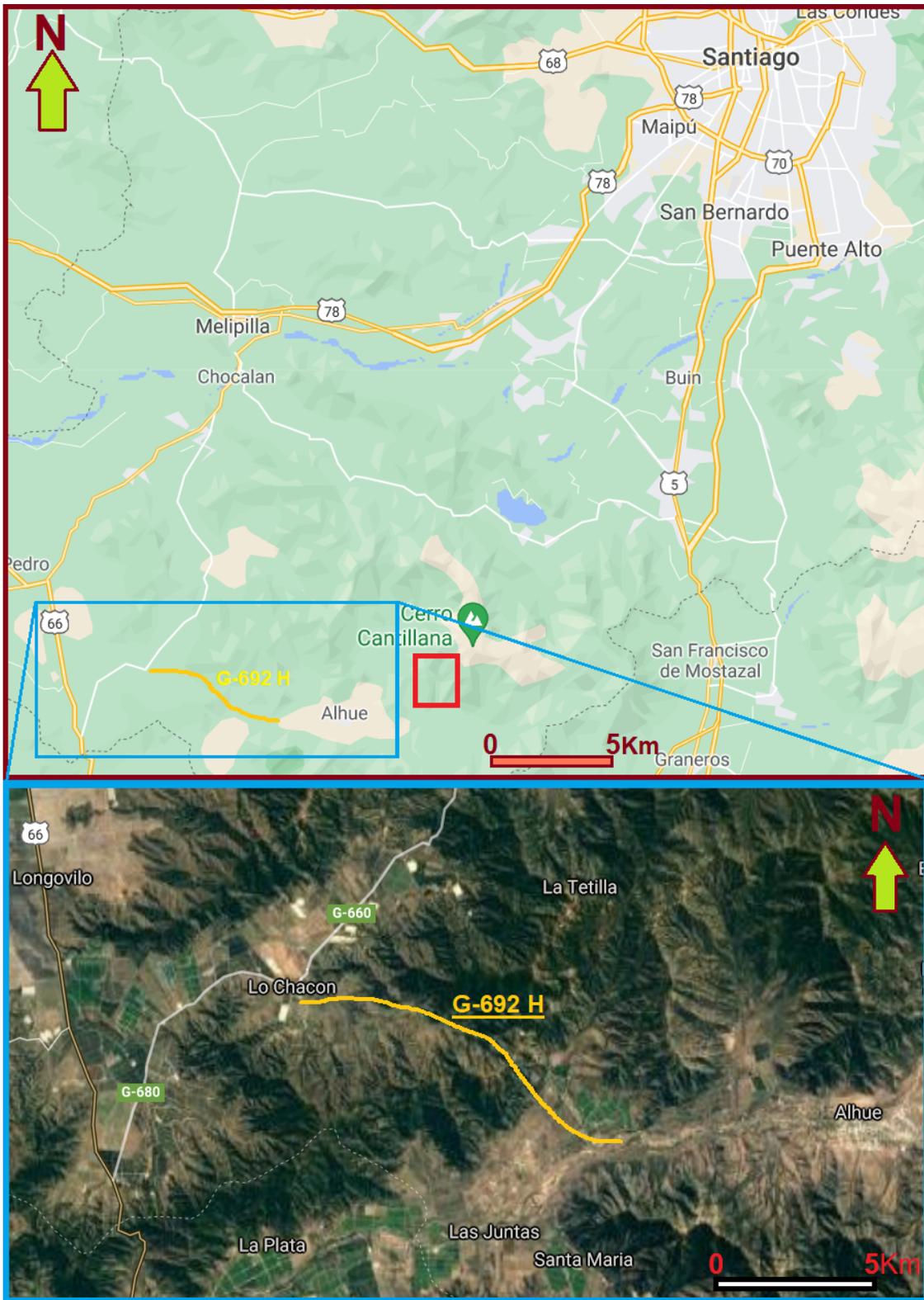
### **1.3.1. Objetivos específicos**

De manera sistemática se irán resolviendo teoría y preguntas prácticas para enmarcar el desarrollo y la resolución de la tesis.

El primer objetivo específico corresponde a: Establecer los procesos de inmiscibilidad en sistemas magmático-hidrotermal tipo depósitos mesotermal, y el rol de los volátiles.

El segundo corresponde a: Establecer el efecto de la inmiscibilidad en los fluidos y la influencia en el transporte y precipitación de Au y Ag, en condiciones mesotermales.

El tercero corresponde a: Reconocer procesos de inmiscibilidad y, evaluar y determinar sus condiciones, en las muestras estudiadas.



**FIG. 1.1:** Mapa referencial para orientarse en la ubicación y acceso al distrito minero Alhué. Se enmarca con un rectángulo rojo la zona donde se hallan las vetas Las Pataguas y Don Leopoldo. Desde Santiago: Ruta 78 luego 66 luego G-680 y finalmente G-692 H. *Indicaciones para conducir desde Santiago a Alhue, Chile. Google Maps, 2021.*

El cuarto corresponde a: Establecer un link entre practica y teoría, tal que al enlazar características de inmisibilidad u otras características asociadas a las muestras, se pueda proyectar su utilidad a la exploración.

Destacar que estos mismos objetivos pueden ser desarrollado en perspectiva de un deposito tipo epitermal, o cualquier deposito.

## 1.4. Metodologías

El distrito minero Alhue ha presentado dificultad al momento de clasificarlo en un tipo de deposito. El presente trabajo establece una metodología por etapa la cual comienza con una recopilación de información teórica desde asociada a un tipo de deposito para enmarcar la comprensión de los volátiles, inclusiones fluidas, y mecanismos de precipitación de dicho sistema. Luego esta base teórica pueden ser comparada con las observaciones realizadas sobre las muestras estudiadas. En particular se recopila información principalmente los depósitos de oro mesotermal-orogenico, información de epitermales. Para explicar mejor el proceso metodológico se expone a continuación las 4 etapas principales en que se desarrolla la investigación.

### 1.4.1. Etapa 1: Recopilación teórica

El presente estudio considera importante los siguientes tópicos: (i) Relación entre gases y metales en los fluidos hidrotermales, (ii) técnicas analíticas aplicadas al estudio de volátiles, (iii) texturas e inclusiones fluidas, y por ultimo (iv) geología del distrito minero Alhué. Establecer una base teórica que enmarque el contexto sobre estos tópicos resulta, luego de la búsqueda de la información, en la exposición por escrito de cada capitulo, y dichos capítulos representan el resultado de la metodología aplicada.

### 1.4.2. Etapa 2: Preparación y selección de muestras

En esta etapa se seleccionan 178 muestras de sondajes que intersecan la veta Las Pataguas y Don Leopoldo del distrito minero Alhué. A dichas muestras la compañía minera YamanaGold les ha realizado un análisis de química de roca total. Por lo tanto, se preparan cortes "quick plate.<sup>en</sup> el laboratorio de corte de roca de la Universidad de Chile, a cada una de estas 178 muestra. Luego, haciendo uso de la base de dato de química de roca total y si ha cortado o no sectores de la veta Don Leopoldo y Las Pataguas, se realiza una selección de muestras con valores altos de Oro, Plata, metales bases, así como una selección de muestras con valores bajos de los mismos. Esta selección se realiza mediante criterios estadístico de la concentración de cada metal en terminos de cuartil. Un cuartil equivale al 25 % de la población estadística. Particularmente se considera alto sobre el tercer cuartil (Q3), el cual equivale a valores mayor al 75 % de la población. Se considera de valor bajo cuando se halla por debajo del primer cuartil (Q1; menor al 25 %). Valores cercanos al limite del Q3, es decir que sobrepasen casi un 70 por ciento de los valores de la población, pueden considerarse altos. De esta forma se generan los siguientes grupos: Muestra con valores altos de metales preciosos y bases. Muestras con valores altos de metales preciosos y no bases. Muestras con valores altos de metales bases y no preciosos. Muestras con valores bajos de metales preciosos y bases. Muestras con valores bajos de metales preciosos y no bases. Muestras con valores

bajos de metales bases y no preciosos. Se generó una selección de 54 muestras distribuidas en los diferentes grupos.

Una vez seleccionada dichas muestras por valores altos y bajos, se les prepara para extraer de ellas un "mini drill". Este proceso se efectúa en el laboratorio de corte de roca de la Universidad de Chile utilizando un taladro de carpintería el cual ha sido adaptado con una broca con punta de diamantina, hueca por dentro, especial para realizar mini perforaciones y obtener una muestra cilíndrica de la roca, esta además a sido adaptada con una manguera de agua para lubricar y enfriar durante el proceso de perforación. El lugar de perforación a sido seleccionado en el rechazo de cada muestra a partir de las observaciones petrográficas de las inclusiones fluidas presentes, seleccionando el sector homologo en el rechazo con respecto al corte *Quick Plate* observado. El criterio de selección en la observación petrográfica ha sido principalmente: presencia de inclusiones fluidas ricas en vapor, y/o presencia de coexistencia de inclusiones fluidas ricas en vapor con ricas en liquido. La observación es realizada siempre en las vetas de cuarzo hidrotermal que presenta la muestra. A dicha información se le acompaña la textura de cuarzo presente.

Una vez obtenido el "mini drill" se describe y se pesa antes de ser enviado a análisis de gases total, o específicamente, cromatografía de gases. La descripción consiste principalmente en cantidad de trozos (usualmente se fractura el cilindro al interior de la broca), color, características, mineralogía.

Otra selección son las muestras para doble pulido. Estas son muestras con alto contenido de metales y con alta abundancia de inclusiones fluidas ricas en volátiles, y un grupo más específico que además presente esfalerita masiva, con el objetivo de observar y estudiar inclusiones fluidas en esfalerita. Obteniéndose 3 doble pulidos para Las Pataguas, 5 Doble pulidos para Don Leopoldo y 5 Doble Pulidos con esfalerita. Para contrastar información se realizan 7 Doble Pulidos de muestras con bajo contenido de metales.

### **Selección para análisis de microtermometria y espectroscopia de ramman**

De las muestras con Doble Pulido, tras un estudio petrográfico de inclusiones fluidas y texturas de dichos cortes, se seleccionan áreas específicas con familia de inclusiones fluidas tales que sean estas analizadas mediante microtermometria y posterior espectroscopia de ramman. Se obtiene principalmente 4 a 5 sectores de cada corte con 1 a 3 familias de inclusiones fluidas relevantes a estudiar en cada sector. El objetivo es principalmente lograr determinar la parencia de  $\text{CO}_2$  en las muestras y conocer condiciones de flashing o boiling. Por lo tanto, la observación petrográfica principal es que se sospeche de la presencia de  $\text{CO}_2$  en la inclusión, y/o que representen eventos de flashing o boiling. Inclusiones fluidas en esfaleritas representan candidatas directas para análisis de microtermometria y espectroscopia de raman pues significa estudiar las condiciones del fluido al momento de la mineralización. Se busca enmarcar y estudiar las inclusiones fluidas de mayor tamaño y que estén lo más cerca de la superficie del cristal. Esto ultimo permite mayor efectividad en la aplicación de espectroscopia de ramman.

El cumplimiento metodológico se ve realizado si se obtienen los resultados, o en su defecto, si se deja todo preparado para que se realice la medición.

### 1.4.3. Etapa 3: Base de datos

Es parte de la metodología la compilación de: descripciones, observaciones, modelos, mediciones y resultados, de las muestras estudiadas. El objetivo es establecer de manera clara una base de datos de las muestras estudiadas la cual pueda ser consultada. Incluso si se deja todo preparado para realizar posteriores mediciones, que esta información o cualquier información extra sea fácil de complementar, ya sea en un capítulo o una sección individual o adjuntándose la nueva información en alguna tabla, esquema o gráficos. Puede consultarse esta etapa en la sección de apéndice.

Por lo tanto, la metodología principal es tomar toda la información y concretarla en la confección de capítulos y los apartados de apéndice. Para ello se realizan principalmente textos explicativos, figuras y tablas resúmenes, con y sin fotos.

### 1.4.4. Etapa 4: Permutación para la validación de datos

Con la recopilación de las características de cada muestra se realizan ensayos de permutación para poder validar la correlación o no correlación de las muestras a trabajar. Para el desarrollo de esta metodología se requiere si o si la base de dato, luego el primer paso fue crear un código en python para realizar las permutaciones para comparar dos grupos y poder validarlos. Se permuta 800 veces con criterio de no muestras repetidas en la selección para el momento de comparar. El criterio para validar que ambos grupos son comparables o no son comparables es mediante la aceptación o el rechazo de la hipótesis bases. Este es el principio de la permutación considerando un alpha de 5 por ciento y la media de los grupos, es decir que la media este o no este dentro del 95 por ciento del muestreo representado en el histograma. El código usado es el ilustrado en la imagen, donde primero se seleccionan los grupos por separado desde la base de dato y luego en el código se selecciona la medida-valor-característica a evaluar para considerar comparable o no comparable, y validar así futuros trabajos sobre dicha información. Ejemplo: seleccionamos muestras de Patagua y muestras de Don Leopoldo y comparamos el valor de Oro en cada uno permutando para ver si corresponden a la misma distribución o son diferentes (Figura 1.2).

### 1.4.5. Etapa 5: Relación entre teoría y datos reales: Discusiones/-Conclusiones

Con todas las etapas previas realizadas, en esta cuarta fase se interrelaciona todo los conocimientos y observaciones obtenidos (tanto teóricos como del caso de estudio) para dar un análisis, una discusión y establecer una conclusión respecto a el efecto de la inmisibilidad en el transporte de los metales, el rol de los volátiles en la formación de depósitos de oro, plata, y como estos pueden, a través de las inclusiones fluidas y/o técnicas analíticas, ser utilizados para la exploración. Se puede proyectar o indicar que información falta, que trabajos serían buenos o útiles de realizar o, que áreas, temáticas o teorías abordar.

```

import numpy as np
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import rc
from matplotlib.ticker import FormatStrFormatter
from mpl_toolkits.axes_grid1 import make_axes_locatable
import seaborn as sns
import pandas as pd

# ####
sns.set()
plt.rcParams["mathtext.fontset"] = "cm"
plt.rcParams['font.family'] = 'Tahoma'

font = {'family' : 'Tahoma',
        'size'   : 10}

rc('font', **font)
plt.rcParams['axes.labelsize'] = 10
# ####

File = np.loadtxt("DataValues.txt")

Var = 4 # Columna en File  0:Au, 1:Ag, 2 Zn, 3 Pb, 4 Cu
NumRep = 800

VecMean = np.zeros((NumRep))
T_obs = np.mean(File[:23,Var]) - np.mean(File[23:,Var])
print("T_obs",T_obs)
for ind_r in range(NumRep):
    #print("Repeticion", ind_r+1)
    Index = np.random.choice(len(File[:,0]),23, replace=False)
    Mean_A = np.mean(File[Index,Var])
    Mean_B = np.mean(File[~Index,Var])
    VecMean[ind_r] = Mean_A - Mean_B

fig, axs = plt.subplots(figsize=(6,2.5))#, gridspec_kw={'hspace': 0.2, 'wspace': 0.2})

sns.distplot(VecMean, ax=axs, kde=0,bins=20)#, norm_hist=True,rug=True,bins=10)
axs.axvline(T_obs,color='orange', linestyle='--', label='Valor observado')
axs.legend(loc=1, fontsize=9)
#axs.set(xlabel='Dif. en medias - log(Ag)', ylabel='Frecuencia')
axs.set(xlabel='Dif. en medias - log (Cu)', ylabel='Frecuencia')

fig.savefig("Figures/Histohg_Cu.pdf", dpi=800, bbox_inches='tight')

plt.show()

```

**FIG. 1.2:** Imagen que ilustra el código utilizable para realizar permutaciones y exportar los histogramas gráficos.

## Capítulo 2

# Los volátiles en el transporte de metales en sistemas hidrotermal

La relación entre sistemas magmáticos y sistemas hidrotermales en la formación de los depósitos minerales se ha comprobado y estudiado exhaustivamente (Burnham, 1979; Ding et al., 2018; Hedenquist, 1995; Hedenquist and Lowenstern, 1994). Una comprensión en el desarrollo de ellos o el entendimiento de los procesos que sufren los metales en el transcurso de su relación y formación, ayudarían a la exploración de depósitos minerales. Esto conllevaría beneficios para la industria minera, logrando un impacto económico-social directo (Álvarez et al., 2018; Martens and Rattmann, 2001). La relación existente entre los magmas y los fluidos hidrotermales con respecto a los metales es la estabilidad y solubilidad de los complejos metálicos al momento de ser captados/retenidos y transportados de un medio a otro. El estudio de los complejos se ha enfocado en entender su comportamiento ante un medio acuoso. No obstante, en el último tiempo se ha demostrado que los gases están presentes en la formación de depósitos mineral y por ende la necesidad de comprender la relación entre metales y vapor de los sistemas magmático-hidrotermal podría mejorar aún más la comprensión y el desarrollo de los yacimientos (Bodnar et al., 2014; Roedder, 1984; Yardley and Bodnar, 2014).

Los volátiles en un sistema pueden ser comprendido como compuestos disueltos o disociados, los cuales están presentes en el fundido-fluido o pueden hallarse formando parte de una estructura mineral. El análisis que se les da usualmente a nivel de corteza, que a su vez es donde suelen desarrollarse los yacimientos, es comúnmente estudios mediante ecuaciones termodinámicas o análisis de inclusiones fluidas y/o fundidas por técnicas analíticas (Bodnar et al., 2014; Pearson, 1963; Pokrovski et al., 2014, 2008; Yardley, 2005). La presente investigación engloba una revisión sobre la distribución de los gases en el manto, corteza, ambiente de subducción y la relación con la formación de magmas, junto al análisis de complejos para oro, plata, plomo y zinc en fluidos gaseosos hidrotermales, para englobar aspectos generales que puedan ayudar a quienes inician en la relación de vapor y depósitos mineral.

## 2.1. Volátiles: Composición, distribución y relación con respecto al manto, corteza, magma y fluidos hidrotermales

En los procesos de acreción que formaron la Tierra, se produjo una distribución de los elementos volátiles en sus diferentes partes: manto, manto superior, corteza, etc., pudiendo interpretarse como una acreción heterogénea de volátiles considerada como un sistema carbón-hidrógeno-nitrógeno (C-H-N) o ampliándose a un sistema carbón-hidrógeno-oxígeno-nitrógeno-azufre (C-H-O-N-S) (Javoy, 1997; Zhang et al., 2009). Javoy (1997) considera que porcentualmente se tenía un total de: 6 % hidrógeno, 48 % carbón y 70 % de nitrógeno entre manto superior, corteza y océano-atmósfera. Sugiere además que el Nitrógeno (N) está principalmente retenido en la parte mantélica, mientras que el carbón, como compuestos CO-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> y el agua están más presentes en la corteza, en ambientes más oxidantes. Hier-Majumder and Hirschmann (2017) calcularon que el manto está enriquecido en C-H-N por sus características incompatibles. Estos fueron repartidos en las etapas tardías de acreción cosmoquímica de manera que quedó un 77 % de agua y un 12 % de dióxido de carbono en el manto producto de la cristalización del magma oceánico (Hier-Majumder and Hirschmann, 2017). Sugieren además una composición total de la tierra (BSE, Bulk Silicate Earth, por sus siglas en inglés, ignorando el núcleo) con rangos entre 38-93 % de hidrógeno, 50-98 % carbono, 15-60 % nitrógeno. Los valores actuales de concentraciones de CO<sub>2</sub> en el manto serían entorno a los 740ppm. Hirschmann (2016) resalta que los procesos de acreción tanto tempranos como tardíos tienen igual importancia en la distribución de los volátiles en el BSE. Esta partición de las distintas especies volátiles tiene relación con la fugacidad de oxígeno y la composición del fundido (Hirschmann, 2016). Por ejemplo, el carbón (C) al ser el elemento siderófilo más compatible para formar minerales no metálicos en condiciones mantélicas, en ambientes reductores es estable entre carbonatos y vapor CO<sub>2</sub>. Por su parte, el hidrógeno es más compatible cuando el medio tiene fugacidad de oxígeno tal que el grado de oxidación permita disolver -OH o H<sub>2</sub>O (Hirschmann, 2016).

La curva del solidus de rocas mantélicas estudiadas como un sistema lertzolita-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O requieren necesariamente la presencia de volátiles, para lograr el proceso de fusión de la roca bajo los 100km (Wyllie, 1995; Wyllie and Ryabchikov, 2000). Estos volátiles se encontrarían disueltos principalmente en los minerales. La mínima presencia de CO<sub>2</sub> haría variar (1) la posición con respecto a la curva del solidus y (2) la presión necesaria para fundirlos. Los distintos volátiles emitidos provenientes de los minerales junto a los eventos de metasomatismo del manto, fomentan una diferenciación y la movilidad de los volátiles y elementos trazas, resultando en la generación de diversos tipos de magmas. Por lo tanto, se puede pensar que diferentes magmas (kimberlitas, lamproitas, otros magmas alcalinos primarios o basalto picriticos) podrían representar diferencias composicionales en la químicas de la fuente e historias evolutivas distintas. (Wyllie, 1995; Wyllie and Ryabchikov, 2000).

Wyllie (1995) postula que en un sistema lertzolita- CO<sub>2</sub>- H<sub>2</sub>O, a presiones más altas que la curva de solidus, se tiene que: el fundido cerca de dicha curva correspondería a una carbonatita dolomítica con relación carbonato-magnesio Ca/Mg >1 que no sobrepasa el 10 % de silicatos disueltos. Además, los fundidos basálticos y carbonatados migrarían fácilmente a través de canales interconectados, de las peridotitas mantélicas, evitando que los diferentes compuestos

acuados y volátiles tengan un rol químico preponderante, quedando atrapados entre poros e intersticios (Wyllie, 1995).

Las distribuciones espaciales, e incluso temporales, de los diferentes volátiles en el manto se ha postulado como una respuesta a la fugacidad de oxígeno presente en la zona mantélica y su relación con los diversos ambientes tectónicos (Ballhaus, 1993; Deines, 1980; Thomassot et al., 2007; Zhang et al., 2009).

Junto a lo anterior, se han llevado a cabo diversos estudios respecto a la evolución magmática y las consecuencias en los volátiles bajo diferentes condiciones de presión, temperatura, composición, mecanismos de formación, mecanismos de ascenso (fusión parcial, total, cristalización fraccionada, separaciones de fases), incluyendo además la evaluación de la presencia de volátiles entre los diferentes ambientes tectónicos. A partir de ellos, se consideran: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub>, como los compuestos gaseosos más relevantes (Zhang et al., 2009). Estos estudios, en conjunto a corroboraciones de mediciones directas de magmas, inclusiones fundidas y/o fluidas en minerales de origen mantélico, han permitido realizar conclusiones de las condiciones químicas. Ejemplos de estas conclusiones son: Manto litosférico profundo está enriquecido en especies reductoras (H<sub>2</sub> o CO), niveles superficiales del manto litosférico presentan composiciones iniciales ricas en especies reducidas, como las antes mencionadas, que bajo ciertos metamorfismo se puede llegar a un enriquecimiento en especies oxidadas tales como CO<sub>2</sub> e incluso SO<sub>2</sub> (Ballhaus, 1993; Zhang et al., 2009).

Se incluyen estudios sobre las diferentes composiciones de volátiles en los basaltos oceánicos donde predominan H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> y en menor medida de CO, empobrecidos en CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>. Aquí, los magmas tipo MORB (*Mid-ocean ridge basalt*) son los más empobrecidos en volátiles, mientras que los IAB (*Island arc basalt*) presentan mayor concentración. Entre medio se encuentran los OIB (*oceanic island basalt*) y BABB (*Back-arc basin basalts*), por tanto se resume la siguiente relación comparando las concentraciones de las composiciones de los volátiles (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>): MORB pose menos que (<) OIB, luego OIB < BABB, finalmente BABB < IAB (siento este último el más enriquecido en los volátiles mencionados).

Se ha demostrado que la evolución de un magma granítico es condicionada fuertemente por la presencia de CO<sub>2</sub> en la fuente magmática. Esto en condiciones de corteza y bajo diferentes mecanismos de ascenso (isobárico, polibárico, fraccionamiento, sistema cerrado, sistema abierto) y bajo distintas concentraciones de agua y dióxido de carbono (Holloway, 1976; Wyllie, 1979). Esto influye tanto en situaciones de cristalización isobáricas como polibáricas, ya sea como sistema abierto o cerrado (Holloway, 1976). Wyllie and Huang (1975) y Wyllie (1979) evalúan la evolución de un magma a partir de un manto interpretado bajo el sistema peridotita- H<sub>2</sub>O- CO<sub>2</sub>, y CaO- MgO- SiO<sub>2</sub>- CO<sub>2</sub>, con las consecuencias en los volátiles producto a las formaciones de fases mineralógicas. Se destaca que si o si existe una interacción con CO<sub>2</sub>, es decir, en el manto es necesaria su presencia, de lo contrario el sistema requeriría condiciones inusuales de temperaturas muy altas. Normalmente el dióxido de carbono puede hallarse reservado bajo la asociación mineralógica de forsterita + clinopiroxeno + ortopiroxeno + dolomita en solución sólida.

En su modelo, inicialmente se tiene un fundido con alta presencia de agua y dióxido de carbono. El dióxido de carbono se disuelve junto al agua para formar parte del magma pero, con leves ascensos y cristalizaciones, rápidamente se exsuelve dada su baja solubilidad, per-

mitiendo que se genere una fase vapor. La creación de una nueva fase conlleva a que el agua se reparta entre las fases presentes, e incluso puede provocar modificaciones composicionales del magma. Esto traería consecuencias en la formación de los minerales y sus texturas (Holloway, 1976), más aún, dependiendo de lo sucedido y si pasa por una zona de subducción el magma puede concentrar, en sus etapas tardías de ascenso, compuestos del tipo HF y HCl, desarrollando fluidos (acuosos y gaseosos) enriquecidos en cloruro. Esto sucede con las pegmatitas que se asocian a plutones graníticos representando un magma granítico residual enriquecido en H<sub>2</sub>O, o las carbonatitas que se asociarían a complejos plutónicos dominados por rocas alcalinas subsilicatadas, presentando elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>.

Lowenstern (1995), mediante diversos datos de inclusiones fundidas de magmas silíceos (dacitas y riolitas), logra determinar modalidades de ascenso y tendencias de concentraciones metálicas como también de volátiles. Establece que el agua es el volátil más predominante y puede encontrarse distribuido de manera homogénea o heterogénea en el fundido, y en último caso generar zonaciones de abundancia en el fundido. En segunda medida CO<sub>2</sub>, y en menor medida pueden hallarse gases tales como Cl y F, los cuales suelen estar asociados al ambiente tectónico de formación del magma silicatado. Dependiendo del grado de oxidación del magma, producto de la disolución de sulfuros, pueden hallarse porcentajes de azufre.

Holloway and Jakobsson (1986) estudian la partición de distintas especies volátiles entre la fuente, el fundido y fases fluidas separadas de estos últimos, hallando diferentes concentraciones entre los magmas y los fluidos y diferencia en la composición/proporción de las fases gaseosas proveniente de la fuente. Concluyen que de estar presentes, el orden jerárquico de predominancia es: H<sub>2</sub>O > CO<sub>2</sub> > CO > H<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub>. Recalcan además que la solubilidad de los volátiles depende de la fugacidad de oxígeno y componentes del sistema (minerales hidratados, anhídricos y efecto buffer), por lo que fuentes mantélicas oxidadas generarían H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> con casi nula presencia de otros volátiles en el fundido resultante. Dado que el CO es 9 veces más soluble que el CO<sub>2</sub>, se esperan razones altas de CO/CO<sub>2</sub> en el fundido y bajas en fluidos separados del magma.

En ambientes convergentes se ha demostrado que las zonas de subducción funcionarían como un medio importante para emitir y transportar CO<sub>2</sub> hacia la superficie (Elderfield and Schultz, 1996; Hilton et al., 2002; Sano and Williams, 1996) estimándose que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en los fundidos producidos serían de un 85-90 %, aportados por la fusión del slab, y un 10-15 % aportados por la fusión del manto. Este último valor varía en los trabajos de Wallace (2005) donde se postulan porcentajes de entre un 3 % a un 22 %. Además, se estima que el aporte del slab proviene de la descarbonización de 15 % sedimentos pelágicos y 70 % de los sedimentos marinos y minerales carbonatados del slab. Esta descarbonización podría suceder entre los 80 y 120 km de profundidad (Sano and Williams, 1996; Wallace, 2005). Particularmente, en ridge oceánicos el flujo geoquímico de los volátiles dependería del régimen de temperatura y presión (Elderfield and Schultz, 1996). En el arco andino se estima que el flujo de CO<sub>2</sub> es de  $268.8 \times 10^9$  mol/año y SO<sub>2</sub>  $47.3 \times 10^9$  mol/año, destacando que el volátil emitido más abundante es H<sub>2</sub>O (tablas 9 y 14 de Hilton et al.).

Los trabajos de Wallace (2005) y Portnyagin et al. (2007) son una revisión más exhaustiva de los volátiles presentes en los distintos magmas según la zona, los procesos y condiciones en que se generan. Portnyagin et al. (2007), en su estudio del arco Kamchatka, postulan la

existencia de una zonación geoquímica por debajo del arco. Esta existencia de zonación puede ser extendida a otros sistemas de arco. Enfatizan que la heterogeneidad de la fuente influye en las concentraciones de los volátiles en los resultantes magmas y que depende directamente del grado de fusión parcial y la zona donde se produce con respecto a la profundidad del slab, ya que las concentraciones geoquímicas difieren según la profundidad. Por ejemplo, el aporte de S es mayor en zonas más profundas respecto al arco, favoreciendo el enriquecimiento.

Si los magmas son generados en la zona *tras* arco, donde la descompresión es el principal mecanismo de fundición, es necesaria la participación de volátiles para reducir puntos de fusión, siendo el agua el principal agente. Su rol es inversamente proporcional al grosor de la corteza (en zonas delgadas se pueden producir magmas en seco). Wallace (2005) muestra que los valores de volátiles de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, S y Cl en arcos, tras arcos y otras zonas, presentan una variación de agua con respecto a la posición del arco propiamente tal. Este comportamiento no se observa al analizar el CO<sub>2</sub>, para el cual los procesos de desgasificación en superficie influyen directamente pudiendo acontecer en cualquier lugar e incluso siendo susceptible a los procesos de desgasificación del agua, dado que modifica su solubilidad.

En zonas de subducción, los magmas basálticos tienen un amplio rango de concentración de agua disuelta, de <0.5wt. % a 8wt. %, donde no es posible descartar su dependencia a la posición donde se genera con respecto al arco y su dependencia a otros procesos como exsoluciones someras por cristalización o descompresión (Wallace, 2005). Las concentraciones de dióxido de carbono varían desde 0.6 a 1,3wt. % pero las mediciones en inclusiones fundidas resultan en valores bajo el límite de detección y hasta 2500ppm, evidenciando pérdidas de CO<sub>2</sub> (Wallace, 2005). Para el Cl se tienen valores medidos en inclusiones fundidas que varían entre los 500 y 2000ppm, siendo valores mayores que los basaltos de ridge medio oceánico. Esta situación también se observa con el S y se explicaría debido a que la zona de subducción recicla estos volátiles. Se concluye entonces que el Cl no vuelve al manto, el S vuelve 9 veces más a los reservorios superficiales y el C se recicla en partes iguales, 50 % Wallace (2005).

Las evoluciones de los magmas durante su ascenso tienen directa relación con la formación de fluidos hidrotermales, desde la consideración del sistema más simple - que serían fluidos hidrotermales representados por H<sub>2</sub>O - pasando luego por sistemas bifásicos característicos como el sistema H<sub>2</sub>O-NaCl, hasta la proyección de otros multicomponentes con tres o más fases (CO<sub>2</sub>- más gases o más sales, SO<sub>2</sub>, KCl, etc) (Burnham, 1979). Esta relación sucede principalmente por la exsolución de fluidos acuosos y gaseosos del magma debido a (1) diferentes factores tales como la descompresión, cristalización, mezcla de magma, mezcla con aguas meteóricas, etc, o (2) a su mera influencia termal, dada la proximidad de fluidos con respecto a las intrusiones magmáticas.

Cuando el magma sufre una separación de fases y genera uno o dos fluidos (acuoso y/o gaseoso) estos fraccionan los elementos que componían dicho magma, volviéndose estos fluidos generados en agentes importantes para el aporte de agua, metales y ligantes hacia los fluidos hidrotermales que favorecerían la formación de depósitos mineral (Burnham, 1979; Hedenquist and Lowenstern, 1994). Los principales ligantes son: Cl<sup>-</sup>, HS<sup>-</sup> y OH<sup>-</sup>, sin embargo la estabilidad de los complejos depende de la naturaleza de los metal y los ligante inmersos en el sistema (el principio de relación de ácido-base/fuerte-débil puede brindar nociones sobre dicha estabilidad) (Seward et al., 2014; Williams-Jones and Migdisov, 2014). Los componen-

tes magmáticos en la formación de los depósitos minerales están fuertemente relacionados a la distancia respecto a un sistema magmático y con la historia de este último. Así, un magma que sufre fusión parcial del manto incorpora elementos más incompatibles (como el Au o el grupo del platino) debido a que funde minerales de sulfuros Fe-Ni, trasladándolos a niveles más superficiales, cercanos a la corteza, facilitando la formación de yacimientos. Si durante el ascenso el magma sufre una desgasificación, los metales son repartidos a fases gaseosas las cuales son luego absorbidos por aguas meteóricas, pudiendo alcanzar niveles aun más superficiales ([Hedenquist and Lowenstern, 1994](#)).

El transporte de los metales desde un sistema magmático a uno hidrotermal se realiza mayoritariamente a través de complejos clorurados, bisulfurados o hydroxiácidos. Para una composición del sistema dada, los niveles de saturación determinan la retención y la capacidad de transporte del fluido magmático-hidrotermal. Así, fluidos con composiciones de salinidad de 3wt %NaCl y 4wt % de vapor  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}$  están presentes en la formación de epitermales de baja sulfuración de Au, mientras que en el caso de epitermales de plata, las composiciones alcanzan de 10 wt %NaCl a 15 wt %NaCl. Por lo tanto, la mayoría de los magmas sufren saturación de volátiles en su ascenso y dividen en diferentes grados su salinidad y sus gases saturados entre los fluidos presentes. Estos exsuelven producto de la descompresión, cristalización, mezclas u otro evento durante el ascenso. Además, se genera una redistribución de los metales entre las fases coexistentes. Los gases exsueles más comunes son  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{HCl}$ , predominando la emisión de gases de agua y  $\text{SO}_2$ , en menor medida el  $\text{CO}_2$ , usualmente con bajos niveles de Cl y nulos de F ([Hedenquist, 1995](#); [Hedenquist and Lowenstern, 1994](#)).

Concretamente, la partición de los metales hacia una fase líquida o una fase poco densa exsueles de un magma esta directamente relacionada con la solubilidad de sus complejos en cada una de estas fases, según las condiciones de presión, temperatura, densidad, fugacidad, pH, entre otras. Así, a presiones más altas y temperaturas moderadas-altas, los complejos clorurados suelen ir a la fase líquida pudiendo incluso formar fluidos hipersalinos (salmueras densas) por efectos de la compatibilidad de KCl y NaCl. Aquellos complejos clorurados que llegan a ser transportados en fluidos de baja densidad (vapor) estarían relacionados a la presencia de  $\text{HCl}$ . Sin embargo, si este gas se comienza a destilar pasarían a precipitarse o diluirse en la fase líquida ([Hedenquist, 1995](#)). El estudio realizado por [Webster \(1997\)](#) en sistemas porfídicos, muestra que un magma exsuelve  $\text{H}_2\text{O}$  y ligantes clorurados (-Cl) sin necesidad de sufrir una fuerte despresurización, y si por tan solo una extensa cristalización fraccionada que genera cambios drásticos en las solubilidades de estos componentes a medida que se modifican las composiciones producto de la cristalización. Estos fluidos exsueles pasarían a ser principales agentes formadores de mineralización en términos de fluidos hidrotermales. Evidenciando que la solubilidad del -Cl en el líquido no depende de la abundancia de K, Fe, Mn, Ti y si, en magmas aluminosilicatados, de la proporción e interacción de Al, Na, Ca, Mg. Por lo que complejos tipo K-Cl, Ti-Cl, Fe-Cl, Mn-Cl para transportar metales no son relevantes. Pero si el sistema tiene concentraciones de F, estos complejos aumentan su rol, dado que la presencia de F desestabiliza los enlaces O-Al-O, dejando el sistema enriquecido en  $\text{Al}^{+3}$ , facilitando la formación de complejos tetraedros.

La solubilidad del  $\text{CO}_2$  en diferentes magmas ha sido estudiado por [Lowenstern \(2000\)](#) en función de la presión, temperatura y presencia de agua, de igual forma se estudia la solu-

bilidad del Cl. Dicho estudio indica que el  $\text{CO}_2$  tiende a ser menos volátil a altas presiones, en otras palabras la solubilidad del  $\text{CO}_2$  es directamente proporcional con la presión (aumenta cuando aumenta la presión). Además, agregar agua al sistema fundido- $\text{CO}_2$  provoca que disminuya la solubilidad de este último. Por otro lado, el Cl favorece la formación de salmueras a bajas presiones (fase acuosa), a su vez es menos volátil que el  $\text{CO}_2$  por lo tanto cuando se habla de formar especies volátiles a bajas presiones de vapor su rol es mayor. La coexistencia de Cl y  $\text{CO}_2$  implica usualmente fases que son inmiscibles (no mezclables), por lo que dependiendo de sus concentraciones, estas se separaran y generaran líquidos y vapores a presiones y temperaturas dadas. Comúnmente esto sucede a niveles medios y/o superiores de la corteza. Como idea general vale establecer que: durante un ascenso del magma, de este primero se volatiliza el  $\text{CO}_2$  (evento que sucede a mayor profundidad) y luego, si se continua ascendiendo, el Cl sufre su separación y se comporta como volátil (a menor profundidad-menor presión-), pero antes de ello se puede ir generando una fase acuosa (miscible con el fundido hasta los  $800^\circ\text{C}$ ) rica en cloro llamada salmuera.

Finalmente, [Taran \(2009\)](#) identifica que la composición de aniones y cationes en los fluidos hidrotermales depende del origen del mismo. En su estudio, el fluido hidrotermal esta caracterizado por  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ , teniendo un carácter ácido. Esto provendría de un fundido originado por la fusión de corteza y cuña mantélica en la zona de subducción.

## 2.2. Revisión del agua como volátil y su relación con el magma y los metales

Como se ha expuesto en la sección anterior, el agua se encuentra siempre presente en los sistemas geológicos y su comportamiento como fluido gaseoso o liquido depende de las condiciones del sistema. Se ha hablado como un magma mantélico en su ascenso sufre desgasificación y que los gases principales que interactúan en dicha situación son el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{O}$ , siendo el dióxido de carbono exuelto primero a mayor profundidad. Ahora se informara sobre como interactúa el agua en la evolución de un magma más félsico, al continuar ascendiendo, hasta su transición a un fluido hidrotermal, y el efecto del agua sobre los metales bases en esta evolución.

Las propiedades intensivas como presión, temperatura, densidad, solubilidad, compresibilidad, punto de ebullición, etc, son claves para entender el comportamiento de una sustancia, y en particular, son muy útiles para comprender los sistemas magmaticos y su evolución. Al considerar también propiedades como composición, tenemos las propiedades presión-temperatura-volumen-composición (PTVX) como las propiedades básicas de información sobre fluidos mineralizadores, hidrotermales. La manera para lograr estudiar estos fluidos, en base a estas propiedades, es mediante diagramas de fase.

El diagrama de fase más simple para representar un fluido en ambiente geológico viene dado al considerar solo una sustancia, en particular, solo agua y su comportamiento en función de la presión y la temperatura. Paralelamente se puede tener la misma situación para el dióxido de carbono. De igual forma, diagramas de fase binarios como  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$  y  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  otorgan un entendimiento más cercano a los fluidos hidrotermales que tienen lugar en los procesos geológicos. Más complejo son los sistemas ternarios (o de más componentes)

como diagramas  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  que representan fluidos de mayor composición.

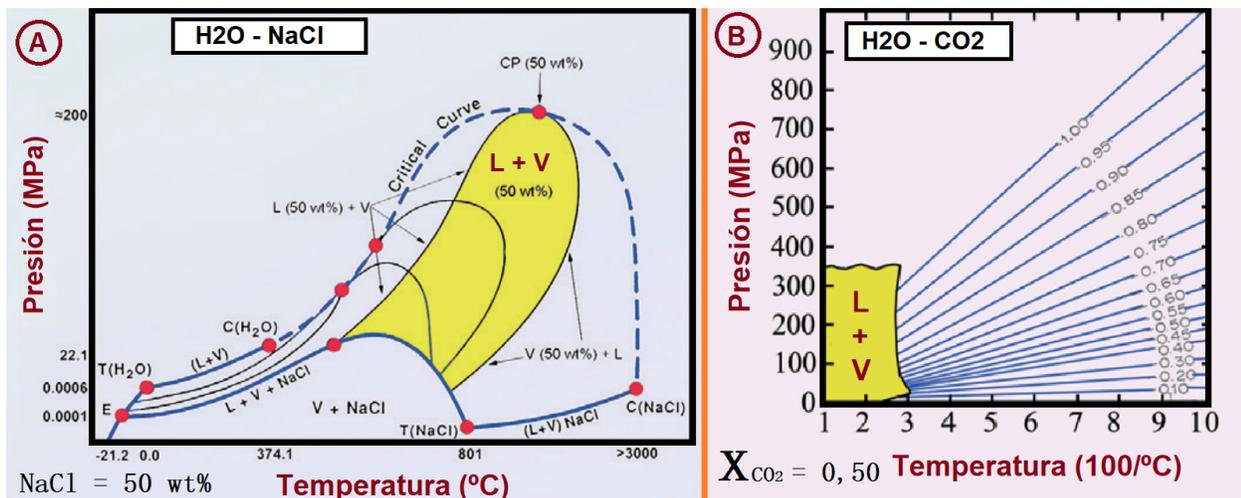
### Diagrama solo $\text{H}_2\text{O}$ y solo $\text{CO}_2$

El sistema de agua pura presenta un punto triple (TP) a los  $0,01^\circ\text{C}$  y  $0,0006\text{ Mpa}$ , lo que quiere decir que a dichas condiciones de temperatura y presión puede coexistir agua sólida, líquida y gaseosa. Luego, a partir del punto triple, se extiende una curva que indica la coexistencia de líquido y vapor a tales condiciones hasta llegar al punto crítico (CP) que se encuentra a los  $373,95^\circ\text{C}$  y  $22,064\text{ MPa}$ . Fuera de esta curva, a cualquier presión y temperatura dada, el fluido existe en una sola fase (ya sea líquida o vapor). Por lo general será líquido al hallarse a presiones sobre la curva de coexistencia y a temperaturas menores del CP, y en vapor si las presiones están bajo la curva. A temperaturas mayores que las del punto crítico el fluido es llamado *fluido supercrítico*. La densidad del fluido puede ser representado por curvas isocóricas que representan un volumen constante y otorga nociones de la densidad, y compresividad del fluido, esta última propiedad está relacionada a la pendiente de la curva isocórica. Con ella se interpreta que el vapor de agua tiene niveles de compresividad sin embargo el agua líquida es altamente incompresible. Esto último tiene relevancia en la solubilidad del agua en el magma al momento de sufrir descompresión o presión. La curva isocórica de densidad  $0.322\text{ g/cm}^3$  separa el comportamiento líquido o vapor en condiciones de temperatura mayor a la del punto crítico.

En ambientes tipo manto superior, cuencas sedimentarias o de alto grado metamórfico se pueden hallar fluidos con escasa cantidad de agua y con mayor predominancia de dióxido de carbono o fluidos carbonatados. En dicha situación la manera más simplista de representar el fluido y entender su comportamiento es mediante el diagrama de fase unicomponente de  $\text{CO}_2$ . Al igual que el diagrama del agua, el sistema presenta un punto triple a  $-56.558^\circ\text{C}$  y  $0.518\text{ MPa}$  y un punto crítico a  $30.978^\circ\text{C}$  y  $7.3773\text{ MPa}$ , conectados ambos puntos por la curva de datos presión-temperatura donde coexiste dióxido de carbono líquido y vapor. De igual forma, bajo la temperatura del punto crítico y con presiones mayores a las de la curva se tiene un campo de fase líquida y, a presiones menores un campo de fase vapor. Sobre la temperatura del PC también se comporta como un *fluido supercrítico*. La curva isocórica de densidad  $0.462\text{ g/cm}^3$  separa el comportamiento líquido o vapor en condiciones de temperatura mayor a la del punto crítico para el  $\text{CO}_2$ . Una gran diferencia en las isocóricas del sistema  $\text{CO}_2$  versus la del agua es la pendiente menor que tienen, indicando mayor grado de compresividad, y por lo tanto puede variar incluso la densidad al modificar su volumen en función de la presión, lo que hace a su vez susceptible la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en función de la profundidad. Esto es lo que se ha presentado en el capítulo anterior como desgasificación de  $\text{CO}_2$  en magmas mantélicos al momento de ascender, separándose del sistema a temprana evolución magmática.

### Diagrama $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ y $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$

Al ser muy difícil hallar fluidos totalmente puros en los sistemas geológicos, una mejor aproximación de estos es a partir de diagramas binarios. Una información importante obtenida de estos diagramas es el campo de inmiscibilidad de los componentes del sistema, es decir, una zona que encierra condiciones de temperatura y presión tales que al hallarse el fluido bajo ellas este sufriría inmiscibilidad.



**FIG. 2.1:** Representación gráfica de los diagramas de fases del sistema H<sub>2</sub>O-NaCl y H<sub>2</sub>O - CO<sub>2</sub>. La zona amarilla en ambos diagramas representa la zona de inmiscibilidad bajo las condiciones de Presión, Temperatura y Concentración correspondiente. Para la figura a se tiene 50wt % de NaCl y la figura b 0,5 de concentración de CO<sub>2</sub>, con líneas de densidad. L: liquido, V: vapor, C: punto crítico, T: punto triple, CP: punto crítico del sistema. Tomado y modificado de (Yardley and Bodnar, 2014)

El sistema H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> modifica el campo de inmiscibilidad según las concentración de CO<sub>2</sub> presente, obteniéndose el mayor rango si el fluido presenta un 50 % de CO<sub>2</sub>. El campo de inmiscibilidad aumenta si se va de 0 a 50 % y disminuye desde los 50 % hasta el 100 %. Las situaciones donde suelen ser completamente miscibles suelen ser bajo condiciones metamórficas de alto grado tipo esquistos verdes o mayores, indicando que la inmiscibilidad de estos dos componentes (cuando el fluido sufre separación de fase luego de estar miscible) sucede a rangos de temperatura y presiones mayores que las de cada sistema individual.

Otra relevancia de la composición del fluido binario H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> es que este modifica su compresibilidad de manera directa a la concentración de dióxido de carbono, siendo más compresible a mayores cantidades de CO<sub>2</sub>. Esto es acercarse a la situación final dado por el caso ideal de puro CO<sub>2</sub>, análogamente al ser casi solo agua se asemeja al sistema H<sub>2</sub>O puro.

El sistema H<sub>2</sub>O-NaCl representa la manera más resumida y amplia de los fluidos hidrotermales o mineralizadores si se asume que las otras sales y cationes que pueden estar presentes cumplen un rol menos importantes al hallarse usualmente en cantidades muy bajas, sin embargo esta influencia debe ser considerada dependiendo el estudio que se realice.

Al igual que el diagrama H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>, una zona importante es el área de inmiscibilidad que presenta el fluido y que depende de la salinidad del sistema (representada por la concentración en peso de NaCl). Esta dependencia con la salinidad viene originada por la curva que conecta los puntos críticos del sistema H<sub>2</sub>O-NaCl, y otros puntos importantes como: punto crítico del Agua pura, punto triple del agua pura, punto triple del NaCl, punto crítico del NaCl, punto eutáctico del sistema (Figura 2.1). La relevancia de la salinidad es principalmente el desplazamiento del punto crítico del sistema lo que implica un aumento de la zona de inmiscibilidad y que a su vez esto se genere a temperaturas y presiones mayores. Por lo que, fluidos con 50 por ciento de salinidad representen sistemas de altas temperaturas y presiones, tales como profundidades moderadas (200MPa) y 800 °C de temperatura para que el fluido

sufra inmiscibilidad.

Esta información es relevante para comprender la evolución magmática y la transición a fluidos hidrotermales. Y la mejor manera de obtener datos sobre la presión, temperatura, composición, densidad, de un fluido, como también saber si sufrió inmiscibilidad al momento de suceder un proceso geológico es a partir del estudio de inclusiones fluidas. Las inclusiones fluida es la representación directa del sistema.

### Diagrama ternario $\text{H}_2\text{O-NaCl-CO}_2$

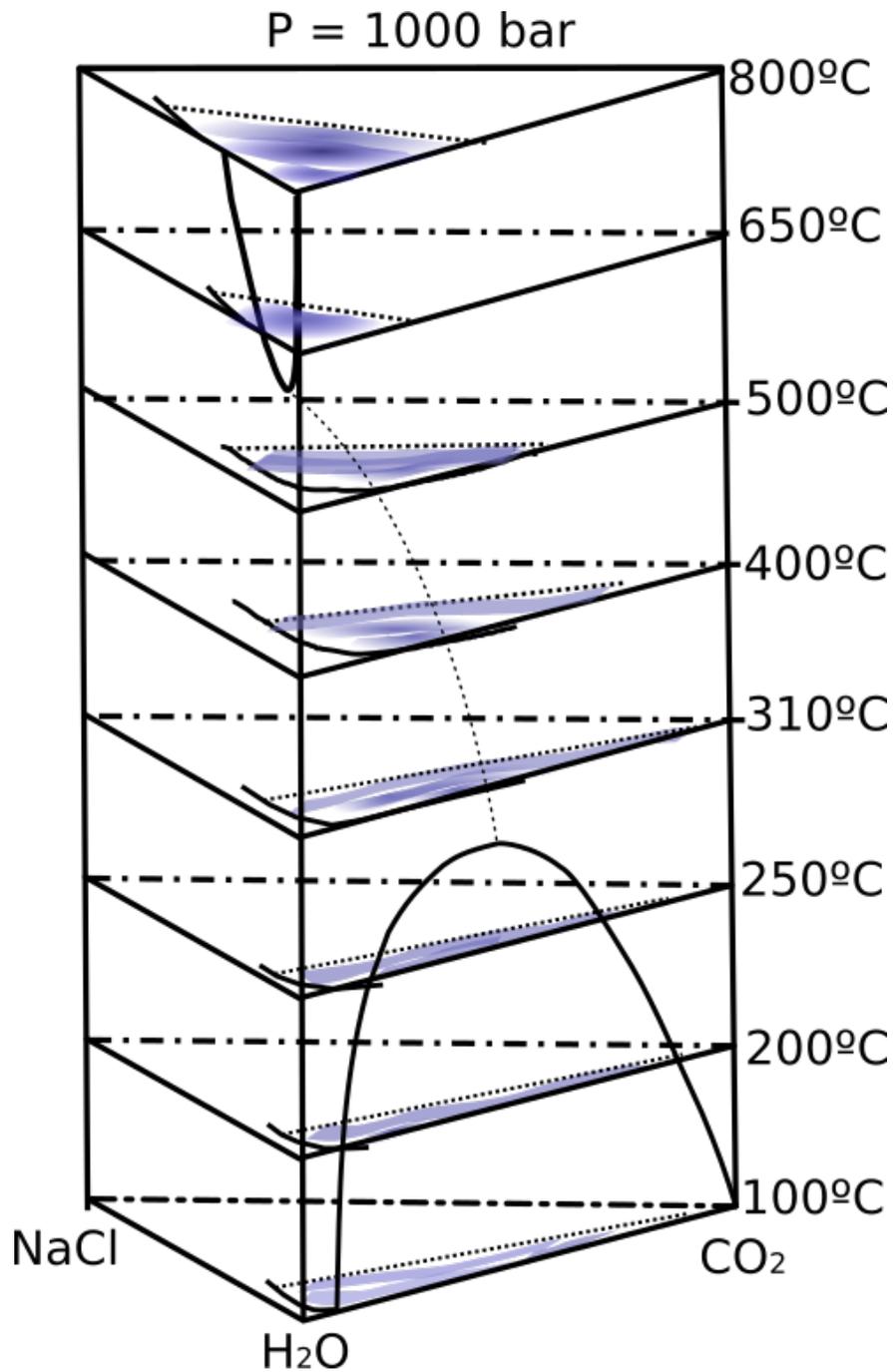
Los fluidos geológicos implicados en los procesos magmáticos-hidrotermales contienen cantidades variables de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NaCl}$ , y ambos pueden comportarse de manera inmiscible, no mezclable, en rangos de presiones y temperaturas en la corteza. El sistema  $\text{H}_2\text{O-NaCl-CO}_2$  tiene notoriamente menos cantidad de estudios y modelos, su diagrama de fase puede consultarse en la Figura 2.2 y Figura 2.3

Con ecuaciones de estados representativos del sistema trifásico, [Duan et al. \(1995\)](#) logra dar una aproximación tanto empírica como teórica sobre las fases existentes a ciertas condiciones de presión, temperatura, composición y volumen. Con ello se generan diagramas ternarios a condiciones de presión y temperatura específico que muestran las zonas de inmiscibilidad donde coexisten fases líquidas y vapor. Experimentos y modelamientos de esta índole han continuado realizándose, pero se suelen enfocar en sistemas acuosos, ignorando las características de los compuestos en la fase gaseosa como por ejemplo la solubilidades de  $\text{CO}_2$  y su dependencia con respecto a la presencia de  $\text{NaCl}$ , condiciones de presión, temperatura y cualquier otro parámetro, lo cual suele evaluarse en fases acuosas y no estudiarse en fase gaseosa.

[Hu et al. \(2007\)](#) es un trabajo científico posterior que ejemplifica la situación. Este trabajo expone de excelente manera, al igual que el trabajo de [Duan et al. \(1995\)](#), la situación del sistema bifásico  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  y trifásico  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ , bajo los 674 grados Kelvin, y la aproximación que existe entre los modelos teóricos de ecuaciones de estados para representar el sistema. Concluyendo que aún existe gran incertidumbre, sobre todo a temperaturas cuando el fluido está en condiciones super críticas. Con ello las conclusiones más relevantes de los trabajos sobre los sistemas  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ , es que: si bien las ecuaciones de estados son las más útiles para construir los modelos termodinámicos, diagrama de fases del sistema, aceptándose con buena aproximación lo expuesto por [Duan et al. \(1995\)](#) ([Hu et al., 2007](#)), estas son a su vez muy susceptibles a que en ciertos rangos de presión o temperatura o composición no se ajusten adecuadamente y por lo tanto ***aún existe ecuaciones de estados inadecuadas para predecir PTVx en ciertos rangos críticos.*** Con esto último podemos entender que las ecuaciones de estados de matemática analítica clásica es útil en condiciones como fluidos diluidos.

### *Ley de Henry*

Como información extra un pequeño repaso sobre la Ley de Henry, esta ley indica que la cantidad de gas disuelto es proporcional a su presión parcial en la fase gaseosa. Para tener una terminología coherente, recomiendo el nombre "constante de solubilidad de la ley de Henry" cuando se tiene Agua y Gas (agua/gas o l/v). Cuando es al revés, Gas/Agua, se



**FIG. 2.2:** Representación gráfica del diagramas de fase del sistema H<sub>2</sub>O-NaCl- CO<sub>2</sub> a presión constante y variables temperaturas. Bajo los 300°C las fronteras se han calculado a partir de ecuaciones de estado. Tomado y modificado de [Duan et al. \(1995\)](#)

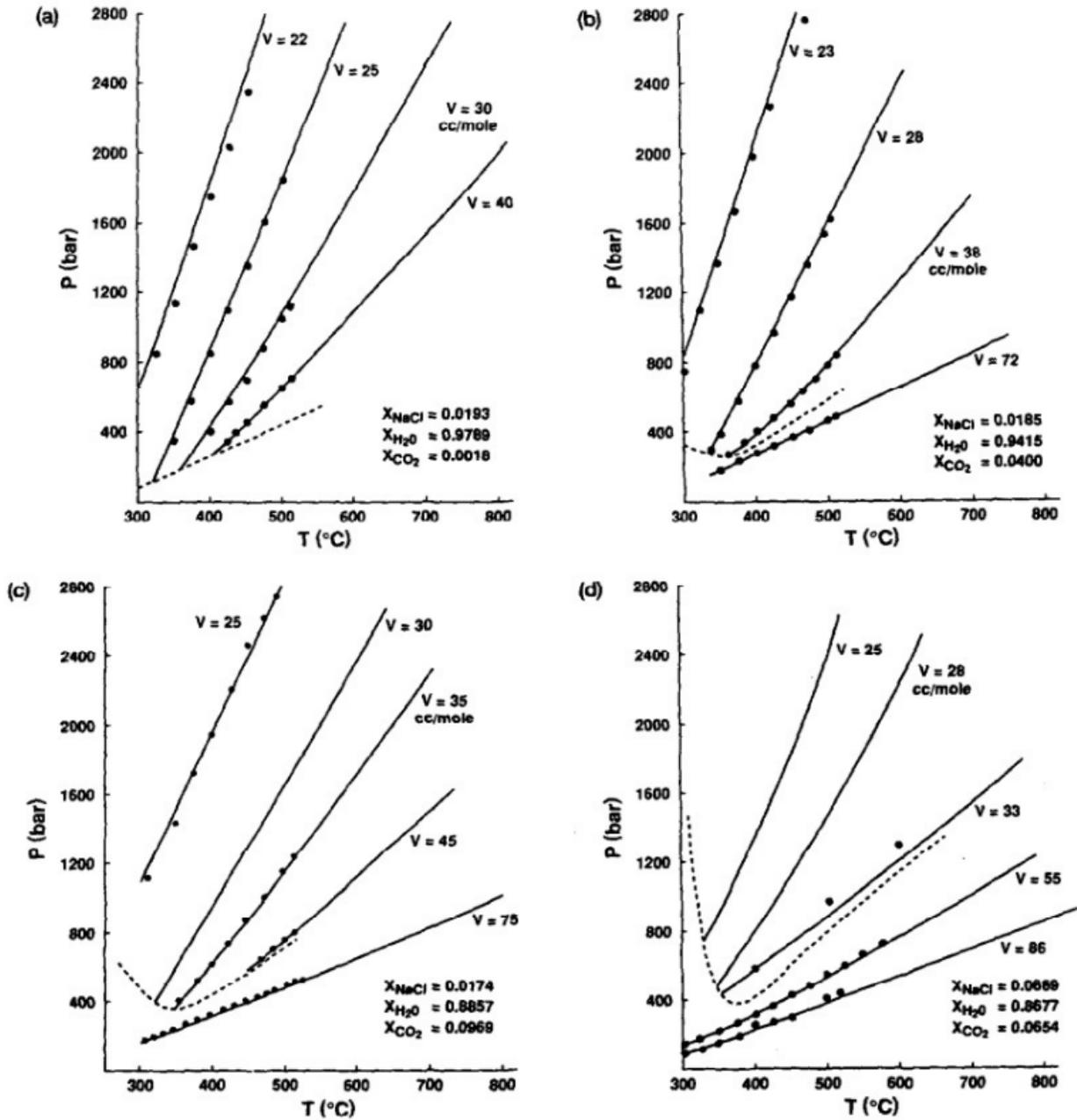
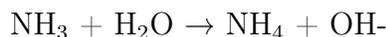


FIG. 2.3: Diagramas de fase P-T del sistema  $\text{H}_2\text{O-NaCl-CO}_2$  con diferentes concentraciones de estos tres componentes. Unión entre resultados empíricos y teóricos. Los teóricos se han calculado a partir de ecuaciones de estado. Estos últimos son representado por la línea punteada en los diagramas (a),(b),(c) y (d). Bajo esta línea se halla la zona bifásica L-V y sobre ella fluido de una sola fase. Líneas solidas son isócronas. Tomado de [Duan et al. \(1995\)](#)

hace referencia como constante de volatilidad de Ley de Henry o Volatilidad de Henry. Esta ultima se simboliza con el termino  $K$  sub  $H$  (de Henry) (Sander, 2014).. Una forma común de definir la volatilidad de Henry es dividir la presión parcial por la concentración de la fase acuosa:

$$K_H^{cp} = p/c_a = 1/H^{cp} \text{ y } H^{cp} = c_a/p \text{ con unidades de (Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol})$$

La  $c_a$  es la concentración de una especie en la fase acuosa y  $p$  es la presión parcial de esa especie en la fase gaseosa en condiciones de equilibrio. Si la presión aumenta, el equilibrio se moverá en la dirección en la cual se reduce la presión —principio de Le Chatelier—. La presión se puede reducir si hay más gas disuelto en el disolvente. Así, la solubilidad o concentración de un gas, en un disolvente dado, incrementa con el aumento de la presión. Requiere como base que el gas se comporte como gas ideal. Esto quiere decir que debe cumplir con: (i) A temperatura y presión moderadas. (ii) Si la solubilidad del gas en el disolvente es baja. (iii) Cuando el gas no reacciona con el solvente para formar una nueva especie; por ejemplo, el amoníaco o el HCl, que reaccionan con el agua, no obedecen la ley de Henry.

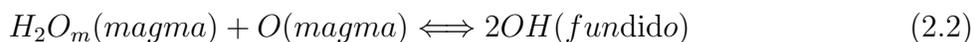


## Efecto de la evolución magmática en el aporte y transporte de volátiles y metales

En la subseccion anterior se expuso la manera simple de entender los fluidos en un sistema geológico. Al momento de estudiar la evolución del magma hacia el fluido hidrotermal términos como solubilidad del fluidos en el magma y los métodos para estudiarlo toman importancia. Mecanismos como espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para estudiar el agua disuelta en el magma es útil (Liu et al., 2005) . Existe también una dependencia del tipo de fundido (magma) y la solubilidad del agua. En general la cinética que controla la presencia de agua en el fundido viene dada por la siguientes ecuaciones (Zhang, 1999), dado que se encuentra disuelto como moléculas de agua o como grupo OH:



$K_1$  constante y  $\text{H}_2\text{O}_m$  mezcla de componentes de agua en el fundido.



$K_2$  constante.

Estos estudios muestran tambien la complejidad en la evolución del magma con fluidos solubles de  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ , es decir, la solubilidad de estos dependiendo de la temperatura y sus concentraciones tal que se comporten o no bajo la ley de Henry. Sin embargo vale destacar que estos fundidos en su ascenso en algún momento exsuelven estos volátiles.

Al desgasificar los volátiles, se sufre una partición de las especies en las fases nuevas generadas: magma remanente, fluido denso y fluido de baja densidad ( puede llamarse salmuera y vapor respectivamente). Si el fundido traía consigo un porcentaje de salinidad, en esta primera inmiscibilidad se genera un fluido salino enriquecido en NaCl y que es propenso a captar complejos metálicos clorurados. En vista a la fase menos densa, vapor, la partición de sulfuro

como también de cloro puede originar complejos sulfurados, bisulfurados y/o clorurados en fase vapor. Este efecto conlleva una transferencia metálica del magma parental a un fluido magmático-hidrotermal que puede seguir ascendiendo.

El aporte metálico de los magmas para generar yacimientos ha sido objeto de estudio centrándose en sus condiciones y el tipo de magma que debiese ser o puede ser el más óptimo para generar cierto enriquecimiento metálico (Burnham, 1979; Candela, 1991, 1997; Eugster, 1985; Hedenquist, 1995; Hedenquist et al., 2000; Heinrich et al., 2004; Kamenetsky and Kamenetsky, 2010; Krauskopf, 1964; Lowenstern, 1994; Urabe, 1985; Williams-Jones and Heinrich, 2005). Procesos como cristalización fraccionada, mezcla de magmas, asimilación cortical (su historia de ascenso) y variables como de tiempo de permanencia a cierta profundidad y temperatura, composición del mismo, y otras características han sido también centro de atención para definir la condición óptima para generar grandes yacimientos. En general un fundido andesítico puede comenzar entre los 1200-1050 °C a 200MPa su historia de ascenso con una composición de 5 a 6 wt % H<sub>2</sub>O y 0,5 a 3 wt % NaCl (Botcharnikov et al., 2007) (si tiene dióxido de carbono puede presentar menor cantidad de agua disuelta).

En particular, un estudio pionero en evaluar la posibilidad de los volátiles como agentes importantes en la formación de yacimientos metálicos es Krauskopf (1964), concluyendo que la consideración de la presencia de volátiles en el sistema y su cantidad dependerá de su solubilidad y su volatilidad. A su vez, la solubilidad está determinada por la interacción con las moléculas de agua en el fluido pero puede considerarse, como primera aproximación, que la volatilidad sea independiente de las moléculas de agua.

El vapor, que es el fluido dominante en términos de la masa total de H<sub>2</sub>O, se interpreta como el principal agente de transporte de metales. Las relaciones de estabilidad de fase en el sistema NaCl-H<sub>2</sub>O indican cómo puede ocurrir el transporte de vapor de metales en la naturaleza (Williams-Jones and Heinrich, 2005). El rango de composiciones y condiciones de presión-temperatura-densidad que experimentan los fluidos magmático-hidrotermales determinara el comportamiento y el campo de estabilidad para que actué el agente y transporte los metales (Williams-Jones and Heinrich, 2005). Esto último es resultado del cambio de densidad que puede sufrir un fluido, pasando de ser poco denso a sobrepasar la densidad crítica y comportarse de manera distinta. Este cambio conlleva efectos composicionales en el sistema o, en otras palabras, que un vapor que atrapo metales luego modifique su densidad y pase a ser un líquido con dicha composición. Esto es un rango de estabilidad generado por salinidades moderadas a altas temperaturas y bajas presiones, que luego cambia la pasar a presiones elevadas y menores temperaturas (Williams-Jones and Heinrich, 2005).

Las últimas décadas se ha buscado ir entendiendo esta temática. Aspectos como el comportamiento cristalográfico de los elementos de interés, resulta relevante para que los metales puedan transportarse como carga en el magma y luego ser traspasado al fluido hidrotermal (Eugster, 1985). Elementos como Zn y Cu, se relacionan con cationes bivalente ubicados en posiciones octaédricas, asociado a hierro ferroso. El estaño también pero es monovalente. Plomo y plata asociado a la posición de cationes alcalinos. El Zn, Cu y Sn es fuertemente fraccionado en la fase vapor en los procesos de vesicular. El fraccionamiento del fundido genera mecanismos relacionado a la oxidación, reducción, saturación de agua. El efecto del agua tiene lugar posterior al emplazamiento de un fundido subsaturado, una vez procede a

interactuar el magma con la roca caja, a enfriarse y cristalizar minerales anhydricos, el magma sufre saturación de agua, ebulle y separa fluidos acuosos. La especiación estará asociada a la fugacidad de oxígeno, temperatura, y la química del sistema (presencia de cloro y sulfuros) (Eugster, 1985).

Los magmas aluminosilicatados serían los más capaces de generar una transferencia de carga metálica óptima hacia fluidos hidrotermales, y por consiguiente, son los fundido mas óptimo para originar fluidos hidrotermales mineralizadores como consecuencia de procesos post-magmáticos (Urabe, 1985). De manera opuesta, magmas peralkalinos son malos candidatos para explorar o realizar prospección de depósitos generados a partir de procesos post-magmaticos, de igual forma, existe una mala asociación con granitos alcalinos (Urabe, 1985). Esto sobretodo si se explora, Pb y Zn, dado que las cantidades de metales de plomo y zinc aumentan en la fase acuosa si la masa fundida granítica tiene un ligero exceso de aluminio con respecto a la concentración de feldespatos. Por el contrario, estos metales tienden a quedar retenidos en la masa fundida si su composición es alcalina. Se propone como consecuencia a proceso de zonación de la cámara magmática entre magmas tipo I y magmas tipo S. Esta zonación genera transferencia en los metales dentro de la misma debido a la saturación y movilidad de agua en el reservorio de la cámara (Urabe, 1985).

La movilidad de este vapor, o del fluido dependerá de las condiciones de atrapamiento del magma en la corteza; si esta incapacitado de seguir ascendiendo y, si se encuentra a moderadas o altas temperaturas y/o presiones. La manera más óptima para movilizar el vapor es que las burbujas presentes en el fluido tengan un radio menor a 1cm, no mayor (Candela, 1991). Para situaciones de inmovilidad magmatica dentro de la corteza, es decir, se ha emplazado el fundido y a su vez se encuentra con bajas concentraciones de agua y a presiones altas (1-2wt % H<sub>2</sub>O a 0.5Kbar o a 2kbar para concentraciones entre 2 a 4 wt %), la movilidad para ascender será principalmente a partir de difusión por fracturas (Candela, 1991). La exsolución de vapor de agua a partir de magmas con bajas concentraciones iniciales de agua (menores a 2wt %) esta relacionada en primer lugar con la disminución de presión (despresurización) y en segunda instancia con el porcentaje de cristalización del mismo. Esto sucede cuando se alcanza un 20 por ciento de cristalización. La despresurización es la responsable del fenómenos que se conoce como *primera ebullición* y la cristalización de *segunda ebullición*. En especial, en el proceso de cristalización, se genera una exsolución de vapor, más agua, más cristal, más la presencia de fluidos hipersalinos. La partición y concentración de especies cloruradas hará que existan diferencias de densidades en los fluidos exsueitos. El fluido hipersalino será más denso que los fluidos relacionados a burbujas de vapor de agua, esto genera que el vapor de agua ascienda más rápido a la parte superior de la cámara y que el fluido hipersalino genere una especie de estratificación en la parte baja del sistema. Esto ultimo implica que inclusiones fluidas ricas en vapor sean halladas en las partes altas e inclusiones fluidas hipersalinas en las partes bajas, de sistemas magmaticos (Candela, 1991).

Un estudio del análisis de 29 inclusiones vítreas, representa las condiciones del fundido en las etapas tardías de la evolución del magma felsico. Con los datos obtenidos mediante medidas espectroscópicas infrarrojas se determina la presencia de agua, dióxido de carbono y otros elementos, representando la desgasificación del sistema (Lowenstern, 1994). La coexistencia de estos dos gases con concentraciones de 6 a 8 wt % de agua y 60 a 980 ppm de CO<sub>2</sub>, indican que según los diagrama de fase de agua-CO<sub>2</sub>-magma, el fluido no pudo hallarse en

una sola fase, por lo tanto dicho sistema evolucionó por etapas al ir ascendiendo (Lowenstern, 1994). La desgasificación sucede de manera polibárica abriéndose y cerrándose el sistema en su evolución, atrapándose las inclusiones en las mismas etapas de crecimiento de los cristales. Esto sucedería desde los 15km hasta los 9km de profundidad.

Contenido de agua muy superior al 4% en peso significaría que el magma se saturaría de vapor a altas presiones y tendería a cristalizar durante el ascenso a un granito de grano fino antes de alcanzar profundidades poco profundas. El aporte de gas de CO<sub>2</sub> magmático, debido a que el CO<sub>2</sub> es bastante insoluble en fundidos graníticos calco-alcalino, se fracciona fuertemente en la fase volátil y reduce la actividad del agua. Si el CO<sub>2</sub> está presente en una abundancia demasiado grande, la masa fundida no puede tener el bajo porcentaje de cristales presentes a las temperaturas determinadas (Whitney, 1988).

Recordar que la presencia de CO<sub>2</sub> implica saturación más temprana de volátiles, pudiendo alcanzarse a menos del 50% de cristalización. Sin CO<sub>2</sub> se puede sobresaturar el fundido alcanzando hasta un 67% de cristalización. Todo lo anterior es si el fundido tiene una concentración inicial de agua de 2wt% y de 0 a 400ppm de CO<sub>2</sub> mientras el sistema alcanza 800-900 °C al ascender (Candela, 1997).

Las expresiones texturales son evidencia de condiciones y procesos en la evolución y enfriamiento del magma. Un ejemplo es la presencia de núcleos redondeados de cuarzo. Esta textura indicaría el ascenso de magmas sub-saturado de metales en fase de vapor bajo condiciones de sub-saturación de agua, tales condiciones permiten la solubilidad del cuarzo que conlleva a la formación de esta textura (despresurización y escasas de agua) (Candela, 1997). La saturación de volátiles en el ascenso, luego de haber estado subsaturado, induce un desequilibrio en el sistema y por lo tanto texturas como "esqueletos de cuarzo" son evidencia. Si luego se enfría muy rápido puede hallarse textura dendríticas crecidas a partir de los esqueletos de cuarzo o en bordes de otros minerales preexistentes (Candela, 1997).

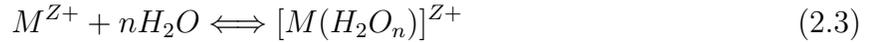
La estabilidad de la fase acuosa en el sistema, evaluada con respecto al equilibrio de los minerales que se van formando, indica que el magma se satura en agua al alcanzar aproximadamente 11 wt%. La estabilidad de las fases viene dada por el volumen del fundido y el rango de temperatura. La cristalización en condiciones de saturación de vapor provocará un rango de temperatura más corto y un tamaño de grano más fino. Modificaciones de presión pueden generar procesos de vesiculación por efecto de los volátiles y evidenciarían texturas porfíricas, mirolíticas. Si inicialmente tenía el fundido bajas concentraciones de agua (menores a 2wt%) puede re absorberse el sílice (Whitney, 1988). La evidencia textural que se atribuye a magmas que se encontraban saturados en fases volátiles son las cavidades mirolíticas. Estas representan una relación entre tamaño de burbujas y tamaño de minerales cristalizados, bajo un enfriamiento (cristalización) isobárico. Otras texturas, como las pegmatíticas, pueden indicar condiciones de sub-saturación de volátiles (Candela, 1997).

### 2.3. Volátiles en los fluidos hidrotermales y los metales

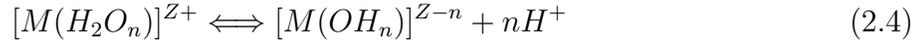
Existe una transición de fluidos magmáticos a hidrotermal con una relación directa e indirecta en la formación de los distintos yacimientos minerales. En Chile, los metales más importantes entre el 1998 y el 2013 fueron: el cobre, oro, plata, molibdeno y hierro (Álvarez

et al., 2018). Para continuar recordaremos que: un volátil es una sustancia química líquida y/o gaseosa, principalmente asociado con fases de vapor, pero que difieren del fundido silicatado, y de manera general hablaremos de salmuera o fase acuosa y también de fase gaseosa/vapor. Esta separación de fundido y volátiles ocurre cuando el fundido evidencia ebullición, este evento provoca la coexistencia de magma, fase acuosa y fase gaseosa, y es esta exsolución del magma lo que da paso a la transferencia de metales mediante ligantes (por medio de los volátiles) a los fluidos hidrotermales.

Esta importancia conlleva al desarrollo constante del conocimiento sobre el transporte y precipitación de los minerales en conjunto a las condiciones que favorecen su acumulación y el desarrollo de los diferentes yacimientos. Un entendimiento general de ello se puede obtener mediante la Figura 2.4 y las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5, extraídas de Ding et al. (2018). De esta manera, se considera que el transporte de un metal comienza cuando es extraído de la fuente mediante difusión o metasomatismo hasta que es llevado a su trampa de concentración, acumulación y precipitación que termina creando el yacimiento. Entendiéndose que los metales se transportan en un estado de especies que forman, lo que se conoce bajo el nombre de: complejos. Estos dependen del estado de valencia, condiciones de presión, temperatura, pH, fugacidad de oxígeno, fugacidad de azufre, fugacidad de otros gases, composición del sistema y niveles de concentración, actividad. Estos complejos se generan a partir de reacciones de solvatación, hidrólisis, sustitución y otras, las cuales fomentan la formación de los complejos en el medio líquido o gaseoso (Ding et al., 2018).



Debido a la inestabilidad del complejo metal solvatado, se hidroliza fácil y libera protón (ec. 2.4)

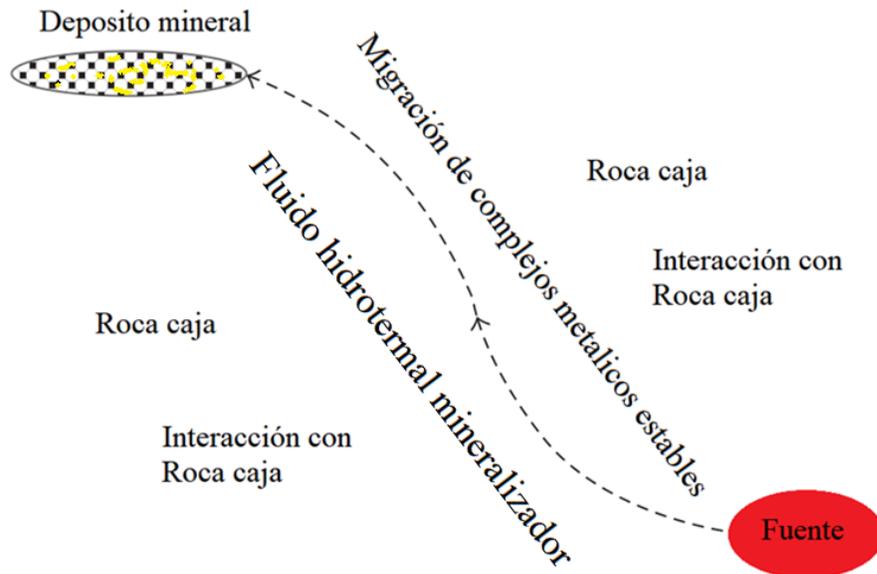


cuando algún anión X entra en el fluido las especies son más complicadas y puede ser entendida mediante la ec. 2.5, donde se consideran sustituciones nucleofílicas de hidróxidos OH<sup>-</sup> por los aniones X<sup>-</sup>



En general, los complejos metálicos se componen de: S, Cl, C, o ligantes hidroxilos, y se puede tener una apreciación de ellos recurriendo a las leyes de la clasificación y asociación de ácidos-base. En menor medida actúan elementos como el F, P, N y ligantes orgánicos. Recalamos que, la asistencia del vapor para transportar metales toma importancia en la evolución de sistemas magmático-hydrothermal, que conlleva diferenciaciones y exsoluciones que recaen en partición de los elementos (Ding et al., 2018)

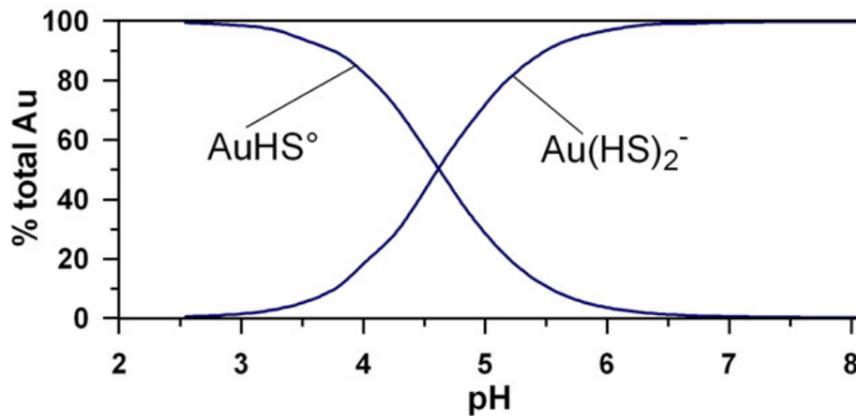
Los estudios de las especies presentes, formación de complejos y partición de estos entre las distintas fases según las condiciones del sistema son en primera instancia desarrollados a partir de modelamientos teóricos de ecuaciones y reacciones termodinámicas y fisicoquímicas, como también a partir de observaciones y mediciones de modelos experimentales con condiciones controladas realizados en laboratorios, que en conjunto se comparan con mediciones directas de muestras geológicas naturales (Akinfev and Zotov, 1999; Hemley et al., 1992; Pokrovski et al., 2008). Pokrovski (2008) obtuvo, bajo condiciones de presión-temperatura-pH,



**FIG. 2.4:** Esquema simplista del proceso hidrotermal para generar un depósito mineral. Un fluido proveniente de una fuente extrae de ella cierta composición y transporta los metales como complejos hasta que logra llegar a un nivel de concentración que forma el depósito mineral. Modificado de [Ding et al. \(2018\)](#)

concentraciones para algunos metales en salmueras y fases gaseosas poco densa (como fluidos exsultos de un magma) similares a las concentraciones medidas en muestras naturales, y para otros metales obtuvo medidas distintas, como por ejemplo en el caso del Oro donde sobre estima el valor esperado y lo explica por la formación de complejos no considerados en el experimento. Valores interesantes son obtenidos para los metales bases en la fases gaseosa, donde incluye a la plata. Obtuvo concentraciones de 10ppb a 100ppb a menos de 350°C, y para el oro 1ppb. Estas concentraciones cambian si el sistema contiene o es libre de azufre y si el pH es o no relativamente ácido, lográndose variaciones de 1 o hasta 2 ordenes de magnitud para el cobre y el oro.

Sobre los 450°C, ante un sistema con  $H_2S$  y  $SO_2$ , se tiene el siguiente orden comparativo de coeficientes de partición entre la fase vapor con respecto a la salmuera: Pt posee mayor coeficiente de partición que ( $>$ ) el Au, luego el Au mayor que ( $>$ ) Cu y así, Cu mayor coeficiente que la Ag, la plata que el Pb, el plomo mayor que el Fe, y el hierro mayor que el Zn, lo que significa que el ultimo elemento en preferir la fase de vapor es el Zn, o que el primero en migrar a la fase vapor es el Pt. Si el sistema solo tiene  $H_2S$  y HS, o solo HS, el orden de preferencia a la fase de vapor pasa a ser: Pt prefiere primero que la Ag, la Ag mayor coeficiente que el Cu, el cobre mayor que el Au, el Oro mayor que el Pb, el plomo mayor que el Fe, y el hierro mayor que el Zn, reflejando la dependencia con el pH y la necesidad de estabilidad de complejos bi-sulfurados o hidro-sulfurados neutros principalmente para el caso del platino, plata, oro y cobre  $Pt(HS)_2O$ ,  $AuHS^0$ ,  $Au(H_2S)(HS)^0$ ,  $Zn(HS)_2^0$ ,  $Ag(HS)^0$ . La plata generalmente disminuye su solubilidad en soluciones cloruradas cuando incrementa el pH, manifestando el cambio de la naturaleza de la especie dominante para formar complejos; de  $Cl^-$  a  $S^-$ . En el caso del Oro, de un pH ácido a otro más alcalino pasa de formar complejos  $AuHS$  ( $AuCl_2$ ) a formar  $Au(HS_2)^-$ , ver Figura 2.5 ([Pokrovski et al., 2008](#)).



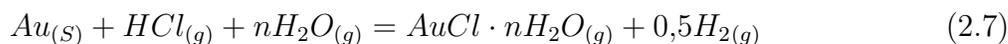
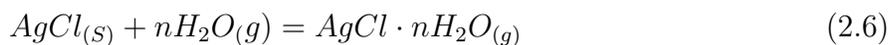
**FIG. 2.5:** Distribución de los complejos de oro hidrosulfurado en fase líquida en función del pH. Se observa el dominio de uno sobre el otro en condiciones reductoras u oxidantes, siendo similares a pH cercano al 4.5 Pokrovski et al. (2008)

Zajacz et al. (2012) trabaja la partición del cloro y el azufre entre magmas andesíticos y volátiles magmáticos, en función de la fugacidad de oxígeno. Destacando que el Cl presenta un comportamiento tipo Henry y fracciona cationes a la fase vapor; de mayor a menor concentración se tiene que: el  $\text{FeCl}_2$  se fracciona en igual cantidad que el NaCl, mientras que NaCl fracciona más que el KCl, y este último en mayor cantidad que el HCl. El S obedece una ley tipo Henry. La concentración del Cl en la fase vapor aumenta linealmente a medida que aumenta su concentración en el fundido andesítico. La concentración del S en el fundido influye en que se aumente en igual proporción de concentración en la fase volátil hasta que el gas alcanza la saturación, que es representada por la formación de pirrotina. A su vez, la concentración de S aumenta rápidamente en la fase vapor cuando comienzan a formarse gotas de óxidos de Fe en el magma debido a la extracción del azufre del fundido. Y en condiciones reductoras, medidas por níquel-níquel óxido (NNO), el gas capta hasta 7 veces más concentraciones de S, que en condiciones oxidantes NNO.

Pokrovski et al. (2013) recopila información sobre la relación de metales y metaloides con los gases de ambiente magmático-hidrotermal y volcánico. Indica que a nivel superficial la desgasificación de magmas solo genera una leve concentración de metales trazas y metaloides, por lo que es poco probable que se generen concentraciones importantes y transportes relevantes a partir de este proceso para desarrollar depósitos mineral de gran escala. Cuando estas mediciones son comparadas con los datos obtenidos directamente de inclusiones fluidas y fundidas de depósitos hidrotermales en los minerales de ganga, se tienen que dichos sistemas contienen de 2 hasta 5 veces más concentración y representarían mezclas o ebulliciones de magmas en condiciones de transición magmático-hidrotermal, a profundidades de 5 km a 10 km o más. Una gran diferencia entre las fases gaseosas producidas en superficie o en dichos eventos profundos es: la densidad.

La solubilidad del complejo en la fase vapor para los metales es altamente controlada por la presión de agua del sistema, favoreciendo la formación de monómero o polímeros de hasta con 14 grados de coordinación en estados neutros. Siendo la hidratación el fenómeno físico-químico que controla la solubilidad de los elementos y su transporte en soluciones gaseosas, y esta a su vez depende de la densidad del fluido y la presión. Ejemplo de ello son las ecuaciones,

donde  $n$  representa el numero de hidratación del complejo, el cual depende de la presión o fugacidad de vapor de agua. (Pokrovski et al., 2013; Williams-Jones and Heinrich, 2005):



Williams-Jones and Heinrich (2005) resalta nuevamente la importancia de los complejos clorurados sobre los sulfurados usualmente hidratados, y la relevancia del vapor de agua. Las moléculas de agua puede rodear los complejos permitiéndoles aumentar su solubilidad y capacidad de transporte por medios gaseosos. A presiones y temperaturas altas el vapor de agua puede disolver grandes cantidades de metales, y si es acompañado de especies de cloruro y/o azufre, fomentara aún más la disolución de ellos. Por lo que existen metales, como el cobre y el oro, que manifiestan una sensibilidad elevada a la fugacidad o presión de vapor de agua, incluso mayor que a la fugacidad de oxígeno o de  $HCl_{(g)}$ .

El Cu, Au y Ag prefieren altamente la fase líquida hiper salina antes que la fase gaseosa o el fundido en condiciones magmáticas, debido a la formación de complejos clorurados. Para el caso de los metales bases como Pb y Zn, ante sistemas magmáticos libres de cloro, el efecto de los carbonatos tiene un rol importante, pudiendo incrementar de 3 a 7 veces la constante de partición entre fluido y fundido de estos metales, comparados con los sistemas cuando no tienen carbonatos (Pokrovski et al., 2013). Los fluidos magmáticos, hidrotermales o metamórficos causan una redistribución de los metales en la corteza bajo 5 procesos: descompresiones, separación de fase (ebullición), enfriamiento, interacción con rocas cajas, y mezcla de aguas externas o superficiales. La descompresión con la ebullición son los mecanismos más predominantes a concentrar oro en la fase volátil bajo presiones y temperaturas altas. Como sucede en el oro orogénico donde la separación de fase sucede en un fluido acuoso carbonatado pobre en sales y rico en  $H_2S$  (Pokrovski et al., 2013).

Seward et al. (2014) muestra que la constante dieléctrica del agua disminuye de 80.1 a 7.22 cuando se pasa de  $20^\circ C$  a  $373^\circ C$ , lo que permite comportarse como ligante para formar complejos con metales, producto al cambio de la naturaleza dipolo, y la presión actúa de manera inversa. Este trabajo es una extensa recopilación de información sobre la composición de fluidos en diferentes depósitos mineral, y los campos de estabilidad de diferentes minerales gangas y de mineralización. Indica así, que la ebullición y la inmiscibilidad para complejos de oro(I) como son;  $AuHS^\circ$  y  $Au(HS)_2$  por sobre los  $500^\circ C$  y 500bar, tiene gran influencia en la precipitación y desestabilización de este metal. Para entender cómo distintas moléculas se comportan entre la fase vapor y líquida se puede recurrir a la ley de Henry correlacionando las presiones parciales de los componentes. Útil para la fase gaseosa resultante durante el ascenso de un magma. Pero no implica que los comportamientos lineales modelan la naturaleza, existen complejos con un comportamiento que responden a leyes distintas a la Henry.

### 2.3.1. Complejos y solubilidad en medios de transporte: Au

Los primeros estudios fueron realizados a partir del análisis del transporte de los metales mediante fluidos acuosos. El rol de las fases gaseosas como medios para transportar y concentrar metales era poco considerado y valorado en los años 50-70, hasta que muestras de

depósitos hidrotermales eran observadas con inclusiones fluidas ricas en gas y estas a su vez presentaban minerales hijos o concentraciones de metales. Helgeson and Garrels (1968) estudio vetas de cuarzo-oro formadas por soluciones ácidas que contenían entre 0.001 a 0.05ppm de Au. Concordaba con los modelos de entonces que el oro se transportaba como complejo clorurado y precipitaba entorno a los 175°C. Analizando las asociaciones minerales concluía que la precipitación simultanea de cuarzo-oro-pirita era acompañada por una disminución de temperatura, mientras que la precipitación simultanea de solo oro-pirita se podía desarrollar a temperatura constante pero con incrementos de pH o disminuciones de estados redox en el sistema. Todo esto fue realizado mediante cálculos termodinámicos considerando interacciones químicas entre las soluciones hidrotermales y roca caja, exponiendo varias ecuaciones de equilibrio que tomaban lugar en el sistema, obteniendo constantes de equilibrio y graficandolas con respecto a la temperatura o al pH. Al siguiente año, Boyle (1969) indica que dicho trabajo no considero todos los aspectos químicos, mineralógicos y las ecuaciones para realizar el modelo termodinámico. Establece que no se están considerando los posibles transporte del oro mediante complejos ligados al arsénico, telurio, bismuto y otros probables, siendo que minerales asociados a estos elementos suelen estar presente en el tipo de veta de cuarzo-oro que se estudió.

Años siguientes Seward (1973) estudia la solubilidad del oro en soluciones ácidas e indica que existe un máximo para ella a los 300°C, 1000bares y pH cercano a 6, sugiriendo un valor de 225mg/kg como complejo bisulfurado. Contribuye al entendimiento del transporte de este tipo de complejos en soluciones acuosas alcalinas sulfatada, desarrollando extensamente cálculos termodinámicos de la solubilidad del oro ante complejos sulfurado y bisulfurado, concluyendo que la presión, temperatura, pH, fugacidad y actividad de azufre, concentraciones de NaCl y NaHS, influyen sobre dicha propiedad. Sugirió que sobre los 400°C en la solución acuosa dominarían los complejos clorurados por sobre los sulfurados.

Siguiendo en sus estudios, en los noventa Seward (1993) indica que el complejo oro(I) hydrosulfurado juega un rol importante en la formación de la mayoría de depósitos hidrotermales de oro, sin excluir el aporte de otros ligantes como lo son los clorurados. Ante esto, expresa que hasta la fecha aún faltaría entendimiento de los diferentes escenarios de transporte y deposición asociados al oro, dado que faltan datos termodinámicos tales que permitan modelar un sistema con mayor cantidad de complejos, un sistemas multicomponentes (como expone en su tabla 2.4, donde muestra los complejos de mayor interés para oro(I)), y faltarían estudios del comportamiento del oro bajo sistemas CO<sub>2</sub>- CH<sub>4</sub>- H<sub>2</sub>O. Pese a todo ello, rescata que los coloides de sulfuro serian un mecanismo eficiente para captar y concentrar el Oro producto a la química superficial de sus moléculas, junto con postular comparaciones de estabilidad de complejos. Con dicha comparación, de mayor a menor estabilidad, se tendría que: el AuCl<sup>-4</sup> es mas estable que el AuCl<sub>2</sub>, este último presenta mayor estabilidad que el AuCl<sup>0</sup>, y de mayor a menor estabilidad para formar especies se tendría que: el I<sup>-</sup> es quien brinda mayor estabilidad, quien le sigue es el Br<sup>-</sup>, luego el Cl<sup>-</sup>, y este ultimo es lejos mayor que el F<sup>-</sup>. Estas ultimas relaciones se apoyan por la ley de ácido-base de Lewis. La importancia del Cl sobre los demás se debe a que es el elemento más abundante en sistemas geológicos, esto si se compara con el yodo, bromo y flúor. Estos ultimos podrian tomar relevancia en sistemas pegmatíticos con magmas restíticos.

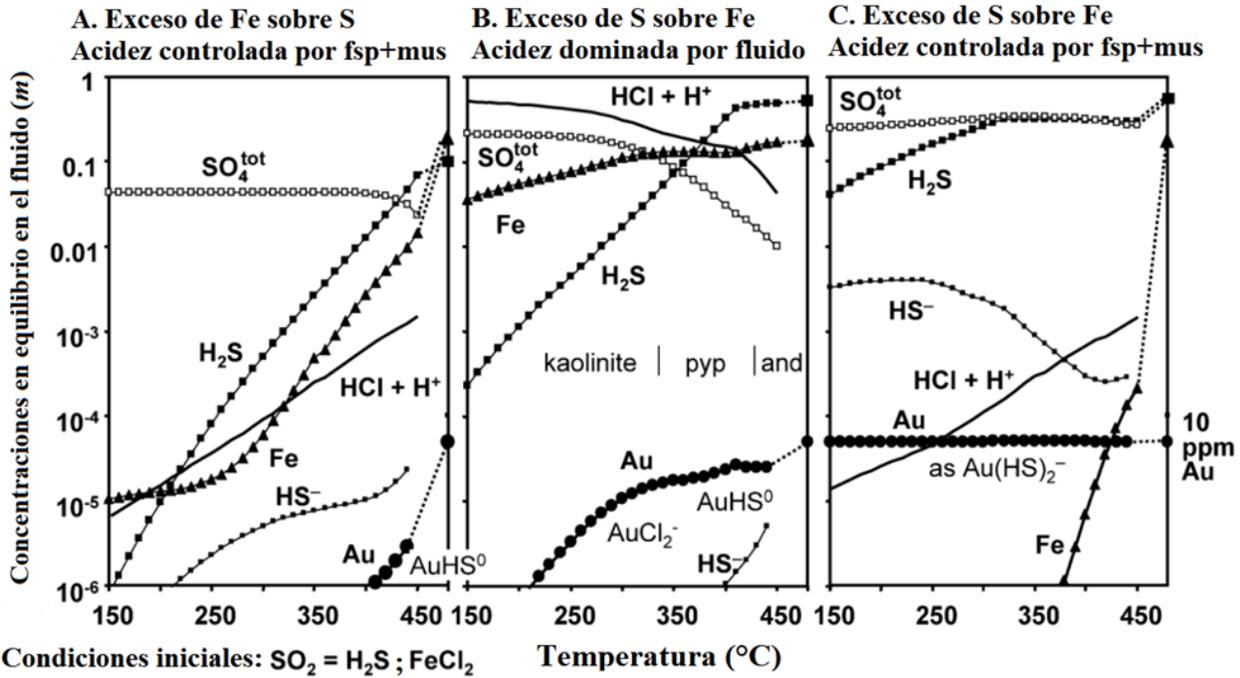
Johnson et al. (1992) realiza una amplia base de datos termodinámicos para diferentes

especies que pueden ser utilizables, y son utilizados, en los moldeamientos de evolución de sistemas geológicos, por ejemplo, para cálculos de las reacciones que suceden en procesos hidrotermales y que toman lugar en el desarrollo de depósitos mineral. Son ampliamente usados para estudios termodinámicos de los complejos metálicos en soluciones acuosas.

A partir del siglo XI un gran número de trabajos sobre modelamientos termodinámicos ligados a la solubilidad del oro, tanto para fases líquidas, gaseosas, fraccionamiento entre distintas fases (fundido, fluido, vapor), se han desarrollado. A continuación se hablarán algunos de ellos que han generado aportes importantes.

Heinrich et al. (2004) genera un modelo multicomponente de la química de fluidos formadores de sistemas tipo pórfido, resultando que el fluido gaseoso tiene un 7wt. % de salinidad como  $\text{NaCl}_{(aq)}$ , y posee una composición promedio de  $1.2m$  (mol/kg  $\text{H}_2\text{O}$ ) de  $\text{NaCl}$ ,  $0.33m$   $\text{KCl}$ ,  $0.18m$   $\text{FeCl}_2$ ,  $0.19m$   $\text{CuCl}$ ,  $0.003m$   $\text{H}_3\text{AsO}_3$ , y  $5 \times 10^{-5}m$   $\text{AuCl}$  (equivalente a 10ppm de Au), y a los  $650^\circ\text{C}$  y 800bar existe coexistencia de fase gaseosa con fase líquida tipo salmuera. Expone las condiciones necesarias para que el oro sea transportado mediante la fase vapor siendo necesario que a bajas temperaturas un fluido magmático tenga exceso inicial de Fe tal que se fomente la formación de una salmuera de baja a mediana salinidad y una fase vapor enriquecida en S. Luego, por medio de mecanismos como la ebullición, condensación o una contracción del vapor se lograría modificar las condiciones para que se precipite oro. Esta condición es ejemplificada en la Figura 2.6c, donde la capitación, retención y transporte de oro en el fluido se mantiene a concentraciones constante y elevadas, 10ppm, mientras que los escenarios a y b (Figura 2.6a,b, respectivamente) muestran como las concentraciones varían dependiendo de la temperatura, el pH y la salinidad. Se concluye principalmente que en los fluidos geotermales de baja temperatura los complejos sulfurado de oro(I) predominan, y a temperaturas más elevadas los complejos clorurados e hidróxidos de oro(I) empiezan a tener influencia en su transporte en las soluciones ácidas cloruradas concentradas o diluida. Stefánsson and Seward (2004) continua evaluando los complejos de oro(I) en soluciones acuosas sulfuradas a condiciones de temperatura y presiones específicas:  $500^\circ\text{C}$  y 500bar. Obteniendo que el transporte es efectuado mediante complejos sulfurados y bisulfuros de Oro, y un tercer complejo es importante sobre los  $400^\circ\text{C}$ , que es el hidróxido;  $\text{AuOH}$ . Con su estudio determino que la constante para cada complejo tienen un aumento, un máximo y un decaimiento con relación a la temperatura, y de igual forma con relación al pH (lo que ilustra en sus figuras 5,6 y 8, Stefánsson and Seward (2004)). Finaliza su estudio con una figura donde muestra, a presión constante de 500bar, la distribución porcentual de oro en las diferentes especies según la temperatura y pH dado. Es por tanto, altamente recomendado para modo de consulta o evaluación del oro transportado en medios acuosos.

El trabajo de Simon et al. (2005) indica que: La concentración total de oro en las distintas fases generadas en un sistema magmático ( vapor, salmuera, fundido) considerando el coeficiente de partición entre estas fases, es dependiente de la salinidad específica de las fases acuosas según la concentración total de cloruros. Las concentraciones en la fase vapor tiene una relación directa con la presión; a mayor presión, más se fracciona Au-Cl a la fase vapor. Sin embargo en el trabajo no consideran el efecto del S en sus estudios, mas solo se enfocan en los efectos del cloro. Una desgasificación magmática profunda puede originar un transporte de volátiles a zonas someras propicias para fomentar la formación de yacimientos. Esto ultimo es expuesto por Heinrich et al. (2004) y una publicación pequeña de Simmons and Brown



**FIG. 2.6:** Se modela la concentración de oro medidas mediante análisis de LA-ICP-MS (ablación láser - plasma acoplado inductivamente - espectrometría de masas) en inclusiones fluidas de vapor de un pórfido Cu-Au. Tanto (A),(B) y (c) representan la evolución desde un sistema porfídico a 450°C a un epitermal de 150°C, con concentraciones iniciales de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{FeCl}_2$ ; las que son representadas con sus curvas comenzadas a los 450°C. El sistema se encuentra modelado a 500bar. Se ilustra le influencia de las proporciones S/Fe; en (A)  $\text{Fe} > \text{S}$ , en (B) y (C)  $\text{S} > \text{Fe}$ . indicadas en el titulo. Las elevadas concentraciones de Fe permiten que la fase vapor concentre 10ppm de Au en sus inicios. El transporte es eficiente solo en el escenario C, donde hay exceso de S y pH controlado por reacción fsp+mus, en (A) y (B) no se logra transportar Au a temperaturas  $< 200^\circ\text{C}$ . Situacion (A) es el menos eficiente, dado el exceso de Fe. Tomada y modificada de [Heinrich et al. \(2004\)](#). fsp:feldespato, mus: moscovita

(2006) donde explican que por una deshidratación del SLAB se produce una transición hasta los niveles más someros tal que se forma a nivel epitelmal una salmuera geothermal oxidada de origen magmático.

Zajacz et al. (2010) es una importante contribución para indicar como de sistemas magmáticos el oro puede ser transportado mediante vapor para generar depósitos de oro. Con ello resaltan la importancia de complejos clorurados a elevadas temperaturas (entorno a los 1000°C) y las condiciones reductoras y oxidantes que genera la fugacidad de oxígeno, más la relevancia de la fugacidad del agua que pueden hallarse en ambientes de arco o tras arco. Con ello, incluso muestran en su figura 4 como un aumento del 2% en las concentraciones de cloruro en el sistema lograría diluir hasta 3 o casi 4 veces más Oro. Concluye así que un fundido silicatado con 3 características sería el escenario ideal para generar volátiles ricos en Oro: 1) Altas concentraciones iniciales de H<sub>2</sub>O, S, Cl y Au 2) Altas razones de concentración de alkalis preferentemente entre K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 3) Fugacidad de oxígenos baja en la transición de H<sub>2</sub>S a SO<sub>2</sub> Con ello, en estos sistemas el oro tendría un comportamiento tipo Henry como los metal traza.

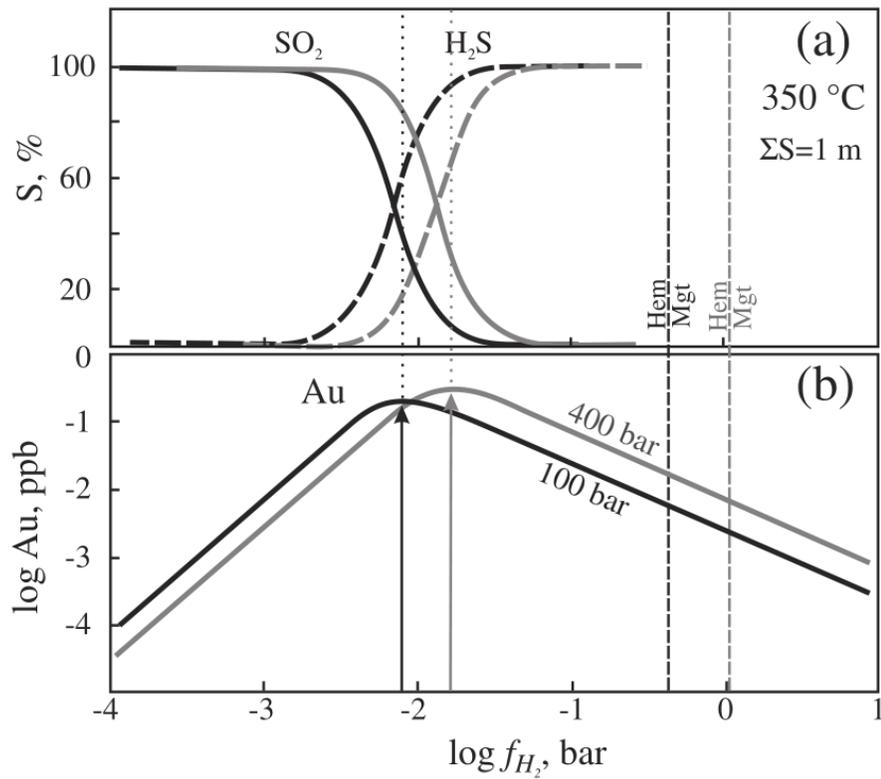
Zein et al. (2011) indica que la solubilidad de Au en un sistema de mezcla de gas de H<sub>2</sub>O - H<sub>2</sub>S, a temperaturas 300°C, 350°C, 365°C, se logra mediante la formación de especies de sulfuros hidratados gracias al H<sub>2</sub>S; AuS·(H<sub>2</sub>S)<sub>n</sub> y AuS·(H<sub>2</sub>O)<sub>m</sub> disolviéndose en cada fluido respectivamente 2.2, 6.6 y 6.3 lg/kg de Au. Indica que el máximo se alcanza en condiciones de fugacidad de H<sub>2</sub> entorno a un valor -2, tal que están en igual proporción el SO<sub>2</sub> Y H<sub>2</sub>S en el sistema Figura 2.7a,b.

Existen también trabajos publicados enfocados a recopilar la información que se ha desarrollado entorno a la geoquímica del oro y su transporte en los fluidos de la corteza, y los fluidos hidrotermales que desarrollan yacimientos de oro. Estos trabajos posibilitan a su vez la comparación entre teoría y realidad.

Williams-Jones et al. (2009) resume muy bien la solubilidad del oro en soluciones acuosas y las condiciones de transporte y precipitación a partir de ebullición, sulfidización, oxidación o enfriamiento, el efecto de los procesos coloidales originados por la química, naturaleza, de los enlaces de los complejos del oro y, sobre como en el último periodo se ha evaluado el transporte mediante vapor.

Zhu et al. (2011) aborda detalladamente la geoquímica del oro en los fluidos, exponiendo con detalle las reacciones de disolución que se han obtenido de diferentes trabajos, las solubilidades en diferentes condiciones, e incluso habla de las micro inclusiones de oro en minerales tipo sulfuros y como estos fomentan el desarrollo de transporte, concentración y precipitación de oro. Establece que el oro tiende a estar concentrado en la fase vapor en fluidos de alta temperatura y presión, ejemplificando esto incluso con la disminución de las concentraciones de Oro en el vapor desde 36ppm a 5ppm cuando se pasa de 1450 bar a 1100bar estando a 800°C (Simon et al., 2005), y es mediante la fase vapor el principal mecanismo para transportar oro desde un sistema porfídico a uno epitelmal.

Garofalo and Ridley (2014) recalca principales las publicaciones que han desarrollado aportes en diferentes contextos sobre el oro y su transporte en los fluidos hidrotermales. Varios de ellos son casos de estudios directamente realizado en depósitos de oro. Y bajo



**FIG. 2.7:** La distribución de  $SO_2$  y  $H_2S$  (a) y las concentraciones de complejos sulfurados de oro en el vapor (b) en función de la fugacidad de  $H_2$ . En ellos se puede observar como se correlacionan los niveles más altos de oro según presiones de 100bar o 400bar con la distribución de los gases que hace referencia al porcentaje de S en el sistema a  $350^\circ\text{C}$ . Tomado de [Zezin et al. \(2011\)](#)

dicha perspectiva, enmarca la relación entre análisis directos de depósitos mineral y datos experimentales de modelos termodinámico, unificando teorías y pruebas contundentes sobre la situación de las condiciones del transporte de oro. Se expone además la influencia de la mecánica estructural en la precipitación del Oro, debido a la constante relación estructural que se evidencian en los diversos depósitos, yacimientos de oro. Esta relación esta ligada a los cambios de presiones y condiciones volumétricas que sufren los fluidos bajo los movimientos estructurales.

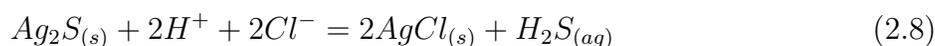
[Pokrovski et al. \(2014\)](#) es uno de los trabajos más extensos tratándose de recopilación y revisión de la literatura sobre la especiación y transporte del oro. Indica que los complejos dominante, y por tanto más importantes, en soluciones acuosas son:  $\text{AuOH}$ ,  $\text{AuCl}_2^-$ ,  $\text{AuHS}$  y  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ . Y que el S es un agente importante para transportar oro en fase vapor, pero es condicionado por las propiedades fisicoquímicas del sistema.

Es importante destacar que existe una brecha entre mediciones de concentración de Au en fases vapor y los modelos que estiman las mediciones, donde la realidad es 2 a 5 veces mayor que lo teórico, y por tanto se requiere mayor conocimientos sobre las especies que incluyen un sistema gaseoso que transportan complejos de oro en estado gaseoso. Esto se puede observar muy bien en la figura 7 y 8 de [Pokrovski et al. \(2014\)](#) ya que se ha evaluado la partición del Oro en experimentos a distintas condiciones, y diferentes sistemas, indicando que la variabilidad de los componentes en el sistema influye en las concentraciones de Au.

### 2.3.2. Complejos y solubilidad en medios de transporte: Ag

[Shcherbina \(1972\)](#) realiza un estudio de las condiciones ambientales, asociación mineral y tipo/forma de los minerales de plata formados en diferentes depósitos analizando las reacciones químicas que debieron desarrollarse para originar la situación actual observada. Estas reacciones son influenciadas por los diferentes tipos de sulfuros, sulfatos, haluros y carbonatos, junto a las reacciones de oxidación/reducción, y los efectos de pH producido por estas mismas. Así, indica que en las zonas oxidadas la plata tendería a ser transportada de forma sulfatada. Las aguas reactivas que son de pH más neutro podrían implicar carbonatos y tendería la plata a transportarse de forma bicarbonatada. En este trabajo se obtienen diferentes solubilidades de la plata, dependiendo de la asociación mineral con la que se encuentra el mineral de plata.

[Seward \(1976\)](#) establece que los complejos clorurados de plata cumplen un rol importante para transportar y depositar este metal desde fluidos hidrotermales. Señalando que a medida que aumenta la temperatura los complejos clorurados de más baja coordinación se vuelven mas estables hasta que los iones clorurados comienzan a formar  $\text{NaCl}$  en el sistema, exponiendo que a los  $275^\circ\text{C}$  el sistema puede tener  $\text{AgCl}^0$  y  $\text{AgCl}^-$ , predominando  $\text{AgCl}^-$ . En salmueras de alta temperatura se vuelve estable la especie  $\text{NaAgCl}_2^0$  pero no prueba la veracidad de su existencia en los sistemas hidrotermales. Además, en aguas estudiadas observa que un cambio de pH de 4.4 a 5.5 podría generar una disminución de concentración de plata en la solución entre 10 a 20mg/kg. Por tanto, la actividad de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{H}^0$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , la precipitación de minerales de platas como clorargirita, sucederían en diferentes rangos de temperaturas y pH, controlada por la siguientes ecuaciones:

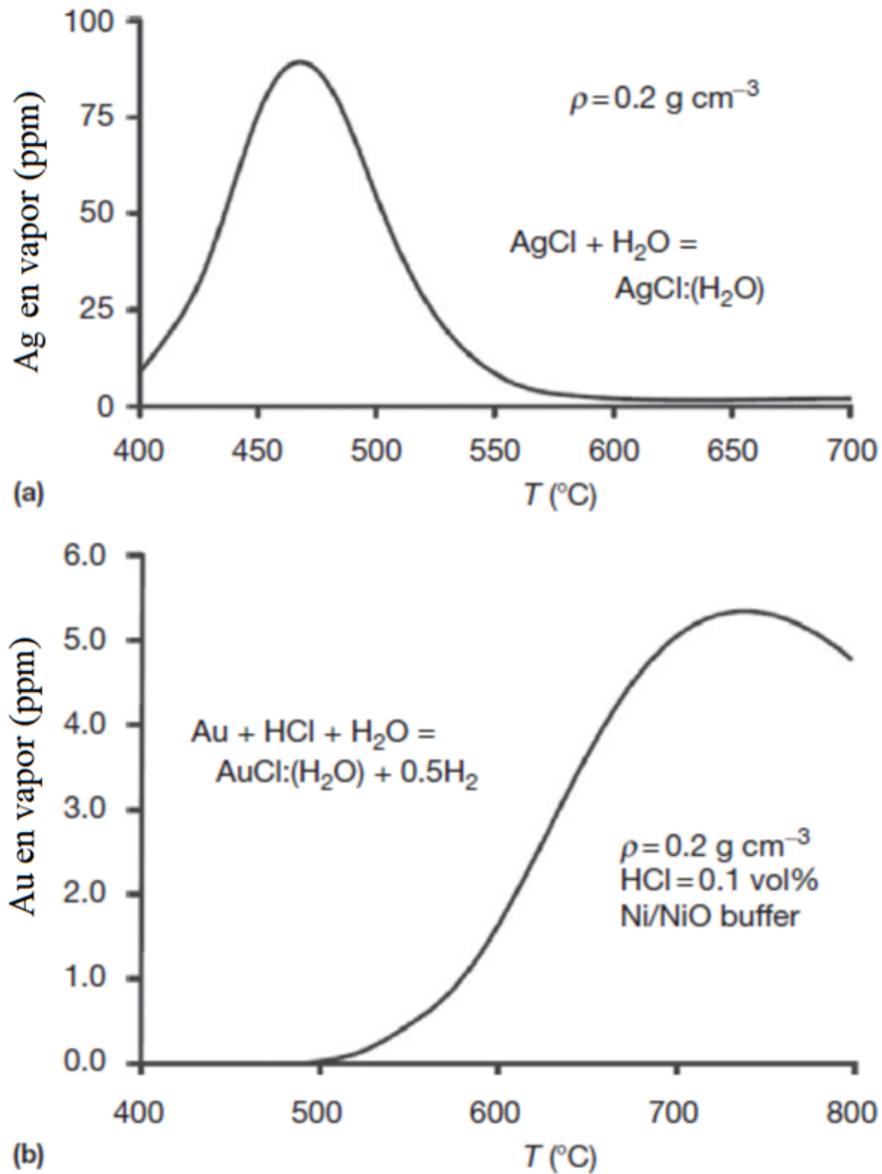


En este escenario se tiene una constante de reacción que depende de la actividad de los protones, cloruros y el ácido sulfúrico, esta constante aumenta fuertemente a medida que aumenta la temperatura. El complejos clorurados como  $\text{AgCl}_4^{3-}$  no serian estable en solución. Esto es corroborado por las observaciones de [Liu et al. \(2012\)](#), mostrando que el complejo es inestable, y que  $\text{AgCl}_3^{2-}$  es estable hasta los  $300^\circ\text{C}$ , luego se disociaría espontáneamente. El complejo  $\text{AgCl}^{2-}$  es estable a todo rango de temperatura y presión. Y entre los complejos  $\text{AgCl}$  vs  $\text{AgCl}(\text{H}_2\text{O})_2$  es más estable y debiese tener mayor prioridad el complejo clorurado no hidratado. En la fase vapor la carga de la especie  $\text{AgCl}^{2-}$  no es favorable por la constante dieléctrica del agua como vapor, la cual es baja, y por tanto el complejo neutro mono clorurado de plata debiese ser el mas predominante en este medio.

[Li and Boudreau \(2019\)](#) estudia la formación de minerales en asociación de Au-Ag-Cu, en flujos de lavas pahoehoe de Hawai y MORB de Chile. Estipula que la cristalización en profundidad del magma genera un fundido residual concentrado en Oro y Plata, que luego es removido por fluidos hidrotermales mediante complejos bisulfurados para el Oro y clorurados para la Plata. Para el caso del MORB chileno, el transporte de metales calcofilos en la fases vapor es mas efectivo en lavas pobres en azufre o cuando la saturación de vapor ocurre antes que la saturación de sulfuros. Esto podría ocurrir cuando un MORB es enriquecido en  $\text{CO}_2$ . Por lo tanto, en franjas metalogenicas asociadas a plutones maficos es importante considerar el transporte de metales mediante vapor como mecanismo producidos al niveles en que una intrusión de magmas basalticos sufre cristalizaciones importantes.

Otros estudios como [Zajacz et al. \(2013\)](#) han calculado la partición de distintos elementos y sus solubilidades bajo diferentes contextos, donde se destaca que la composición de elementos mayores en un sistema magmático tiene un efecto moderado en la solubilidad del Au y Ag. Indicando que el índice de saturación de aluminio influye de manera proporcional a la solubilidad de la Ag; entre mayor índice mayor solubilidad. En el caso del Oro es importante la concentración y actividad de S en el sistema. Y comparativamente entre si, la plata tiende menos que el Oro a preferir la fase gaseosa. Este comportamiento de preferencias diferentes es también observado por [Li and Boudreau \(2019\)](#), y hacen hincapié a que dependiendo del grado de fusión parcial de una fuente tipo manto y sus fases sulfuradas presentes, implicara la capacidad de concentrar una mayor o menos cantidad de estos metales(Au o Ag) en el fundido silicatado. A mayor grado de fusión parcial mayor es la cantidad de oro en el fundido, mientras que la plata depende de la proporcionalidad de los minerales sulfurados y del azufre en el fundido. A medida que aumenta la fusión parcial las concentraciones de plata aumentaran en el fundido silicatado solo si aumenta las concentración de S en el liquido, y frente a magmas generados por fusión de minerales sulfurados, a mayor grado de fusión parcial, menor concentración de plata. Con un 10% de fusión parcial, las concentraciones de Au y Ag son iguales en el fundido silicatado proveniente de la fusión de minerales mono-sulfurados (MSS).

La Figura 2.8 esquematiza la predicción de concentración de Oro y Plata en el vapor según la temperatura cuando son transportados como complejos clorurados neutros, e hidratados.



**FIG. 2.8:** (A) Gráfica de las concentraciones de plata como complejo clorurado en la fase vapor. Se observa que este prioriza en un rango acotado de  $100^{\circ}\text{C}$  la fase gaseosa, con un máximo entorno a los  $450^{\circ}\text{C}$ . (b) Gráficas del oro concentrado en el vapor según condiciones de temperatura y porcentaje de ácido clorhídrico. Se aprecia como a temperaturas mayores se tienen más concentración de oro en el fluido, con un máximo cercano a los  $700^{\circ}\text{C}$ . Modificado de Seward et al. (2014).

### 2.3.3. Complejos y solubilidad en medios de transporte: Pb y Zn

El plomo y zinc tienen un comportamiento similar en su solubilidad frente a los cambios de temperatura y presión considerando el sistema como una fase acuosa. Eso se asocia a la similitud entre los complejos de cloruro acuoso de los dos metales. Así, las modificaciones de la temperatura generan en sus curvas de solubilidad gráficas paralelas, y con el aumento de la presión, se muestran cambios de concentración aproximadamente iguales, para sus curvas de 0.5, 1.0 y 2.0 kbar de cada metal (Hemley et al., 1992). Hemley et al. (1992) resaltan que a temperaturas elevadas la especie dominante debiese ser neutra ( $\text{PbCl}_2^0$ ,  $\text{ZnCl}_2^0$ ). Frente a una situación de coexistencia de fases, líquida y gaseosa, como lo puede ser ante un evento de ebullición, esto puede dar lugar a la precipitación de los metales producto que la solubilidad de ellos disminuye con la disminución de la presión a temperatura constante, o bajo un incremento de temperatura a presiones constantes.

Ante una reacción de disolución caracterizada por intercambio entre dos electrolitos, la reacción se moverá hacia la especie que muestra mayor disminución en su disociación. Esto debido a que las reacciones son entendidas desde la fisicoquímica y termodinámica, enfocada en la energía libre de Gibbs. Aquí factores de fugacidad de  $\text{S}_2$ ,  $\text{O}_2$ , pH, presión, temperatura, e incluso la consideración de HCl vs KCl, generan modificaciones en la solubilidad de los metales dentro del sistema. Se incluye este efecto en la solubilidad del Pb y Zn (Hemley et al., 1992).

Peucker-Ehrenbrink et al. (1994) consideran que los fluidos hidrotermales lixiviarían y transportarían casi hasta un 12% ( $\pm 8\%$ ) del plomo concentrado en la corteza, sin considerar aportes de sulfuros o volúmenes y niveles de plomo situado en stockwork o sulfuros masivos.

Li et al. (2015) realizaron un estudio sobre la fuente que genera una veta epitermal de Pb-Zn-Ag de baja sulfuración formada a mediana-baja temperatura y que presenta una mineralización precipitada principalmente mediante mecanismos de ebullición. En su estudio se consideró el fluido como un sistema de baja salinidad y densidad compuesto por  $\text{H}_2\text{O}$  - NaCl-  $\text{CO}_2$ -  $\text{CH}_4$ . Lo relaciono como un sistema de aguas meteóricas con leve mezcla de fluidos magmáticos. Este proceso de ebullición probablemente generado como consecuencia del ascenso en conjunto a la desgasificación de  $\text{CO}_2$  y el consecuente cambio de pH y de fugacidad de oxígeno que esto genera, desestabilizaron los complejos metálicos que transportaban Pb-Zn-Ag, los cuales se consideran que eran principalmente formados por  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HS}^-$ . Asignando así un grado de importancia a los vapores para la formación del depósito.

Ellis (1959) mediante estudios termodinámicos concluye que la solubilidad de sulfuro de Zinc en aguas de temperaturas entre 200 – 300°C, es de  $5 \times 10^{-6}$  mol/kg. Y los agentes importantes para transportar metales pesados (como el zinc) en fluidos hidrotermales corresponderían a complejos tiosulfato. Esto deducido entre la interacción de gases magmáticos y aguas termales, que son constituidas principalmente por:  $\text{H}_2$ - $\text{SO}_2$ - $\text{CO}$ - $\text{CO}_2$ , y  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$  respectivamente. Haciendo participe un sistema  $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$

Nagaseki and Hayashi (2008) estudian la partición del Zn entre la fase vapor y líquida ante un escenario de ebullición en condiciones entre 500 – 650°C y 35-100MPa, bajo sistemas con y sin S. Los datos obtenidos de su coeficiente de partición estarían bien relacionados con los valores empíricos directos de depósitos mineral, e indican que prefiere usualmente

la fase líquida. Atribuyen su comportamiento a la clasificación y regla de Pearson (1963). Esta clasifica varios ácidos y bases como "duros" o "blandos" según su estructura molecular, y establece que los ácidos duros y las bases duras (o ácidos blandos y bases blandas) tienden a unirse. Por lo tanto, como el  $Zn^{2+}$  tiene un comportamiento límite, puede formar complejos fuertes con  $Cl^-$ , permitiéndole fraccionarse a la salmuera, mientras que los compuestos  $H_2S_{(aq)}$  o  $HS^-$  con complejos clasificados como blandos se fraccionan a la fase vapor, por lo que se prioriza la formación de complejos clorurados en la fase líquida. Bajo estas condiciones, tanto el zinc y los metales parecidos como lo es el plomo, tienen baja volatilidad. Incluso es independiente a un aumento de S en el sistema, esto no aumentaría su partición a la fase vapor. La observación anterior es soportada por Pokrovski et al. (2008) donde muestra que el Zn está más concentrado en solución clorurada e incluso aumenta sus concentraciones en las soluciones con pH más ácidas producto a que es una condición más favorable para la formación de complejos cloruros en comparación con los complejos hidro-sulfurados, los que son más compatibles en soluciones alcalinas. En condiciones alcalinas sulfuradas el complejo neutro  $Zn(HS)_2^0$ , es el más estable y el que tendería a formarse para irse a la fase vapor, pero mientras se desarrollen complejos clorurados tipo  $ZnCl_4^{4-}$  este dominaría por su naturaleza polar y el zinc se estaría haciendo principalmente al líquido. La preferencia entre vapor y líquido del zinc se puede aproximar dada la distribución de sus especies de cloruro y sulfuro en la fase líquida. En general el Zn tiene menor volatilidad que el Pb.

Zhong et al. (2015) El Pb y el Zn tienen comportamientos de solubilidad dependiente de las condiciones oxidantes-reducidas y de las concentraciones de Cl y S, junto a la presión y la temperatura. La combinación de estos factores fomentaría la formación de complejos clorurados o sulfurados, para ellos. En comparación, la predominancia en formar complejos hidro sulfurados es Pb mayor que ( $>$ ) Zn. A bajas temperaturas los complejos clorurados dominan, mientras que la formación de hidrosulfurados y sulfurados toman relevancia a altas temperaturas donde la solubilidad del azufre aumenta, e incluso su estabilidad puede incrementarse con aumentos de salinidad. Es esperarse entonces que según la evolución del fluido magmático-hidrotermal se tengan depósitos con asociación mineral relacionada a la presencia o ausencia de S en el sistema. Sería posible realizar primeras aproximaciones de las condiciones en que fueron transportados el Zn y/o el Pb si se considera la baja solubilidad de minerales sulfurados y el comportamiento de sus complejos bisulfurados. Observaciones sobre asociación mineral, alteración, e inclusiones fluidas encontradas, permitirían especular dichas condiciones.

Etschmann et al. (2019) Este reciente estudio propone una confirmación de que el Zn es transportado como complejos clorurado principalmente en los fluidos hidrotermales de sistemas más superficiales, sobretodo en condiciones ácidas, y que en zonas profundas predomina el transporte como bisulfurado en sistemas hidrotermales más neutros o alcalinos. La transición puede ser entorno a los 10km y a temperaturas sobre los 300°C y casi seguro sobre los 500°C. Indican que las presiones tienen un rol importante, para la estabilidad y solubilidad del Zn.

# Capítulo 3

## Estudios de volátiles en depósitos de oro

El siguiente capítulo está orientado a introducir y enmarcar las diferentes técnicas analíticas que se pueden usar para estudiar volátiles en sistemas hidrotermales que ayudan a la exploración económica. Además, se enmarcan las características geológicas más relevantes a considerar sobre los depósitos de oro orogénicos y epitermales. De manera más detallada, se presenta una recopilación de información sobre: (1) Medidas de volátiles analizados en diferentes depósitos de oro orogénico con la técnica efectuada. (2) Texturas de cuarzo y calcita que evidencian procesos hidrotermales en el sistema. Esta información es relevante para la exploración debido a que da a conocer mecanismos de transporte y precipitación del mineral de mena. Todo esto se expone con el objetivo de concluir características relevantes y prácticas que puedan ser consideradas al momento de efectuar una exploración, prospección o evaluación.

### 3.1. Técnicas Analíticas

Se detallarán diferentes técnicas utilizadas para obtener información geoquímica de los fluidos hidrotermales. Pueden enfocarse en la obtención de información de diferentes volátiles o de algún volátil en particular, de manera cualitativa o cuantitativa. Las principales técnicas analíticas a abordar se pueden clasificar como destructivas o no destructivas, según el trabajo que sufre la muestra en el proceso de análisis. A continuación se agrupan en estas dos últimas clasificaciones y luego se describe separadamente cada una.

#### 3.1.1. Técnicas no destructivas

##### Espectroscopia de Raman

Es una técnica no destructiva que permite estudiar, mediante un análisis composicional, las inclusiones fluidas. Puede identificar cualitativamente los componentes químicos presentes en la inclusión, tanto de los sólidos, los líquidos y los gaseosos. Específicamente, esta técnica permite calcular la presencia y densidad del dióxido de carbono, como también la mezcla de gases ([Burke, 2001](#); [Frezzotti et al., 2012](#)).

El principio por el cual opera el análisis de espectroscopia de Raman es bien expuesto

en el trabajo de [Frezza et al. \(2012\)](#) como también en [Dubessy et al. \(1989\)](#), en los cuales se indican los fundamentos y las metodologías. De manera resumida la técnica se basa en la medición del comportamiento de un haz de luz (fotones), emitido en forma de láser, analizando su dispersión luego de que incide sobre una molécula. La intensidad de luz dispersada resultante da nociones de los enlaces de la o las moléculas incididas. Esta energía es visualizada en una gráfica de intensidad *versus* frecuencia, proyectándose como un espectro, los cuales son característicos de cada sustancia. De esta forma se conoce el espectro del dióxido de carbono, el cual tiene como característica los *peak* de 1285, **1388** y 1370, llamado *Fermi diab* ([Lamadrid et al., 2017](#)).

Este análisis puede ser aplicado en inclusiones fluidas presentes en cuarzo como también en otras fases minerales. [Rosasco et al. \(1975\)](#) lo aplica por primera vez en inclusiones fluidas para poder identificar sus componentes líquidos, sólidos y gaseosos. Un impedimento era la necesidad de inclusiones de gran tamaño (mayor a 100micrones). [Rosasco and Roedder \(1979\)](#) elimina dicha limitación y puede aplicar la técnica a inclusiones menores, mostrando la utilidad para calcular la presencia de moléculas e iones. Se indica que se debe considerar la fluorescencia, iridiscencia y la intensidad de bombardeo principalmente al momento de realizar un estudio en las inclusiones fluidas en una fase mineral en particular. En su trabajo se expone una gran cantidad de espectros para identificar sustancias.

Esta técnica puede detectar pequeñas cantidades de agua en inclusiones ricas en dióxido de carbono, y viceversa ([Berkesi et al., 2009](#)). Al ser una técnica cualitativa con la cual puede, a lo sumo, obtenerse cuantitativamente un valor de densidad para el dióxido de carbono, es muy usual que se combine con microtermometría. Esta combinación permite obtener información de presión, temperatura, volumen y composición del fluidos. Ejemplo de ello es el trabajo [Rosso and Bodnar \(1995\)](#) donde se consigue estudiar la temperatura del fluido de la inclusión fluida mediante microtermometría, la densidad mediante espectroscopia de ramman, y considerando ecuaciones termodinámicas proyectar la presión y por consiguiente profundidad a la cual el fluido fue atrapado. Para ello asume una linealidad entre el espectro de ramman y la densidad, para ajustarlo a las ecuaciones. La versatilidad de la técnica permite que pueda estudiarse una inclusión fluida al mismo tiempo que esta ésta bajo un procesos de análisis microtermometrico o simplemente, siendo calentada o enfriada ([Berkesi et al., 2009](#)).

## Microtermometría

La microtermometría aplicada al estudio de las inclusiones fluidas para obtener información de condiciones de temperatura, presión y composición del fluido tiene innumerables trabajo con los cual se ha ido desarrollando y perfeccionando la técnica en las ultimas décadas. Corresponde a una técnica centrada a enfriar y calentar la inclusión fluida y ver los cambios de fases que esta sufre según la temperatura dada. Para darle factibilidad a los datos obtenidos mediante esta técnica se debe realizar una petrografía detallada de las inclusiones fluidas ([Goldstein and Reynolds, 1994](#)) . El autor experto Edwin Roedder ([Roedder, 1977, 1984, 1990; Roedder and Bodnar, 1980](#)) ha presentado gran cantidad de información sobre los estudios en inclusiones fluidas, microtermometría y su aplicación para la exploración de distintos depósitos mineral. Lo principal a saber y a considerar en la aplicación de la microtermometría es: (1) Las reglas de Roedder. (2) Las inclusiones representan un sistema de

un componente o de múltiples componentes y este puede ser simplificado para aproximar su entendimiento.

El punto uno refiere a las siguientes 3 reglas (Roedder, 1979; Roedder and Bodnar, 1980): (i) El fluido es atrapado como una sola fase; fluido homogéneo. (ii) El volumen de la inclusión no cambia luego de ser atrapado y sellado. (iii) No se pierde ni se agrega nada a la inclusión después de ser sellada. Estos 3 principios deben ser cumplidos por la inclusión para que se pueda realizar un estudio fidedigno sobre ella, es decir, debe cumplir las reglas de Roedder. Luego, cualquier efecto de la presión en la que se encuentra la inclusión puede ser insignificante o conocido. Y también, es pertinente reconocer el origen de la inclusión para poder referirse al evento geológico que representa dicho fluido, y dar sustento a la pregunta que se trata de responder al estudiar dicha inclusión. El punto dos puede entenderse de la siguiente explicación: Sabido es que los fluidos geológicos poseen múltiples componentes, tanto de fases como de solutos iónicos. Esta escasez de fluidos puros vuelve complejo el entendimiento del sistema propiamente tal por lo que se asume una representatividad del fluido geológico a partir de los componentes más abundantes. Estos componentes son agua, dióxido de carbono y sal. Los sistemas a utilizar por lo general son  $H_2O-NaCl$ ,  $H_2O-CO_2$ , y  $H_2O-NaCl-CO_2$ . Es necesario poseer información sobre el comportamiento termodinámico de estos para poder extrapolar dichos datos al estudio del fluido geológico atrapado en la inclusión analizada. Conociendo sus diagramas de fases presión, temperatura, composición, podemos conocer punto triple, puntos críticos y las isocoras de *liquidus*, *solidus*, *solvus* (Roedder and Bodnar, 1980)

Por lo tanto asumiendo que las inclusiones que serán analizadas cumplen las reglas, lo principal es luego obtener la información a partir de la técnica. La metodología es enfriar, a una tasa controlada de temperatura, utilizando usualmente nitrógeno líquido, y mientras se enfría ir observando y/o grabando la evolución de la inclusión. Una vez esta toda la inclusión solidificada o pareciera que no evolucionara más, se procede de igual forma pero ahora calentando la inclusión. Los datos de temperatura importantes son; cuando se completa la solidificación, cuando se funde el sólido o cada sólidos, el último sólido, cuando se torna una fase homogénea; y los datos importantes por lo tanto son: y apoyarse en los diagramas de fases del sistema simplificado que representaría el sistema interno de la inclusión fluida analizada.

se han realizado múltiples estudios con inclusiones fluidas sintéticas, a las cuales se les conoce la composición, para construir los diagramas de fases de dicho sistema composicional. Estos estudios se realizan en determinados rangos de temperatura y/o presión y/o composición. Existen excelentes trabajos para consultar sobre los sistemas de  $H_2O-CO_2$  y  $H_2O-CO_2-NaCl$  (Bakker and Diamond, 2000; Diamond, 2001; Schmidt and Bodnar, 2000), ambos sistemas representan el fluido más general de los depósitos de oro mesotermal (Bodnar et al., 2014). Unas características de los depósitos mesotermales de oro determinadas a partir de microtermometría son; rango de temperatura entre 150 y 400 grados Celsius, entre 2 a 10 % de salinidad, usualmente menor a 5 %, y con una significativa presencia de  $CO_2$  y  $CH_4$ , usualmente entre 4 a 25mol % (Bodnar et al., 2014; Wilkinson, 2001).

### 3.1.2. Técnicas destructivas

#### *Crushing*

Con el enfoque de reconocer en las vetas de cuarzo hidrotermal la presencia de dióxido de carbono, [Deicha \(1950\)](#) propone una manera rápida y simple para reportarlo. Con la utilización de un aparato, que genera trituración de granos de cuarzo inmersos en un aceite junto con una lupa, se puede observar la presencia o no de algún gas. La metodología es extraer un grano de cuarzo pequeño, 1mmx1mmx1mm por ejemplo, colocarlo sobre una placa, imbuirlo en un liquido-aceite conocido, el cual genera un comportamiento inmiscible con algún gas en particular, sabido. Luego sobreponerle un placa gruesa de vidrio, después esto colocarlo en el aparato para realizar la trituración del cuarzo con la maquina mediante tracción. Una vez logrado que el cuarzo se fracture, se observa este con una lupa para poder reportar si existen burbujas atrapadas en el aceite. La factibilidad reside en la hipótesis de que si dicho grano de cuarzo posee inclusiones con el volátil buscado, este sera liberado al ser fracturado y quedara atrapado en el medio (aceite) con el cual es inmiscible. Para poder observar **dióxido de carbono** el aceite recomendado es **glicerina**. Con ello se indican probabilidades de procesos neumatolíticos, procesos hidrotermales, o eventos de fluidos que intervinieron en la cristalización o re-cristalización de los minerales. Esta técnica es un aporte útil para realizar exploración de oro mesotermal ([Deicha, 1950](#)).

Esta técnica fue nuevamente retomada, trabajada y evaluada para considerar su potencial como herramienta para exploración mediante el estudio de inclusiones fluidas. De igual forma se han propuesto mejoras al modelo de Deicha. El trabajo de [Roedder \(1970\)](#) indica la precaución de no atrapar burbujas en el aceite en la preparación de la muestra-técnica, y que la muestra no se escape del instrumento por la presión ejercida. Hace hincapié en el posible efecto del índice de refracción entre solvente, mineral y gas. Ejemplo de esto ultimo es la aplicación en esfalerita, la cual debido a su alto índice de refracción es difícil de observar resultados.

La factibilidad de su uso para reconocer dióxido de carbono en minerales y la utilidad de esta información para la exploración de oro en depósitos mesotermales fue evaluada por [Diamond and Marshall \(1990\)](#). Con un método estadístico tipo histograma de las observaciones de burbuja, y distribuyendo esta información en el espacio se puede generar un vector aurífero, delimitando los alrededores del deposito. La manera de delimitar la zona tomando en cuenta la liberación de burbujas que quedan atrapadas en el aceite, considera tres escenarios: (1) Cero burbujas. (2) Pocas burbujas, correspondiendo a 5 o menos por grano. (3) Abundantes burbujas, escenario más usual con respecto a las vetas de cuarzo ricas en inclusiones fluidas.

En su estudio las inclusiones fluidas de las muestras fueron analizadas mediante petrografía, microtermometría y espectroscopia de Raman. Se demostró que el principal volátil en las inclusiones de las muestras con oro era dióxido de carbono, por lo que el *Crushing* resulta cualitativamente un método sensible a la presencia de este último. Las principales consideraciones a tener son la posibilidad de que los eventos geológicos, tectónicos, del lugar manifiesten participación de fluidos carbonatados, ejemplo de esto serían presencia de metamorfismo regional en facies de anfibolita o condiciones de grado superior. Otra consideración es que las muestras hayan perdido sus inclusiones post atrapamiento por procesos posteriores

o que no sean muestras proveniente de un deposito mesotermal. Conocer el contexto regional y local de la zona de estudio resulta por tanto importante. Lo positivo de la técnica es la rápida, económica y directa aplicación tanto en terreno como en gabinete.

### **Ablación láser (LA) - inducción de plasma (ICP)- espectrometría de masas (MS), Cromatografía de gases (GC)**

Las técnicas de ablación laser por inducción de plasma han sido acopladas con aparatos para analizar espectroscopia de masa, o con multi collector, o espectroscopia de emisión atómica. Por sus siglas en ingles se abrevian: LA-ICP-MS, LA-MC-ICP-MS, LA-ICP-AES respectivamente. Esta es una técnica destructiva que obtiene valores cuantitativos a semi-cuantitativo de la composición y razones de los isótopos de la muestra, en tiempo real y rápido. Es muy útil producto a su potencial de realizar estudios micro-analítico con umbrales de detección de ordenes de partes por millón (ppm) e incluso partes por billón (ppb). Utiliza como láser un gas de neón o argón, gas nobles, calentados para que alcancen el estado de plasma. La técnica se basa principalmente en que rayo láser se enfoca sobre la superficie de una muestra contenida en una celda de ablación, la muestra se ablaciona ("bombardea"), esta se gasifica y luego se transporta, como partículas (es decir, un aerosol), por el gas portador (He o / y Ar) al ICP para estar ionizado; después de la ionización, los iones con diferentes razones de masa y carga son filtrados por el sistema de espectroscopia de masas por el cual luego son captado mediante el detector(Liu et al., 2013).

La calibración del equipo es fundamental para asegurar una buena obtención de los datos. Para estudiar inclusiones fluidas se debe trabajar con una inclusion fluida como estandar que tenga una salinidad conocida (NaCl equivalente) y un estandar que represente al mineral hospedante, luego el análisis de LA-ICP-MS debe realizarse sobre una inclusión fluida que a demás tenga una microtermometria previa para conocer mediciones de su salinidad (Heinrich et al., 2003). La sensibilidad (s) para cada elemento depende de la razón de concentración en la muestra y la intensidad del laser con la que se muestreo. De igual forma se controla la intensidad de emisión base (Ib) del láser. De esta forma, la intensidad base y la intensidad de emisión (Im) del láser a la muestra se correlacionan (Icc) para luego conjugarla con la sensibilidad de detección y obtener la concentración (C) del isótopo(Guillong and Pettke, 2012; Lin et al., 2016; Liu et al., 2013; Wieser et al., 2012).

$$I_{cc} = I_b - I_m, C = I_{cc} \times s$$

Esta técnica puede ser aplicada en inclusiones fluidas. Algunos de los elementos que pueden ser medidos son los isótopos de Li, C, O, Mg, Cl, Ba, Fe, K, Ca, Zn, Sr, Sn, Pb, Ge, Te, As, Ag, Au, entre otros. La precisión y exactitud son insensibles, no dependiente, del tamaño y de la profundidad de la inclusión (Allan et al., 2005). De igual forma no depende de la cantidad de inclusiones estudiadas, y las mediciones debiesen tender a una distribución gaussiana. En este caso se necesita una calibración con inclusiones fluidas sintéticas. Por otro lado, otros autores consideran de suma importancia la profundidad de la inclusión con respecto a la superficie del mineral hospedante, el tamaño de la inclusión y su forma, concluyendo que esto puede afectar la precisión de los cálculos composicionales de la inclusión fluida, indicando que a mayor profundidad menor precisión del estudio de la inclusión (Guillong and Pettke, 2012; Ramsey et al., 1992).

### *Cromatografía de gases (GC)*

Esta técnica analítica destructiva consiste en pulverizar una muestra en una celda vacía, luego los gases son transportados usualmente por un gas noble, helio por ejemplo, a una celda para generar una columna capilar de los componentes gaseosos. Estos luego son detectados por fotoionización y conductividad térmica ([Chi et al., 2006](#); [Salvi and Williams-Jones, 2003](#)). Esta técnica tiene menos nivel de detección que la espectroscopia de masa (MS), sin embargo permite que los gases puedan ser utilizados para pasar a futuros análisis. El límite de detección va a los  $10^{-6}$  micromoles. Pueden detectarse especies como;  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Puede realizarse en distintas fases mineral, es decir, si se desea se puede realizar la GC de inclusiones fluidas presentes en cuarzo, o en esfalerita o en anklerita, etc ([Eichinger et al., 2010](#); [Salvi and Williams-Jones, 2003](#)). Para conocer más sobre esta técnica, poco aplicada para realizar exploración de metales, puede recurrir al texto [McNair et al. \(2019\)](#).

# Capítulo 4

## Revisión Geológica del distrito minero Alhue

El distrito minero Alhue se encuentra ubicado unos 80km al suroeste de Santiago y a unos 9km al este de la Villa Alhué, entre a los 32° y 34° latitud sur, y entorno a los 71° latitud norte. Se halla en la cordillera de la costa central donde pueden ser observadas secuencias estratificadas con dirección norte-sur de edades Jurásicas a Cretácicas de origen volcánica, volcanosedimentaria y sedimentarias. Las rocas intrusivas presentes en el sector tienen edades correspondientes al paleozoico, jurásico y al cretácico, y son principalmente felsicas.

### 4.1. Geología distrital

#### 4.1.1. Rocas estratificadas

Son 6 las principales Formaciones estratificadas (en adelante se usará la abreviación "Fm." para referir la palabra Formación). Ordenadas de la más antigua a la más reciente: Formación (Fm.) Cerró Caldera, Fm. Horqueta, Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilca, Fm. Lo Valle. Estas se describirán a continuación.

#### **Formación Cerro Caldera (Jurásico Medio; Aaleniana superior – Bajociano)**

Esta formación ha sido datada por bivalvos y ammonites publicado en [Nasi and Thiele \(1982\)](#). Subyace concordantemente a la Fm. Horqueta, y su base sobreyace a granitoides de edades Jurásicas como Cretácicas ([Gana and Wall, 1997](#); [Wall et al., 1996](#)). Posee una potencia de 760m y un buzamiento que varía entre 30° y 50° al Este. Presenta evidencia de deformación por esfuerzos de direcciones NNE - SSW a N - W. Su litología se compone de conglomerado polimictico, areniscas y limolitas volcanoclasticas con intercalaciones pequeñas de caliza. En la parte central existen intercalaciones de toba y flujo de lavas. En la parte superior presenta unidades de areniscas con laminación cruzada bien clasificada de granulometría homogénea.

### **Formación Horqueta (*Jurásico Medio-Superior; Bajociense - Berriasiense*)**

Interpretada por primera vez por [Thomas \(1958\)](#) y modificado después por [Piracés \(1976\)](#). Sobreyace concordantemente a la Fm. Cerro Caldera y subyace concordantemente a la Fm. Lo Prado. Se estima que posee una potencia de 4300m con un buzamiento que varía entre los 22° y 60° al Este. Corresponde a una secuencia de grupo de rocas volcánicas y volcanoclasticas de color gris verdoso, con intercalaciones de rocas sedimentarias de carácter continental. Se constituye de tobas, lavas andesíticas a riolíticas, brechas andesíticas, conglomerados polimicticos volcanoclasticos, areniscas bien redondeadas y seleccionadas de color pardo rojizo, limolitas del mismo color pardo rojizo y algunos estratos de calizas y lutitas.

### **Formación Lo Prado (*Cretácico; Berriasiano superior-Hauteriviano*)**

Interpretada por [Thomas \(1958\)](#), separada de las unidades del Jurásico en 1963 por otro autor producto de una inconformidad. Dividida en 2 y 3 miembros por [Piracés \(1976\)](#) y [Wall et al. \(1996\)](#). Fósiles de Ammonites hallados en rocas calcáreas señalan el intervalo de edad Berriasiano superior-Hauteriviano ([Nasi and Thiele, 1982](#); [Vergara et al., 1995](#)). Sobreyace concordante a la Fm. Horqueta y subyace concordante a la Fm. Veta Negra. Corresponde a una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias marinas. Esta secuencia se constituye por areniscas feldespáticas, conglomerados finos con intercalaciones de calizas y lutitas bien estratificadas, areniscas conglomeradicas con intercalaciones de brechas andesíticas, lavas andesíticas y tobas con filones andesíticos, areniscas y caliza. La potencia y sus miembros han sido postulados de la siguiente manera por los siguientes autores:

[Nasi and Thiele \(1982\)](#) asignan una potencia variable a la formación en si entre 2500m a 6800m y la subdividen en 2 miembros: Uno inferior compuesto por rocas sedimentarias marinas y uno superior donde se alternan rocas marinas y continentales. [Wall et al. \(1996\)](#) definen 3 miembros: Superior, Medio e Inferior. (i) Miembro Superior: Potencia de 1100m, constituida por calizas marinas, areniscas y conglomerados con intercalaciones de rocas volcánicas. (ii) Miembro Medio: Potencia de 2150m, constituida por lavas, lavas brechosas y tobas, de composición andesíticas a riolítica e intercalaciones sedimentarias. (iii) Miembro Inferior: Potencia de 1970m, consta de areniscas, arenisca calcárea fosilíferas marinas, lutitas calcáreas, arenisca y conglomerados, escasa intercalación de lavas andesíticas y tacíticas. En estos 3 miembros postulados por [Wall et al. \(1996\)](#) se han reconocido las siguientes mineralizaciones: Mineralización de cobre y oro-cobre en vetas presentes en los Miembros Superior y Medio, mineralización estratiforme de cobre y yacimientos de caliza en el Miembro Superior, y vetas de cobre-plata solo en el Miembro Medio.

### **Formación Veta Negra (*Cretácico Inferior; Barremiano-Albiano*)**

Originalmente definida por [Thomas \(1958\)](#). La edad del Cretácico Inferior es principalmente asignada por crono-estratigrafía al hallarse entre la Fm. Lo Prado y la Fm. Las Chilcas. Sobreyace concordantemente a la Fm. Lo Prado y subyace con una leve discordancia angular a la Fm. Lo Valle. Se estima una potencia de 2350m por [Nasi and Thiele \(1982\)](#). Se considera que forma un Homo-Monoclinal con un buzamiento entre 20 a 40° hacia el Este, con esfuerzos NE-SW. Corresponde a rocas volcánicas y en parte subvolcánicas, constituidas por andesitas ocoóticas, lavas andesíticas a riolíticas porfídicas y afanáticas, brechas volcánicas, areniscas, con intercalaciones de calizas y areniscas fosilíferas. Presenta filones andesíticos. Las lavas

fueron eruptadas en un ambiente continental. Vergara et al. (1995) sugieren una deposición bajo el agua o en sedimentos húmedos producto a la fuerte autobrechización de las lavas con matriz de arenisca y brechas hialoclasticas y peperitas. Sobreyace concordantemente a la Fm.

### **Formación Las Chilca (*Cretácico Inferior alto - Cretácico Superior bajo*)**

Cubre concordantemente a la Fm. Veta Negra y subyace a la Fm. Lo Valle a través de un contacto que no está aún definido si es concordante o discordante, o incluso si corresponde a una interdigitación de formaciones (Charrier et al., 2007). Esta secuencia era considerada parte de la Fm. Lo Valle por Thomas (1958), sin embargo Matthews (2018) genera una separación de estas secuencias basándose en las edades producto a dataciones de U-Pb y Ar-Ar en tobas y dacitas, obteniendo edades de  $110.3\text{Ma} \pm 0.9$  y  $110.5\text{Ma} \pm 1.0$ , respectivamente. Se reportaron otras edades en el sur por otros autores que permitió otorgándole un carácter regional a la secuencia en 1986.

Con una potencia de 3.500 metros, esta compuesta principalmente por secuencias volcánicas con escasas intercalaciones de rocas sedimentarias continentales. Dominada por tobas que presentan intercalaciones con lavas andesíticas y basálticas. Matthews (2018) indica que la mineralización del distrito minero Alhue está relacionado a la Fm. Las Chilca y no a la Fm. Lo Valle, a pesar de que aún no esta oficialmente bien definida la distribución estratigráfica de esta formación.

### **Formación Lo Valle (*Cretácico Superior- Paleógeno*)**

Aflora como una secuencia estratigráfica con disposición NW-SE manteniendo entre  $20$  a  $26^\circ$  al este (Thomas, 1958). Esta sobreyace en concordancia con la Fm. Las Chilca y con leve discordancia angular sobre la Fm. Veta Negra. (Gana and Wall, 1997) datan la base de la Fm. Lo Valle con edades mediante  $40\text{Ar} / 39\text{Ar}$  de  $72.4\text{Ma}$ ,  $71.9\text{Ma}$ ,  $71.4\text{Ma}$  con  $\pm 1.4$  Nasi and Thiele (1982) le asignan una potencia de  $3500\text{m}$  y le asignan una edad mínima de  $80\text{Ma}$  dada que esta es la edad de un stock granítico que instruye la formación. Consta principalmente de secuencias combinada por solo rocas continentales, desapareciendo las intercalaciones de rocas sedimentarias marinas en esta formación. Corresponde esencialmente a rocas volcánicas, constituidas por una sección basal de conglomerados y areniscas, sobre la cual se disponen lavas andesíticas a riolíticas, ignimbritas y brechas, con intercalaciones de tufitas y areniscas epiclasticas continentales (Nasi and Thiele, 1982).

#### **4.1.2. Rocas Intrusivas**

La zona presenta rocas intrusivas de edad Paleozoica, Jurásica y Cretácica, estas pueden ser descrita agrupadas por su edad como también se pueden abordar considerando que se enmarcan en el sector 2 batolitos, uno de edad Jurásica y el otro Cretácico. Esto destaca la intensa actividad de pulsos magmáticos que engloba el área de estudio a lo largo del tiempo geológico.

#### **Paleozoico**

Dataciones realizadas por Hervé et al. (1988) mediante isócrona Rb-Sr indican una edad de  $308 \pm 15\text{Ma}$ , la cual se ha considerado como la edad de cristalización. Otras mediciones

realizadas mediante datación K-Ar en biotita indican una edad entre 274 y 289 Ma por [Wall et al. \(1996\)](#), estas edades corresponden posiblemente al proceso de enfriamiento. Una edad obtenida mediante K-Ar en biotita de  $159\pm 4$  Ma se interpreta como rejuvenecimiento térmico debido a plutones del Jurásico. Lo último hace referencia al hecho de que las rocas intrusivas del Paleozoico están intruidas por granitoides de edad Jurásica y Cretácica. La litología descriptiva de las intrusiones paleozoicas corresponde predominantemente a tonalitas y granodioritas de anfíbola y biotita, afectadas por foliación milonítica. Forman plutones alargados entre 19-25 Km ([Wall et al., 1996](#)). Son rocas calcoalcalinas, peraluminosas, principalmente tipo I y, en menor proporción, tipo S.

## **Jurásico**

Estudios de K-Ar en biotita les asigna edades plateau de  $92\pm 2$  Ma y, mediciones de K-Ar en anfíbol indican edades de  $161\pm 9$  Ma,  $164\pm 8$  Ma y  $144\pm 7$  Ma. Estos intrusivos Jurásicos corresponden a tonalitas y granodioritas de horblenda-biotita, monzodioritas cuarcíferas y dioritas. Se hallan instruyendo a los granitoides del Paleozoico y a la Fm. Cerro Calera y Fm. Horqueta. Generan zona de alteración en los sectores donde instruyen. [Wall et al. \(1996\)](#) los describe como rocas calcoalcalina, metaluminosas a peraluminosas de tipo I con formas circulares de 2 a 13Km de diámetro

## **Cretácico**

[Wall et al. \(1996\)](#) nuevamente con dataciones K-Ar en biotita y también en plagioclasas les asigna edades plateau de  $92\pm 2$  Ma y  $95\pm 4$  Ma, respectivamente. Estas rocas instruyen a las Formaciones del Jurásico y del Cretácico como también a los intrusivos previos. Corresponden a pórfidos dioríticos y granodioríticos, granodioritas y tonalitas de anfíbola-biotita-piroxeno y monzodioritas cuarcíferas. [Wall et al. \(1996\)](#) las define como rocas calcoalcalinas de potasio intermedio, metaluminosas y de tipo I.

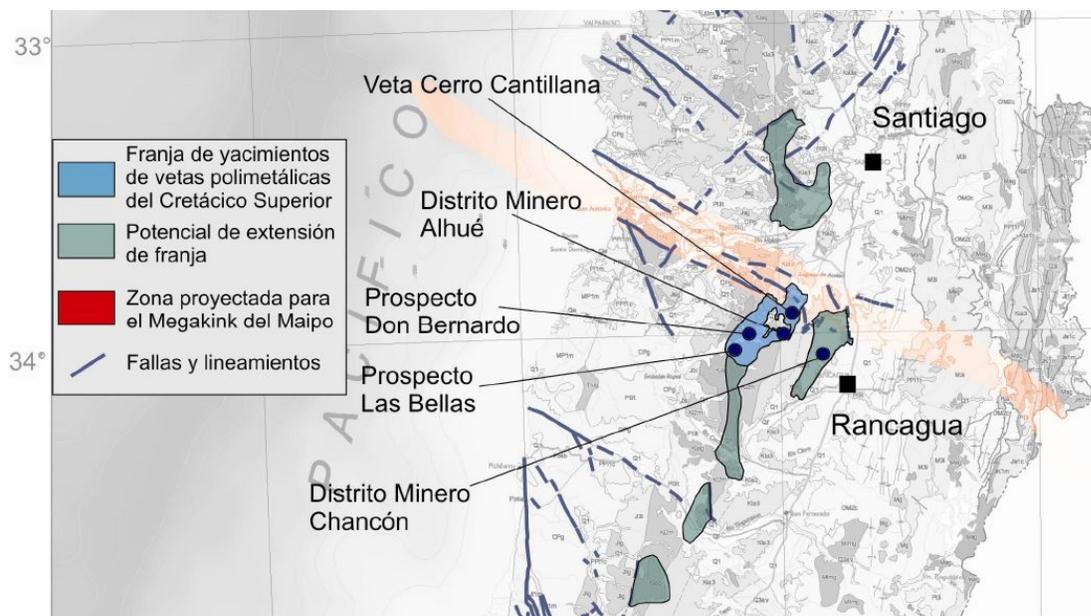
### **4.1.3. Estructuras - Morfoestructuras**

Gran medida de lo expuesto a continuación se apoya en el trabajo realizado por [Gröpper \(2011\)](#) y las citas que en él mismo se presentan.

Las estructuras y morfoestructuras principales del área de estudio están íntimamente relacionadas con la evolución geodinámica del sector, en otras palabras, están asociadas a la evolución del ciclo andino. Este proceso se desarrolla principalmente entre el Jurásico y el Cretácico, con algunos eventos activos hasta el Eoceno-Mioceno.

A saber, tras la reactivación de la subducción durante el Jurásico Temprano el área sufre (y evidencia) principalmente un desarrollo de cuenca extensional con pequeños episodios compresionales asociados a la formación de un arco con dirección Norte-Sur. Este arco migra hacia el Este. Este proceso genera las condiciones para formar estructuras extensivas de dirección N-S, las cuales van en igual dirección que las Formaciones litológicas estratificadas generadas durante dicho periodo.

Actualmente la estratigrafía del sector evidencia un Homoclinal con buzamiento al Este entorno a los  $20^\circ$  -  $40^\circ$ , este volcamiento sucedería post Cretácico Inferior, periodo en el que



**FIG. 4.1:** Franja metalogénica de yacimientos de vetas polimetálicas epitermales y mesozonales del Cretácico Superior. Tomado y modificado de Gröpper (2011).

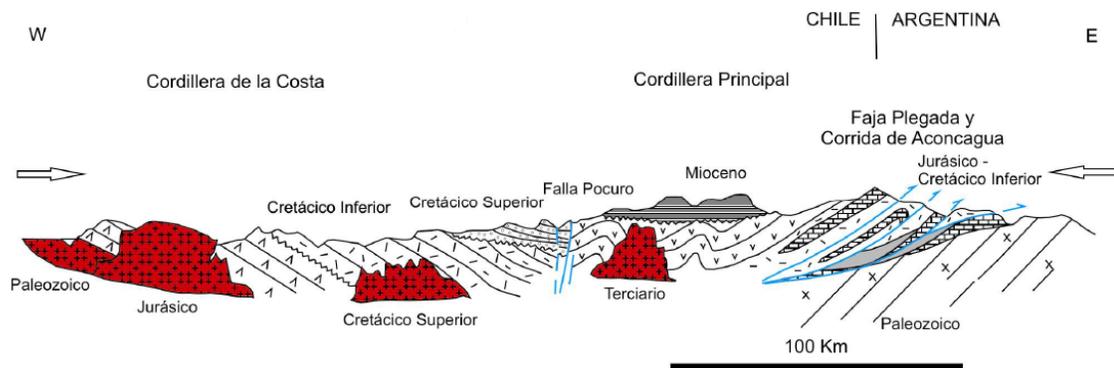
ocurren episodios de un sistema de tipo contracción. Este pequeño periodo compresivo es interrumpido, a finales del Cretácico y principio del Paleogeno, y se vuelve a generar un ambiente extensional.

En resumen, se tiene de más antiguo a más joven las siguientes estructuras: (i) Estructuras profundas de rumbo NW-SE asociadas a cuenca extensiva del Permico Tardío - Jurácico Temprano. Origen del set de fallas *Megakink del Maipo*, el cual cruza todo el país con dirección NW- SE, y presenta una rotación de  $28^\circ$  entre los bloques del Norte y los del Sur, el cual fue presuntamente generado post Mioceno. Estas estructuras evidencia la prolongada actividad de estas estructuras a lo largo de la historia geológica. (ii) Set de fallas paralelas a las formaciones estratificadas jurásicas y cretácicas. El set de fallas posee dirección N-S con variaciones debido a la influencia de la rotación provocada por el *megakink*; entorno a la intersección entre el set de falla y el *megakink* se hallan estructuras con direcciones NW- SE a NNW- SSE. (iii) Fallas con orientación NNE- SSW que podrían corresponder a la generación de bloques de esta dirección producto de episodios tectónicos compresivos durante el Turoniano - Santoniano.

Los yacimientos en el sector están controlados fuertemente por estas estructuras subverticales y la influencia de los eventos magmáticos intrusivos.

En la Figura 4.1 se proyecta el *Megakink* del Maipo junto a la franja metalogénica propuesta por Gröpper (2011), donde Alhué pertenecería a la franja de vetas polimetálicas del Cretácico Superior.

El perfil geológico ilustrado en la Figura 4.2 resume la situación actual del sector entre las latitudes  $32^\circ\text{S}$  y  $34^\circ\text{S}$ . En él se destacan los eventos intrusivos definidos para cada periodo de tiempo (Jurásico, Cretácico, Terciario) por los granitoides de color rojo. El distrito minero Alhué se ubica en la zona entre Cretácico Superior y Terciario. Dicho sector presenta



**FIG. 4.2:** Resultado de la evolución geológica andina que representaría la geología a nivel regional del distrito minero Alhué. En rojo los granitoides, en azul la falla. Tomado de Gröpper (2011).

plegamiento y fallas profundas.

## 4.2. Geología local

### 4.2.1. Rocas Estratificadas

Las vetas de cuarzo polimetálicas (Au,Ag,Zn,Pb) denominadas vetas de Alhué, se hospedan en una secuencia volcano-sedimentaria asociadas a la Fm. Lo Valle (Araya, 2001). Actualmente se considera que es la Fm. Las Chilca la principal hospedante de las estructuras mineralizadas (Matthew 2017).

Las unidades distritales definidas en la Fm. Lo Valle por Romero y Mundaca 1997, ordenadas de la más antigua al más reciente, corresponden a: Tobas brechosas, andesita inferior, unidad de tobas y andesita superior. Estas 4 unidades se encuentran depositadas de manera concordante entre si. Sin embargo, estudios detallados de la compañía minera YAMANA-GOLD han distinguido más de 20 unidades litológicas diferentes, que estarían ubicadas donde previamente se habían definido estas 4 unidades. A continuación se presenta una descripción de estas 4 unidades primeramente definidas.

#### Unidad de Tobas brechosas

El espesor mínimo ha sido estimado en 230m, y presenta 2 litología: (i) Toba lito-cristalina: Matriz verde oscura con 10 a 15 por ciento de cristales de feldespato con tamaño menor a 3mm y entre un 20 a 30 % de fragmentos líticos; estos fragmentos corresponden a andesitas porfídicas y afaníticas, y tobas cristalinas. (ii) Toba brechosa: Matriz gris-verdosa constituida por ortoclasa, cuarzo, plagioclasa, y fragmentos líticos de composición tobácea y andesíticas. Fragmentos líticos mayores que alcanzan hasta 30mm y que corresponden a litologías de andesitas porfídicas, andesitas afaníticas y tobas. Esta unidad se encuentra intruida en la base por cuerpos granitoides.

#### Unidad de Andesita Inferior

Su potencia se estima en 390m. Se observa de color gris verdoso a gris oscuro y con textura porfídica. Es de un 80-90 % masa fundamental afanítica, un 10 a 20 % plagioclasa y con un

2 a 5 % de piroxenos. Esta unidad posee propilitización moderada a fuerte con alteración selectiva. Las plagioclasa se alteran a epidota, los piroxeno a clorita. Junto a la alteración anterior, se puede presentar una superposición de silicificación.

### **Unidad de Tobas**

La potencia de esta unidad varía de 400m a 600m. Estas tobas generalmente son de color gris violáceo y gris verdoso, y presentan una alteración similar a la unidad de Andesita Inferior pero con una alteración argílica débil. En ella se halla una unidad sedimentaria que intercala con las rocas de la Unidad de Tobas y la Unidad de Andesita Superior correspondiendo a litologías de brecha conglomerada, arenisca y lutita, donde esta última resalta cuando presenta una potencia de 10m.

### **Unidad de Andesita Superior**

Esta unidad posee una potencia mínima de 500m. Su techo representa el nivel de erosión actual, por lo tanto la potencia máxima es variable. Se presenta en el sector Este de la zona de estudio. En esta unidad se reconocen 2 litologías: (i) Andesita porfídica con fenocristales de anfíbol. (ii) Andesita porfídica. La diferencia está en el color, porcentaje de la masa fundamental y los fenocristales. La primera tiene color gris verdoso con 90 % de masa fundamental afanítica y alcanza un 5 % de fenocristales de anfíbol. La segunda es de color negro con 70 % de masa fundamental afanítica y alcanza un 10 % de fenocristales de anfíbol, y hasta un 30 % de fenocristales en general.

## **4.2.2. Rocas Intrusiones**

Se define la presencia de batolitos que afloran en el sector, definiéndose el batolito Tantehue (Jurásico Medio-Superior) y el Granitoides Alhue (Cretácico Superior).

Con mayor énfasis e influencia se considera el Plutón Aguas Frías que delimita la distribución local de las rocas estratificadas por el costado Oeste, colindante con la disposición de la Fm. Las Chilcas. Representando este límite se encuentra la Falla Aguas Frías o Falla Límite. De composición monzodiorita, monzonita de cuarzo y monzogranitos de piroxeno y biotita. Pueden observarse texturas pegmatíticas y de mezcla.

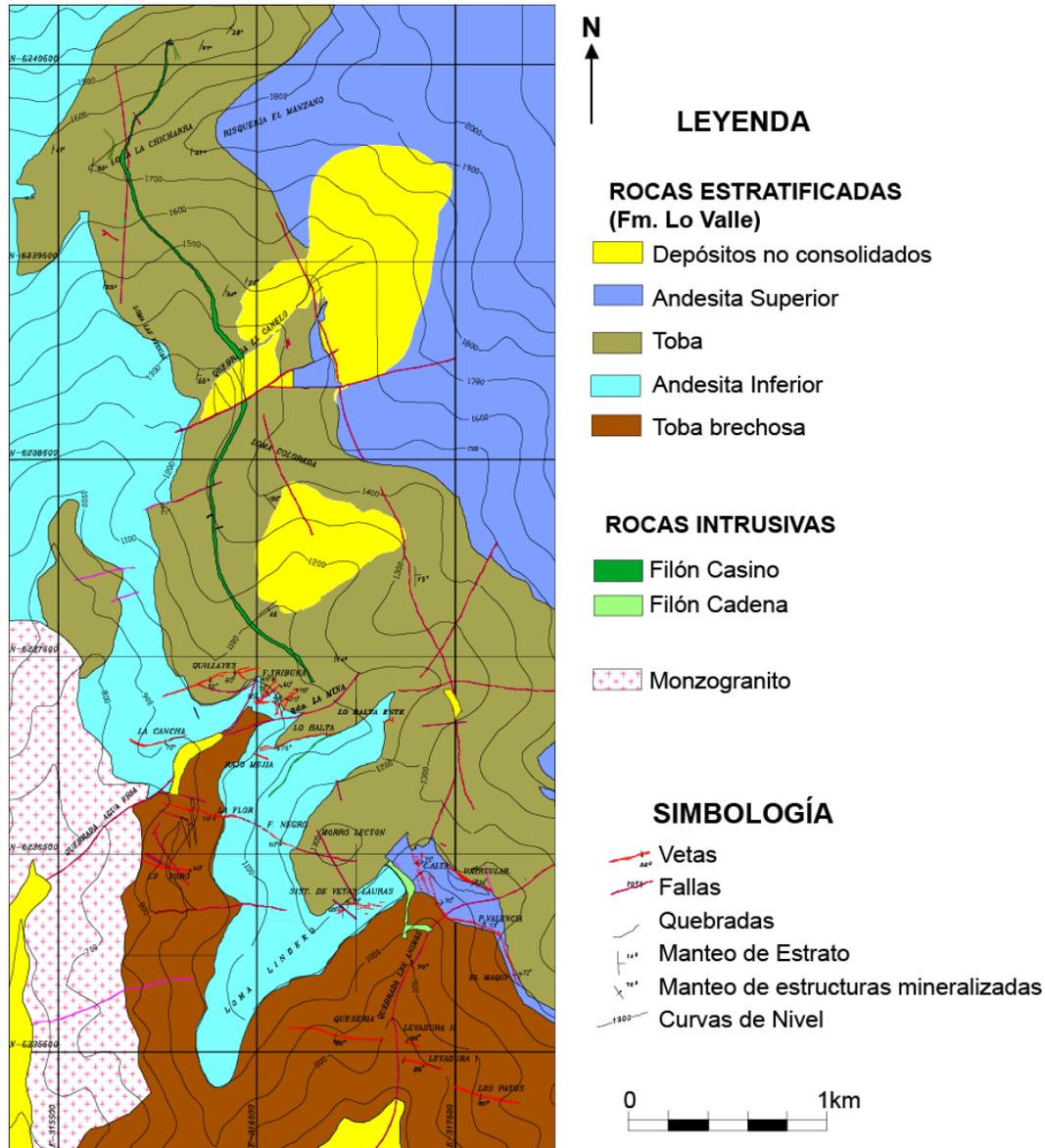
Existe una serie de diques, sill y filones que instruyen tanto al plutón Aguas Frías como a las unidades estratificadas de la Fm. Las Chilcas y/o Lo Valle. Estos diques, sills y filones presentan direcciones preferenciales de orientación N-S, o bien NNW-SSE o NNE-SSW. Estas rocas pueden tener espesores de 5m hasta 30m y prolongarse por decenas a centenas de metro. Sus composiciones varían entre basaltos afaníticos, restitas, andesitas, dacitas. La presencia de esta gran variedad de secuencias intrusivas, evidencian la gran actividad magmática del sector junto con una interesante evolución del fluido magmático (historia magmática del lugar) dada la gran diversidad en la composición de los intrusivos.

El filón que más destaca en el sector se llama Filón Casino, que corresponde a una andesita de color verdoso de edad Cretácica Superior con textura porfídica. Presenta una masa fundamental granular fina. Macroscópicamente es visible en el Filón Casino una alteración propilitica con mineralización de magnetita y pirita, mientras que al microscopio puede ha-

llarse; ilmenita y rutilo diseminados, pirita, calcopirita, magnetita, galena y esfalerita en pequeñas cantidades.

La información expuesta se apoya con información de la minera YAMMANAGOLD, y los trabajo de [Quintana Brevis et al. \(2018\)](#) y [Hanna Castro \(2017\)](#), quienes se apoyan con Herrero 2009 y Romero y Mundaca 1997.

Para observar la distribución de las litologías locales se presenta el mapa esquemático de la Figura 4.3



**FIG. 4.3:** Mapa local de la distribución litológica. En rojo zonas mineralizadas. Tomado de [Hanna Castro \(2017\)](#).

### 4.3. Relación entre la geología estructural y la alteración hidrotermal y mineralización.

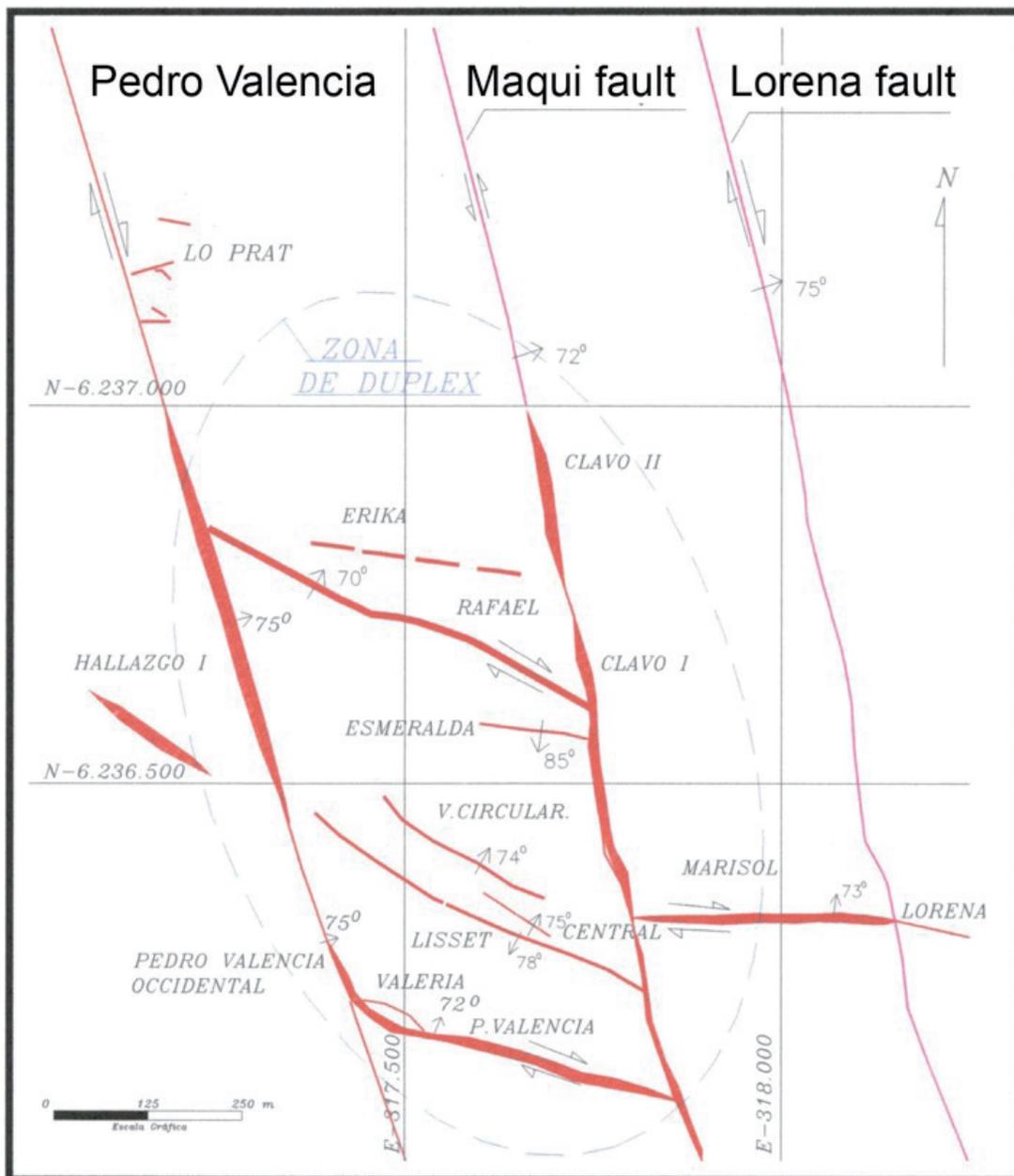
Agrícola en el 1556, con sus observaciones sobre zonas de mineralización, concluye los dos primeros principios importantes para el desarrollo de la geología económica: (1) canal de mineralización como característica secundaria que vendría siendo más joven que la roca caja. (2) Los minerales han sido depositados por, y a partir de, soluciones que circularon por dichos canales. Luego Nicolas Steno, establece las primeras clasificaciones de los depósitos. Es con Linged 1906 que se entablan las clasificaciones de los tipos de depósitos.

Heald et al. (1987) clasifica en 2 tipos los depósitos epitermales hospedadas en rocas volcánicas de metales preciosos y bases; "tipo acid-sulphatez tipo .adularia-sericita", destacando que las característica mas importante es las vetillas y la asociación de minerales de alteración. Ambos tipos son ricos en oro y plata, diferenciándose en el grado de presencia de metales bases y las condiciones de formación; siendo los ácido-sulfatado ricos en cobre y los adularia-sericita pobre en él, y estos últimos se desarrollan en sistema donde las aguas superficiales se mezclan con aguas salinas más profundas y calentadas probablemente por una fuente de calor en profundidad. A su vez, destaca que son más abundante en su estudio los adularia-sericita. Esta clasificación es tomada por Camus (1990) quien estudia los depósitos de oro en Chile, usando de ejemplo 20 yacimientos donde se incluye el distrito minero Alhue. El establece una clasificación o agrupación de 2 tipos para la nación, junto con re definir las franjas metalogenicas de oro. El estudio el distrito de Alhue con el apoyo de la referencia (Flores, 1948) indican que sus características geológicas y metalogenicas corresponderían a la clasificación de deposito tipo epitermal adularia-sericita, dado que el contexto del distrito es una mineralización del sistema en rocas subvolcanicas de composición intermedias asociadas con un arco magmático mineralizando oro a lo largo de estructuras con orientación N25E, de edad Cretácico Superior en roca caja de andesitas, brechas, granodioritas y tobas. Dado el mismo contexto, Gröpper lo propone perteneciente a una franja polimetálica de epitermales y mesozonales del Cretácico Superior.

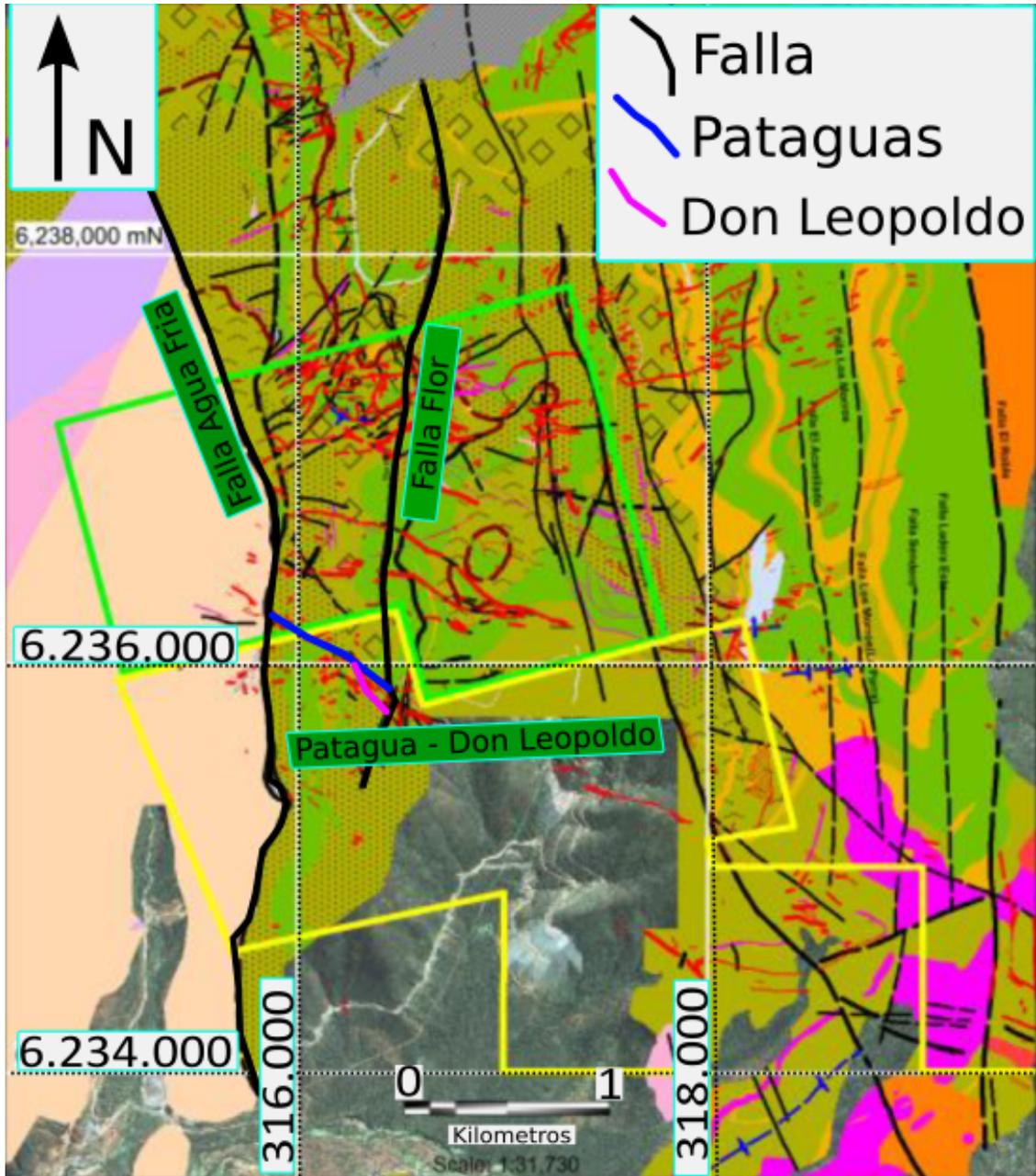
Una relación estructural puede ser visualizada en la Figura 4.4 donde podemos notar 3 estructuras principales llamada falla Pedro Valencia, Maqui y Lorena, con orientación N20E aproximadamente y en dicha imagen las zonas rojizas representan los sectores mineralizados correspondiente en su mayoría a vetas polimetálicas como respuesta conjugada de las fallas, ejemplo: veta marisol, v. circular, veta P.valencia, y otras.

La situación de la Figura 4.4 sucede unos cientos de metros al noreste de las vetas Pataguas y Don Leopoldo, estas vetas también se encuentran en orientación conjugada entre dos estructuras principales, Falla Agua Fría y Falla Flor, situación que puede verse en la Figura 4.5.

Destacan las morfologías de vetas asociadas a fallas y fracturas con varias generaciones. La mineralización hidrotermal ocurre en los espacios abiertos de las estructuras (vetas, stockwork, brechas). En Alhue se tiene vetas de cuarzo-pirita-oro y en menor medida calcopirita-esfalerita. Se identifica como un deposito de zona intermedia de metales bases con un promedio de 4-6g/t de Oro, al tener la asociación: Cuarzo- pirita- calcopirita- esfalerita-galena-hematita-oro.



**FIG. 4.4:** Esquema de la situación estructural en un sector de vetas polimetálicas a unos cientos de metros al NE con respecto a las vetas del estudio. Una relación más específica puede verse en Apéndice H.



**FIG. 4.5:** Edición de mapa realizado por Yamana para exponer la ubicación de las vetas Patagua y Don Leopoldo y su relación con respecto a las estructuras del sector. Una relación mas específica puede verse en Apéndice H. Tomado y Modificado de reporte anual Yamana Gold

Por tanto, Alhue ha sido explotado por Oro desde mediado del siglo 16 (Cuadra and Dunkerley, 1991) Poblete (2008). Al tener diferente forma de mineralización, distribución de metales y cantidades de los mismos, más el hecho de presentar diferente paragenesis entre las estructuras mineralizadas, aún ha sido debate establecer la clasificación de Alhue como deposito; ya sea, epitermal de baja o de alta sulfuración, mezosomal, si es un orogénico-mesothermal, o incluso si pertenece a un estratoligado (IOCG o IOA).

Se definirán algunas características de las alteraciones presentes y de la mineralización que se puede encontrar.

La alteración principal del sector corresponde a una fuerte silicificación y una intensa alteración propilítica. En menor medida existe alteración potásica y supergena (expresada como argílica), distribuidas de manera local. La alteración propilítica y la silicificación pueden hallarse de manera gradacional hacia los sectores con mineralización, siendo más intensa a mayor cercanía.

### **Propilítica**

Esta alteración se presenta ampliamente distribuida en el área de estudio producto a que tiene un origen de proceso regional. Puede hallarse sectores donde la alteración propilítica es gradacional entre el contacto de una roca alterada y una no alterada. Su asociación mineralógica principal corresponde a: clorita-epidota-calcita-pirita.

### **Silicificación**

Esta alteración es la más común en el sector. Esta silicificación genera un reemplazo del cuarzo microcristalino por cuarzo criptocristalino. Puede presentar mineralización de pirita ehuedral.

### **Potásica**

La alteración potásica se halla de manera muy local en la unidad Andesita Superior. Esta alteración se caracteriza principalmente por la presencia de feldespatos potásico o adularia, donde esta ultima es usualmente observable en vetas o brechas hidrotermales.

### **Supergena**

En el sector se puede hallar una alteración supergena representada por una alteración argílica de carácter regional pero de manera muy superficial, de poca intensidad y queda a criterio personal considerar el grado pervasivo de la alteración producto que la hidrólisis no supera los 30m de profundidad, hallando su mayor extensión en los sectores de vetas y fallas.

Gonzales 2019 indica 9 procesos metasomáticos en el sector: (1) Potásico. (2) Potásico-cálcico. (3) Sodico a Calco- sódico (4) Propilítico (5) Cálcico Tardío (6) Fílico (7) Zeolita (8) Argílica (9) Argílica avanzada.

## Mineralización

La mineralización económica se desarrolla en vetas polimetálicas (Au, Ag, Zn), brechas hidrotermales, stockworks en la roca caja, y disseminación. Todas estas modalidades presentan un fuerte control estructural para su desarrollo. La influencia estructural proviene de alguno de los siguientes cuatro sistemas de fallas: (1) N- S, (2) E-W, (3) NW- SE, (4) NE- SW (Poblete, 2008). Algunas vetas presentan zonación de los metales, con enriquecimiento relativo en oro y plata en las zonas más altas, y uno en zinc en las zonas inferiores (Agnerian y Pearson, 2006; citado en Poblete (2008)). A saber, el oro ocurre nativo o en forma de electrum asociado principalmente a cuarzo o a minerales tipo sulfuros tales como: pirita, calcopirita, galena, esfalerita e incluso magnetita. La plata se presenta en forma nativa, como electrum, argentita, sulfosales (pirargirita), y asociada a cuarzo y sulfuros (Araya, 2001).

# Capítulo 5

## Caso de estudio

En los capítulos anteriores se plasmó la teoría sobre volátiles con relación al transporte y precipitación de metales, y sobre los depósitos de oro orogénico. Los yacimientos pueden ser estudiados a través de estos conocimientos en función de los datos disponibles, obtenidos generalmente a partir de técnicas analíticas (anteriormente presentadas) aplicadas en inclusiones fluidas. El presente capítulo está enfocado en aplicar la información anterior a un depósito de oro-plata en las vetas Patagua y Don Leopoldo del distrito minero Alhue, Chile. Utilizaremos estudios petrográficos, información geoquímica, análisis de inclusiones fluidas, estadística y distribución de datos. Se dejaron las muestras preparadas para aplicar sobre ellas las siguientes técnicas analíticas: microtermometría, espectroscopia de raman, cromatografía de gases, LA-ICP-MS, *crushing*, para un futuro trabajo cuando la pandemia del planeta pase. Se proyectaron perfiles 2D(perfiles) con los que se englobarán las zonas con mayor o menor probabilidad de encontrar mineralización, y su correspondiente evaluación de recurso.

El capítulo se subdivide en 3 partes. Parte 1 (5.1): Introducción y contexto sobre la aplicación de observaciones petrográficas de las texturas e inclusiones fluidas en las muestras para aplicarlas a la exploración. Parte 2 (5.2): (i) Catastro y selección de muestras (ii) Distribución de metales. (iii) Correlación de metales. (iv) Distribución de inclusiones fluidas y de texturas mineral. (v) Estimación de recursos. Y finalmente, (vi) Relación entre texturas, inclusiones fluidas y temporalidad de eventos. La Parte 3 (5.3) corresponde a la sección de las técnicas analíticas propuestas; pendientes por la contingencia sanitaria.

### 5.1. Texturas de mineral de ganga y sus relaciones con la mineralización de mena en depósito epitermal

La sílice abunda en la gran mayoría de los sistemas hidrotermales y comúnmente está presente durante todo su desarrollo, por lo que el cuarzo es el mineral ganga predominante en los distintos depósitos, incluyendo los oro orogénicos. Características morfológicas, composicionales y principalmente texturales permiten identificar condiciones específicas relacionadas al fluido hidrotermal ([Dong and Morrison, 1995](#); [Dong et al., 1995](#)).

Numerosos autores han descritos diversas texturas de cuarzo y las han asociado a procesos hidrotermales (Adams, 1920; Dong et al., 1995; Fournier, 1983, 1985; Moncada and Bodnar, 2012; Moncada et al., 2012; Morrison et al., 1995; Sander and Black, 1988). Estos trabajos se han desarrollado estudiando principalmente depósitos epitermales pero estas texturas también se presentan en los yacimientos de oro orogénico (Herrington and Wilkinson, 1993; Sibson et al., 1988).

La génesis de estas texturas esta directamente relacionada con la evolución de la sílice en un sistema tal que las condiciones permitan la formación de los distintos tipos de cuarzo: cuarzo cristalino, calcedonia o sílice amorfa (Moncada et al., 2012; Morrison et al., 1995).

Cuando el fluido alcanza condiciones de sobresaturación leve de sílice con respecto al cuarzo, le permite la cristalización. Este cuarzo es el más estable y usualmente ocurre cuando encuentra espacios abiertos, ahí comienza a cristalizar de manera perpendicular a las superficies, lo más ehedral posible. Este cuarzo suele presentar inclusiones fluidas atrapadas durante su crecimiento (Fournier, 1985). El grado ehedral dependerá de la cinética y la lucha de espacio durante la formación de los cristales.

La calcedonia puede formarse por precipitación directa del fluido hidrotermal cuando tiene una sobresaturación intermedia de sílice con respecto a la formación de cuarzo cristalino y cuando se encuentra a temperaturas menores a 180°C. Otro mecanismo es mediante la transformación de sílice amorfo pre existente, proceso de recristalización generado por el paso del fluido hidrotermal.

La sílice amorfa se forma por precipitación directa desde el fluido cuando evidencia un gran grado de saturación de sílice con respecto al cuarzo. En este escenario, los polímeros de sílice coagulan y generan un material gelatinoso que origina la sílice amorfa. Este proceso involucra la presencia de agua. Si la saturación es grande, en conjunto a la hidratación de los polímeros, se generan partículas coloidales, en caso contrario el gel precipita como sílice amorfa directamente en las superficies preexistentes (Dong et al., 1995; Morrison et al., 1995; Weres et al., 1982).

Ante los procesos que sufre la sílice y sus distintas variedades de precipitación, las texturas de cuarzo se han agrupado en tres clases: (1) Texturas primarias: las cuales son por precipitación directa desde el fluido, ya sea de cuarzo cristalino o amorfo. (2) Texturas de recristalización: estas representan procesos de recristalización de calcedonia a cuarzo, de amorfo a calcedonia, de amorfo a cuarzo o de cuarzo en cuarzo. (3) Texturas de reemplazo: evidenciadas por el cambio parcial o completo de un mineral preexistente, por cuarzo (Dong et al., 1995; Moncada et al., 2012).

De las texturas definidas y agrupadas por los autores, se establecen nociones de temporalidad de eventos generados por el/los fluido hidrotermal(es) estudiado(s). Además existen aquellas que indican procesos de ebullición o no ebullición, dado que este mecanismo explicaría su formación.

A continuación se expone un total de 14 texturas de cuarzoes distribuidas según su clase. Pueden ser revisadas esquemáticamente en la Figura 5.1 Estas texturas son definidas ya sea por su geometría individual, o por los agregados cristalinos o por características internas del

crystal (definición descriptiva). Algunas de ellas son identificables a muestra de mano y otras mediante uso de un microscopio a luz transmitida.

### 5.1.1. Texturas primarias

Existe una subdivisión natural de las texturas primarias relacionadas al cuarzo cripto-cristalino, correspondiendo a: calcedonia masiva, calcedonea bandeada y coloforme, versus el cuarzo cristalino, correspondiendo a: sacaroideal, comb, zonal. Los miembros de esta clase comunmente ocurren juntos, en algunos casos existen gradaciones de una textura a otra.

#### *Massive/Masivo*

Referido al cuarzo hayado en vetas con apariencia mas o menos homogéneo y que muestra ausencia de bandas, fracturamientos por cizalle, o fracturas similares.

#### *Colloform/Coloforme*

En termino general corresponde a una característica de la superficie externa de un mineral o agregado mineral que toma forma esfereidal, botroidal, reniforme y/o mamilar. Con respecto al sílice, corresponde a agregados finos de calcedonia en formas de bandas ritmicas. Bajo observación microscópica la calcedonia usualmente se presenta con hábito microfibroso con ángulos de contacto agudo entre los bordes adyacentes.

#### *Comb/Peineta*

Grupo de cristales paralelos a subparalelos orientados de manera perpendicular a las paredes de la veta. Normalmente con tamaño de grano uniforme, euhedrales con terminaciones libres. Aspecto similar a dientes de peineta.

#### *Zonal/Zonal*

Cristales individuales o grupo de cristales de cuarzo crecidos presentando zonas translúcidas y/o lechoza. En su crecimiento comunmente atrapa gran cantidad de inclusiones fluidas o solidas.

#### *Crustiform/Crustiforme*

Bandas sucesivas y paralelas a sub paralelas con respecto a la muralla de la veta, puede presentar variación mineralógica, de color e incluso textural entre las bandas.

#### *Cockade/Cocardá*

Corresponde a un caso en particular de textura crustiforme que se genera en torno a fragmentos de rocas aisladas, por lo que puede considerarse concéntrica.

#### *Moss/Musgo*

En muestra de mano parece un agregado de sílice heterogéneo con apariencia túrbida. Bajo observación microscópica son grupos de esferas entre 0.1 a 1 mm de diámetro destacados

por la presencia de impurezas en los agregados de sílice. Estas impurezas pueden presentar patrones concéntricos o radiales. Esta textura puede gradar a colofome si las esferas comienzan a interconectarse. [Dong et al. \(1995\)](#) lo establece como textura primaria, pero en trabajos previos de los mismos autores en el año 1990 lo establecían como una textura de recristalización.

### 5.1.2. Texturas de recristalización

#### *Jigsaw/Mosaico*

Agregado cristalino o microcristalino de cristales de cuarzo altamente irregulares e intercrecidos, es decir, con sus bordes de grano interpenetrados. En muestra de mano se ve como una masa vítrea. Observado en el microscopio es similar a la textura característica del jaspeoide.

#### *Feathery/Plumoso*

Es una textura observable solo al microscopio de luz transmitida con nicols cruzado tal que al encontrarse en el ángulo de extinción, que en su defecto viene siendo la posición de máxima extinción, el cristal de cuarzo tiene apariencia de estar astillado, se ve como una pluma. Esta textura se desarrolla usualmente en los márgenes de los bordes del cristal de cuarzo y que a su vez presenta un claro núcleo euhedral.

#### *Flomboyant/Extravagante*

La principal característica de esta textura es la extinción radial que se presenta en los contornos de los cristales de cuarzo. Similar a la textura *feathery* puede presentarse en los bordes del cristal con núcleo euhedral, pero también puede presentarse en todo el cristal.

#### *Ghost sphere/Esferas fantasmas*

Esta textura ocurre principalmente en cuarzo microcristalino visible como esferas borrosas distinguidas principalmente por las impurezas. Es una particularidad de la textura moss. Esta textura gradada a textura mosaico en los sectores donde las impurezas ya no predominan y los bordes de cristales comienzan a interpenetrarse. Se suele presentar hospedada en cuarzoes, y estos a su vez pueden presentar textura *flomboyant*

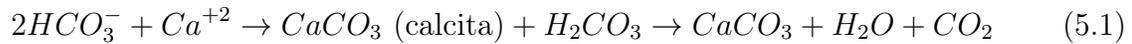
## Texturas de reemplazo

Una comparación de las características de la morfología entre cuarzo y minerales primarios, como carbonatos o sulfatos, que han sido reemplazados. En esta categoría las características morfoestructurales del mineral primario pueden prevalecer luego de ser reemplazado.

#### *Pseudo Bladed/Seudo Hoja: Lattice Bladed, Ghost Bladed, Parallel Bladed*

Estas texturas provienen del resultado de calcita reemplazada por cuarzo. Recordar que la calcita es controlada no tan solo por las condiciones de presión y temperatura del sistema, también se ve influenciada por la fugacidad de CO<sub>2</sub>, pH, y actividad de calcio en el fluido. La calcita evidencia ebullición en los sistemas cuando este mecanismo provoca una pérdida

de dióxido de carbono en el fluido y genera una sobresaturación de calcita. La reacción que define esto se observa en la Ecuación 5.1 (Hedenquist et al., 2000; Henley, 1985; Simmons and Christenson, 1994):



Es común que cuando esto suceda se genere calcita granular, llamada también *platy calcite*, nombre que hace referencia a la forma pinacoide de la base de la calcita rombica. De otra perspectiva puede verse como calcita seudohojosa o *pseudo bladed*.

Retomando lo anterior, se tienen 3 tipos de texturas de calcita remplazada por cuarzo según sus características:

(i) Lattice Bladed: Hojas delgadas de calcita, laminar, con clivaje romboédrico ( $60^\circ$ - $120^\circ$ ), y con terminaciones acunadas dan indicio de que la calcita hojosa ocurrió de forma primaria, la cual actualmente exhibe una red de cuarzos cristalinos con posible textura comb formados a partir de las hojas de calcita de manera perpendicular a ellas, por lo que estos cuarzos poseen distribución paralela a subparalelos.

(ii) Ghost bladed: Identificado a muestra de mano por las impurezas que presentan las hojas de calcita, estas resaltan la distribución aleatoria de la calcita en la muestra. En vista microscópica, se observa que las hojas de calcita se encuentran dispersadas sobre un agregado de cuarzo, cuarzo que también está ubicado entre los espacios de los cristales de calcitas (siendo usualmente cuarzo jigsaw). Al microscopio puede distinguirse mejor los diferentes tipos, tamaños y las diferentes formas de las impurezas.

La diferencia para que se origine esta textura o la *Lattice Bladed* se halla principalmente en la situación inicial del reemplazo. En el caso de *Lattice Bladed*, los cristales de calcita se encuentran formados sin presencia de cuarzo al momento de ser reemplazado por sílice, en el caso de *Ghost Bladed* los cristales de calcita están precipitados con cuarzo.

(iii) Parallel Bladed: Grupo de diferentes cristales de calcitas reemplazada por cuarzo en donde cada grupo muestra una orientación paralela de cristalización primaria reemplazada. Los grupos son identificados por la distinta orientación del paralelismo entre ellos. Esto define un patrón granular en la muestra de mano. Esto podría originarse cuando el cuarzo reemplaza calcita granular, repitiendo el patrón entre las laminas de calcita, que resulta más eficiente de reemplazar que utilizar el clivaje. Esto es evidenciado dado que el clivaje puede ser observado en cada grupo, justificando a su vez que cada grupo era un cristal distinto.

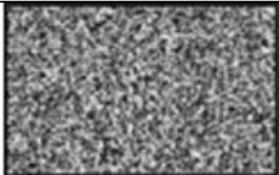
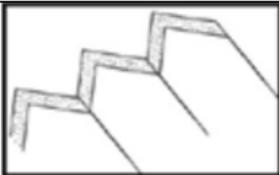
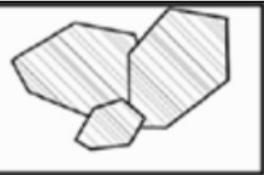
### ***Pseudo Acicular***

En muestra de mano se observa un agregado de mineral silicatado asociado a adularia o sus alteraciones con hábito radial-acicular. Una vez visto al microscopio, esta zona muestra lineamiento de agregados de cuarzo de grano fino con forma rectangular, o lineamiento de agregados finos de adularia y/o sus alteraciones. Puede entenderse como lineamientos de granos con exhibición en abanico-radial.

### *Saccharoidale/ Sacaroidal*

En muestra de mano se observa una agrupación de granos finos de cuarzo con apariencia vítrea a lechosa no tan compactado por lo que puede generar una similitud de ver azúcar. Bajo el microscopio se exhiben abundantes cristales alargados subhedrales con terminaciones dobles distribuidos de manera aleatoria en una matriz de granos pequeños anhedrales. Puede generarse una apariencia de red en sectores locales donde están los cristales alargados.

Texturas de No ebullición

			
Masiva	Comb	Zonal	Calcita rombica

Textura de Ebullición

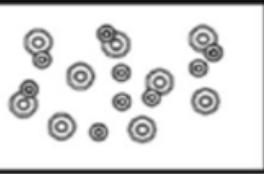
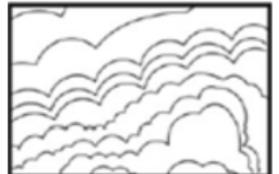
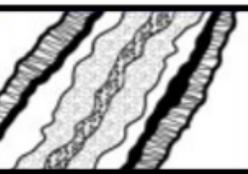
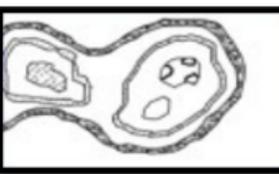
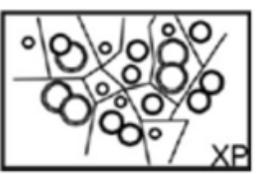
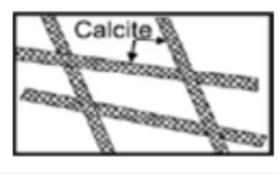
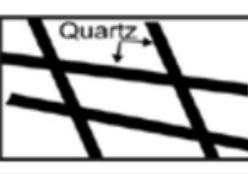
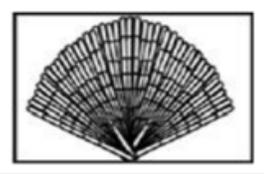
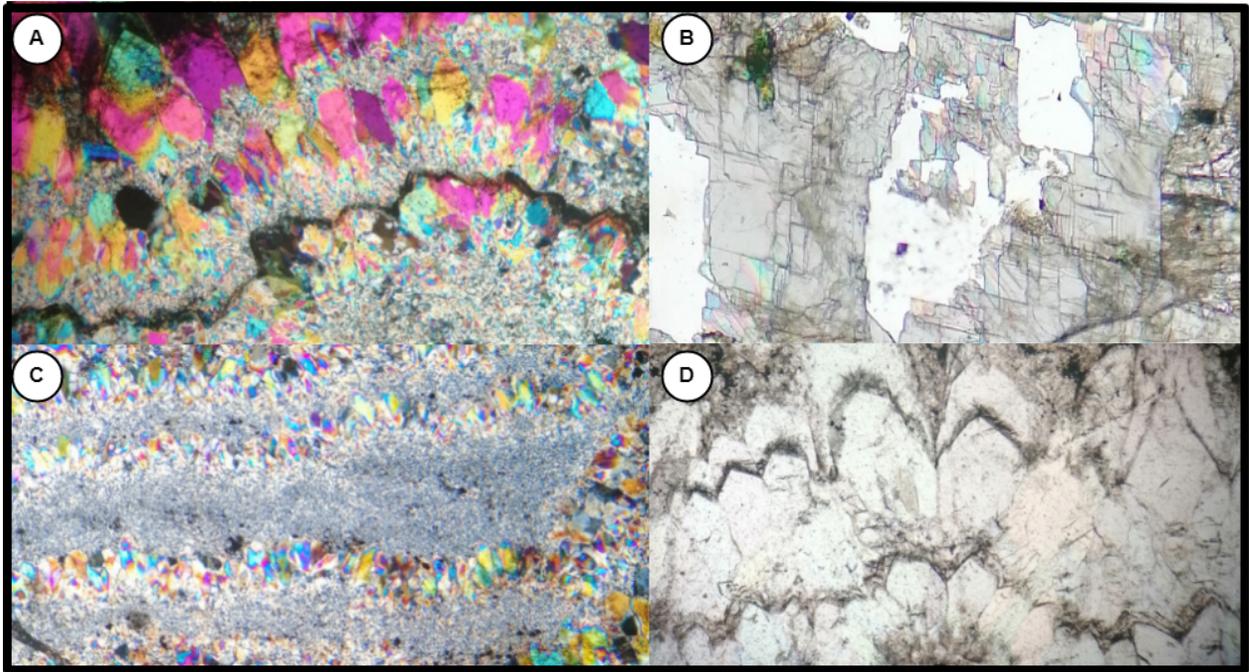
			
Extravagante	Plumoso	Jigsaw	Moss
			
Coloforme	Crustiforme	Cockade	Ghost sphere
			
Calcita hojosa	Seudo hojosa	Ghost Bladed	Seudo Acicular

FIG. 5.1: Imágenes esquemas de texturas que representan condiciones del fluido Adams (1920); Dong et al. (1995); Moncada et al. (2012)



**FIG. 5.2:** Foto representativa de texturas que indican no ebullición como condición del fluido. (a) Dominio con textura de cuarzo Comb. (b) calcita rombica. (c) Dominio con textura de cuarzo masivo. (d) Dominio con textura de cuarzo zonal

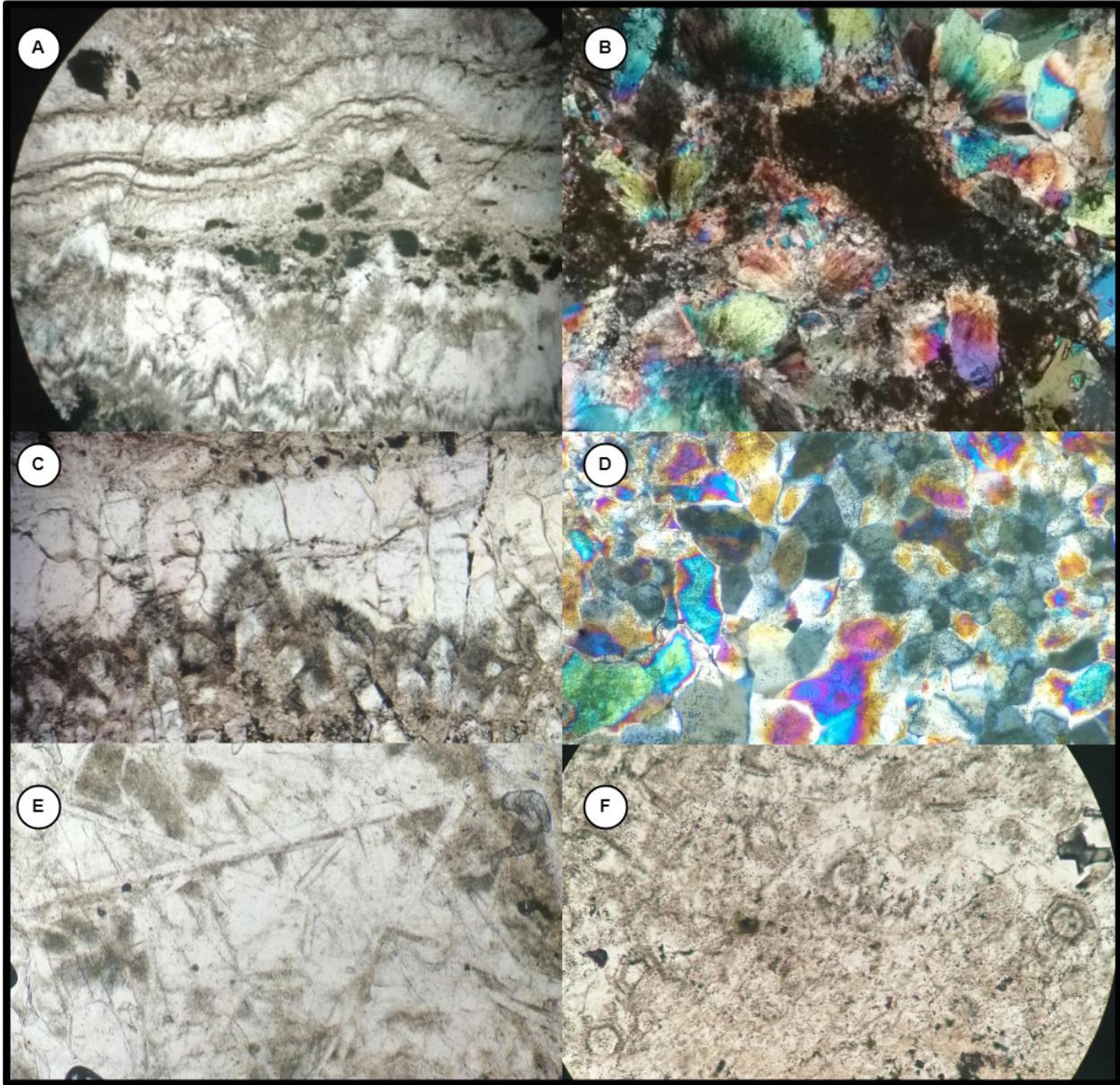
## 5.2. Veta Don Leopoldo y Patagua

### 5.2.1. Catastro y selección de muestras

El trabajo a continuación se efectúa sobre 179 muestras correspondientes tanto a la veta Patagua como Don Leopoldo, por lo que se expondrá la cantidad de muestras pertenecientes a cada una, y con cuantas se disponen. Estas muestras fueron previamente trabajada por dos memoristas de la Universidad de Chile, por lo que se efectúa un catastro de las *Quick Plate*.

En la Tabla 5.1 se expone el catastro. Se tienen 179 muestras con datos geoquímicos de las concentraciones de metales de Oro, Plata, Zinc, Plomo y Cobre. De ellas solo falta 1 rechazo. Se tienen 135 *Quick Plate* para estudiar inclusiones fluidas. Se seleccionaron 54 muestras para mini drill, de las cuales 30 presentaron concentraciones de oro, plata y/o metales bases altas, y 24 bajas. A su vez, se seleccionaron 18 muestras para realizar doble pulidos, donde se pretende a futuro efectuar microtermometría, espectroscopia de Raman y LA-ICP-MS. Son 6 doble pulidos con concentraciones altas de metales, 7 con valores bajos, y 5 con esfalerita granular.

La selección de muestras para confeccionar cortes doble pulidos, y obtener *mini drills* y clasificarla en la categoría de valores altos o bajos de metales se basa en los siguientes criterios de concentración: (i) Se considera muestra con valor alto si la concentración del metal es superior o igual al valor del tercer cuartil de la base de datos geoquímica. (ii) Se considera valor bajo si la concentración del metal en la muestra es inferior al primer cuartil. El tercer cuartil (Q3) equivale a valores mayor al 75 % de la población. Se considera de valor bajo cuando se halla por debajo del primer cuartil (Q1; menor al 25 %).



**FIG. 5.3:** Foto representativa de texturas que indican ebullición como condición del fluido. (a) Dominio con textura de cuarzo colorforme. (b) Cuarzo con textura plumosa/feathery. (c) Cuarzo con textura extram-bayante/flomboyant. (d) Dominio con textura de cuarzo jigsaw. (e) Textura de calcita bladed remplazada. (f) Zonas con textura ghos sphere

Muestras	Quick Plate	Rechazos	Patagua
179	135	178	93
Don Leopoldo	Intersección	Sin ubicación	Mini drill Valor Alto
46	23	16	30
Mini drill Valor Bajo	D.P valor alto	D.P. valor Bajo	D.P. con spl
24	6	7	5

**TAB. 5.1:** Contabilidad del muestreo y de muestras preparadas.

	Valores Patagua				
	Au	Ag	Zn	Pb	Cu
Mínimo	0,006	0,250	0,009	0,002	0,000
Media	1,484	3,865	0,676	0,344	0,037
Máximo	41,500	37,000	7,960	6,450	0,584
Desviación estándar	5,511	6,267	1,393	0,947	0,083
Primer cuartil	0,040	0,500	0,033	0,015	0,006
Tercer cuartil	0,638	4,000	0,413	0,115	0,035
Conteo	115	115	115	115	115

**TAB. 5.2:** Estadística descriptiva de metales en veta Patagua.

La información estadística para cada metal respecto a estos valores se presentan en las Tabla 5.3 y Tabla 5.2. En ellas se observa que los valores de primer cuartil para Oro, Plata, Zinc, Plomo y Cobre en Patagua son, respectivamente: 0,040; 0,500; 0,033; 0,015; 0,006. En Don Leopoldo: 0,039; 0,500; 0,023; 0,009; 0,005. Para el tercer cuartil son, en Patagua: 0,638; 4,000; 0,413; 0,115; 0,035. Y en Don Leopoldo: 0,358; 4,000; 0,175; 0,059; 0,037.

La zona para realizar la perforación y obtener un *mini drill*, es definida según los siguientes criterios. (1) Se seleccionan las muestras para *mini drill*, si cumple las condiciones (i) o (ii) y a demás presenta inclusiones fluidas ricas en vapor. (2) La ubicación donde se realiza la perforación es en la zona más abundante de inclusiones fluidas ricas en vapor en la veta de cuarzo. (3) Si se identifica una textura mineral en la veta en dicha zona tratar en lo posible de capturarla en la perforación. En el caso de las selección de Doble Pulidos para valores altos y bajos, es similar, sumándole el criterio de que presenten inclusiones grandes para futuras técnicas analíticas. En el caso de las Doble pulido con esfalerita, estas deben presentar esfalerita granular, evidenciar inclusiones ricas en vapor en las vetas de cuarzo y poseer valores altos de concentración.

Con esta selección de muestras se tienen 3 grupos distintos para observar y/o trabajar los resultados: Grupo 1: Observación entre vetas (comparar muestras pertenecientes a Patagua, Don Leopoldo y a la Intersección). Grupo 2: Observación entre mini drills (comparar entre las muestras de valores altos y las de valores bajos). Grupo 3: Observación entre doble pulido (comparar entre muestras con valores altos, con esfalerita y con valores bajos).

Valores Don Leopoldo					
	Au	Ag	Zn	Pb	Cu
Mínimo	0,003	0,250	0,004	0,001	0,000
Media	0,473	3,751	0,232	0,045	0,043
Máximo	4,360	38,000	2,410	0,466	0,584
Desviación estándar	0,933	5,932	0,513	0,064	0,101
Primer cuartil	0,039	0,500	0,023	0,009	0,005
Tercer cuartil	0,358	4,000	0,175	0,059	0,037
Conteo	70	70	70	70	70

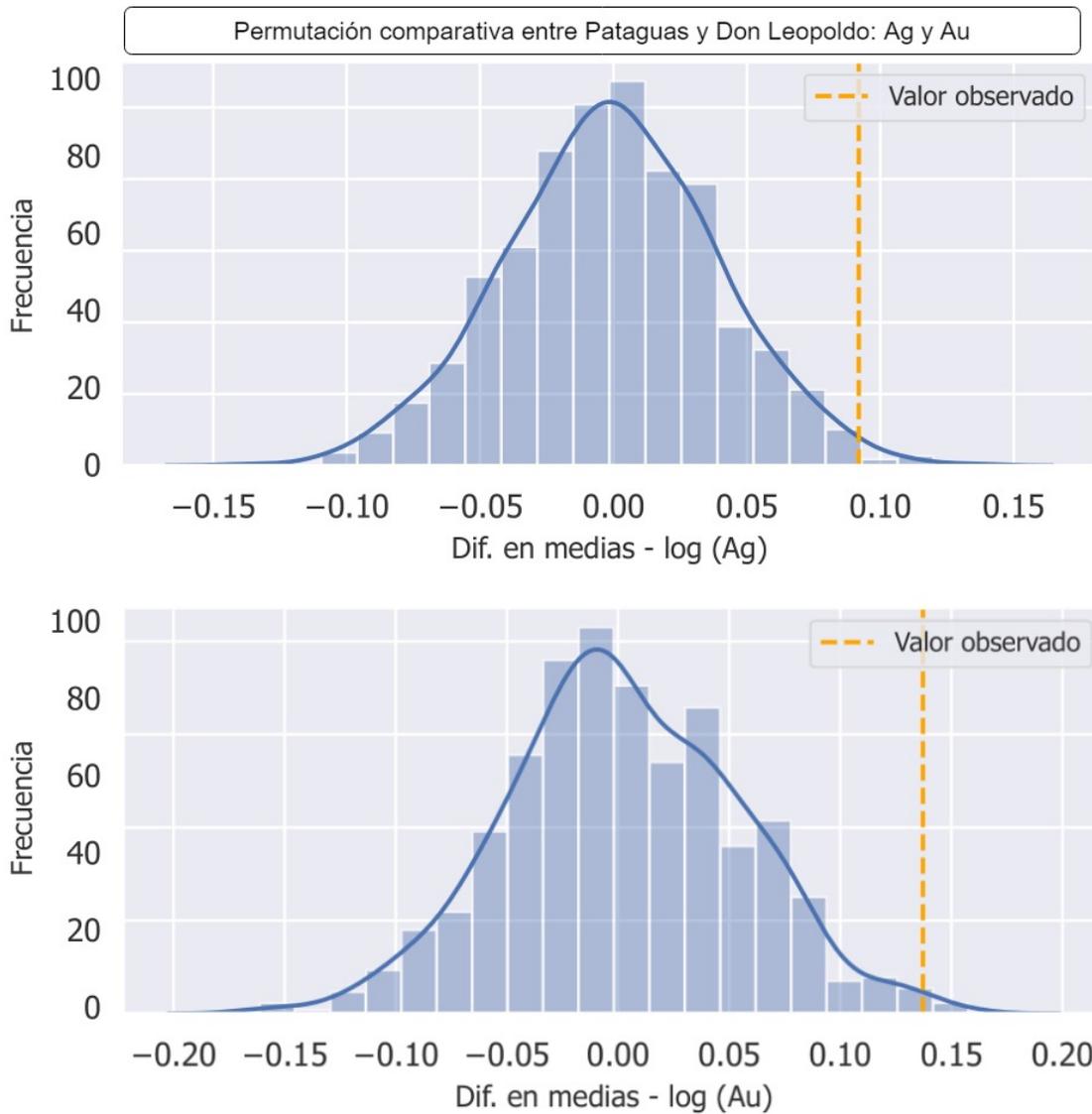
**TAB. 5.3:** Estadística descriptiva de metales en veta Don Leopoldo.

## Permutación y validación comparativa

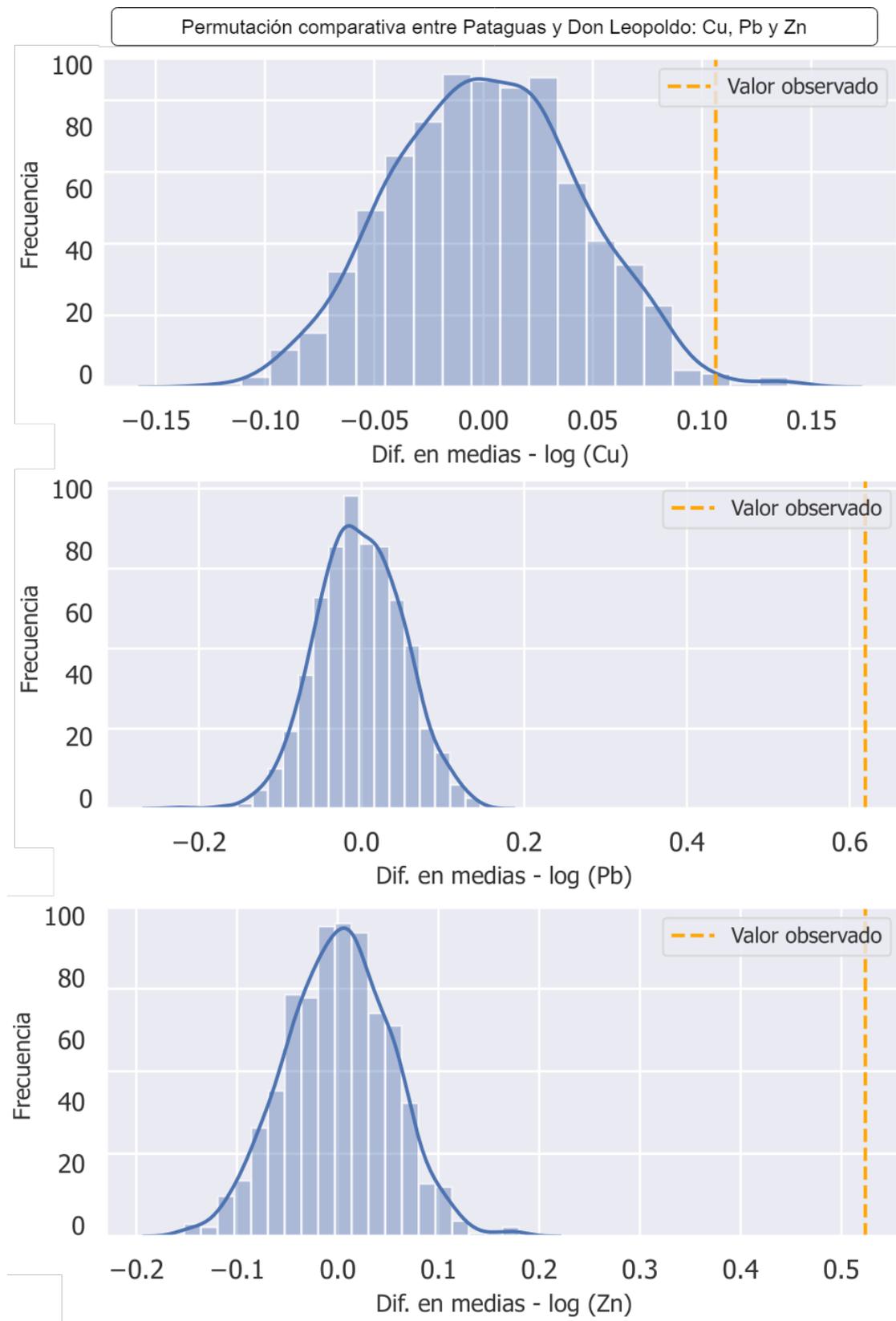
Conociendo los valores estadísticos como la media de los metales en cada veta aplicamos permutación como se expuso en el apartado de metodología para poder evaluar si las muestras pertenecientes a distintos grupos puede o no considerarse del mismo origen para el caso de cada metal, en otras palabras, comparar oro, plata, cobre, plomo y zinc entre estas vetas tiene o no sentido bajo la idea de si representan distintos fluidos originadores de sus concentraciones o puede considerarse el mismo fluido-proceso. Recalamos que esto es un supuesto de Hipotesis y la negación a partir de la permutación es considerando un alpha de 0.05, equivalente a que la media este fuera del 95 por ciento de los datos del histograma o caiga dentro del histograma. Este valor es ilustrada mediante una linea amarilla en los gráficos.

Notaremos que para el caso de comparar los metales entre las vetas Patagua y Don Leopoldo, tenemos que para el caso del Oro y Plata puede considerarse que esta fuera del 95 por ciento y por lo tanto son comparable estos elementos entre ambas vetas. De igual forma, e incluso de manera mas explicita, sucede con los metales bases Cu, Pb, Zn. Esto se observa en las Figura 5.4 y Figura 5.5.

Existen muestras que se trabajaran bajo el concepto de Intersección debido a que pertenecen a la zona donde se intersectan las vetas Patagua y Don Leopoldo, tambien puede considerarse Pat/D.Leo. La evaluación de las concentraciones de metales entre la veta Patagua y esta zona de intersección como también entre Don Leopoldo y la zona de intersección, puede hallarse en el Apendice I, en el cual se puede observar que Don Leopoldo en este sector representa una situación de no ser comparable en los 5 elementos (oro, plata, cobre, plomo y zinc). Indicando que la formación de la veta Don Leopoldo tenga alta influencia en la formación de esta zona de corte, o específicamente, que la mineralización esta controlada por el mismo fluido que origino a la veta Don Leopoldo. Esto ultimo no es lo mismo para la evaluación de los metales bases de la veta Patagua comparada con la zona de intersección, puesto que aquí el valor de la media se aleja del histograma e indicaría fluido de origen distinto, y por lo tanto, son sectores comparables con respecto a la concentración de estos elementos, sin embargo no es el caso para los metales de oro y plata.



**FIG. 5.4:** Permutación entre Patagua y Don Leopoldo de la concentración de sus metales de Plata y Oro en escala logarítmica. En amarillo se observa la línea vertical en el límite de hallarse fuera del 95 por ciento del histograma, representando el rechazo de la hipótesis del mismo origen e indicando que son comparables.



**FIG. 5.5:** Permutación entre Patagua y Don Leopoldo de la concentración de sus metales de Cobre, Plomo y Zinc en escala logarítmica. En amarillo se observa la línea vertical fuera del histograma para los tres casos, representando el rechazo de la hipótesis del mismo origen e indicando que son comparables.

## 5.2.2. Distribución de metales

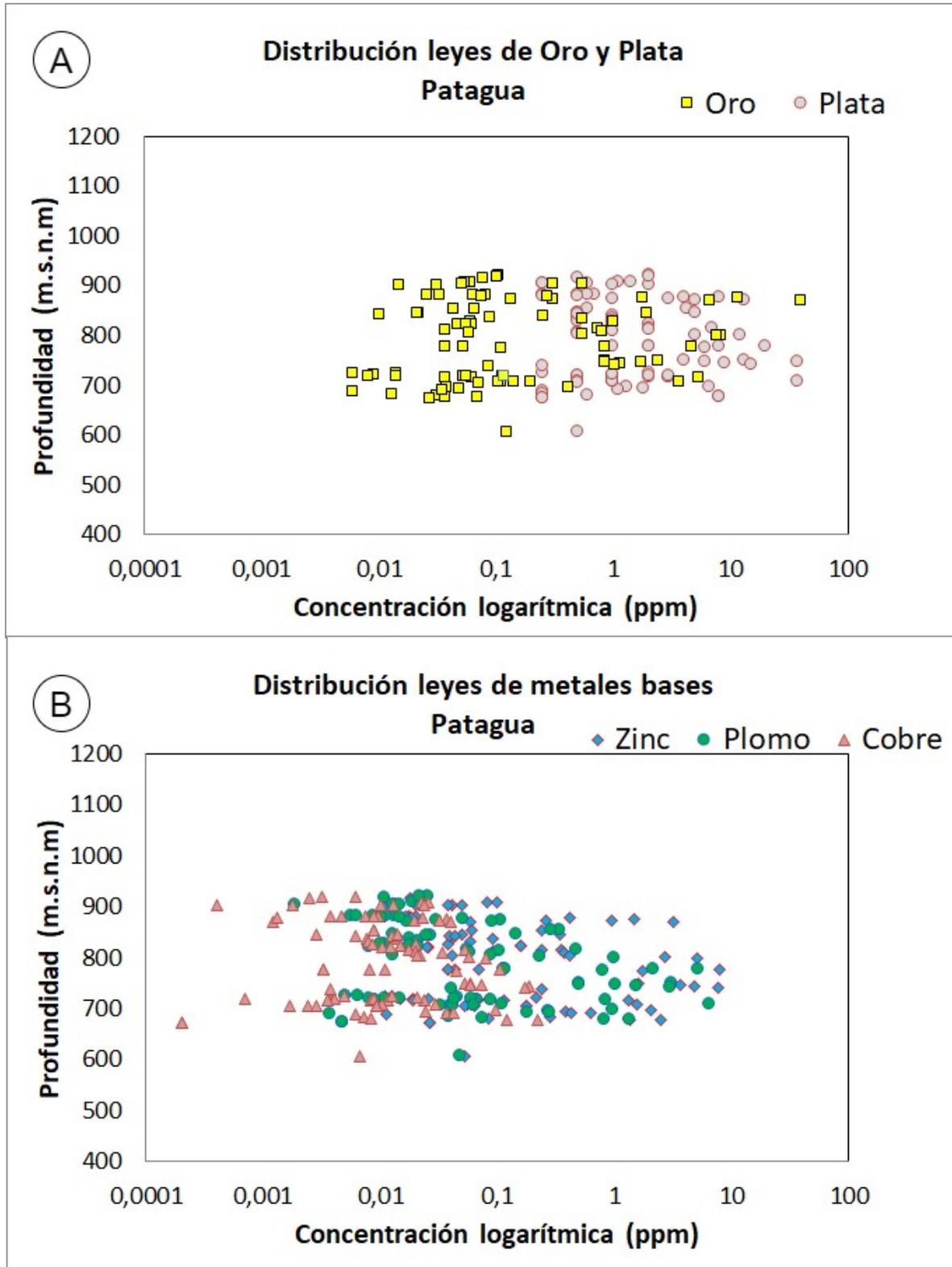
Se presenta una serie de gráficos en los cuales se muestra la distribución de las concentraciones de los metales Oro, Plata, Zinc, Plomo, Cobre con respecto a la profundidad. Se trabaja en los grupos confeccionados como Grupo 1: Patagua, Don Leopoldo e Intersección. Grupo 2: Mini drill con valores Altos y Mini drill con valores Bajos. Grupo 3: Doble pulido de valores altos, doble pulidos con esfalerita y, doble pulidos de valores bajos.

Con la Figura 5.6 podemos dar cuenta que las muestras de Patagua distribuyen en mayor rango vertical que las muestras de Don Leopoldo, estas ultimas se ubican entre los 900 y 500 m.s.n.m Figura 5.7. Junto a esta información, resalta el hecho que las muestras de la Intersección están concentradas en la zona alta, 800m.s.n.m. Figura 5.8 y en la zona baja, entre 0 y 100m.s.n.m.

Para el caso del Oro y la Plata, se observa que este ultimo suele tener 1 a 2 ordenes de diferencia en ambos sectores y en la intersección (parte **.a**" de las Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8). Siendo en la zona inferior más marcada dicha diferencia con respecto a los niveles de concentración de Oro. Para el caso de los metales bases, se puede observar una distribución homogénea en sus valores tanto para Patagua como para Don Leopoldo. Existen algunos *out layer* de valores pequeños de cobre en zona baja de Patagua y zona alta de Don Leopoldo (parte **"b**" de las Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8). En particular, el Plomo tiene una distribución acotada en el sector alto de la Intersección concentrándose muy bien en rango de 0,1 ppm. Se destaca que Patagua presenta valores con un orden de magnitud mayor con respecto al Zinc y Plomo.

Con las Figura 5.10 y Figura 5.10 se puede destacar que: Es marcada la diferencia de 2 ordenes de magnitud mayor de zinc y plomo con respecto al cobre tanto para las muestras de valores altos como de valores bajos. De igual forma, se marca muy bien la diferencia de concentración entre oro y plata en mini drill de valores bajos. Sin embargo, para los mini drill de valor alto, la plata oscila en menores rangos de concentración que el oro (parte **"b**" de Figura 5.9). Por lo tanto, en la vertical existe un comportamiento similar para los metales, pudiendo destacarse que en las muestras de mini drill con valores altos solo el Oro aumenta notoriamente su concentración a medida que esta a mayor altura (parte **.a**" de Figura 5.9).

Para los doble pulidos de valores altos, el cobre y el plomo presentan un comportamiento inverso en la vertical (parte **.a**" de Figura 5.11), siendo el cobre mayor que el plomo en la zona alta, e inverso en la zona más intermedia. Las muestras doble pulida con valores bajos muestran una tendencia de aumentar sus concentraciones de metales bases a medida que se está en zonas más bajas (parte **"b**" de Figura 5.12), manteniendo la relación entre estos metales: zinc mayor que plomo, y plomo mayor que cobre ( $Zn > Pb > Cu$ ) Para las muestras doble pulidas con esfalerita, estas muestran mayor cantidad de plata que de oro (parte **.a**" de Figura 5.13) y, en orden decreciente mayor zinc, luego plomo, y en menor medida cobre (parte **"b**" de Figura 5.13). Esta relación entre sus concentraciones se mantiene en la vertical, y aumentan los niveles a mayor profundidad. .



**FIG. 5.6:** Distribución de las concentraciones de cada metal con respecto a la profundidad para veta Las Pataguas. (a) distribución oro y plata. (b) distribución metales bases.

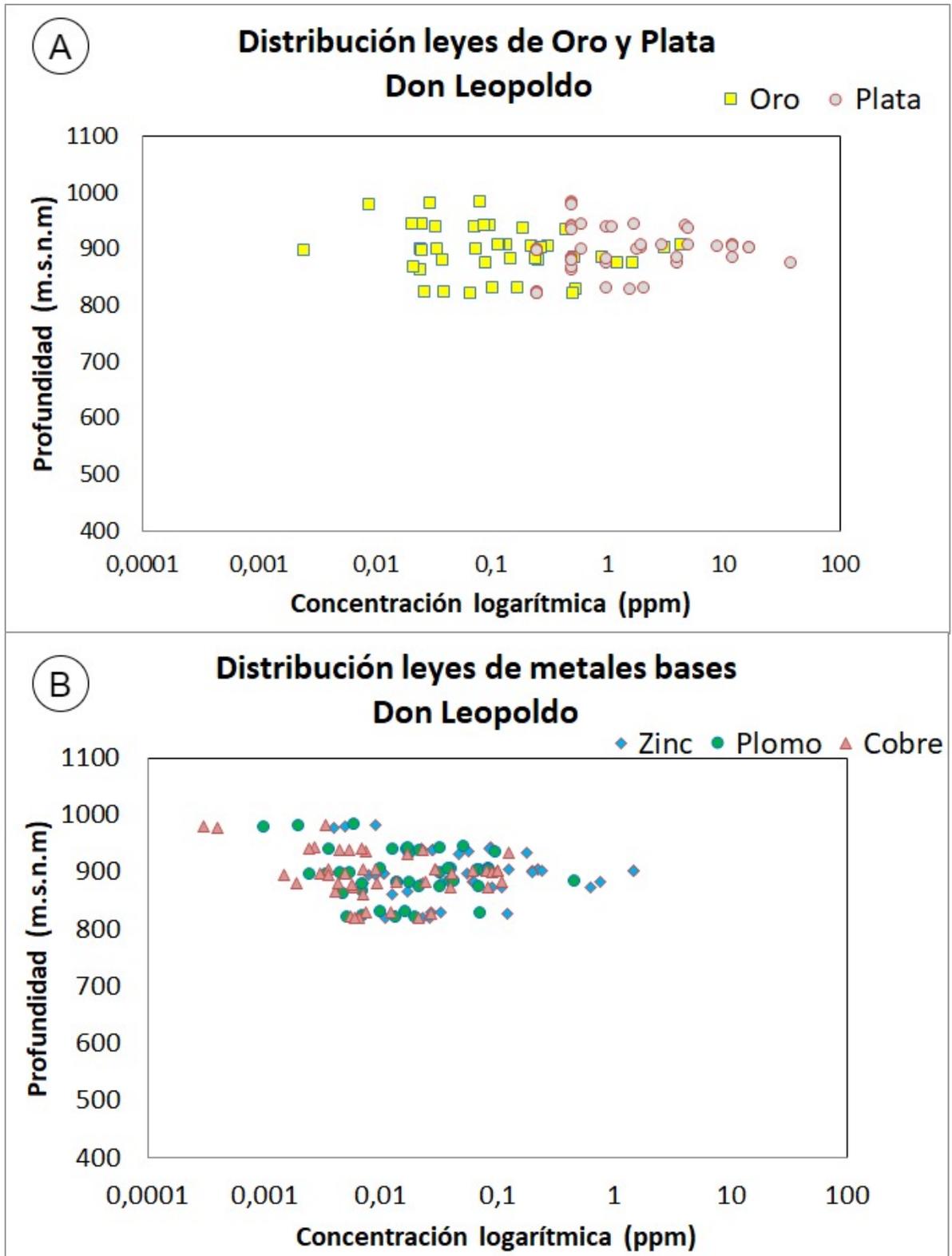


FIG. 5.7: Distribución de las concentraciones de cada metal con respecto a la profundidad para veta Don Leopoldo. (a) distribución oro y plata. (b) distribución metales bases.

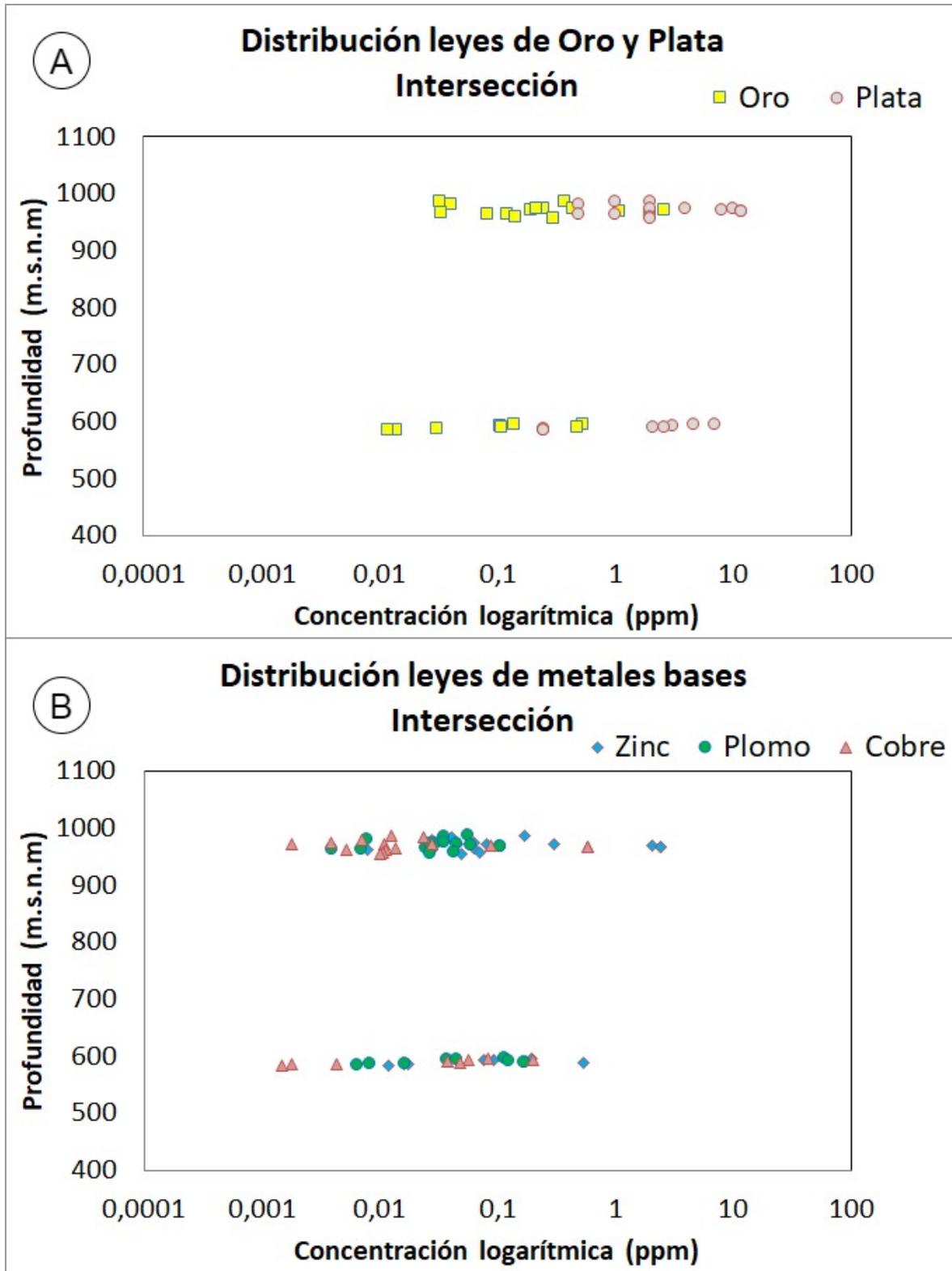
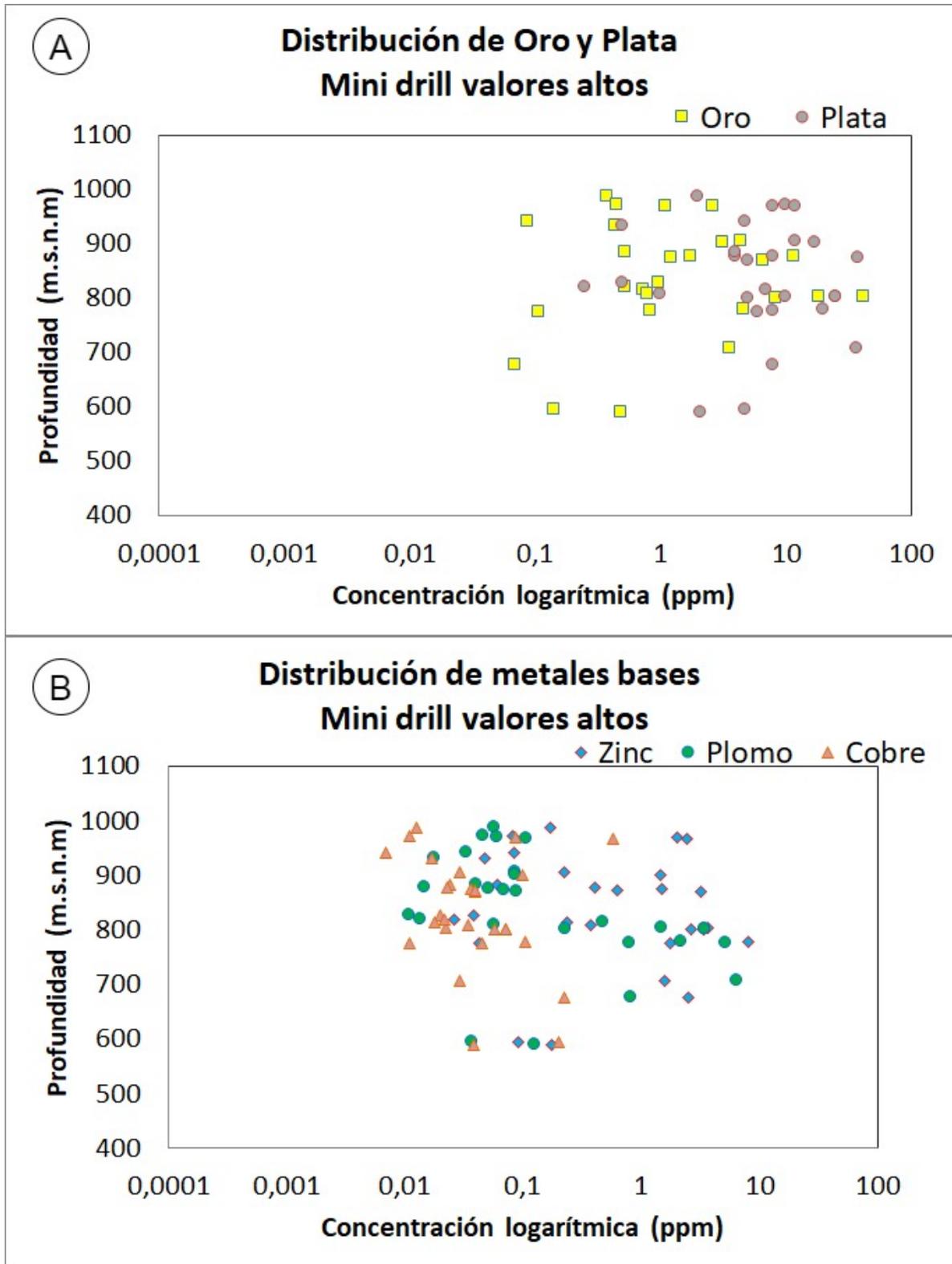
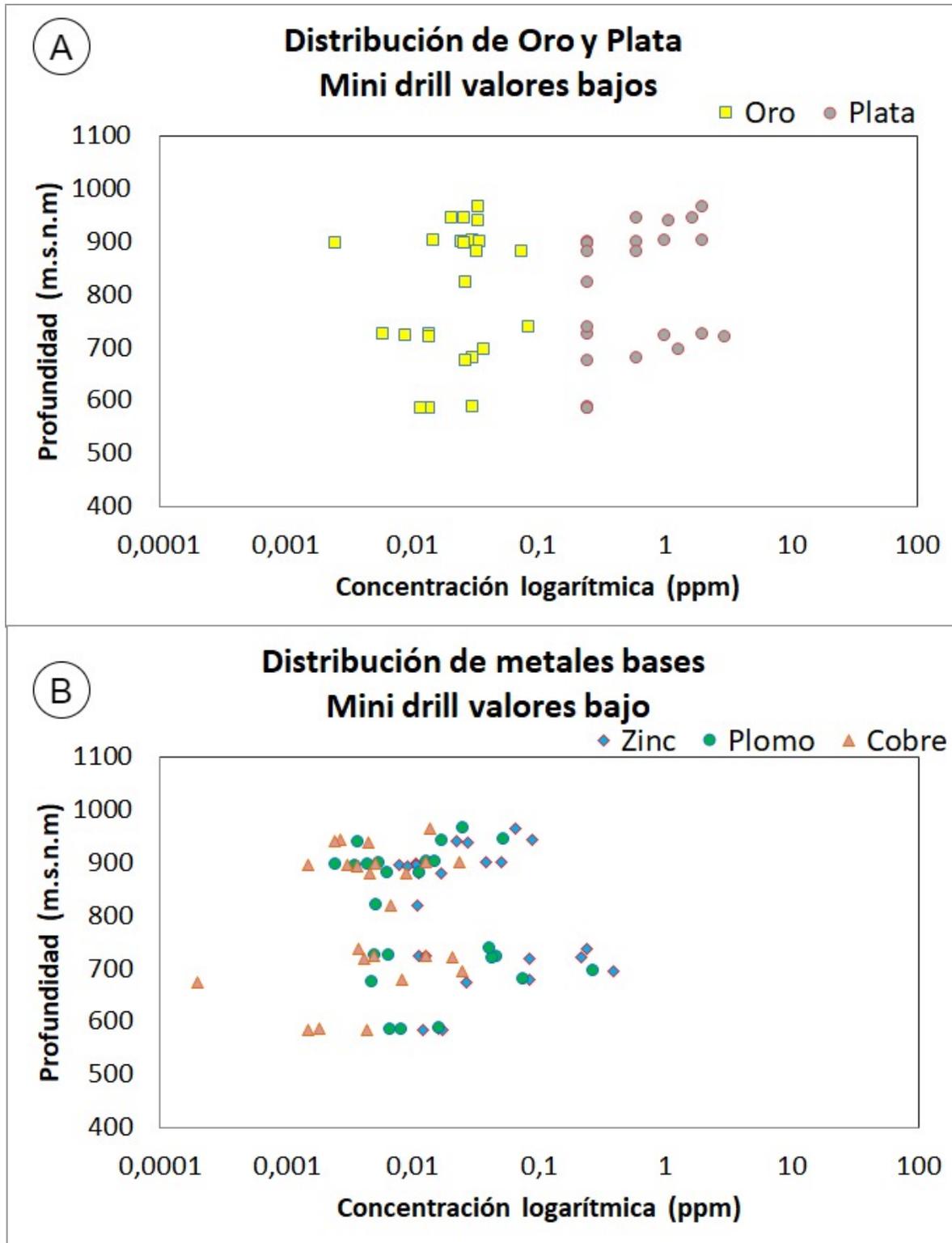


FIG. 5.8: Distribución de las concentraciones de cada metal con respecto a la profundidad para veta Intersección. (a) distribución oro y plata. (b) distribución metales bases



**FIG. 5.9:** Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Mini drill de valores altos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases.



**FIG. 5.10:** Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Mini drill de valores bajos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases.

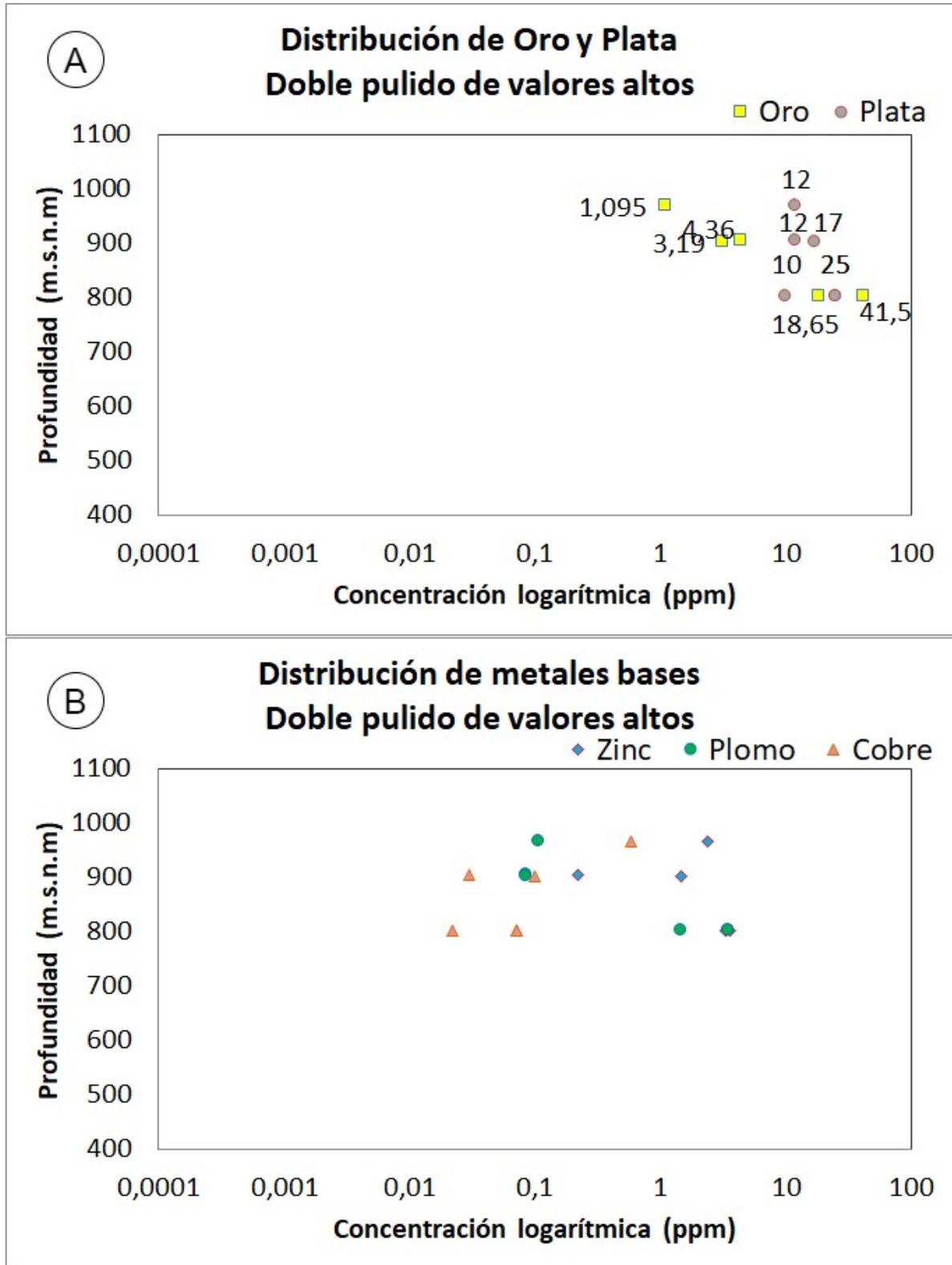


FIG. 5.11: Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Doble Pulido con valores altos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases.

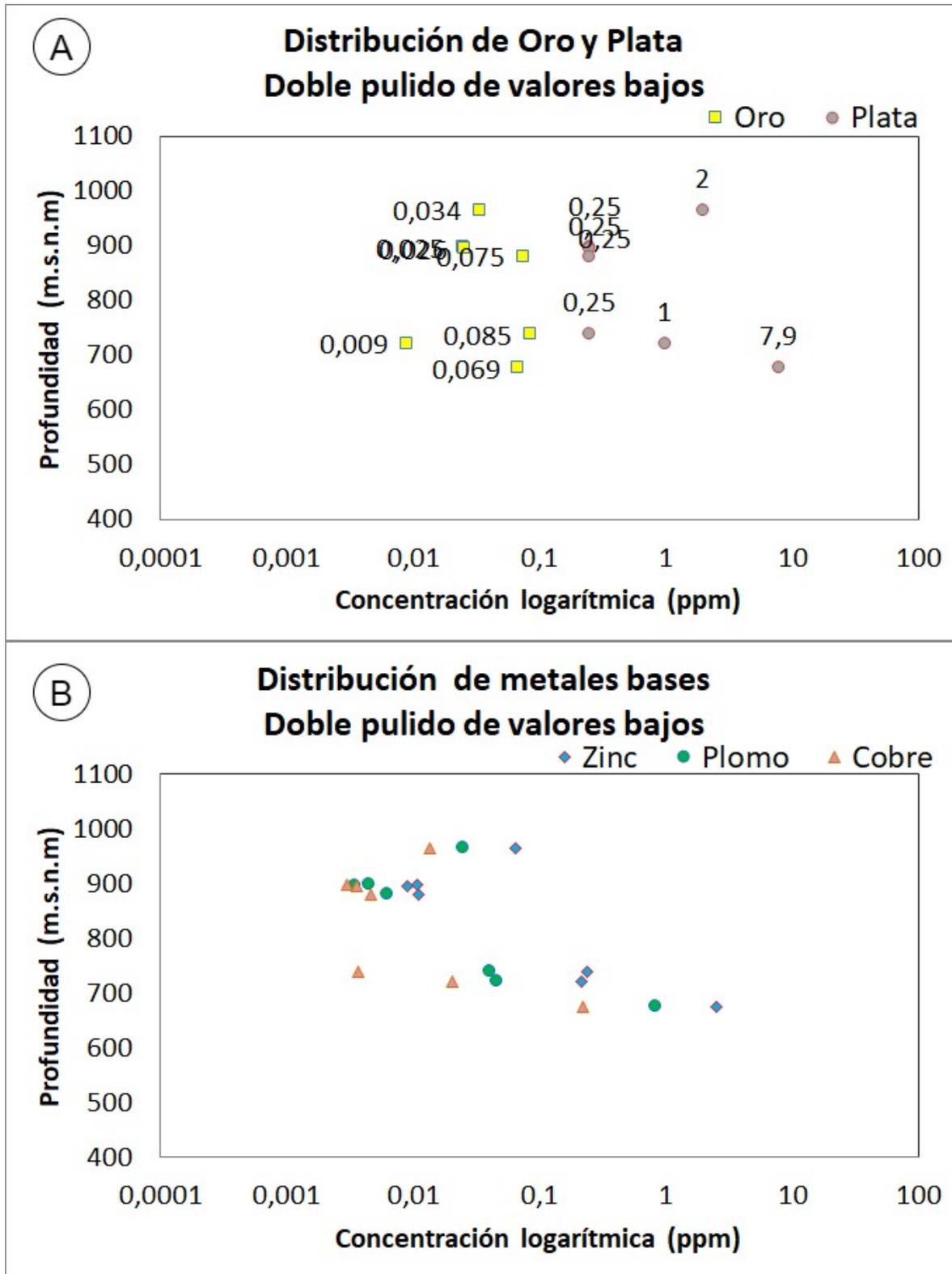
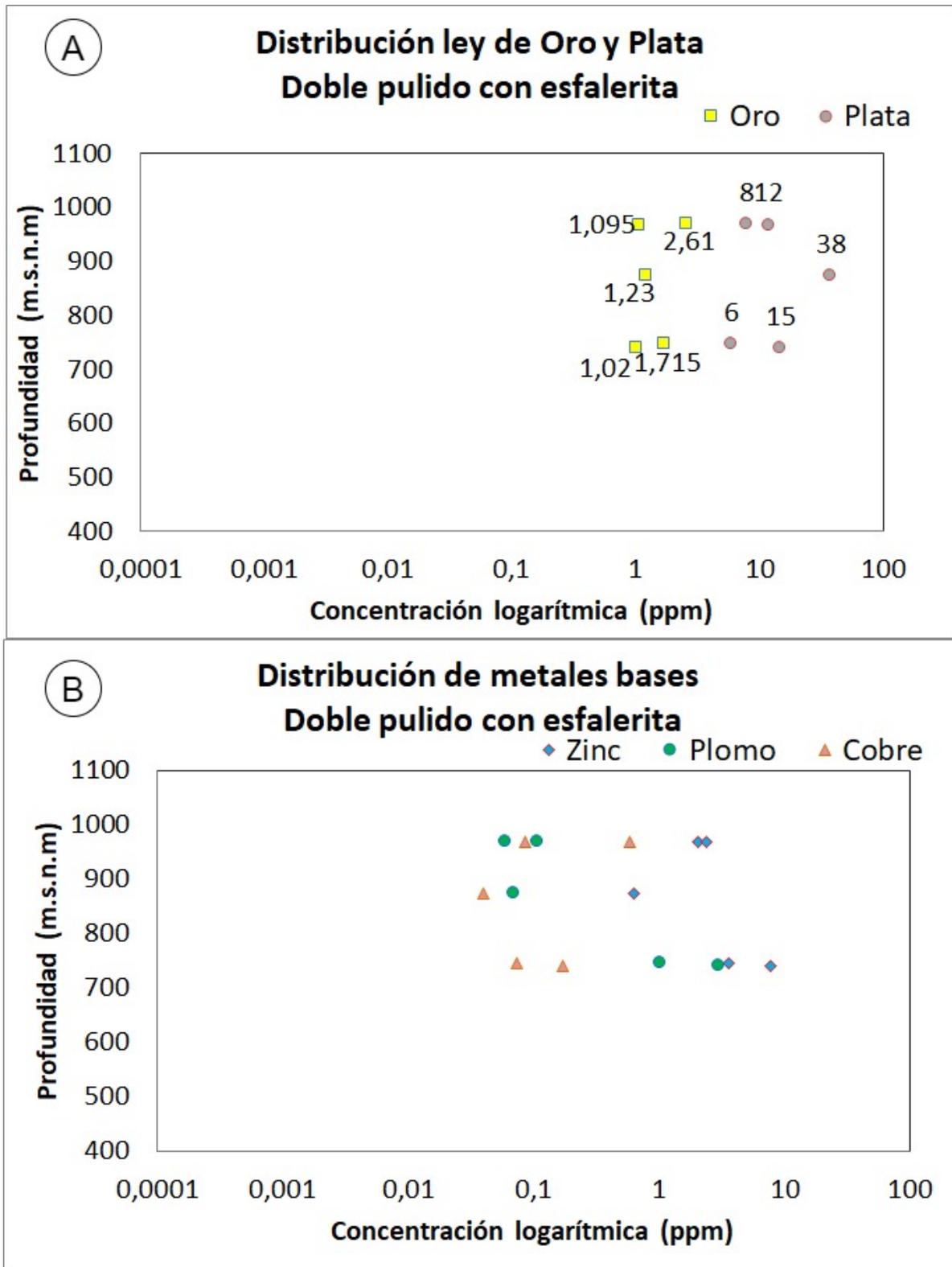


FIG. 5.12: Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Doble Pulido con valores bajos. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases.



**FIG. 5.13:** Distribución de las concentraciones de metales en función de la profundidad para Doble Pulido con esfalerita. Se muestra en escala logarítmica. (a) gráfico correspondiente a Oro y Plata. (b) gráfico correspondiente a metales bases.

### 5.2.3. Correlación de metales

Para profundizar más en el comportamiento de los metales en cada uno de estos grupos, se dispone de una serie de gráficos en los cuales se expone la relación entre: (i) Plata y oro. (ii) Metales bases y oro. (iii) Metales bases y plata.

Se puede observar una relación directa con pendiente positiva para los escenarios (i), (ii) y (iii) en las muestras de Patagua, Don Leopoldo e Intersección mediante las Figura 5.14, Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19. Existen algunos casos en Patagua con respecto a los metales bases, donde a mayor nivel de oro o plata existen valores pequeños de cobre (Figura 5.17). Estas últimas muestras podrían estar relacionadas con la zona baja de Patagua como se expuso en el apartado anterior.

En el Grupo 2, también se observa una correlación positiva (Figura 5.20, Figura 5.21 y Figura 5.22). Además, es notoria la diferencia de las concentraciones metálicas entre la selección de mini drill con valores altos y el con valores bajos (parte a versus parte b de Figura 5.20). Lo peculiar en este grupo se da con la relación del cobre y la plata en mini drill de valores altos (Figura 5.21). En dicho caso se presenta una correlación con una curva más aplanada, correspondiendo a valores acotados de concentraciones de cobre a medida que aumentan las concentraciones de plata, mientras que la correlación de plata con zinc y plomo es casi una línea con pendiente de 45 grados.

Más excepcionales se vuelven las gráficas para el Grupo 3. En ellas se puede observar como los niveles de plata no varían para el caso de las doble pulido con valores altos (Figura 5.23), y si varía en más de 1 grado para las muestras de valores bajos (Figura 5.24), como también en las doble pulido con esfalerita (Figura 5.25), mientras que si cambian los valores de oro, para las muestras doble pulida de valores alto (Figura 5.23), un poco para con valores bajos y casi nada en las muestras con esfalerita. También se observa una correlación directa con zinc y plomo pero más inversa con respecto al cobre en el caso de los metales bases con respecto al oro y la plata en doble pulido de valores altos (Figura 5.26) y bajos (Figura 5.27). Para las muestras con esfalerita los metales bases son quienes varían sus concentraciones (Figura 5.28), desde muy bajos hasta 1 grado de magnitud, con positiva correlación con respecto a la plata. Además, comparativamente, las muestras doble pulido con esfalerita están más enriquecidas en metales bases que las otras doble pulido.

En todos los escenarios de cada grupo se mantiene generalmente la siguiente relación de concentraciones: Zinc mayor concentración que plomo, y plomo mayor que que cobre.

Para terminar, se expone una relación a-dimensional (oro/plata) vs concentraciones de Oro con la Figura 5.29, donde se excluyen las muestras de doble pulido con valores altos y bajos dado que la mayoría pertenecen a las muestras de mini drill. Con esto puede destacarse notoriamente que Patagua presenta valores altos de Oro sobre Plata, con hasta 2 ordenes de magnitud (cuadrante superior derecho, del gráfico Figura 5.29a). Y, en observación general, que todo el sector suele presentar una proporcionalidad directa positiva, entre el oro y la plata. Las muestras con esfalerita se concentran en el cuadrante inferior derecho del gráfico Figura 5.29b, destacando su alto contenido en oro, pero con concentraciones de plata de casi 2 grados de magnitud de diferencia. Las muestras de mini drill bajo clasifican bien, mientras que las muestras de mini drill con valores altos no presentan una muy buena clasificación. Ante

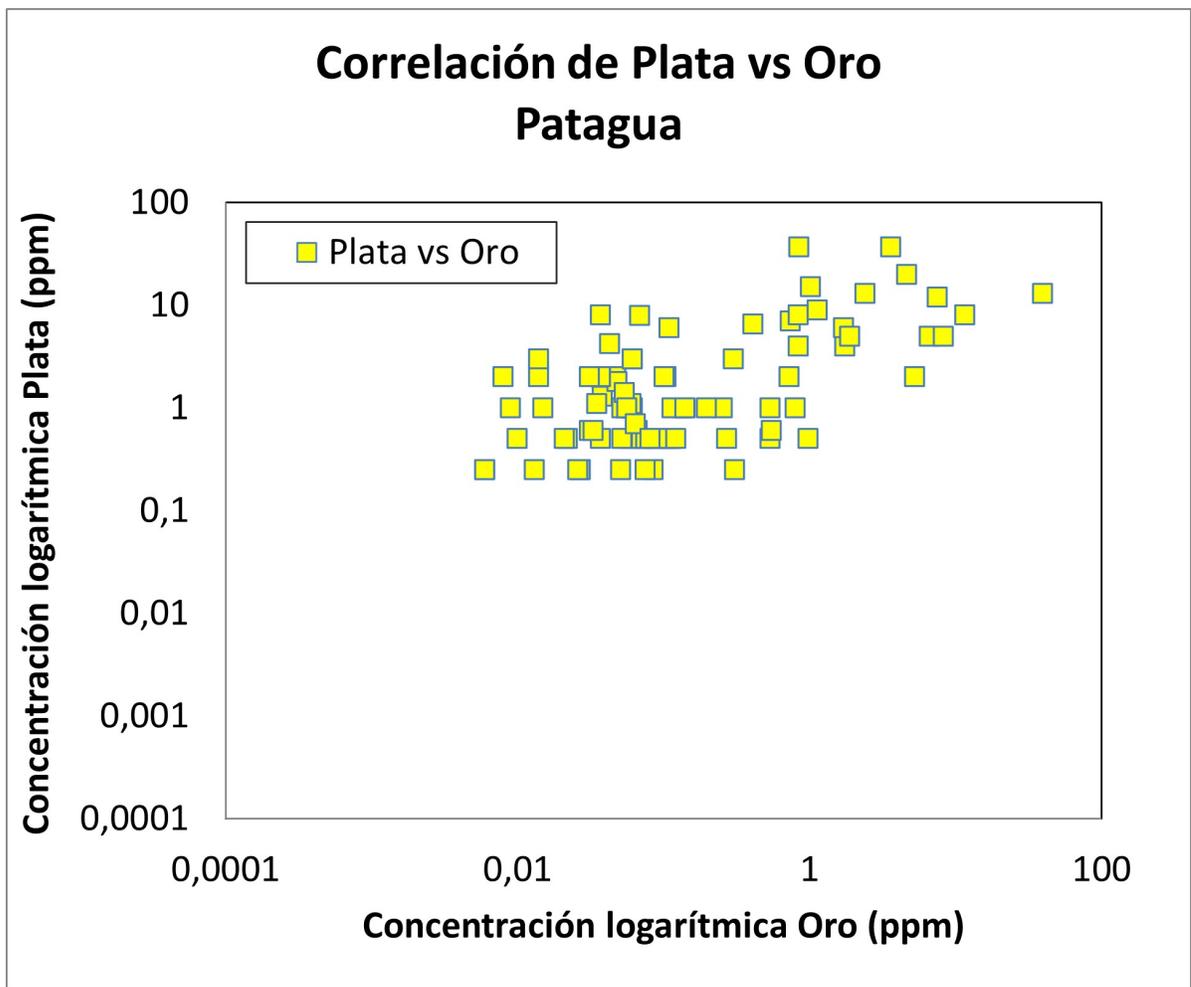


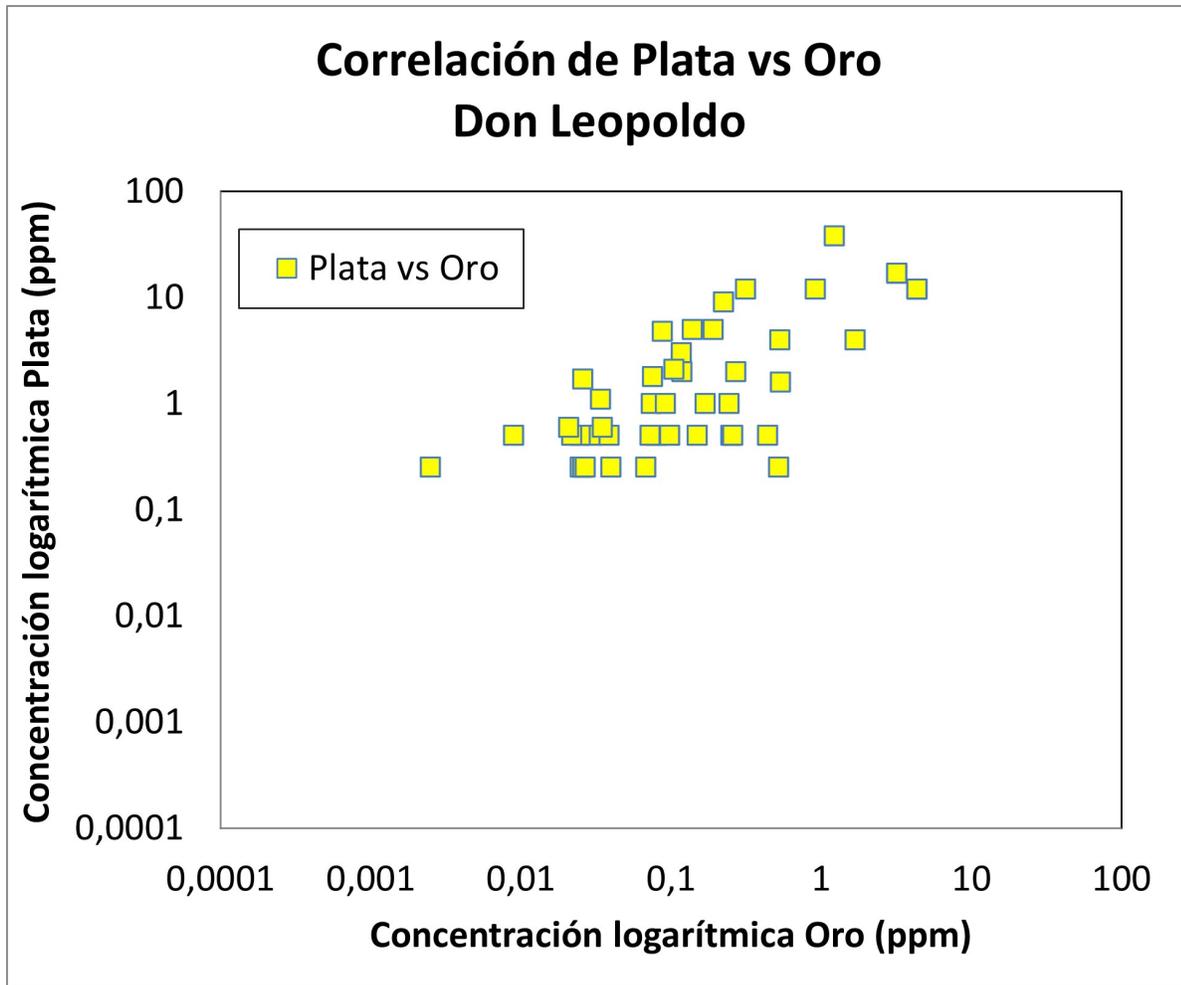
FIG. 5.14: Correlación entre oro y plata grupo 1: Patagua.

esta ultima situación, podría ponerse en duda las muestras del cuadrante inferior izquierdo (10 muestras dudosas, gráfico Figura 5.29b).

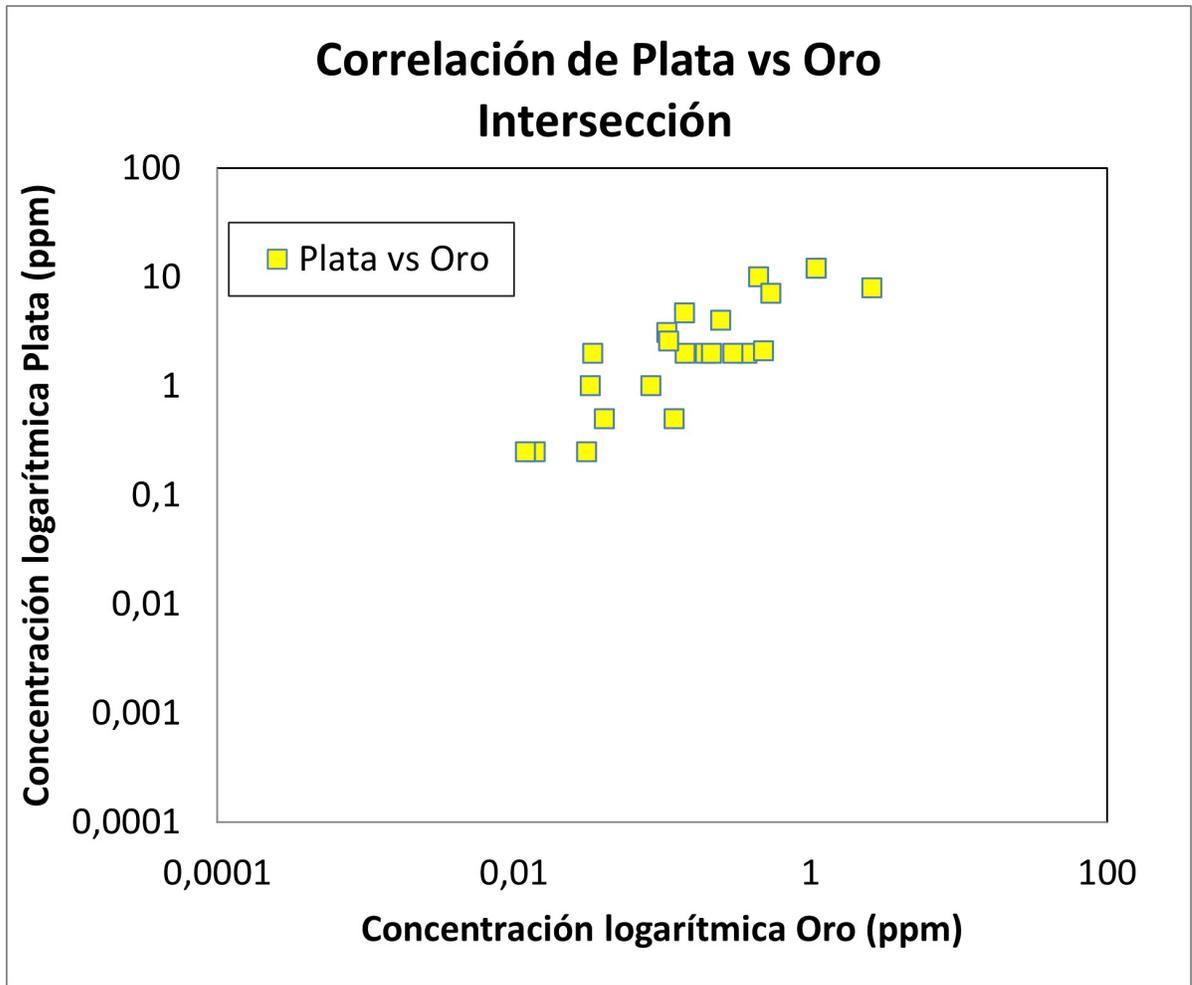
Observando correlaciones positivas entre oro y plata, con la gráfica Figura 5.30 podemos observar como la concentración total de oro y plata en cada muestra se relaciona con las concentraciones de metales bases de la misma. Expresado como Oro más plata versus cobre más zinc más plomo. Esta gráfica de escala logarítmica marca una clara tendencia positiva con curva casi lineal, indicando que concentraciones altas de metales preciosos se relacionan con concentraciones altas de metales bases. Sin embargo, antes de dicha correlación positiva, se observa que los menores valores de concentración de oro y plata del sector presenta una indiferencia (dispersión casi horizontal) con respecto a los valores de metales bases. La curva positiva se marca luego de los 0,1 en escala logarítmica de base 10 (equivalente a un valor de 0,1ppm resultante de la suma cobre+zinc+plomo).

#### 5.2.4. Distribución de inclusiones fluidas y texturas

Se expone la distribución de la frecuencia de estas características con respecto a la vertical. Se puede consultar la sección del apéndice B para ver las tablas y figuras que indican esta



**FIG. 5.15:** Correlación entre oro y plata, grupo 1: **Don Leopoldo**. En las figuras se aprecia una correlación directa positiva.



**FIG. 5.16:** Correlación entre oro y plata, grupo 1: **Intersección**. En las figuras se aprecia una correlación directa positiva.

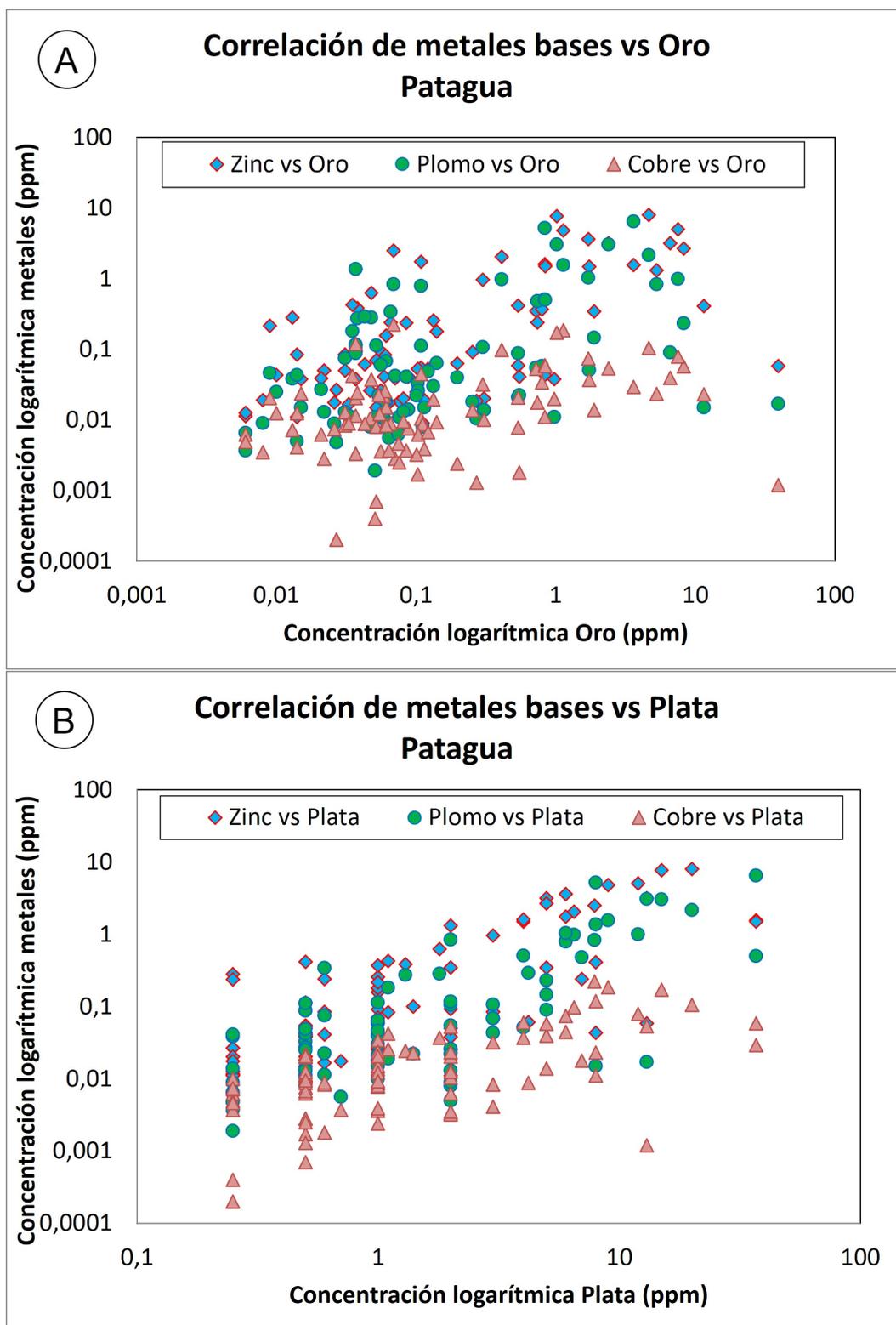


FIG. 5.17: Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 1: Patagua.

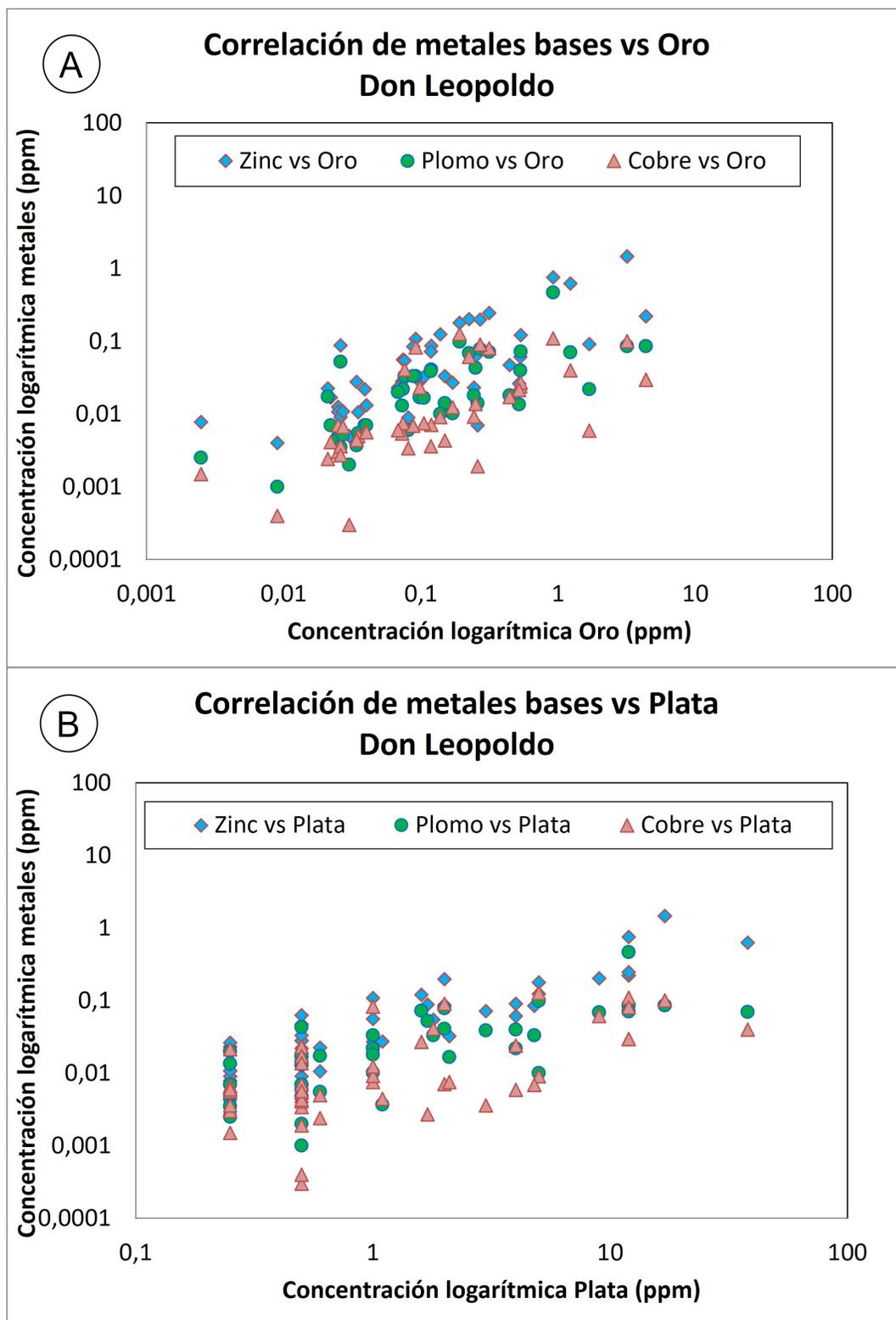


FIG. 5.18: Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 1: Don Leopoldo.

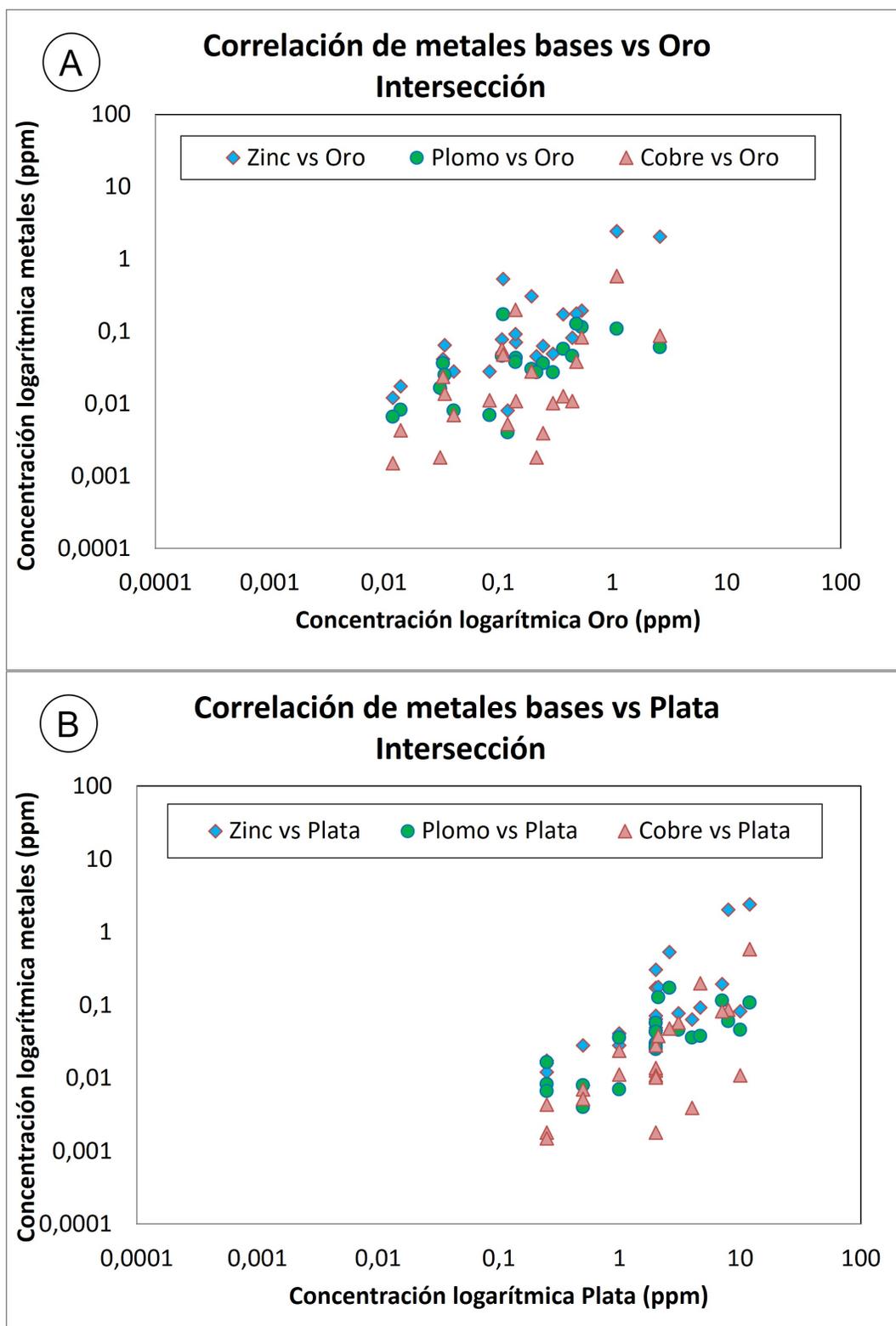
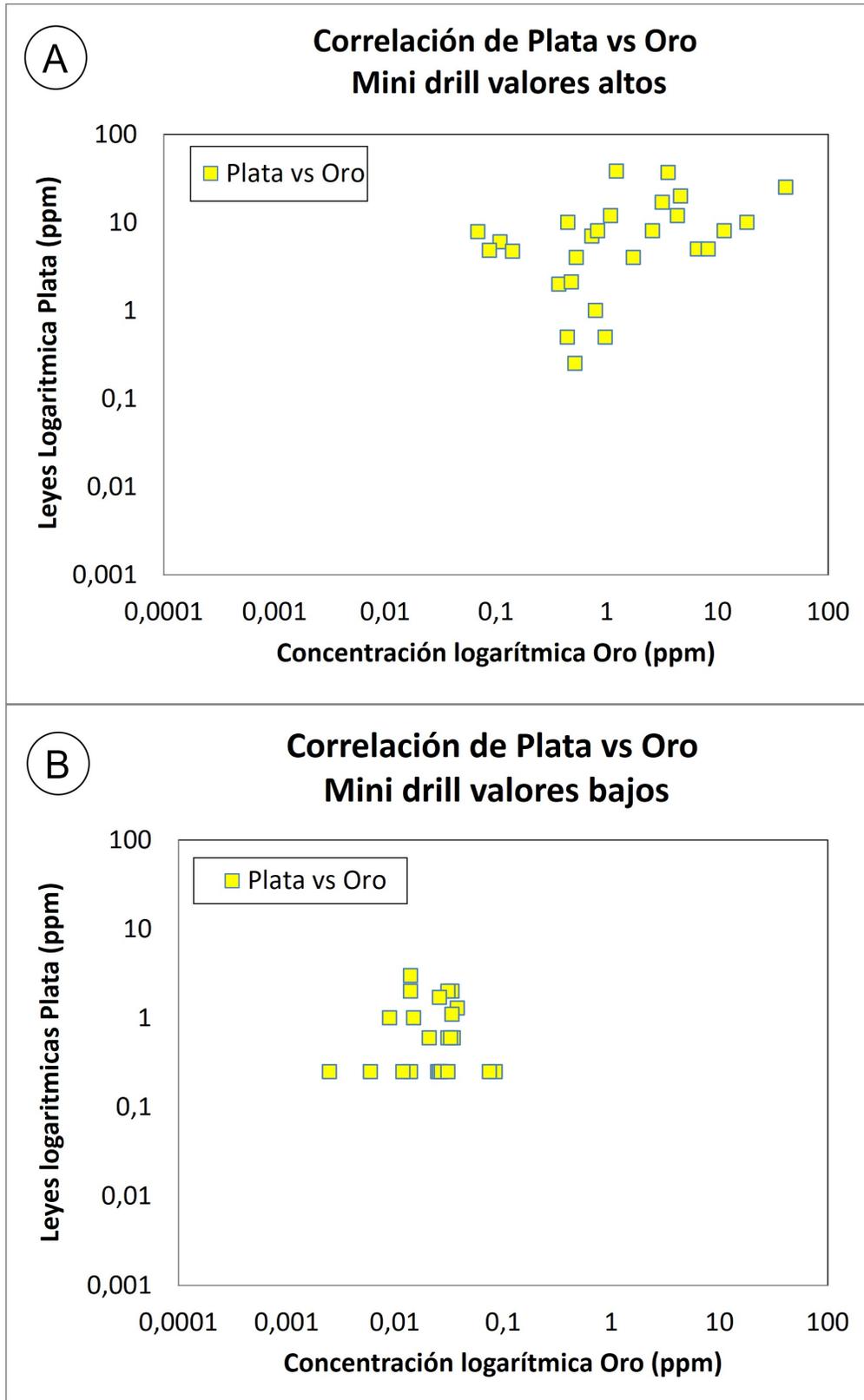
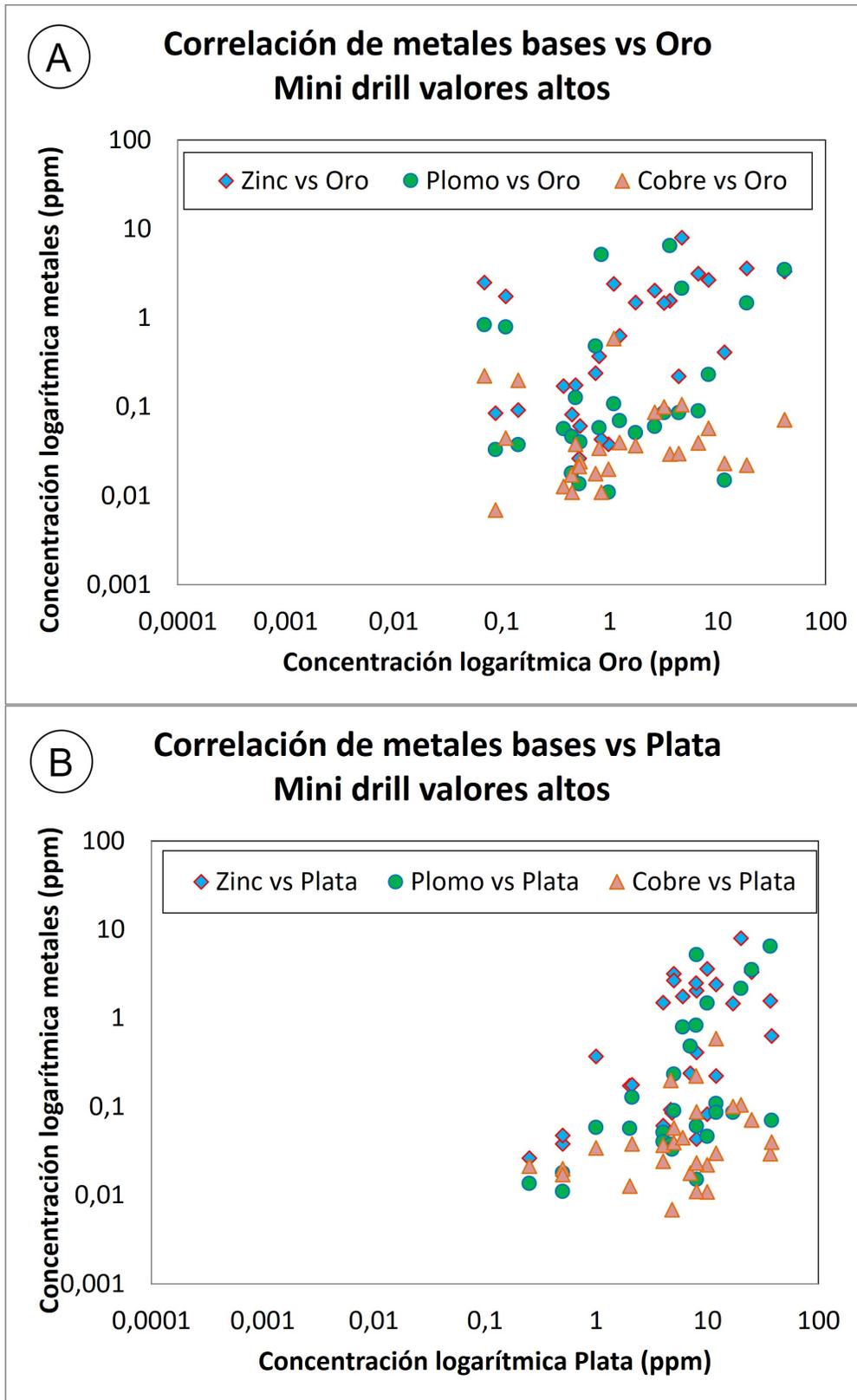


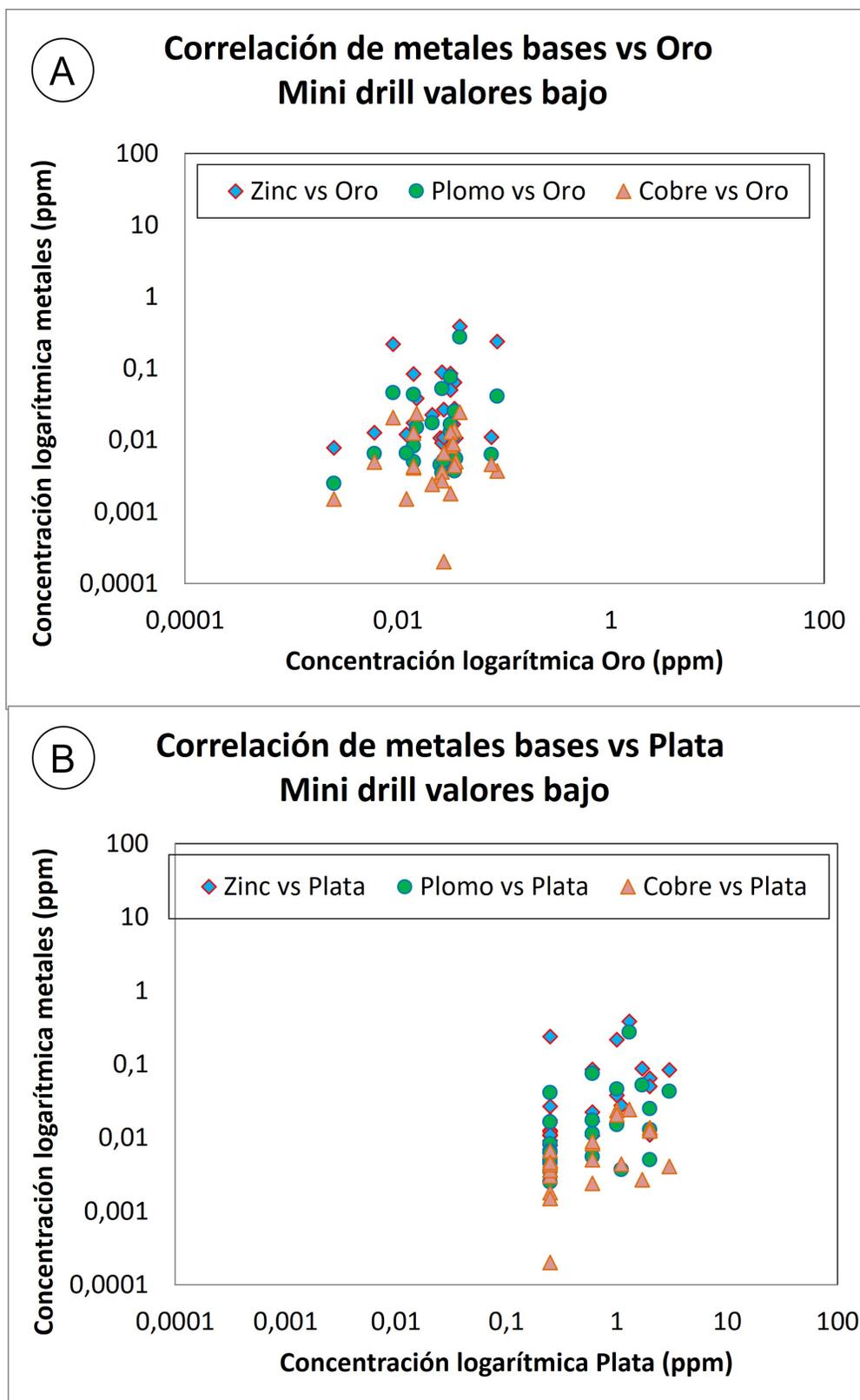
FIG. 5.19: Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 1: Intersección.



**FIG. 5.20:** Correlación entre oro y plata, para el grupo 2: (a) Mini drills valores alto. (b) valores bajos. En las figuras se aprecia una mayor dispersión.



**FIG. 5.21:** Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 2: **Mini drills valores alto**. En las figuras se aprecia una gran dispersión en las concentraciones de metales bases y concentraciones de oro y plata, pero con leve relación directa positiva.



**FIG. 5.22:** Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 2: **Mini drills valores bajos**. En las figuras se aprecia una menor dispersión en las concentraciones de metales bases y concentraciones de oro y plata, con casi indiferencia entre las concentraciones de metales bases con respecto a la plata.

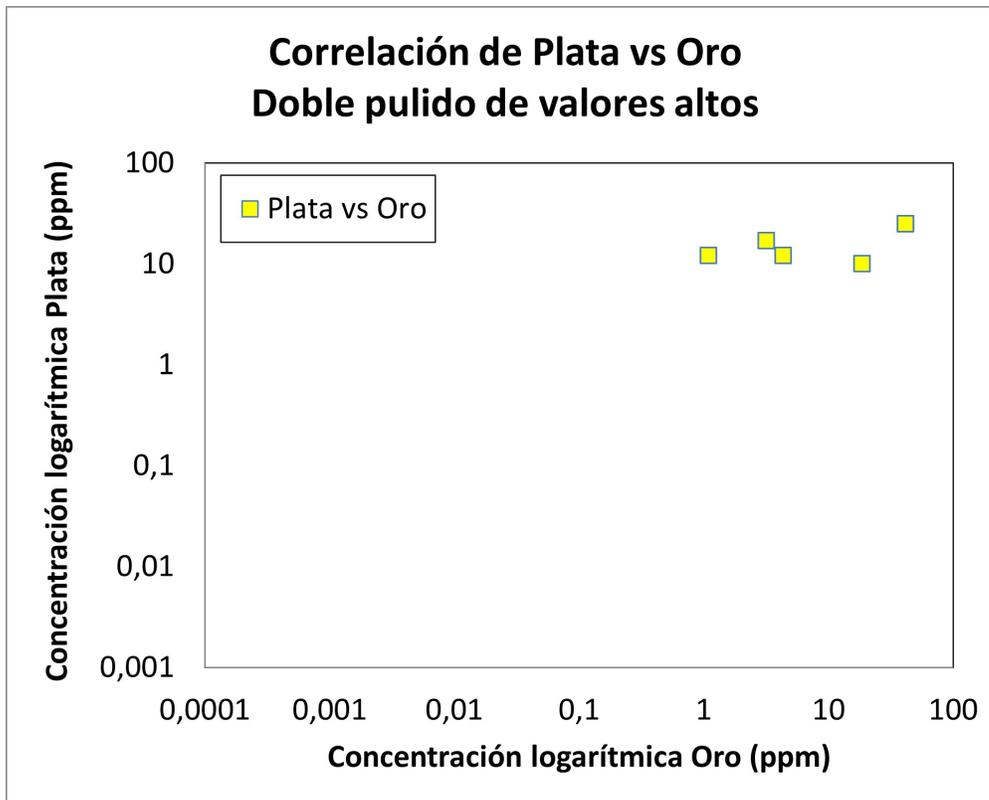


FIG. 5.23: Correlación entre oro y plata, para el grupo 3: Doble pulidos de valores altos (D.P.a). En las figuras se aprecia una indiferencia en los valores de oro para D.P.a con respecto a la plata.

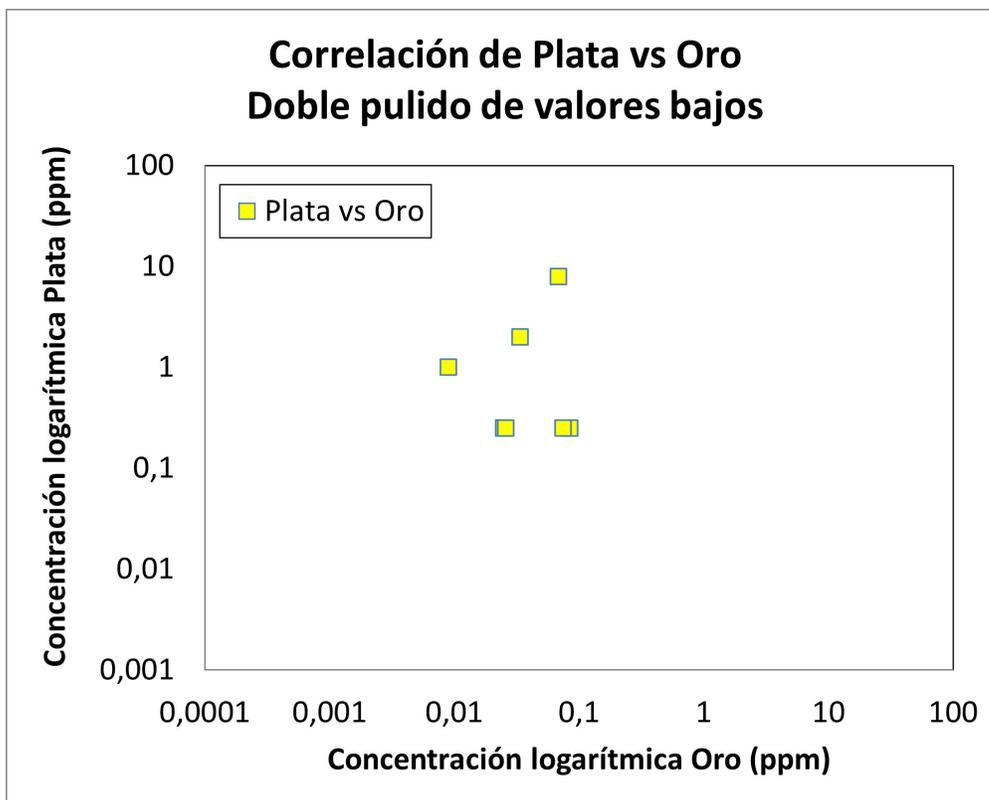
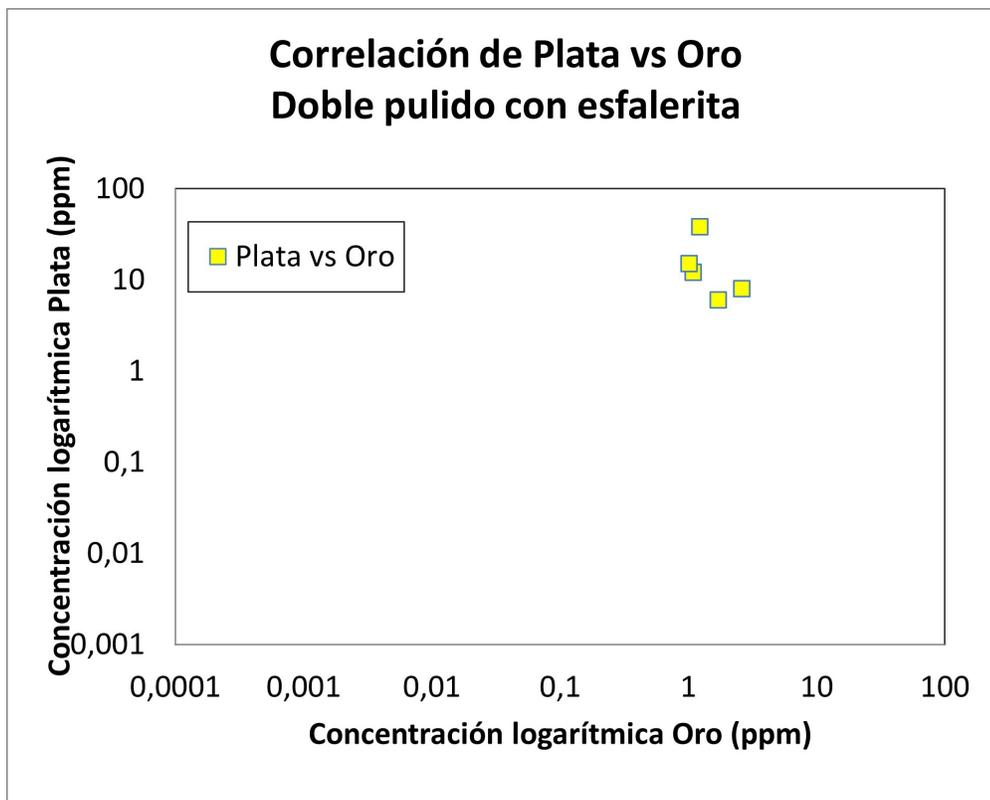


FIG. 5.24: Correlación entre oro y plata, para el grupo 3: Doble pulidos de valores bajos.



**FIG. 5.25:** Correlación entre oro y plata, para el grupo 3: **Doble pulidos con esfalerita**. En las figuras se aprecia un intervalo acotado de concentraciones de plata y oro.

información (Figura 6.7, ??). Para esta sección se trabajara con la presente Tabla 5.4. En ella se contabilizan las características presentes en cada integran de los grupos (sectores, tipo de mini drills, tipo de doble pulidos) con respecto a las inclusiones fluida y las texturas. Específicamente se contabilizan las inclusiones ricas en liquido (L), ricas en vapor (v), coexistencia de liquido con vapor (L+V) e inclusiones ricas en liquido con presencia de halita o algún solido, con o sin coexistencia de ricas en vapor (L+V+H/S). Para el caso de las texturas, se indican la máxima cantidad de texturas que evidencian ebullición que fueron observada en alguna muestra de patagua. La frecuencia de estas muestras con evidencias texturales se da a conocer en cada gráfico. Recordamos que estas texturas corresponden a: coliforme, crustiforme, jigsaw, moss, feathery, flomboyant, ghost sphere, pseudo bladed, pseudo acicular, sacaroidal.

Nuevamente se trabaja por grupo y se presenta en los gráficos de la izquierda las frecuencias de las diferentes inclusiones fluidas, y a la derecha las frecuencias de muestras con texturas que evidencian ebullición y las muestras que presentan texturas no relacionadas a la ebullición.

Observando la Figura 5.31, se aprecia que entorno a los 600m.s.n.m las inclusiones ricas en V y L+V dominan sobre las liquido en la zona de Patagua, y paralelamente exhibe una mayor frecuencia de muestras con texturas que suscitan ebullición. Este mismo escenario se repite entorno a los 650m.s.n.m. en el caso de Don Leopoldo Figura 5.32 y en la zona alta entorno a los 800m.s.n.m. para el caso de la Intersección Figura 5.33.

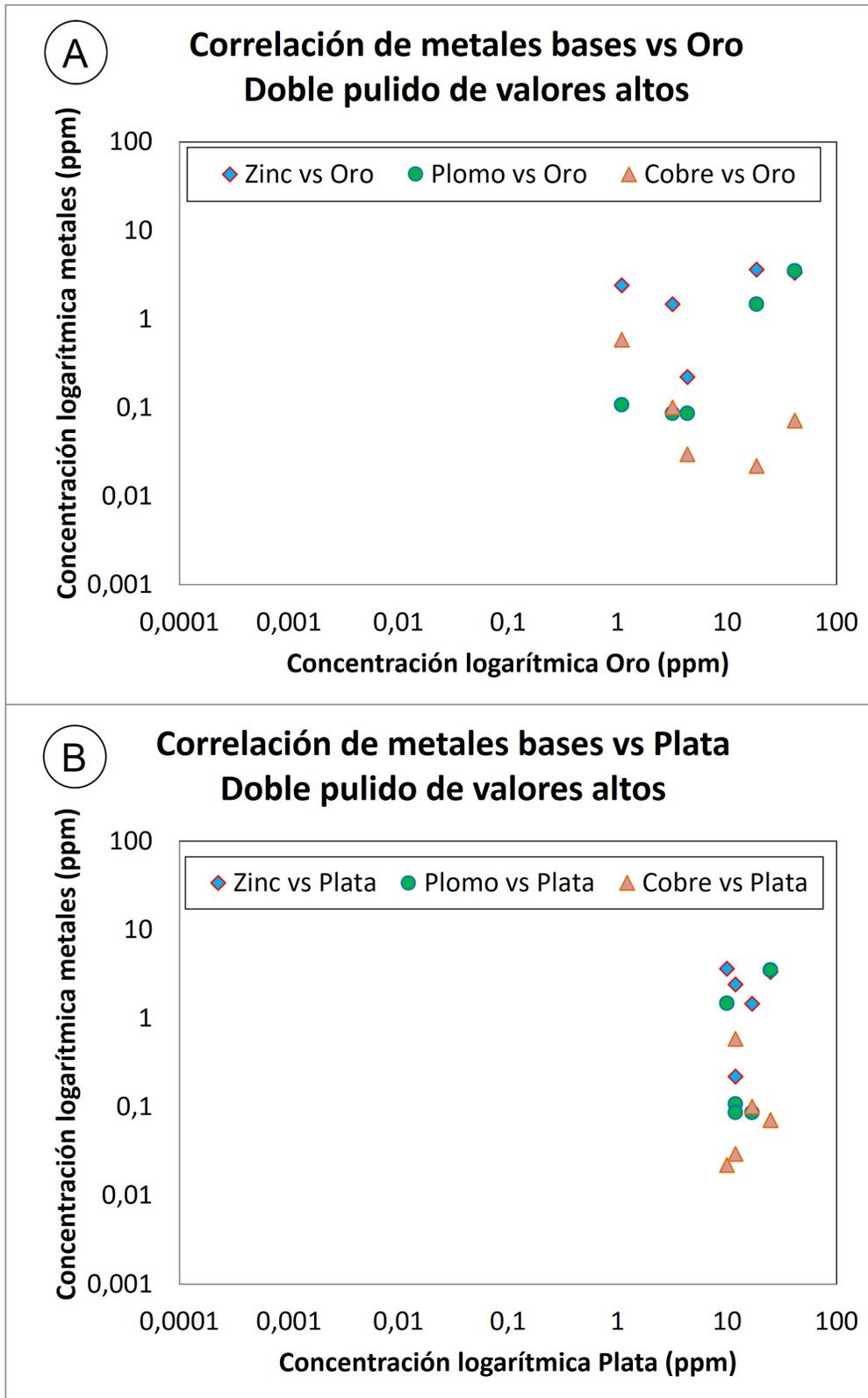


FIG. 5.26: Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 3: **Doble pulidos de valores altos** (D.P.a). En las figuras se aprecia una indiferencia entre los metales bases con respecto a la plata.

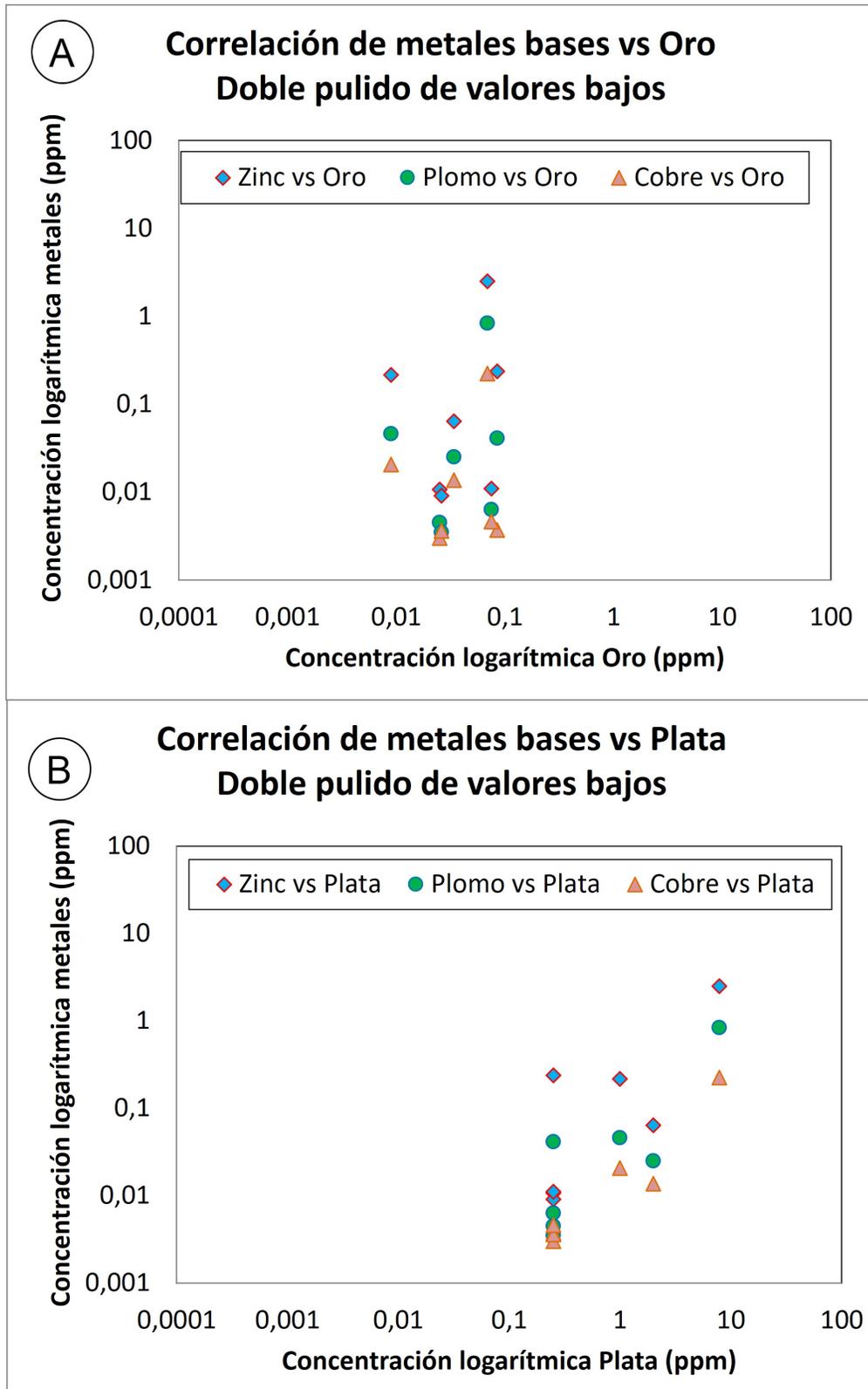
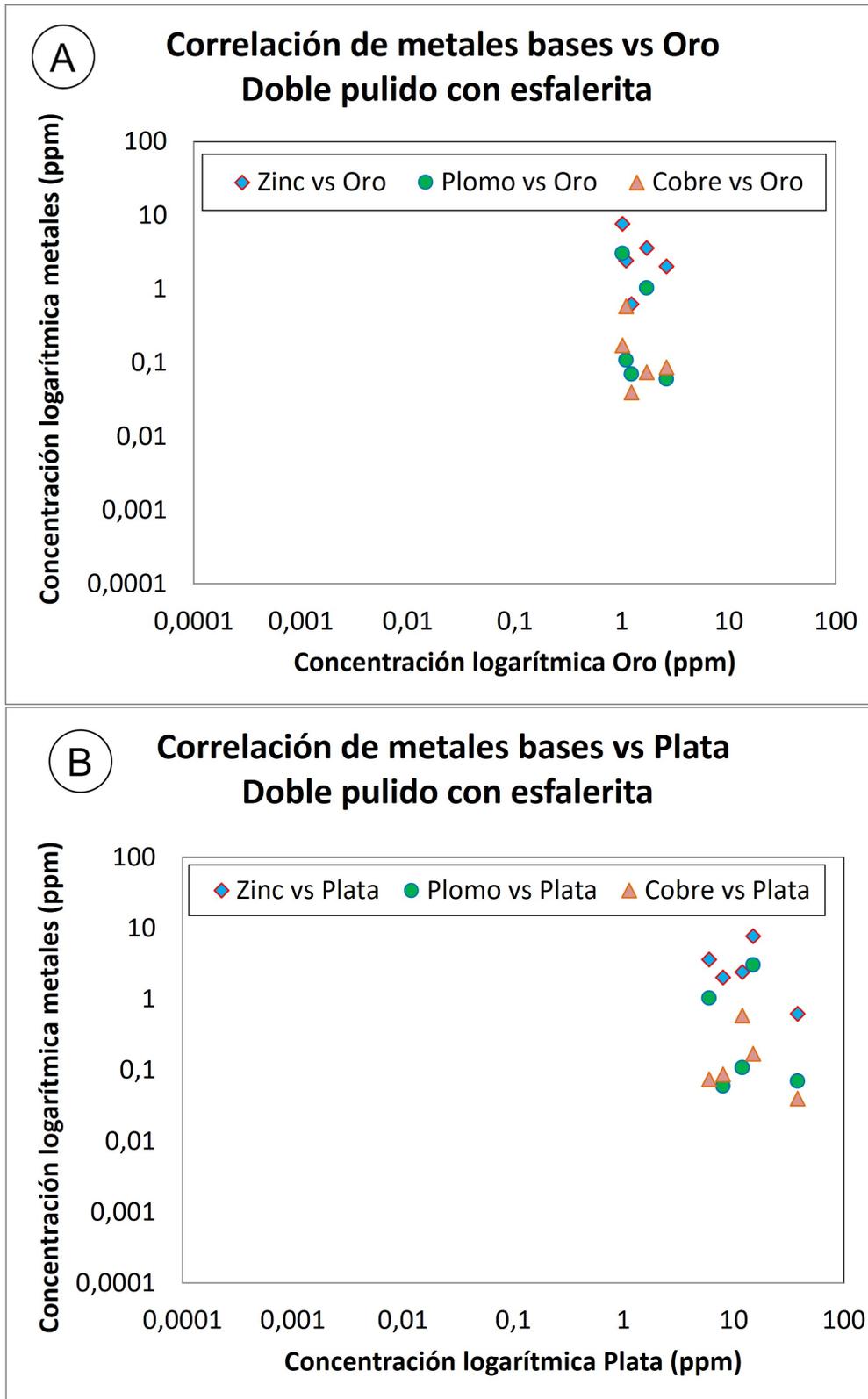
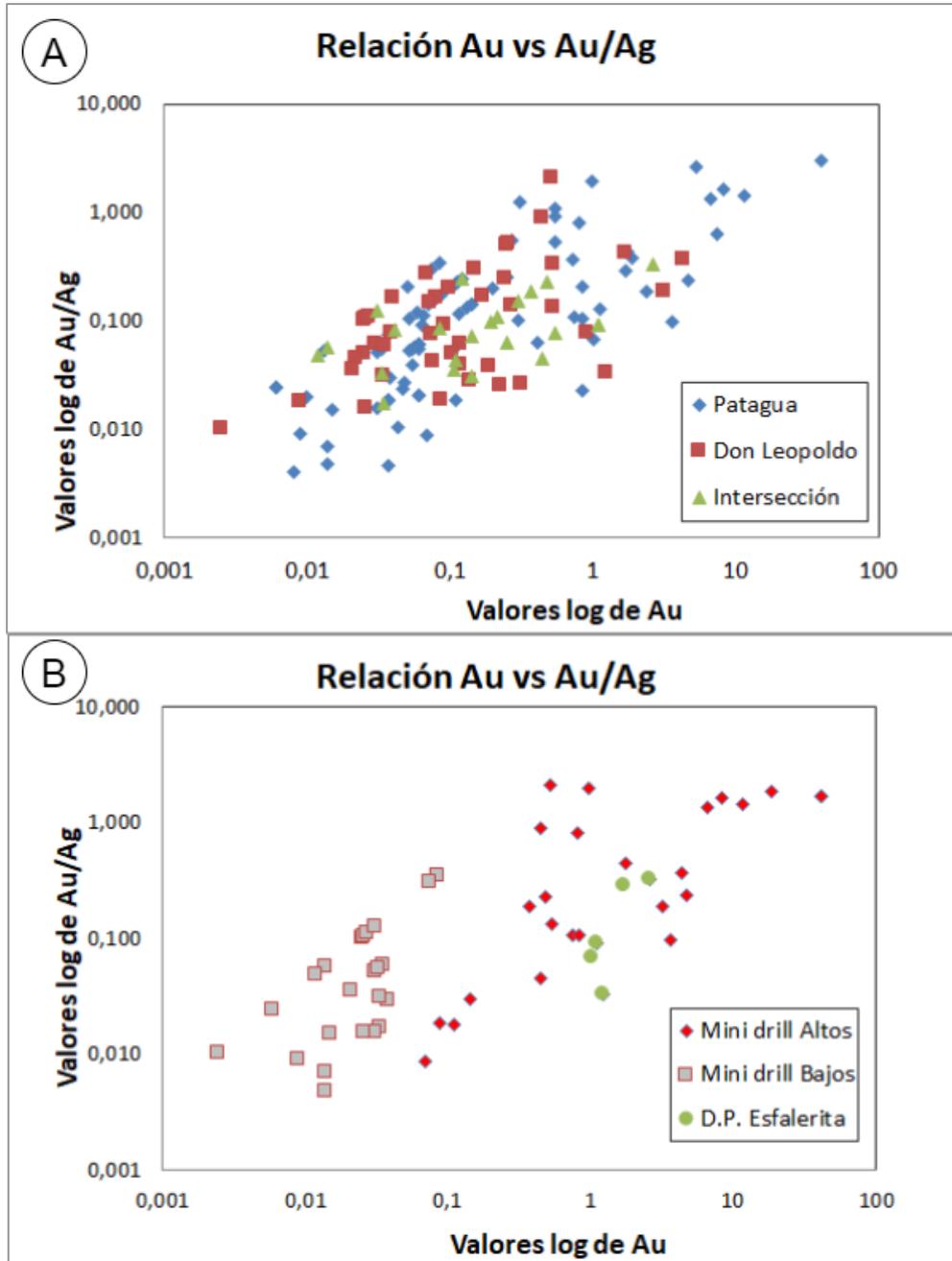


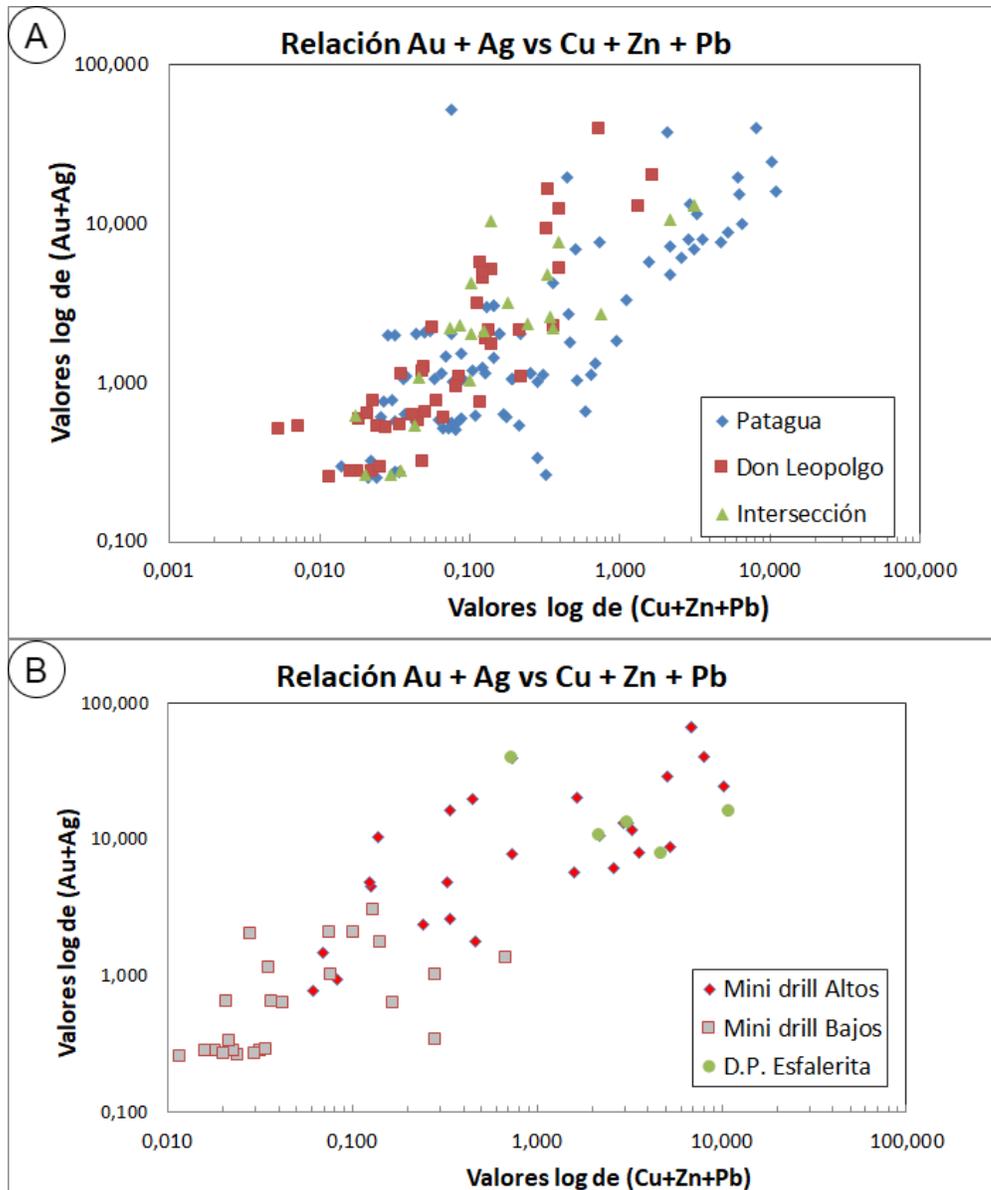
FIG. 5.27: Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el grupo 3: **Doble pulidos de valores bajos**. Los metales se distribuyen en concentraciones acotadas de oro.



**FIG. 5.28:** Correlación entre (a) metales bases y oro, y (b) metales bases y plata, para el Grupo 3: **Doble pulidos con esfalerita**. Los metales se distribuyen en concentraciones acotadas de oro y plata



**FIG. 5.29:** Correlación adimensional entre las razones de Au/Ag y la concentración de Au. (a) muestra los valores asignados para el Grupo 1. (b) Muestra los valores asignados a mini drills de valore altos, mini drills de valores bajos, y doble pulidos (D.P.) con esfalerita. El cuadrante superior derecho indica altas concertaciones de oro y plata, y el inferior derecho indica altas concentraciones de oro y plata, pero con mayor cantidad de plata que de oro. En este ultimo se ubican las 5 muestras D.P. con esfalerita.



**FIG. 5.30:** Correlación adimensional entre la suma de las concentraciones de oro(Au) y plata(Ag) versus las suma de las concetracion de metales bases cobre(Cu), zinc(Zn) y plomo(Pb). (a) muestra los valores asignados para el Grupo 1. (b) Muestra los valores asignados a mini drills de valore altos, mini drills de valores bajos, y doble pulidos (D.P.) con esfalerita. Se observa para ambos grupos una linealidad positiva en la correlación de las concentraciones. Se observa como existe un sector donde los valores bajo de la suma oro + plata son indiferente a las concentraciones de metales bases.

	Frecuencia				
	Inclusiones fluidas				Textura
	L	V	L+V	L+V+H/S	Txt ebullición
Patagua	28	58	15	16	8
Don Leopoldo	24	12	4	3	6
Intersección	13	21	8	8	8
Mini drill Alto	14	25	9	7	7
Mini drill Bajo	9	17	4	6	6
D.P. alto	3	4	0	0	5
D.P. bajo	6	7	5	3	5
D.P. esfalerita	0	3	2	1	8

**TAB. 5.4:** Conteo de inclusiones fluidas y tipo de texturas presentes.

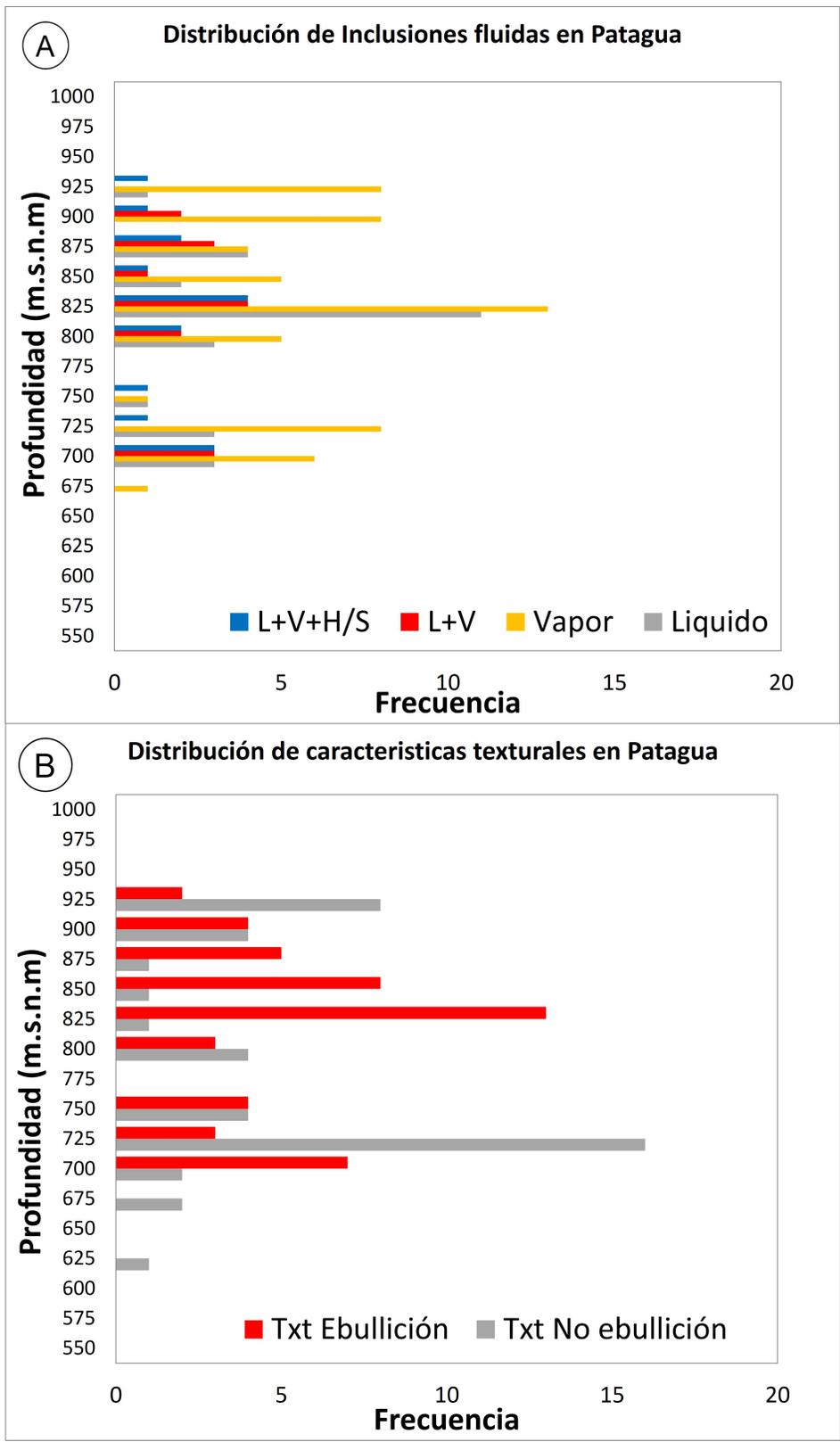
Si nos fijamos en las muestras de mini drill representadas por las Figura 5.34 y Figura 5.35, podemos notar que tanto para valores altos como valores bajos se tienen por lo general más muestras que exhiben texturas que indicarían ebullición que muestras sin evidencia de ebullición, esto solo no se cumple a los 600m.s.n.m. en valores altos, y 800m.s.n.m. en valores bajos. A su vez, en este ultimo sector, priorizan inclusiones fluidas ricas en liquido lo que indicaría una concordancia con las texturas. Sin embargo para el caso de mini drill de valores altos, a los 600m.s.n.m. presenta inclusiones ricas en vapor o tipo L+V, las cuales promueve lo contrario a las texturas, marcando esta discrepancia. Por otra parte, en vista general, predominan las inclusiones ricas en vapor para ambos casos.

Lo interesante se observa en las Figura 5.36, Figura 5.37 y Figura 5.38 donde en todas las muestras doble pulido se encontró evidencias texturales que indicarían posible ebullición. Además, las muestras con esfalerita no presentaron familia de inclusiones ricas en liquido. En las doble pulido con valores altos se destaca la presencia de solo inclusiones ricas en vapor, y en el caso de las muestras doble pulido de valores bajos se observa mayor variación de los tipos de inclusiones fluidas presentes, pudiendo indicar como hipótesis que estas muestras hayan sufrido mayor diversidad de fluidos hidrotermales o procesos.

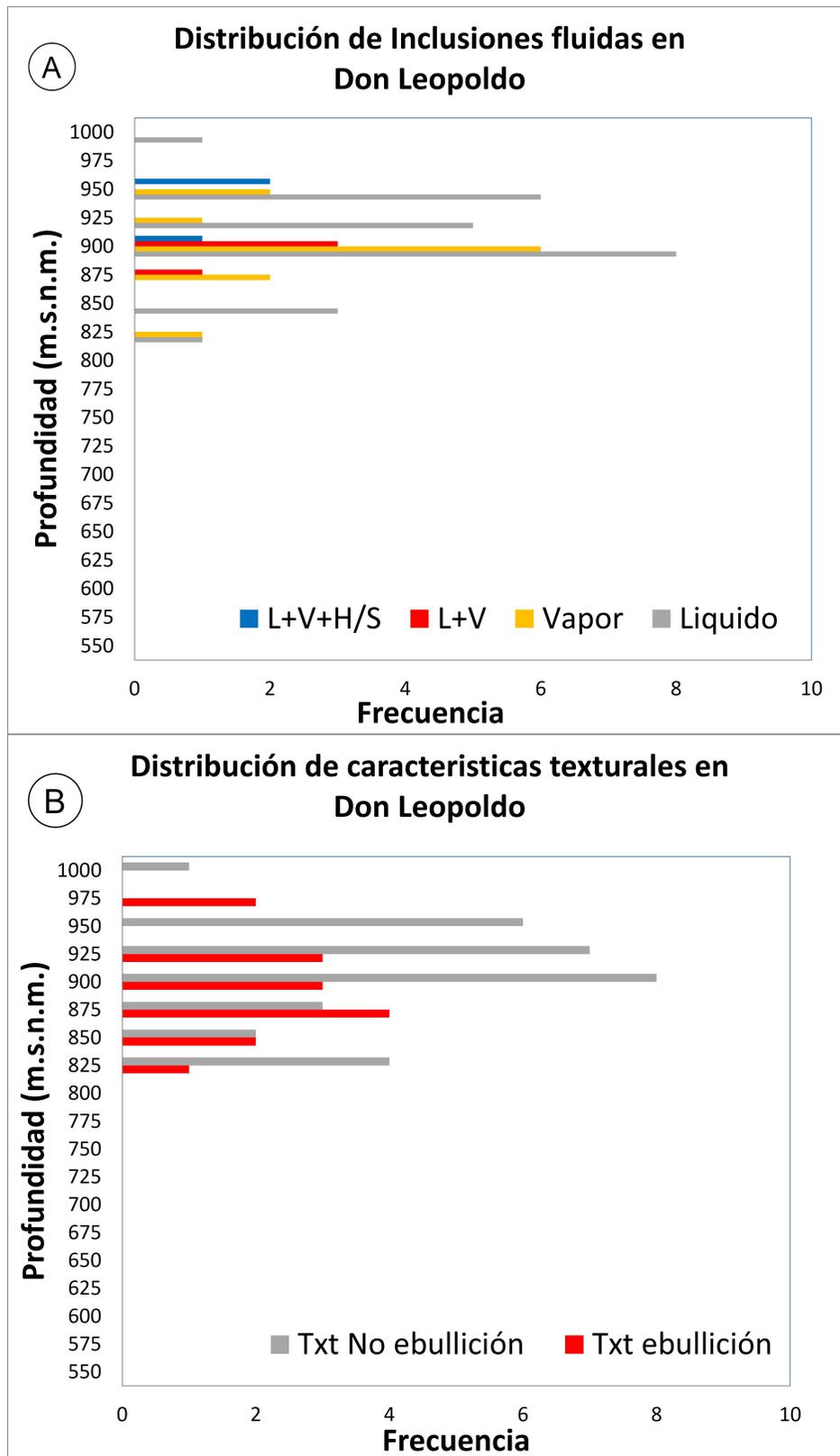
Esto resalta la importancia de poder reconocer la secuencia de eventos, junto con las inclusiones fluidas y las texturas asociadas a cada uno de ellos, y mejor aún, si se obtiene la relación con respecto a la precipitación de esfalerita.

### 5.2.5. Estimación de recursos

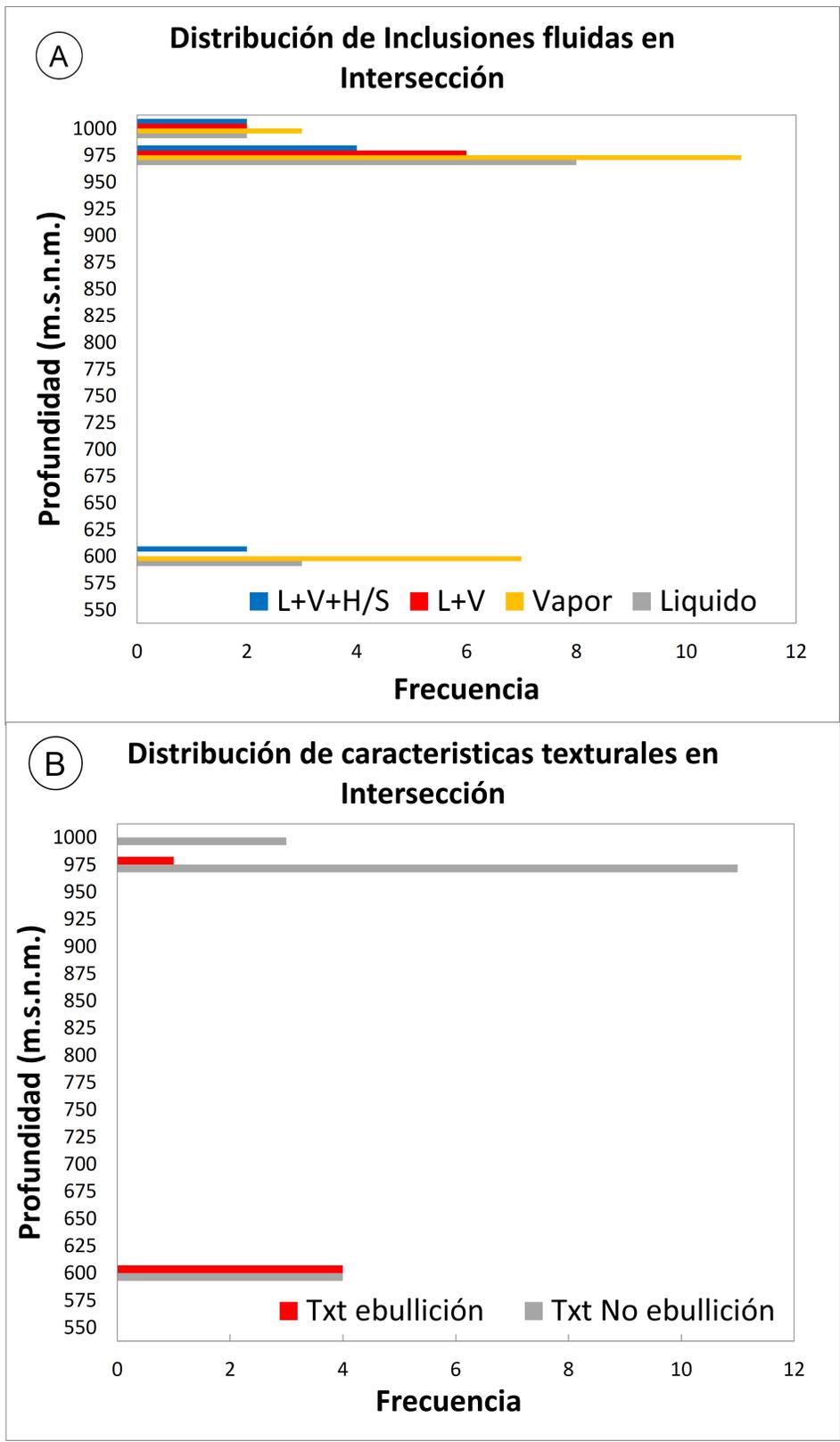
La base de datos geoquímica fue trabajada mediante el software LeapFrog. Se modelo la zona mineralizada, vetas, con apoyo de mapas y la distribución de las muestras en el espacio 3D a partir de sus coordenadas Norte, Este, Z. Esto resulto en una estructura con 20m de ancho, 750m de largo y 200m de alto, originando un volumen de 3.000.000m<sup>3</sup>. Se asumió que la veta mineralizada tenia una densidad similar a la del cuarzo: 2.65 g/cm<sup>3</sup>. Lo que nos da un Tonelaje: 7.95g\*10<sup>12</sup> equivalente a 7.95t\*10<sup>6</sup>. Considerando que las leyes de oro y plata son: 0,95-1,45 % de Au y ley de 4 % de Ag, se tendría una aproximación de 7,55t 11t de Au equivalente a 226.000 – 388.000onzas. Y, 31,8t de Ag equivalente a 1.120.000 onzas.



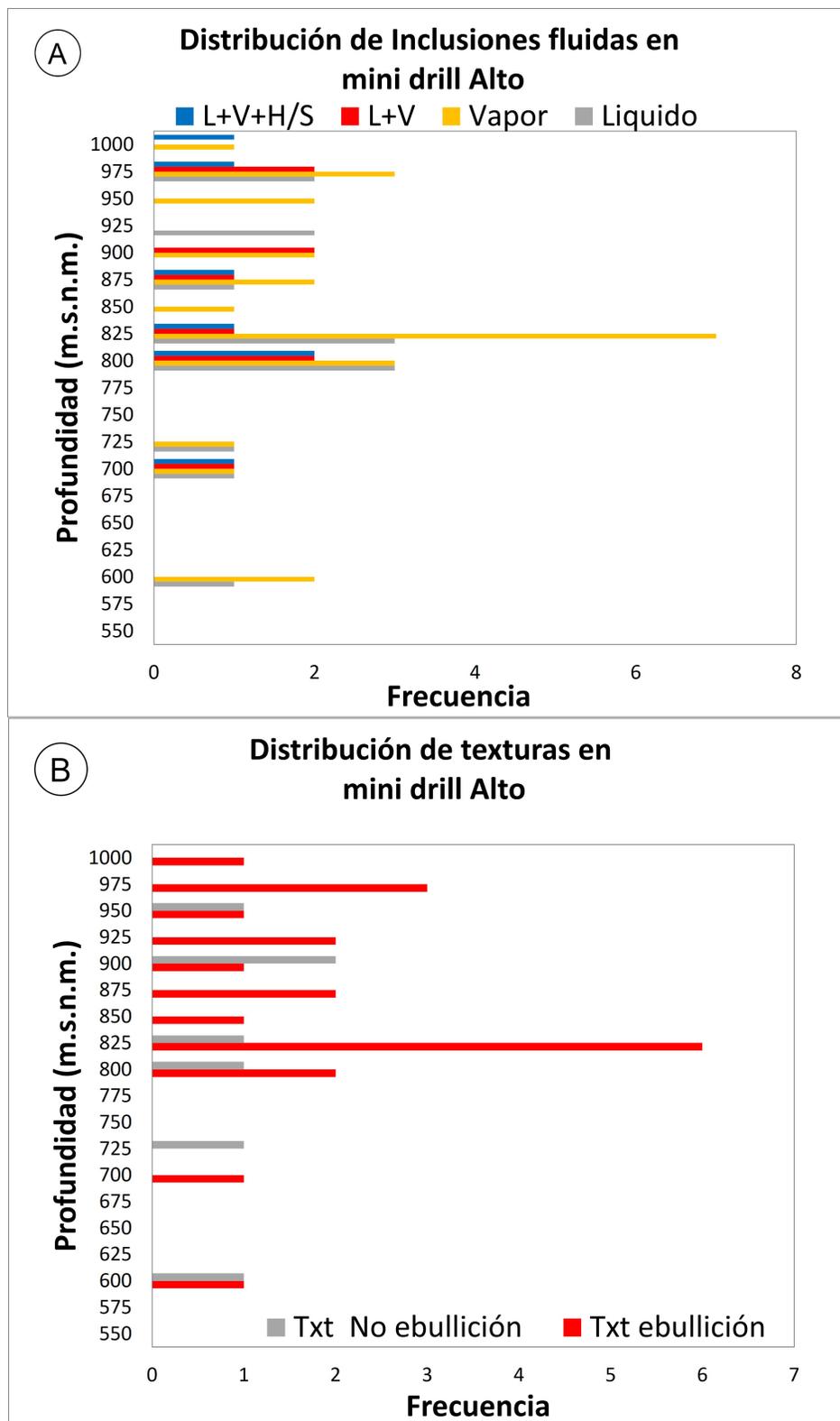
**FIG. 5.31:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 1: **Patagua**. Se destaca en Patagua la zona de los 600m.s.n.m. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



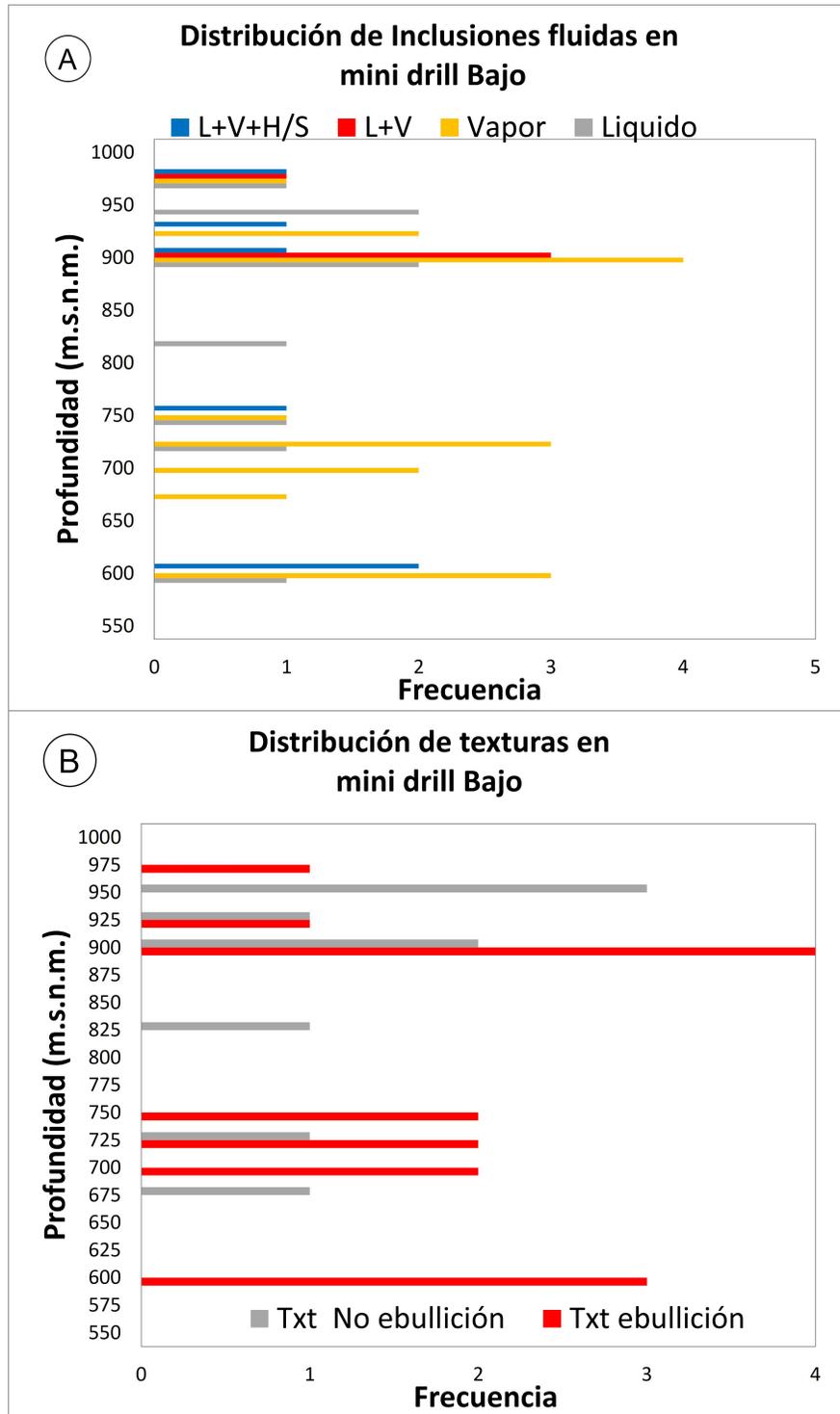
**FIG. 5.32:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 1: **Don Leopoldo**. Se destaca en Don Leopoldo sector de 650m.s.n.m., y la zona alta en Intersección. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



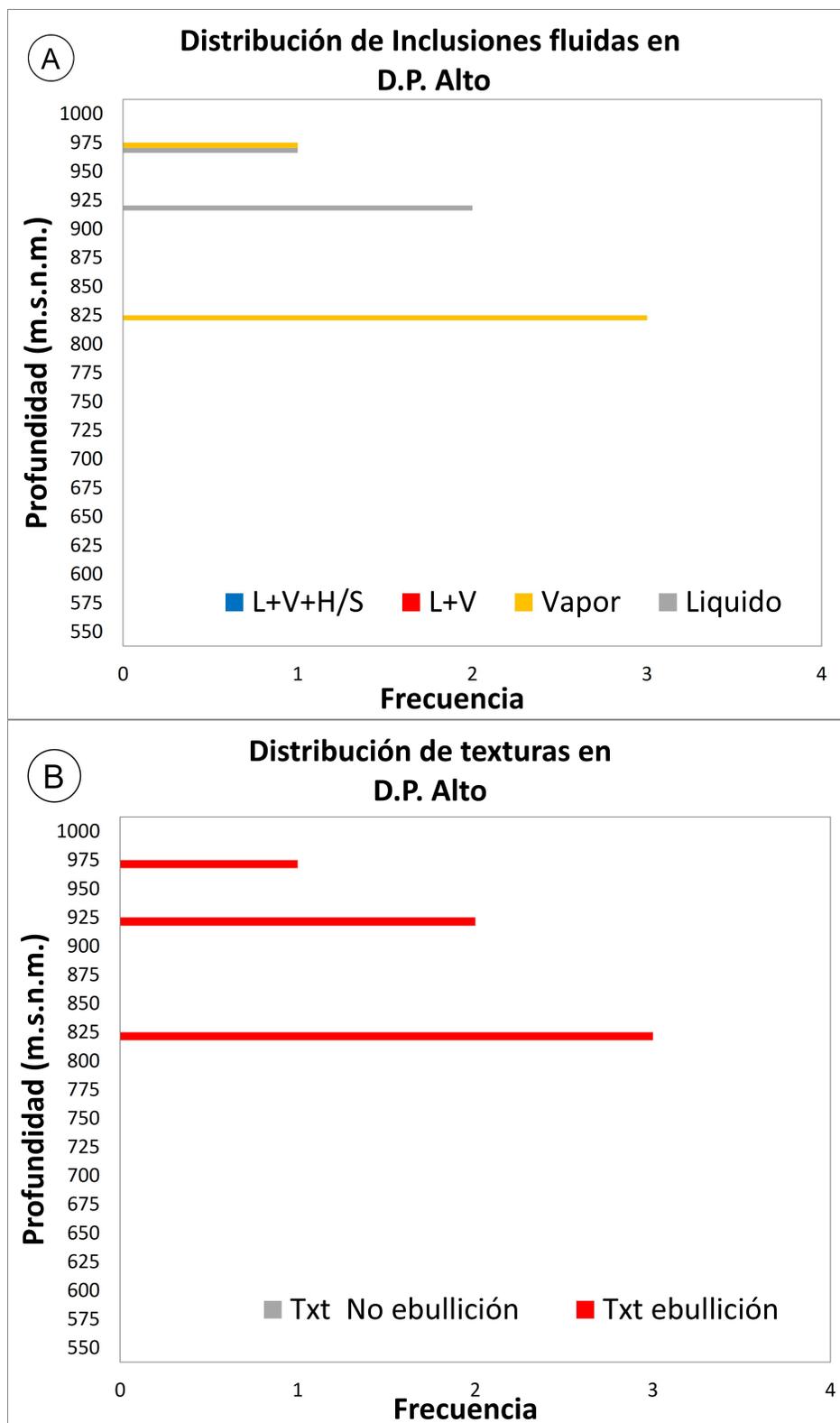
**FIG. 5.33:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 1: **Intersección**. Se destaca la zona alta. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



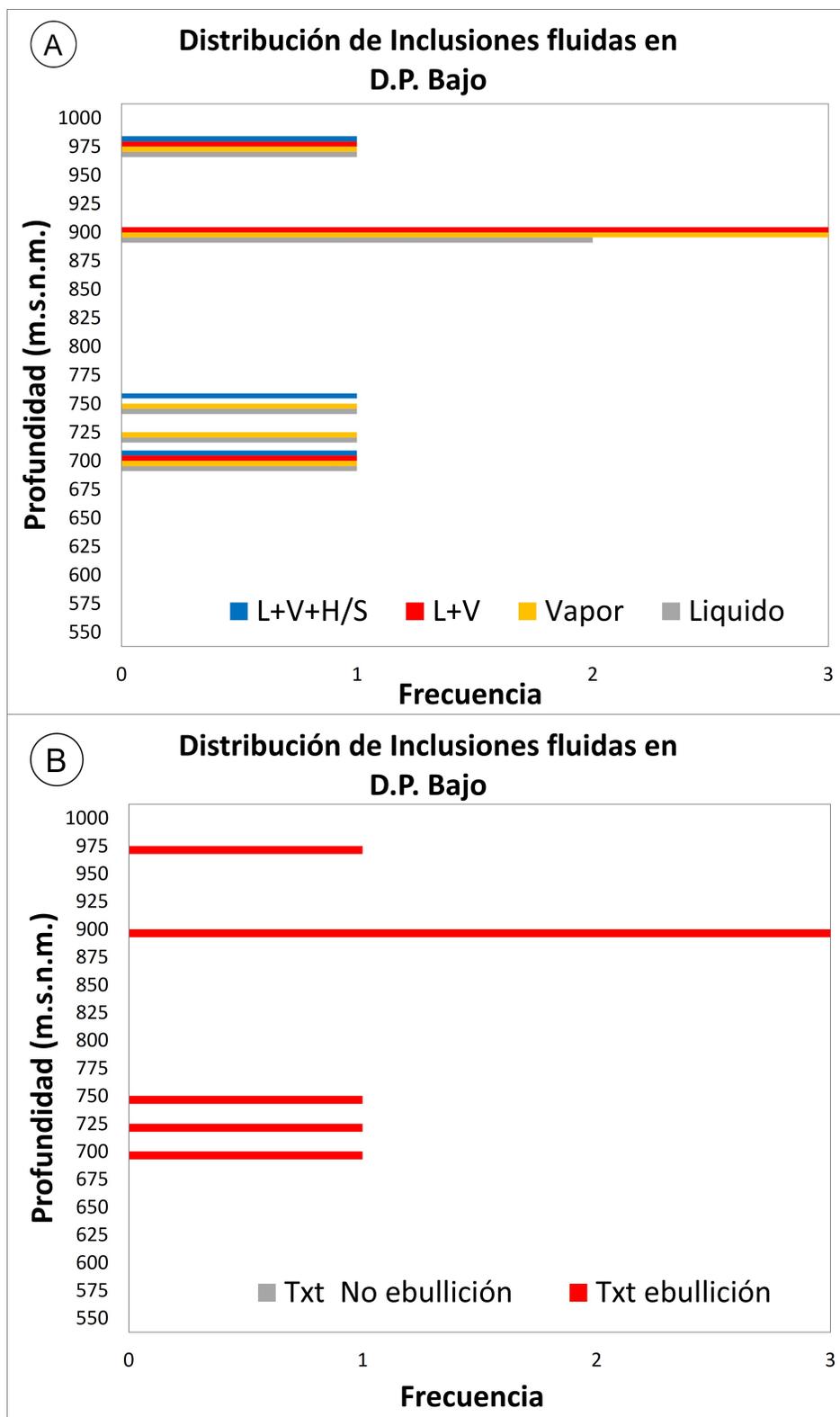
**FIG. 5.34:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 2: **Mini drills valores altos**. Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



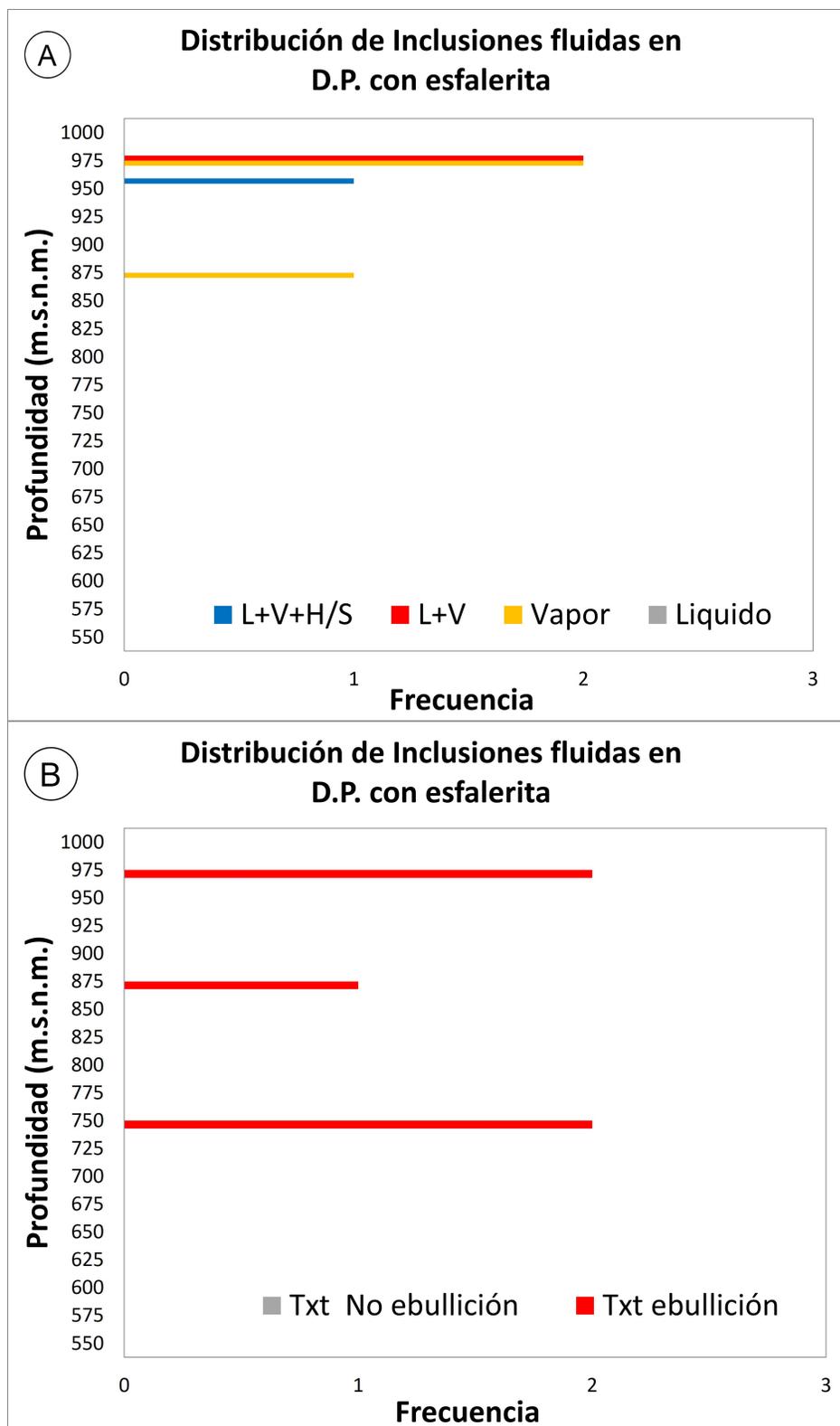
**FIG. 5.35:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 2: **Mini Drills valores bajos**. Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



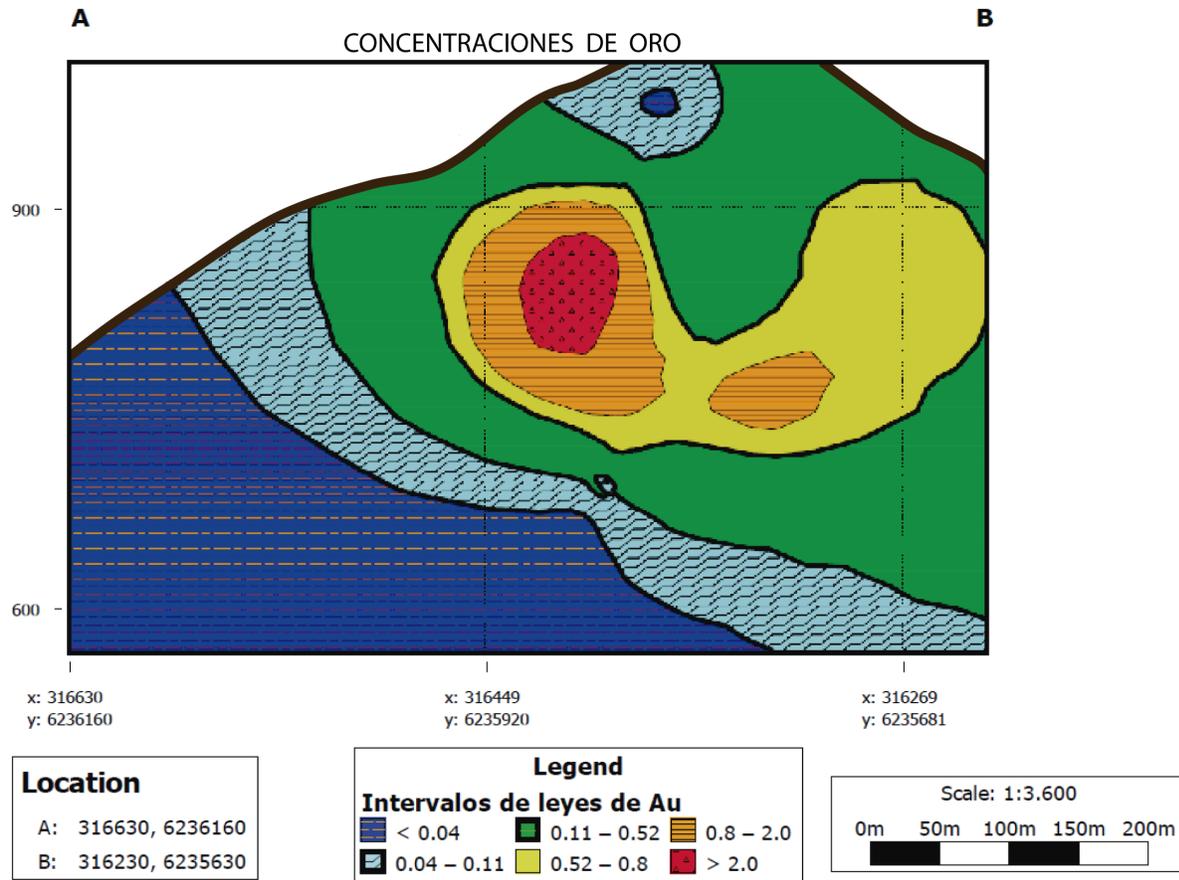
**FIG. 5.36:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 3: **Doble Pulidos valor alto**. Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición, y la presencia de inclusiones ricas en vapor y/o liquido coexistiendo con vapor. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



**FIG. 5.37:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 3: **Doble Pulidos valor bajos**. Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición, y la presencia de inclusiones ricas en vapor y/o liquido coexistiendo con vapor. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



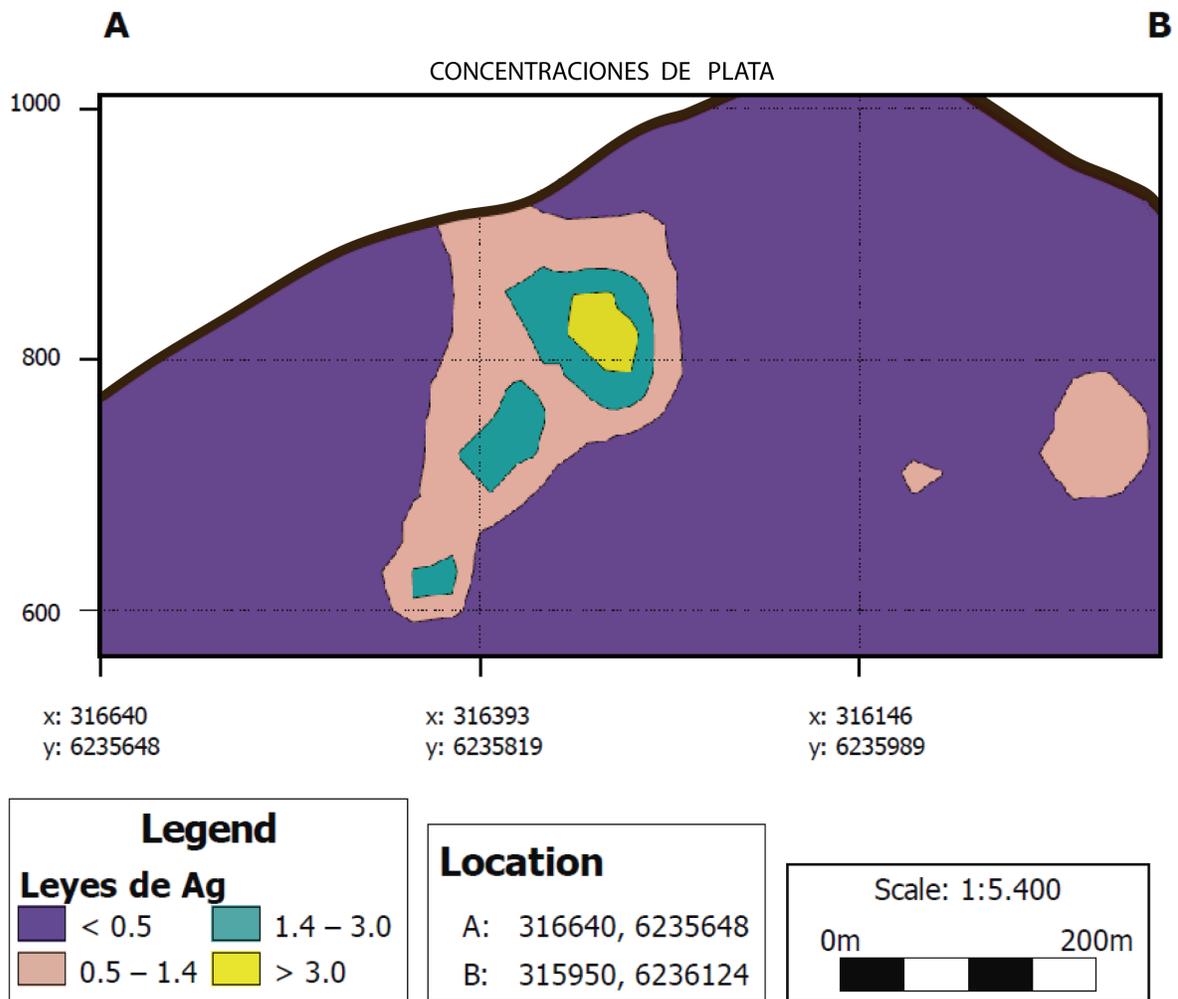
**FIG. 5.38:** Distribución de frecuencia de (a) los tipos de inclusiones fluidas, y (b) texturas que indicarían ebullición, con respecto a la profundidad. Gráfica para el Grupo 3: **Doble Pulidos con esfalerita**. Se destaca la predominancia de muestras con texturas que indicarían ebullición, y la presencia de inclusiones ricas en vapor y/o liquido coexistiendo con vapor. L: liquido; V: vapor; H: halita; S: solido. Txt: textura



**FIG. 5.39:** Perfil de transversal a la estructura que contiene Patagua y Don Leopoldo de las concentraciones de oro. Muestra enriquecimiento entre los 850 y 700m.s.n.m.

Estos valores son cercanos a los señalados por Yamana Gold en sus reportes del 2017 y 2018 de Yammana Gold. Ayudando a verificar la factibilidad de usar las muestras para evaluar los recursos y la mineralización del sector. Junto a esto, se proyectan dos perfiles para indicar donde estaría alojada las zonas de bonanzas según nuestro muestreo. La Figura 5.39 ilustra una distribución de oro, concentrándose la mayor ley entre los 700 y 870m.s.n.m. Para el caso de la plata, puede verse en la Figura 5.40 como esta concentraría sus mayores leyes entorno a los 800m.s.n.m. y distribuye de manera discreta en profundidad.

Esta es una estimación e interpretación de los recursos de forma directa y simple, obviando mayores complejidades que pueda presentar el distrito, dado que no se maneja otra información.



**FIG. 5.40:** Perfil de transversal a la estructura que contiene Patagua y Don Leopoldo de las concentraciones de plata. Muestra enriquecimiento entorno a los 800m.s.n.m., seguido de zonas secundarias cada 100m en profundidad.

# Capítulo 6

## Discusiones y Conclusiones

Se expone de manera generica con la Figura 6.1 la preferencia de los elementos, metales, a ser transportados, captados o diluidos por el vapor. A la izquierda se exponen valores de las constante de partición entre vapor y magma en escala logarítmica de una serie de metales. Se puede observar comparativamente las constantes. Valores más altos para oro, plata luego plomo y por ultimo zinc. Esto indica la preferencia en el sistema para conservarse en el magma. De igual manera, en el lado derecho se exponen los valores de las constantes de partición entre vapor y liquido (no magma). En la recopilación de dato para confeccionar la gráfica derecha se puede observar que el plomo no esta presente, sin embargo se puede considerar similar al Zn y con una leve afinidad mayor a la fase vapor, teniendo el siguiente orden de preferencia de mayo a menor: Au mayor que el Pb, plomo similar al zinc, y zinc mayor a la plata, cuanto se trata de la relación vapor y liquido (ambos exsueitos del magma). Sin embargo, entre vapor y magma se tiene que el Oro prefiere el vapor en mayor afinidad que la Plata, la Plata mas que el Plomo, y el Plomo más que el Zinc.

Los volátiles en la geología presentan una distribución heterogénea, tanto en su presencia como en su abundancia, variando entre ambientes tectónicos e incluso bajo el mismo ambiente geológico pueden existir distribuciones heterogéneas. Ejemplo de esto es una distribución diferencial del azufre en las zonas de subducción, o del carbono en el manto superior o del agua bajo el arco magmático y su relación proximal, o la comparación entre los volátiles presentes en las emisiones volcánicas y los emitidos durante la fusión de corteza y manto en las zonas de subducción, donde puede hallarse una gran presencia de volátiles carbonatados mientras que en las emisiones volcánicas son escasos los niveles de estos gases, o esto mismo sucede con las concentraciones pero de manera inversa con gases como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . Destacamos la importancia de la subducción para reciclar volátiles entre manto y corteza; distribuyendo en partes iguales el  $\text{CO}_2$ , distribuyendo en razón 9:1 el S, y con nulo retorno de Cl al manto, sirviendo por tanto como una importante zona de transporte de  $\text{CO}_2$  a zonas superficiales. Los volátiles presentes en los magmas dependen desde sus inicios de formación, donde la composición de la fuente y el grado de fusión parcial y la composición y cristalinas del magma generado condicionan la presencia o ausencia de gases y su capacidad de contenerlos. Bajo esto, a modo general el volátil más abundante es el agua, y en segundo grado el  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ . Las concentraciones de metales en los magmas también son condicionadas por la fuente que origino el magma y el grado de fusión parcial. La relevancia de los magmas para la formación

de depósitos mineral se liga principalmente a los procesos durante su ascenso. Mientras un magma asciende puede sufrir por diferentes razones la densificación de sus volátiles disueltos y por consiguiente generar una fase gaseosa ( la que puede estar acompañada o no de una fase líquida). Esta separación de fases que sufre el magma conlleva un fraccionamiento de ligantes y metales entre magma, gas y/o líquido. Estas nuevas fases pueden pasar a conformar fluidos hidrotermales y por tanto el magma cumple su rol para el desarrollo de ellos y fomentar la formación de depósitos mineral. La distribución de los metales en el sistema se desarrolla principalmente por medio de complejos clorurados, sulfurados o hidróxidos o hidrácidos, dado que los ligantes más comunes, al menos para los metales evaluados; oro, plata, plomo, zinc, son: aniones de Cl, S, OH. La formación de los complejos para el oro, plata, plomo y zinc puede ser estudiada mediante ley ácido-base. Todos los estudios que se han desarrollado entorno al transporte de los complejos de metales han sido principalmente por 3 maneras: 1) Cálculos teóricos de ecuaciones y reacciones termodinámicas y fisicoquímicas que tendrían lugar en un sistema geológico dado, considerando la energía libre de Gibbs. 2) modelos de evolución de sistemas con condiciones controladas de composición, presión y temperatura en laboratorio, para luego realizar observaciones y cálculos de sus resultados. 3) mediante estudios directos de inclusiones fluidas, fundidas y asociaciones mineral de muestras geológicas naturales, haciendo uso principalmente de técnicas analíticas en los últimos años apoyado de observaciones petrológicas micro y macroscópicas.

Se destaca la importancia del vapor de agua y la presión para fomentar la captación y retención de complejos metálicos en la fase vapor, esto debido a la desnaturalización que sufre el enlace H-O-H y su consecuente disminución en la constante dieléctrica, lo que puede modificar hasta 7 ordenes de magnitud las concentraciones de metales transportados por medios de gaseosos . Los análisis de solubilidad de los metales en la fase de vapor son realizados a partir del coeficiente de partición o la constante de partición. Con ella se han obtenido que bajo un sistema con H<sub>2</sub>S la afinidad por la fase vapor comparativamente es: Au>Ag>Pb>Zn, y si el sistema tiene H<sub>2</sub>S con HS o solo HS, el orden de preferencia sería: Ag>Au>Pb>Zn. En todo lo estudiado el zinc es el que menos preferencia tiene. El plomo y el zinc tienen un comportamiento similar, mientras que el oro y la plata tienen un comportamiento más opuesto, a pesar de que ambos suelen formar complejos clorurados, sin embargo el oro se fracciona más en la fase gaseosa por complejos bisulfurados a las mismas temperaturas en que la plata prefiere la fase gaseosa como complejo clorurado, o dicho de otra forma, cuando ambos son transportados por complejos clorurados la preferencia por la fase vapor sucede a condiciones de temperaturas distintas (Figura 2.7). Por lo tanto las composiciones, los ligantes y las presiones y temperaturas, modifican sus preferencias. Esto últimos factores más, la fugacidades, el pH, y la presencia de vapor, influyen en la solubilidad y especiación de los complejos para los 4 metales. Se destaca la importancia del vapor de agua y la presión para fomentar la captación y retención de complejos metálicos en la fase gaseosa debido a la desnaturalización que sufre el enlace H-O-H y su consecuente disminución en la constante dieléctrica del agua. Su presencia puede modificar hasta 7 ordenes de magnitud las concentraciones de metales transportados por medios de gaseosos. Los complejos más neutros se ven más favorecidos a ser solubles producto de la disminución en la constante dieléctrica. Por ultimo destacar que varios de los estudios revisado apoyaron observaciones o conclusiones con resultados obtenidos de inclusiones fluidas o fundidas las cuales fueron analizadas mediante técnicas analíticas, aunque en un inicio se origino principalmente por observaciones petrográficas de las inclusiones presentes en muestras tomadas directamente de los depósitos mineral, hallándose la

presencia de inclusiones ricas en vapor con o sin mineral hijo en su interior y estando o no en coexistencia con inclusiones liquidas ( con o sin presencia de halita u otros mineral que sucitase una salmuera).

Aún no esta completa la comprensión para indicar niveles de solubilidad precisos con respecto a algún metal, por ende no se concluyen valores de solubilidad dado que se ha demostrado con el presente estudio que la solubilidad de un metal depende en primera instancia del complejo que domina la especie de dicho metal en el medio, y luego la relación multi-componente que existe en el sistema. Incluso se ha demostrado que valores esperados han sobre estimado o subestimado en varios ordenes las concentraciones esperadas en un sistema las cuales luego fueron comparadas por mediciones directas en inclusiones fluidas. Esto resalta la complejidad de la naturaleza y la mayor recomendación para realizar un estudio de exploración en busca de un metal en especifico considerando un estudio a partir de los volátiles, seria recopilar la información de concentraciones que se tenga de gases presentes en distintos depósitos que pueden representar la zona o el yacimiento explorado, y luego hallar en muestras en las inclusiones fluidas características similares o determinantes que sirvan de guía. Ejemplo: si se explora oro frente a un sistema que se cree mesotermal, recopilar la información sobre los datos de volátiles que se han obtenido en otros depósitos sistemas similares(en este caso mesotermal) para luego realizar análisis similares ( ya sea observaciones microscópicas, estudio de microtermometría, ramman, LA-ICP-MS, etc) y comparar resultados, similitudes, características, desigualdades, para hallar indicadores que sirvan para la exploración, como por ejemplo: la mayor cantidad de factores que pudieron influir en la solubilidad, extrapolar el complejo más probable, trabajar con el sistema multicomponente más acercado y dar con las condiciones de presión, temperatura, profundidad, estructural tal que posible la ubicación-zona- de la mineralización, precipitación, enriquecimiento.

La afinidad por preferir la fase gaseosa *versus* el fundido para los metales sigue el orden de: Au prefiere la fase gaseosa en mayor nivel que el Pb, el plomo a igual nivel que el Zn y el zin mayor que la Ag. Este comportamiento se ve manifestado en las muestras de Patagua donde las concentraciones de plomo y zinc distribuyen preferente a sectores con inclusiones fluidas ricas en fase vapor. El caso del oro y la plata es similar, aunque estos metales presenten hasta 3 grados de diferencia en concentración (Figura 5.29 Figura 5.30). Esta relación en la distribución de metales da cuenta de las condiciones que experimento la evolución del fluido hidrotermal, modificándose pequeñas variables como podrían ser temperatura o pH, dado que si el oro y la plata son transportados por un mismo fluido, el oro se fracciona más en la fase gaseosa por complejos bisulfurados a las mismas temperaturas en que la plata prefiere la fase gaseosa como complejo clorurado, o dicho de otra forma, cuando ambos son transportados por complejos clorurados la preferencia por la fase vapor sucede a condiciones de temperaturas distintas. Cambios en las concentraciones de azufre generaría modificaciones en la afinidad por fase vapor entre Au y Ag.

Si los metales precipitan a partir del mismo evento, flujo hidrotermal, implica que los mecanismos que desestabilizan los complejos son los mismos para cada metal. Retomando la información de inclusiones fluidas y texturas, es posible aludir a procesos de ebullición y/o despresurización rápida como los mecanismos principales que generan la separación de fases de vapor y las condiciones para que se acarre, acumule, transporte y precipite oro y plata, en los niveles específicos: 600m.s.n.m y 825m.s.n.m. y 900m.s.n.m.

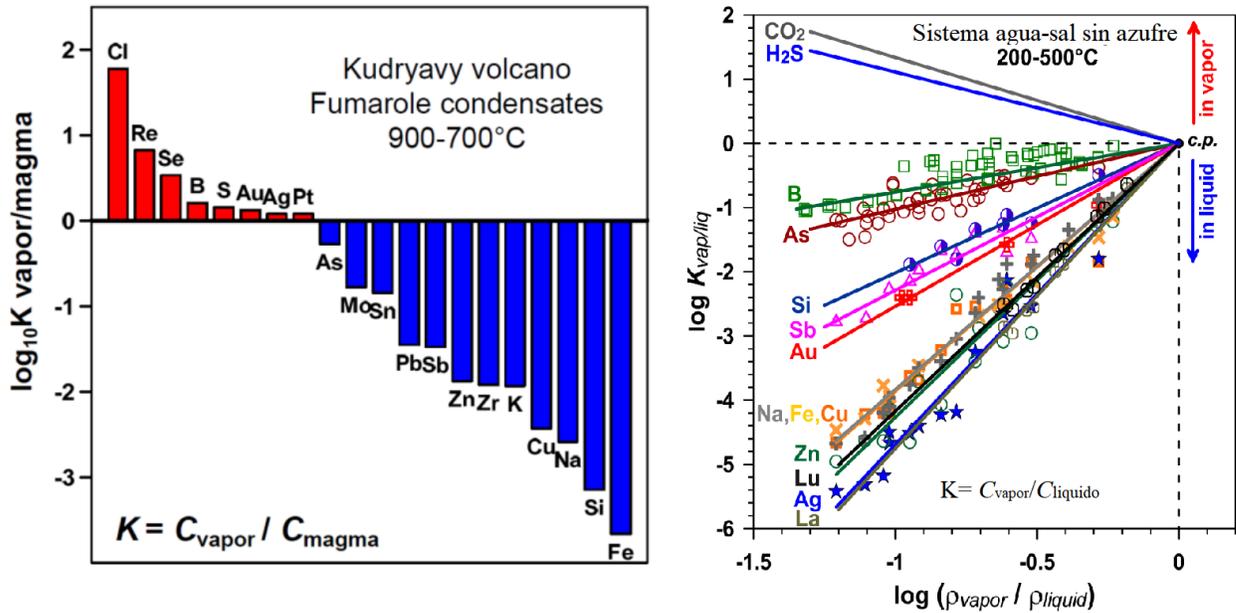


FIG. 6.1: Lado izquierdo representa la recopilación de valores de coeficientes de partición entre vapor y magma obtenido para cada elementos químico expuesto. Las mediciones se tomaron en las fumarolas condensadas, rocas o lavas del volcán Kudryavy. Gráfica derecha se trafican mediciones del coeficiente de partición de metales y metaloides entre dos fases (vapor y liquido) en equilibrio bajo un sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-KCl-HCl en función de la temperaturas entre 250 y 450°C representada mediante la razón de densidad entre vapor y liquido. Tomadas y modificadas de Pokrovski et al. (2013, 2008)

Las petrografía de las muestras de Alhué evidencian mínimo 3 eventos de pulsos hidrotermales (incluso muestras con 5 o más eventos) que caracterizarían la evolución del sistema. Un primer evento genera la alteración propilítica característica en el sistema, un segundo evento origina las vetas de cuarzo y brechización de las muestras, y un tercer evento que reactiva estos canales. Esto es en su situación mínima. Lo relevante es la diferencia entre dos fluidos hidrotermales presentes en el sistema, donde existe uno que presenta texturas feathery, flomboyant, jigsaw y crustiforme (con varias bandas) caracterizado por la presencia de inclusiones fluidas ricas en vapor, liquido y vapor, en menor medida liquido, y liquido con presencia de solidos. Un segundo fluido relacionado con texturas comb, zonal, masiva, que suelen presentar mayor cantidad de inclusión ricas en liquido. Estas aperturas, fracturas y reactivaciones estarían asociadas a la relación entre las presiones litoestaticas y presiones hidráulica. El escenario más drástico es la brechización de la roca. Luego esta la formación y reactivación de vetas con diferente grado de sinuosidad en las que se suele hallar textura colofome o masiva macroscopicamente. Por lo tanto, el sistema se caracteriza por la presencia de inclusiones fluidas ricas en volátiles, con una evolución de: evento 1 rica en liquido (L), evento 2 rica en L+V o V, y un evento 3 rica en vapor (V).

El sistema de vetas polimetálicas Patagua y Don Leopoldo se halla entre dos grandes fallas N-S. Estas estructuras polimetálicas presentan zonación de metales bases. Se ha observado que el sector entorno a los 800m.s.n.m es una ubicación importante de trampa para bonanza. Esto ultimo indica que el principal control es el estructural. Tan solo Patagua presenta una correlación entre la presencia de inclusiones fluidas ricas en liquido + vapor y texturas que evidenciarían procesos de ebullición. Este ultimo evento de ebullición, o limite inferior, se hallaría entorno a los 700 m.s.n.m. Figura 5.31 A los 825-875 m.s.n.m. Don Leopoldo e

Intersección, presentan una correlación de alta presencia de inclusiones fluida ricas en vapor y muestras con texturas que no evidencian ebullición. Esto podría representar más procesos de flashing. Este flashin en la veta de Don Leopoldo tendría su lugar más profundo en los 800 m.s.n.m, Figura 5.32 sin embargo en la zona de Intersección, se llegaría a los 600m.s.n.m, es decir, un espacio de 200 metros de diferencia en el evento Figura 5.33. Vale destacar la abundancia de inclusiones fluidas de vapor en zonas de intersección, sin evidencia de ebullición. Indicando la importancia de sectores donde hay espacio, abertura, y por consiguiente, expansión, despresurización.

Específicamente las muestras con mayor concentración, confeccionadas como doble pulida, se asocian a texturas de ebullición y presencia de vapor. Con toda la información recopilada en los capítulos 2 y 3, junto con las observaciones generadas en el capítulo 5, puede concluirse que: el trabajo de estos conocimientos aplicado en dos vetas polimétricas del distrito minero Alhué (Patagua y Don Leopoldo) produce: (i) Estructuras mayores conectadas a las vetas son partícipe de una configuración tectónica. (ii) Marcada presencia de volátiles evidenciado por abundantes inclusiones fluidas ricas en vapor y/o líquidas coexistiendo con vapor. (iii) Marcada distribución de texturas que indican procesos de separación de fase gaseosa (ebullición y/o *flashing*). (iv) Relación espacial positiva entre punto (ii), (iii), y las concentraciones de metales. (v) Se mantiene la relación de partición de metales entre Pb y Zn, también entre Au y Ag. (vi) La presencia de esfalerita indica mayor concentraciones de plata y metales bases. (vii) El sector presenta 3 procesos principales: 1ero rico en líquido (alteración), 2do rico en volátiles (mineralización) y 3ero rico en volátiles (remueve o aporta nueva mineralización, precipitación). Se concluye la importancia de los volátiles. Cabe señalar que falta aclarar la evolución del sistema bajo una perspectiva trifásico donde exista la relación entre agua, salinidad y dióxido de carbono con respecto a cada evento postulado. Junto con comprender como influyen los volátiles bajo condiciones de deformación dúctil.

# Bibliografía

- Abzalov, M., 2016. Lode gold deposits, in: *Applied Mining Geology*. Springer, pp. 379–390.
- Adams, S.F., 1920. A microscopic study of vein quartz. *Economic Geology* 15, 623–664.
- Akinfev, N., Zotov, A., 1999. Thermodynamic description of equilibria in mixed fluids (h<sub>2</sub>O-non-polar gas) over a wide range of temperature (25–700 c) and pressure (1–5000 bars). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 2025–2041.
- Allan, M.M., Yardley, B.W., Forbes, L.J., Shmulovich, K.I., Banks, D.A., Shepherd, T.J., 2005. Validation of la-icp-ms fluid inclusion analysis with synthetic fluid inclusions. *American Mineralogist* 90, 1767–1775.
- Álvarez, R., García-Marín, Á., Ilabaca, S., 2018. Commodity price shocks and poverty reduction in Chile. *Resources Policy* .
- Bakker, R., Diamond, L.W., 2000. Determination of the composition and molar volume of h<sub>2</sub>O-co<sub>2</sub> fluid inclusions by microthermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 1753–1764.
- Ballhaus, C., 1993. Redox states of lithospheric and asthenospheric upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 114, 331–348.
- Barley, M., Groves, D., 1992. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time. *Geology* 20, 291–294.
- Berkési, M., Hidas, K., Guzmics, T., Dubessy, J., Bodnar, R.J., Szabó, C., Vajna, B., Tsunogae, T., 2009. Detection of small amounts of h<sub>2</sub>O in co<sub>2</sub>-rich fluid inclusions using Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy: An International Journal for Original Work in all Aspects of Raman Spectroscopy, Including Higher Order Processes, and also Brillouin and Rayleigh Scattering* 40, 1461–1463.
- Bodnar, R., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D., Steele-MacInnis, M., 2014. 13.5—fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Treatise on Geochemistry, Second Edition* 13th edn. Elsevier, Oxford , 119–142.
- Botcharnikov, R.E., Holtz, F., Behrens, H., 2007. The effect of co<sub>2</sub> on the solubility of h<sub>2</sub>O-cl fluids in andesitic melt. *European Journal of Mineralogy* 19, 671–680.
- Boyle, R., 1969. Hydrothermal transport and deposition of gold. *Economic Geology* 64, 112–115.
- Burke, E.A., 2001. Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos* 55, 139–158.
- Burnham, C.W., 1979. Magmas and hydrothermal fluids. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* . , 71–136.
- Camus, F., 1990. The geology of hydrothermal gold deposits in Chile. *Journal of Geochemical Exploration* 36, 197–232.
- Candela, P.A., 1991. Physics of aqueous phase evolution in plutonic environments. *American*

- Mineralogist 76, 1081–1091.
- Candela, P.A., 1997. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles, and ore metals. *Journal of petrology* 38, 1619–1633.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the andean orogen in Chile, in: *The geology of Chile*, pp. 21–114.
- Chi, G., Dubé, B., Williamson, K., Williams-Jones, A.E., 2006. Formation of the Campbell-Red Lake gold deposit by H<sub>2</sub>O-poor, CO<sub>2</sub>-dominated fluids. *Mineralium Deposita* 40, 726.
- Cotton, W.B., 1998. Geology and ore deposits of the Maqui vein, Alhué mining district, Coast Range of Central Chile. Ph.D. thesis. University of Colorado.
- Cuadra, W., Dunkerley, P., 1991. A history of gold in Chile. *Economic Geology* 86, 1155–1173.
- Deicha, G., 1950. Essais par écrasement de fragments minéraux pour la mise en évidence d'inclusions de gaz sous pression. *Bulletin de Minéralogie* 73, 439–445.
- Deines, P., 1980. The carbon isotopic composition of diamonds: relationship to diamond shape, color, occurrence and vapor composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44, 943–961.
- Diamond, L.W., 2001. Review of the systematics of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluid inclusions. *Lithos* 55, 69–99.
- Diamond, L.W., Marshall, D.D., 1990. Evaluation of the fluid-inclusion crushing-stage as an aid in exploration for mesothermal gold-quartz deposits. *Journal of Geochemical Exploration* 38, 285–297.
- Ding, X., Harlov, D.E., Chen, B., Sun, W., 2018. Fluids, metals, and mineral/ore deposits. *Geofluids* 2018.
- Dong, G., Morrison, G., 1995. Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structural state and origin. *Mineralium Deposita* 30, 11–19.
- Dong, G., Morrison, G., Jaireth, S., 1995. Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication. *Economic Geology* 90, 1841–1856.
- Duan, Z., Møller, N., Weare, J.H., 1995. Equation of state for the NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> system: prediction of phase equilibria and volumetric properties. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 2869–2882.
- Dubessy, J., Poty, B., Ramboz, C., 1989. Advances in CO<sub>2</sub> fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *European Journal of Mineralogy* 1, 517–534.
- Eichinger, F., Meier, D., Hämmerli, J., Diamond, L., 2010. Stable isotope signatures of gases liberated from fluid inclusions in bedrock at Olkiluoto. Technical Report. Posiva Oy.
- Elderfield, H., Schultz, A., 1996. Mid-ocean ridge hydrothermal fluxes and the chemical composition of the ocean. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 24, 191–224.
- Ellis, A., 1959. The solubility of zinc sulfide in water at high temperatures. *Economic Geology* 54, 1035–1039.
- Etschmann, B., Liu, W., Mayanovic, R., Mei, Y., Heald, S., Gordon, R., Brugger, J., 2019. Zinc transport in hydrothermal fluids: On the roles of pressure and sulfur vs. chlorine complexing. *American Mineralogist* 104, 158–161.
- Eugster, H.P., 1985. Granites and hydrothermal ore deposits: a geochemical framework. *Mineralogical Magazine* 49, 7–23.
- Flores, H., 1948. Informe geológico sobre los yacimientos de la sociedad aurífera de Alhué.

- Dirección de Minas y Petróleo., Intern. Rep .
- Fournier, R.O., 1983. Silica minerals as indicators of conditions during gold deposition. US Geological Survey Bulletin , 15.
- Fournier, R.O., 1985. The behavior of silica in hydrothermal solutions. Review in Economic Geology, v. 2, 45–60.
- Frezzotti, M.L., Tecce, F., Casagli, A., 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. Journal of Geochemical Exploration 112, 1–20.
- Gana, P., Wall, R., 1997. Evidencias geocronológicas 40Ar/39Ar y K-Ar de un hiatus cretácico superior-eoceno en Chile central (33-33° 30'S). Andean Geology 24, 145–163.
- Garofalo, P.S., Ridley, J.R., 2014. Gold-transporting hydrothermal fluids in the earth's crust, Geological Society of London.
- Gebre-Mariam, M., Hagemann, S., Groves, D., 1995. A classification scheme for epigenetic archaean lode-gold deposits. Mineralium Deposita 30, 408–410.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. Lithos 233, 2–26.
- Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994. Fluid inclusion microthermometry .
- Gröpper, J., 2011. Franjas metalogénicas de edad jurásica y cretácica en la cordillera de la costa de Chile central, entre los 32° y los 35° 20' de latitud sur .
- Groves, D., Foster, R., 1991. Archaean lode gold deposits, in: Gold metallogeny and exploration. Springer, pp. 63–103.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore geology reviews 13, 7–27.
- Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L., 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits. Geoscience Frontiers 9, 1163–1177.
- Guha, J., Lu, H.Z., Dube, B., Robert, F., Gagnon, M., 1991. Fluid characteristics of vein and altered wall rock in archaean mesothermal gold deposits. Economic Geology 86, 667–684.
- Guillong, M., Pettke, T., 2012. Depth dependent element ratios in fluid inclusion analysis by laser ablation ICP-MS. Journal of analytical atomic spectrometry 27, 505–508.
- Hanna Castro, V., 2017. Evaluación de tecnologías hiperespectrales en la caracterización mineral de yacimientos para aplicaciones geometalúrgicas: Caso aplicado a mina Florida, Distrito Minero Alhué, Región Metropolitana, Chile .
- Heald, P., Foley, N.K., Hayba, D.O., 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits; acid-sulfate and adularia-sericite types. Economic geology 82, 1–26.
- Hedenquist, J.W., 1995. The ascent of magmatic fluid: discharge versus mineralization. Magmas, Fluids and Ore Deposits: Mineralogical Association of Canada Short Course Series 23, 263–289.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A., Gonzalez-Urrien, E., et al., 2000. Exploration for epithermal gold deposits. Reviews in Economic Geology 13, 45–77.
- Hedenquist, J.W., Lowenstern, J.B., 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. Nature 370, 519.
- Heinrich, C.A., Driesner, T., Stefánsson, A., Seward, T.M., 2004. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits.

- Geology 32, 761–764.
- Heinrich, C.A., Pettke, T., Halter, W.E., Aigner-Torres, M., Audétat, A., Günther, D., Hatendorf, B., Bleiner, D., Guillong, M., Horn, I., 2003. Quantitative multi-element analysis of minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass spectrometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67, 3473–3497.
- Helgeson, H.C., Garrels, R.M., 1968. Hydrothermal transport and deposition of gold. *Economic Geology* 63, 622–635.
- Hemley, J., Cygan, G., Fein, J., Robinson, G., d'Angelo, W., 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems; i, iron-copper-zinc-lead sulfide solubility relations. *Economic Geology* 87, 1–22.
- Henley, R., 1985. The geothermal framework of epithermal deposits. *Geology and geochemistry of epithermal systems*, 1–24.
- Herrington, R., Wilkinson, J., 1993. Colloidal gold and silica in mesothermal vein systems. *Geology* 21, 539–542.
- Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M., Brook, M., Pankhurst, R., Snelling, N., Drake, R., 1988. Granitoids of the coast range of central Chile: geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences* 1, 185–194.
- Hier-Majumder, S., Hirschmann, M.M., 2017. The origin of volatiles in the Earth's mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 18, 3078–3092.
- Hilton, D.R., Fischer, T.P., Marty, B., 2002. Noble gases in subduction zones and volatile recycling. *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry. Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 47, 319–370.
- Hirschmann, M.M., 2016. Constraints on the early delivery and fractionation of Earth's major volatiles from c/h, c/n, and c/s ratios. *American Mineralogist* 101, 540–553.
- Holloway, J.R., 1976. Fluids in the evolution of granitic magmas: consequences of finite CO<sub>2</sub> solubility. *Geological Society of America Bulletin* 87, 1513–1518.
- Holloway, J.R., Jakobsson, S., 1986. Volatile solubilities in magmas: Transport of volatiles from mantles to planet surfaces. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 91, 505–508.
- Hu, J., Duan, Z., Zhu, C., Chou, I.M., 2007. PVTx properties of the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl systems below 647 K: Assessment of experimental data and thermodynamic models. *Chemical Geology* 238, 249–267.
- Javoy, M., 1997. The major volatile elements of the Earth: Their origin, behavior, and fate. *Geophysical Research Letters* 24, 177–180.
- Johnson, J.W., Oelkers, E.H., Helgeson, H.C., 1992. SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of minerals, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bar and 0 to 1000 °C. *Computers & Geosciences* 18, 899–947.
- Kamenetsky, V.S., Kamenetsky, M.B., 2010. Magmatic fluids immiscible with silicate melts: examples from inclusions in phenocrysts and glasses, and implications for magma evolution and metal transport. *Geofluids* 10, 293–311.
- Kerrick, R., Wyman, D., 1990. Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: An association with accretionary tectonic regimes. *Geology* 18, 882–885.
- Krauskopf, K.B., 1964. The possible role of volatile metal compounds in ore genesis. *Economic Geology* 59, 22–45.
- Lamadrid, H., Moore, L., Moncada, D., Rimstidt, J., Burruss, R., Bodnar, R., 2017. Reassessment of the Raman CO<sub>2</sub> densimeter. *Chemical Geology* 450, 210–222.

- Li, P., Boudreau, A.E., 2019. Vapor transport of silver and gold in basaltic lava flows. *Geology* 47, 877–880.
- Li, T., Wu, G., Liu, J., Hu, Y., Zhang, Y., Luo, D., Mao, Z., 2015. Fluid inclusions and isotopic characteristics of the jiawula pb–zn–ag deposit, inner mongolia, china. *Journal of Asian Earth Sciences* 103, 305–320.
- Lin, J., Liu, Y., Yang, Y., Hu, Z., 2016. Calibration and correction of la-icp-ms and la-mc-icp-ms analyses for element contents and isotopic ratios. *Solid Earth Sciences* 1, 5–27.
- Lindgren, W., 1922. A suggestion for the terminology of certain mineral deposits. *Economic Geology* 17, 292–294.
- Liu, X., Lu, X., Wang, R., Zhou, H., 2012. Silver speciation in chloride-containing hydrothermal solutions from first principles molecular dynamics simulations. *Chemical Geology* 294, 103–112.
- Liu, Y., Hu, Z., Li, M., Gao, S., 2013. Applications of la-icp-ms in the elemental analyses of geological samples. *Chinese Science Bulletin* 58, 3863–3878.
- Liu, Y., Zhang, Y., Behrens, H., 2005. Solubility of h<sub>2</sub>o in rhyolitic melts at low pressures and a new empirical model for mixed h<sub>2</sub>o–co<sub>2</sub> solubility in rhyolitic melts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 143, 219–235.
- Lowenstern, J.B., 1994. Dissolved volatile concentrations in an ore-forming magma. *Geology* 22, 893–896.
- Lowenstern, J.B., 1995. Applications of silicate-melt inclusions to the study of magmatic volatiles. *Magmas, fluids, and ore deposits* 23, 71–99.
- Lowenstern, J.B., 2000. A review of the contrasting behavior of two magmatic volatiles: chlorine and carbon dioxide. *Journal of Geochemical Exploration* 69, 287–290.
- Martens, P., Rattmann, L., 2001. Mining and society: No mining, no future, in: XVII International Mining Congress and Exhibition of Turkey.
- McCuaig, T.C., Kerrich, R., 1998. P–t–deformation–fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews* 12, 381–453.
- McNair, H.M., Miller, J.M., Snow, N.H., 2019. *Basic gas chromatography*. John Wiley & Sons.
- Mikucki, E.J., 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in archaic lode-gold systems: A review. *Ore geology reviews* 13, 307–321.
- Moncada, D., Bodnar, R., 2012. Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the santa margarita vein in the guanajuato mining district, mexico. *Open Geosciences* 4, 300–309.
- Moncada, D., Mutchler, S., Nieto, A., Reynolds, T., Rimstidt, J., Bodnar, R., 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal ag–au deposits at guanajuato, mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 114, 20–35.
- Morrison, G.W., Jaireth, S., Guoyi, D., 1995. *Textural zoning in epithermal quartz veins*. Klondike Exploration Services.
- Nagaseki, H., Hayashi, K.i., 2008. Experimental study of the behavior of copper and zinc in a boiling hydrothermal system. *Geology* 36, 27–30.
- Nasi, C.P., Thiele, R., 1982. Estratigrafía del jurásico y cretácico de la cordillera de la costa, al sur del río maipo, entre melipilla y laguna de aculeo (chile central). *Revista geológica de Chile: An international journal on andean geology* , 81–99.
- Pearson, R.G., 1963. Hard and soft acids and bases. *Journal of the American Chemical*

- society 85, 3533–3539.
- Peters, S.G., 1993. Formation of oreshoots in mesothermal gold-quartz vein deposits: examples from queensland, australia. *Ore Geology Reviews* 8, 277–301.
- Peucker-Ehrenbrink, B., Hofmann, A., Hart, S., 1994. Hydrothermal lead transfer from mantle to continental crust: the role of metalliferous sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 125, 129–142.
- Piracés, R., 1976. Estratigrafía de la cordillera de la costa entre la cuesta el melón y limache, provincia de valparaíso, chile, in: *Congreso Geológico Chileno*, pp. A65–A82.
- Poblete, A.J., 2008. Geología, alteración y mineralización en los prospectos au-ag las bellas y don bernardo, comuna de alhue, región metropolitana. Universidad de Chile. Tesis pregado .
- Pokrovski, G.S., Akinfiev, N.N., Borisova, A.Y., Zotov, A.V., Kouzmanov, K., 2014. Gold speciation and transport in geological fluids: Insights from experiments and physical-chemical modelling. Geological Society, London, Special Publications 402, 9–70.
- Pokrovski, G.S., Borisova, A.Y., Bychkov, A.Y., 2013. Speciation and transport of metals and metalloids in geological vapors. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 76, 165–218.
- Pokrovski, G.S., Borisova, A.Y., Harrichoury, J.C., 2008. The effect of sulfur on vapor–liquid fractionation of metals in hydrothermal systems. *Earth and Planetary Science Letters* 266, 345–362.
- Portnyagin, M., Hoernle, K., Plechov, P., Mironov, N., Khubunaya, S., 2007. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (h<sub>2</sub>o, s, cl, f) and trace elements in melt inclusions from the kamchatka arc. *Earth and Planetary Science Letters* 255, 53–69.
- Quintana Brevis, K.A., et al., 2018. Caracterización petrográfica y calcigráfica de zona mina Este, distrito minero Alhúe. Ph.D. thesis. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas Departamento de . . . .
- Ramsey, M.H., Coles, B.J., Wilkinson, J.J., Rankin, A.H., 1992. Single fluid inclusion analysis by laser ablation inductively coupled plasma atomic emission spectrometry: quantification and validation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 7, 587–593.
- Ridley, J., Mikucki, E., Groves, D., 1996. Archean lode-gold deposits: fluid flow and chemical evolution in vertically extensive hydrothermal systems. *Ore Geology Reviews* 10, 279–293.
- Ridley, J.R., Diamond, L.W., 2020. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Economic Geology* 13, 141–162.
- Roedder, E., 1970. Application of an improved crushing microscope stage to studies of the gases in fluid inclusions. in. *Gas-und Flüssigkeitseinschlusse in Mineralien* . , 41–58.
- Roedder, E., 1977. Fluid inclusions as tools in mineral exploration. *Econ. Geol.* 72, 503–525.
- Roedder, E., 1979. Fluid inclusions as samples of ore fluids. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* .
- Roedder, E., 1984. Volume 12: Fluid inclusions. *Reviews in mineralogy* 12.
- Roedder, E., 1990. Fluid inclusion analysis—prologue and epilogue. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54, 495–507.
- Roedder, E., Bodnar, R., 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. *Annual review of earth and planetary sciences* 8, 263–301.
- Rosasco, G.J., Roedder, E., 1979. Application of a new raman microprobe spectrometer to nondestructive analysis of sulfate and other ions in individual phases in fluid inclusions in

- minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, 1907–1915.
- Rosasco, G.J., Roedder, E., Simmons, J.H., 1975. Laser-excited raman spectroscopy for nondestructive partial analysis of individual phases in fluid inclusions in minerals. *Science* , 557–560.
- Rosso, K., Bodnar, R., 1995. Microthermometric and raman spectroscopic detection limits of c02 in fluid inclusions and the raman spectroscopic characterization of c02. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 3961–3975.
- Salvi, S., Williams-Jones, A.E., 2003. Bulk analysis of volatiles in fluid inclusions. *Mineralogical Association of Canada, Short Course Series* 32, 247–278.
- Sander, M.V., Black, J.E., 1988. Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems; implications for fluid inclusion studies. *Economic Geology* 83, 1052–1060.
- Sander, R., 2014. Compilation of henry’s law constants, version 3.99. *Atmos. Chem. Phys. Discuss* 14, 29615–30521.
- Sano, Y., Williams, S.N., 1996. Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries. *Geophysical Research Letters* 23, 2749–2752.
- Schmidt, C., Bodnar, R., 2000. Synthetic fluid inclusions: Xvi. pvtx properties in the system h2o-nacl-co2 at elevated temperatures, pressures, and salinities. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 3853–3869.
- Seward, T., 1976. The stability of chloride complexes of silver in hydrothermal solutions up to 350 c. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 40, 1329–1341.
- Seward, T., 1993. The hydrothermal geochemistry of gold, in: *Gold metallogeny and exploration*. Springer, pp. 37–62.
- Seward, T., Williams-Jones, A., Migdisov, A., 2014. 13.2 the chemistry of metal transport and deposition by ore-forming hydrothermal fluids. *Treatise on geochemistry* , 29–57.
- Seward, T.M., 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37, 379–399.
- Shcherbina, V., 1972. Geochemistry of silver in oxidized zone of sulfidic deposits. *International Geology Review* 14, 1133–1137.
- Sibson, R.H., Robert, F., Poulsen, K.H., 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology* 16, 551–555.
- Simmons, S.F., Brown, K.L., 2006. Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit. *Science* 314, 288–291.
- Simmons, S.F., Christenson, B.W., 1994. Origins of calcite in a boiling geothermal system. *American Journal of Science* 294, 361–400.
- Simon, A.C., Frank, M.R., Pettke, T., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Heinrich, C.A., 2005. Gold partitioning in melt-vapor-brine systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 3321–3335.
- Stefánsson, A., Seward, T., 2004. Gold (i) complexing in aqueous sulphide solutions to 500 c at 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 4121–4143.
- Taran, Y.A., 2009. Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the kamchatka–kuril subduction zone. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73, 1067–1094.
- Thomas, H., 1958. *Geologia de la cordillera de la costa entre el valle de la ligua y la cuesta barriga (geology of the coastal cordillera between the la ligua valley and barriga hill)*. instituto de investigaciones geológicas. Santiago Bulletin 2.

- Thomassot, E., Cartigny, P., Harris, J., Viljoen, K.F., 2007. Methane-related diamond crystallization in the earth's mantle: stable isotope evidences from a single diamond-bearing xenolith. *Earth and Planetary Science Letters* 257, 362–371.
- Urabe, T., 1985. Aluminous granite as a source magma of hydrothermal ore deposits; an experimental study. *Economic Geology* 80, 148–157.
- Vergara, M., Levi, B., Nystrom, J.O., Cancino, A., 1995. Jurassic and early cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the coast range of central chile. *Geological Society of America Bulletin* 107, 1427–1440.
- Wall, R., Gana, P., Gutiérrez, A., 1996. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla: Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología.
- Wallace, P.J., 2005. Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *Journal of volcanology and Geothermal Research* 140, 217–240.
- Webster, J.D., 1997. Exsolution of magmatic volatile phases from cl-enriched mineralizing granitic magmas and implications for ore metal transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1017–1029.
- Weres, O., Yee, A., Tsao, L., et al., 1982. Equations and type curves for predicting the polymerization of amorphous silica in geothermal brines. *Society of Petroleum Engineers Journal* 22, 9–16.
- Whitney, J.A., 1988. The origin of granite: The role and source of water in the evolution of granitic magmas. *Geological Society of America Bulletin* 100, 1886–1897.
- Wieser, M., Schwieters, J., Douthitt, C., 2012. Multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Isotopic Analysis: Fundamentals and Applications Using ICP-MS*, 77–91.
- Wilkinson, J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55, 229–272.
- Williams-Jones, A., Migdisov, A., 2014. Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems. *Society of Economic Geologists* 18, 77–96.
- Williams-Jones, A.E., Bowell, R.J., Migdisov, A.A., 2009. Gold in solution. *Elements* 5, 281–287.
- Williams-Jones, A.E., Heinrich, C.A., 2005. 100th anniversary special paper: vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits. *Economic Geology* 100, 1287–1312.
- Wyllie, P.J., 1979. Magmas and volatile components. *American Mineralogist* 64, 469–500.
- Wyllie, P.J., 1995. Experimental petrology of upper mantle materials, processes and products. *Journal of Geodynamics* 20, 429–468.
- Wyllie, P.J., Huang, W.L., 1975. Peridotite, kimberlite, and carbonatite explained in the system cao-mgo-sio2-co2. *Geology* 3, 621–624.
- Wyllie, P.J., Ryabchikov, I.D., 2000. Volatile components, magmas, and critical fluids in upwelling mantle. *Journal of Petrology* 41, 1195–1206.
- Yardley, B.W., 2005. 100th anniversary special paper: metal concentrations in crustal fluids and their relationship to ore formation. *Economic Geology* 100, 613–632.
- Yardley, B.W., Bodnar, R.J., 2014. Fluids in the continental crust. *Geochemical Perspectives* 3, 1–2.

- Zajacz, Z., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Sanchez-Valle, C., 2012. The partitioning of sulfur and chlorine between andesite melts and magmatic volatiles and the exchange coefficients of major cations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 89, 81–101.
- Zajacz, Z., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Sanchez-Valle, C., Wälle, M., 2013. Solubility and partitioning behavior of au, cu, ag and reduced s in magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 112, 288–304.
- Zajacz, Z., Seo, J.H., Candela, P.A., Piccoli, P.M., Heinrich, C.A., Guillong, M., 2010. Alkali metals control the release of gold from volatile-rich magmas. *Earth and Planetary Science Letters* 297, 50–56.
- Zein, D.Y., Migdisov, A.A., Williams-Jones, A.E., 2011. The solubility of gold in h<sub>2</sub>o–h<sub>2</sub>s vapour at elevated temperature and pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 5140–5153.
- Zhang, M., Niu, Y., Hu, P., Anderson, J., Coates, R., 2009. Volatiles in the mantle lithosphere: modes of occurrence and chemical compositions. *The Lithosphere: Geochemistry, geology and geophysics*, Nova Science Publishers Inc, New York , 171–212.
- Zhang, Y., 1999. Exsolution enthalpy of water from silicate liquids. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 88, 201–207.
- Zhong, R., Brugger, J., Chen, Y., Li, W., 2015. Contrasting regimes of cu, zn and pb transport in ore-forming hydrothermal fluids. *Chemical Geology* 395, 154–164.
- Zhu, Y., An, F., Tan, J., 2011. Geochemistry of hydrothermal gold deposits: a review. *Geoscience Frontiers* 2, 367–374.

# Anexos

# Anexo A

Descripción de eventos, inclusiones fluidas y textura en  
Doble Pulidos

**TAB. 6.1:** Descripción de eventos (Parte 1). L: Líquido; V: Vapor; H: Halita; S: sólido; Txt: textura; Qz: cuarzo; spl: esfalerita; hmt: hematita; act: actinolita; ept: epidota; calc: calcita; grt: granate; gn: galena; py: pirita; ccp: calcopirita; vt: veta; prop: propilítica; alt: alteración; Dpa: Doble pulido con valor alto; DPb: Doble pulido con valor bajo; DPe: Doble pulido con esfalerita.

Muestra	Tipo	Temporalidad	Inclusiones Fluida	Textura mineral	Observación
DM 34	DPe	Evento 1	V, L+V, L en qz.	Jigsaw	Veta principal con reapertura
		Evento 2	V en spl L+V+H en qz	Jigsaw, feathery, flomboyant.	Reapertura con 5 series de FIAS paralelas.
DM 36	DPe	Evento 1	V rich en qz y spl	Coloforme, crustiforme, jigsaw, comb	Asociación jigsaw-feathery, jigsaw-moss, coloforme-feathery, coloforme-comb.
		Evento 2	L, L+V, V rich en qz	Moss, feathery, flomboyant.	Spl precipita en ambos eventos
DM 98	DPe	Evento 1	L rich en spl	Calcita masiva, ghost	Evento primario de precipitación de calcita y spl.
		Evento 2	V rich en spl	bladded, lattelite bladed, jigsaw	Evento secundario con remplazo y spl translucida
DM101	DPe	Evento 1	L en qz.	Jigsaw, druza, cockade,	Inclusiones primarias y secundarias en cuarzo y esfalerita. Primarias L, L+V. Secundarias L+V o multifasicas.
		Evento 2	L+V, L+V+H/S en spl	coloforme, moss, feathery y pseudo bladed.	
DM 113	DPe	Evento 1	L rich	Jigsaw,	Asociación mx grt+calc+qz
		Evento 2	V rich	Moss	Asociación mx spl+gn+hmt+qz+ept
DM 149	DPa	Evento 1	L, V rich en qz	Jigsaw, coloforme, moss, feathery.	Asociación mx qz+hmt+ept+op
		Evento 2	V rich en qz	Feathery, flomboyant, pseudo bladed.	Spl en veta de cuarzo reemplazando.
DM 150	Dpa	Evento 1	V rich en qz	Coloforme, jigsaw	Evento principal
		Evento 2	L+V, posible CO <sub>2</sub> en spl	Jigsaw, feathery	Reapertura pequeña.
		Evento 3	V rich en qz	Calcite Lattice Bladed	Precipitación de calcita en los eventos anteriores. Este evento corresponde al reemplazo.
DM 151	DPa	Evento 1	V rich en qz	Jigsaw	Brechización
		Evento 2	V rich en qz	Jigsaw, coloforme	Vetilleo
		Evento 3	L rich en spl	Spl masiva.	Precipitación posterior
DM 35	DPa	Evento 1	V rich, posible L + CO <sub>2</sub>	Cockade, feathery, jigsaw	Mucha py, algo de ccp + ept ¿act-calcita?
		Evento 2	V rich	Cockade, feathery, moss	
DM 113	DPa	Evento 1	L rich	Jigsaw,	Asociación mx grt+calc+qz
		Evento 2	V rich	Moss	Asociación mx spl+gn+hmt+qz+ept
DM 132	DPa	Evento 1	L rich	Comb	-
		Evento 2	L rich	Coloforme, comb	Posible precipitación de oro.
		Evento 3	L rich	Coloforme	-
DM 142	DPa	Evento 1	L rich	Coloforme, comb y jigsaw.	Veta con varios bandeamientos.
		Evento 2	V rich, posible CO <sub>2</sub>	Feathery, coloforme, cockade y posible moss	Asociado a la precipitación de opacos gn,py,spl
		Evento 3	L, V rich	Coloforme-jigsaw	Genera alteración con ept y py

**TAB. 6.2:** Descripción de eventos (Parte 2). L: Líquido; V: Vapor; H: Halita; S: sólido; Txt: textura; Qz: cuarzo; spl: esfalerita; hmt: hematita; act: actinolita; ept: epidota; calc: calcita; grt: granate; gn: galena; py: pirita; ccp: calcopirita; vt: veta; prop: propilítica; alt: alteración; Dpa: Doble pulido con valor alto; DPb: Doble pulido con valor bajo; DPe: Doble pulido con esfalerita.

Muestra	Tipo	Temporalidad	Inclusiones Fluida	Textura mineral	Observación
DM 37	DPb	Evento 1	V, L+V	Ghost bladed. Qz euhedral, crustiforme, comb y jigsaw	Brechización. Anteriormente se había generado alteración ept+calc+act. Se genera una reactivación y se produce recristalización y reemplazos.
		Evento 2	L rich	Crustiforme, jigsaw, y al centro comb.	En el centro pulso de fluido con bordes más sinuoso, fractura cristales anteriores.
DM 47	DPb	Evento 1	L rich	Comb, jigsaw y masivo	Alteración prop en fragmento de roca cortado por veta recta.
		Evento 2	L, V, L+V, L+V+H/S, posible CO <sub>2</sub>	Crustiforme, masivo, jigsaw, comb.	Brechización. Veta sinuosa. Precipita spl.
		Evento 3	L rich.	Drusa	Genera espaciación. Escasa presencia de spl.
DM 125	DPb	Evento 1	V rich en calcita. V rich en qz.	qz euhedral. Calcita masiva.	Sectores abierto. Coetaneo o posterior a una Alteración propilítica. Evento de abundante vapor.
		Evento 2	L rich	Crustiforme, masivo, jigsaw, comb y drusa.	Recristalización de procesos previos.
DM 129	DPb	Evento 1	sin inclusión	-	Alteración de toba: albitización.
		Evento 2	L rich	Jigsaw, drusa.	Vetilleo, propilítica mgt+ept+py
		Evento 3	V rich en qz. V rich en spl.	Crustiforme, jigsaw, feathery.	Brechización, precipita spl. Posterior hidrolisis. Hay spl verde y roja.
DM146	DPb	Evento 1	L rich. V rich, L+V	Crustiforme con borde jigsaw y hacia el centro comb.	Veta ancha con 3 pulsos en su interior. Abundante inclusiones fluidas que dan aspecto de suciedad.
DM148	DPb	Evento 1	L, V y L+V	Zonal, crustiforme, flomboyante, jigsaw, feathery.	Veta que sufre recristalización en el centro. Borde zonal>comb>flomboyante al centro. Evento 0 genero txt zonal.
DM 172	DPb	Evento 2	V rich	Jigsaw	Pequeño principalmente precipita ept.
		Evento 1	L+V en cockade	Cockade, masivo y jigsaw	Brechización por fracturamiento hidraulico.
		Evento 2	L, V	Crustiforme, jigsaw, comb	Toba>alt. prop. toba >brechización (py+ccp+gn+spl) >vt menores



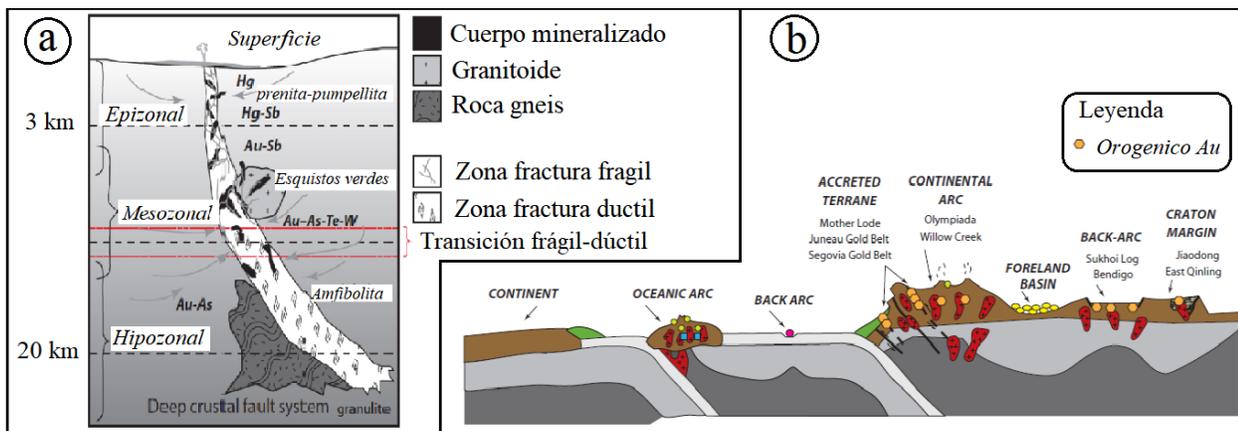
# Anexo B

## Geología de depósitos de oro orogénico

Diferentes nombres se han empleado para referirse a este tipo de yacimiento, estos son: oro en rocas verdes (*Greenstone gold*), oro masivo Arqueano (*Archean gold lode or lode-gold*), oro hospedado en zonas de cizalle (*Shear zone gold*), y oro orogénico (*Orogenic gold*). En el presente trabajo se hace referencia como Oro orogenico mesotermal a aquellos depósitos cuya clasificación esta asignada al nivel mesozonal de yacimientos de oro masivo arqueano en los cuales se presentan condiciones de presión y temperatura con respecto a la corteza. Estas condiciones particulares muestran una zonacion vertical en la formación del yacimiento con respecto a la temporalidad de los procesos tectónicos que han culminado y dejado una gradación metamórfica en la corteza ([Gebre-Mariam et al., 1995](#)). Esta zonación origina de menor a mayor grado una clasificación de epizonal, mesozonal y finalmente hipozonal, equivalente a sectores más someros a mas profundo en la corteza respectivamente.

En el sector mesozonal encontramos los depósitos mesotermales los cuales no están relacionado a eventos volcánicos recientes como es el caso de los depósitos epitermales. Estos últimos, a su vez, se clasifican principalmente según criterios geoquímicos de mineralización y alteración otorgadas por [Lindgren \(1922\)](#). Por otro lado, los depósitos de oro orogénico se ligan principalmente a características relacionadas con la corteza, con procesos tectónicos, acrecionales, o con la formación de orogenos, en otras palabras, asociado a las etapas finales de la evolución estructural de un sector generado por un evento geodinamico ([Gebre-Mariam et al., 1995](#); [Groves et al., 1998](#)).

En estos yacimientos el rango de temperatura se estima que va desde los 250°C a lo 475°C, con presiones de 1.5 a 3 kbar lo que equivale a 6 - 12 km de profundidad. Con mineralización en sistemas de vetas cuarzo-oro relacionadas a estructuras, estas presentan menos de 3-5 % de minerales sulfurados y menos de 5-15 % de minerales carbonatados. Pueden extenderse hasta 2 km sin mayor variación en su grado de mineralización (5 - 30 g/ton de oro o incluso menos) y/o alteración, la cual esta asociada principalmente a cuarzo, calcita, clorita, albita, turmalina, scheelita y mica blanca. Los fluidos presentan usualmente baja salinidad, con concentraciones de dióxido de carbono mayores al 5 %mol (hasta 30 %), en menor cantidad metano y nitrógeno, y alto nivel de Au, Ag, As, Sb, Te, W, Mo, y en menor medida Cu, Pb, Zn ([Groves and Foster, 1991](#); [Groves et al., 1998](#); [Kerrich and Wyman, 1990](#)). Esto se desarrolla en la zona de transición dúctil a frágil del comportamiento de la roca, asociado a fallas de alto ángulo, por lo que la presión litoestáticas junto con la hidroestáticas en función de los esfuerzos tectónicos juegan un rol importante ([Groves and Foster, 1991](#); [Kerrich and](#)



**FIG. 6.2:** Configuraciones geológicas de depósitos de oro Orogénico. (a) Perfil interno en su formación vertical del deposito oro orogénico. (b) perfil esquemático de la configuración tectónica y la ubicación donde se originan estos depósitos. Tomado y modificado de [Goldfarb and Groves \(2015\)](#)

[Wyman, 1990](#)).

La relación directa entre la estructura y la veta de cuarzo-oro se expresa en la importancia que tiene la activación y reactivación de la falla. Este ciclo produce cambios en las presiones del fluido, por lo que funciona como una válvula de presión para que los fluidos circulen por la estructura. Además, este dinamismo genera las condiciones para que se transporte y precipite el oro ([Sibson et al., 1988](#)). La reactividad de fallas individuales y/o conjugadas, en la zona de transición fragil-ductil y en los límites de las presiones litoestática, hidroestáticas y supralitoestática, enfatizan la génesis, o el rol, estructural de los yacimientos de oro orogénico. Esto se observa en su gran asociación con ambientes convergentes y procesos finales de terrenos acrecionados como de formación de orógenos ([Barley and Groves, 1992](#); [Kerrick and Wyman, 1990](#)). La conservación depende de la ubicación espacial con respecto a la parte interna del orógeno, conservándose en mayor grado si se desarrolla en los sectores periféricos. Además, aquellos depósitos desarrollados en el Arqueano o entre el Mesozoico y Holoceno, suelen preservarse mejor. En pocas palabras, es importante comprender el tiempo y el régimen tectónico de la zona de estudio ([Barley and Groves, 1992](#)). La figura ilustra la configuración tectónica del ambiente de formación de un depósito de oro orogénico y las características en su distribución vertical. En ella se puede observar la influencia de estructuras, orógenos, y la presencia de esquistos verdes en la zona mesozonal con diferentes relaciones de Oro y los elementos de Sb, Te, As, W.

El oro puede ser transportado como oro coloidal producto de la presencia de la sílice, por lo que las condiciones del fluido para el transporte y precipitación de oro se entienden a partir de la comprensión de los procesos que sufre la sílice. Este mecanismo de transporte mediante la sílice explicaría el por qué puede extenderse una mineralización de oro depositado entre los agregados cristalinos y amorfos del cuarzo, en las vetas de cuarzo, por cientos de metros hasta 2 kilómetros ([Herrington and Wilkinson, 1993](#)). Específicamente, cuando el oro es transportado como oro coloidal es protegido por los coloides de sílice hasta que estos pierden su estabilidad. Esto sucede entorno a los 410°C y la zona de transición dúctil a frágil. En dichas condiciones los complejos clorurados y sulfurados pierden efectividad por no ser condiciones estables. Cuando los coloides de sílice van precipitándose como cuarzo o cuarzo amorfo, se va

desestabilizando el transporte de oro coloidal y este comienza a interactuar químicamente con las superficies existentes para nuclear y precipitar (Herrington and Wilkinson, 1993). Esto vuelve importante poder identificar procesos de re-cristalización del cuarzo pues indicaría eventos posteriores y no las condiciones iniciales a las cuales precipitó el oro coloidal de manera intersticial.

Esta relación entre evento estructural, procesos de fluidos, precipitación y texturas de cuarzo con respecto a la mineralización de oro, se manifiesta en los trabajos de Peters (1993) y Groves et al. (2018). Estos muestran como las texturas de cuarzo están directamente asociadas a los procesos tectónicos (ciclos de activación), pudiendo generarse la consecuente sobre imposición de texturas con respecto a las evidencias texturales de los eventos principales de mineralización. También se evidencia la gran importancia de los sectores estructurales más amplio, ya sea por dilatación, por intersección de estructuras (en 70° de ángulo) o generados por contactos, estos lugares son los espacios donde los fluidos hallan un cambio de presión, por consiguiente son desestabilizados y concentra la precipitación.

En aspectos geoquímicos, isotópicos, para caracterizar las vetas o los fluidos mineralizadores de oro orogénico mesotermal, se tienen trabajos como Guha et al. (1991); McCuaig and Kerrich (1998); Mikucki (1998); Ridley et al. (1996); Ridley and Diamond (2020). En ellos se observa una escasa variación de las razones  $H_2O/CO_2$  en la zona de mineralización, y que varía con respecto a los sectores sin mineralización o alteración asociada a la mineralización. Evidencia que solo reacciona una pequeña porción del fluido con respecto a la roca caja y en un halo de alteración de corta distancia. De igual forma los rangos de valores de isótopos de oxígeno evidencian poca evolución de los fluidos con respecto a la fuente, con diferencias notorias en salinidad y otros componentes con respecto a los demás depósitos de oros (pórfidos, skarn, carlin, etc). Destacan los isótopos y concentraciones de los siguientes elementos para caracterizar estos yacimientos y guiar su exploración: Ba, Sr, Na, S, Cu, Pb, O (Ridley and Diamond, 2020). Se puede utilizar para trazar la fuente: oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, halógenos y carbono, con criterio. Se recomiendan grillas de 20 metros x 20 metros para explorar estos tipos de depósitos (Abzalov, 2016).



# Anexo C

## Breves antecedentes de estudios en el distrito minero Alhué

Camus (1990) en su estudio de los depósitos de oro en Chile, sugieren que Alhué está relacionado con el arco y los eventos magmáticos del Cretácico Superior al Terciario Inferior. Cotton (1998) describe que todas las rocas y vetas en el distrito de Alhué son cortadas por diques subvolcánicos andesíticos a basáltico con edades Cretácicas entorno a los 83 Ma. Las vetas presentan significativo control estructural, donde vetas más profundas subyacen a estructuras principales mineralizadas, todas con similar orientación. Este sector más profundo representarían las etapas previas a la mineralización principal. Indica que las temperaturas estarían entre rangos de condiciones epitermales hasta tipo skarn (200°C-400°C, con promedio de 310°C).

Araya (2001) realiza una evaluación en el distrito minero Alhué sobre la mineralización indicando que el oro se presenta como electrum en cuarzo, libre o asociado a sulfuros, además evalúa condiciones de temperatura y salinidad de 2 vetas del distrito a partir de inclusiones fluidas y obtiene valores de Th entre 218 – 322°C con un promedio de 257°C y una salinidad de 4wt. % NaCl eq. en ambas.

Sepúlveda (2004) reporta de datos de micro termometría de inclusiones fluidas para la veta Lorena del distrito temperaturas de homogeneización entre 169 – 478°C y salinidades del 35 -52 wt % NaCl. También reporta asociaciones de inclusiones fluidas que sugerirían estar en la raíz de un pórfido.

Poblete (2008) realiza un estudio a escala más distrital definiendo una franja epitermal - mesotermal vetiforme polimetálica en oro y plata en la cual posiciona el distrito minero Alhué y lo define como mesotermal. Además le asocia procesos de ebullición ocurridos bajo presión hidrostática.

Herrero (2009) centra su estudio en una veta del distrito minero de Alhué, resaltando la diversidad de eventos hidrotermales sobre impuestos que esta evidencia. Sugiere por lo menos 3 eventos de fluidos con composiciones variables y temperaturas entre 140-410°C y salinidad entre 0.9 a 39wt. % NaCl eq. Sugiere una canalización estructural de los fluidos con dirección NW, junto a una zonación mineralógica de origen hidrotermal e indicativo de una transición de condiciones meso termales a epitermal.

Yamana Gold (2018) en su reporte anual indica que Minera La Florida, ubicada en el

distrito minero de Alhué, obtuvo una productividad de Au de 82k oz., y que esperan tasas de minería más altas en la zona de Pataguas, con una producción general que mejore moderadamente con respecto al 2018. Dicho año, Minera La Florida evaluó exclusivamente sus minerales de reservas con valores de 1200 oz. de Au y Ag a 5.87 y 41. G/t, con lo que sugirieron un contenido de 228oz. y 1592oz. respectivamente.

Gómez (2019) reporta una gran variedad en los resultados de micro termometría de inclusiones fluidas para 3 vetas del distrito minero Alhué, con sus salinidades y sus temperatura de homogeneización. Propone un fuerte control estructural en la mineralización, que influye en los mecanismo de precipitación, sugiriendo que son principalmente “ebullición rápida y lenta”. Establece que las características de estas 3 vetas están más asociadas a un depósito de carácter mesotermal, mesozonal, proponiendo una evolución con eventos de descompresión, desgasificación y ebullición.

Maldonado (2019) caracteriza la veta Las Pataguas a partir de un estudio petrográfico de inclusiones fluidas y textura mineral. Define 4 tipos de inclusiones: (1) Ricas en vapor. (2) Coexistencia liquido y vapor. (3) Ricas en liquido. (4) Inclusiones trifásicas o más (asociada usualmente a la presencia de halita con liquido y con burbuja). Más del 70 % de las muestras presentan inclusiones ricas en vapor. Establece que en el 80 % de las muestras presentan texturas de ebullición. Predomina cuarzo comb y zonal, así como calcita rombica. Indica que textura crustiforme es posterior a la textura coliforme. Esta ultima se presenta sobre los 770m.s.n.m. Asocia el mineral electrum a la textura jigsaw. Propone eventos sobre los 350°C, incluso hasta 470°C. Cree que es más característico de una veta de oro mesozonal, con calcita hojosa como referente de un nivel de ebullición, sin embargo propone como principal mecanismo de precipitación de mena la despresurización (*flashing*).

Hess (2019) caracteriza la veta Don Leopoldo a partir de un estudios de petrografía de inclusiones fluidas y textura mineral. Reconoce que la alteración propilitica y argilica es predominante en todo el sistema. Define 4 tipos de inclusiones: (1) Ricas en liquido. (2) Inclusiones con Halita. (3) Inclusiones ricas en Vapor. (4) Vapor y primarios. Casi no reconoce I.F primarias. Las inclusiones con halita predominan entre los 950 y 850m.s.n.m. Las texturas predominante son cuarzo jigsaw y calcita rombica. Concluye que la veta muestra características mesotermal y epitermal, que el Au es transportado a partir de complejos clorurado y sulfurado, y cree que la **ebullición** es un mecanismo para la precipitación, con mezcla de fluidos.

# Anexo D

Tabla con ubicación espacial y datos geoquímicos de las muestras

Sample ID	Veta	DH_East	DH_North	depth	Log Au	Log Ag	Log Zn	Log Pb	Log Cu
DM-1	Patagua	316402,1	6235845,8	876,1	0,24	0,60	0,17	-1,29	-1,44
DM-10	Patagua	316538,8	6235768,7	832,3	-0,27	0,00	-1,23	-1,68	-2,11
DM-100	Patagua	316295,3	6235793,8	743,0	0,07	1,04	0,64	0,08	-0,73
DM-101	Patagua	316294,6	6235790,5	739,5	0,01	1,18	0,89	0,48	-0,77
DM-102	Patagua	316304,6	6235839,3	791,5	-1,43	-0,30	-1,16	-1,80	-1,92
DM-103	Patagua	316315,5	6235895,8	853,6	-1,37	0,62	-1,22	-0,54	-2,06
DM-104	Patagua	316313,9	6235887,5	844,6	-1,66	-0,30	-1,30	-1,89	-2,55
DM-105	Patagua	316313,8	6235886,8	843,8	-1,68	-0,30	-1,41	-1,57	-2,21
DM-106	Patagua	316313,7	6235886,3	843,2	-2,00	-0,30	-1,37	-1,60	-1,90
DM-107	Patagua	316313,3	6235884,3	841,1	0,29	1,63	0,43	0,37	-1,17
DM-108	Patagua	316314,0	6235887,9	844,9	0,28	0,70	-0,46	-0,84	-1,86
DM-109	Patagua	316290,5	6235929,8	919,6	-0,98	0,30	-1,64	-1,59	-2,21
DM-11	Patagua	316541,8	6235773,8	827,2	-1,22	0,00	-1,74	-2,00	-2,07
DM-110	Patagua	316290,1	6235928,9	918,7	-1,00	0,30	-1,60	-1,66	-2,49
DM-111	Patagua	316288,8	6235926,1	916,1	-1,12	-0,30	-1,74	-1,96	-2,60
DM-112	Don leopoldo	316424,1	6235722,0	873,5	0,23	0,60	-1,04	-1,66	-2,23
DM-113	Don leopoldo	316424,2	6235722,3	873,2	0,09	1,58	-0,20	-1,15	-1,40
DM-114	Don leopoldo	316424,3	6235722,5	872,8	-1,04	0,00	-0,97	-1,48	-1,09
DM-115	Don leopoldo	316427,7	6235730,6	861,8	-1,60	-0,30	-1,90	-2,32	-2,15
DM-116	Don leopoldo	316426,2	6235727,2	866,5	-1,66	-0,30	-1,77	-2,15	-2,39
DM-117	Don leopoldo	316384,4	6235762,8	884,3	-0,27	0,60	-1,21	-1,40	-1,62
DM-118	Don leopoldo	316384,5	6235764,3	882,7	-0,60	-0,30	-1,20	-1,37	-1,86
DM-119	Don leopoldo	316384,8	6235766,5	880,4	-0,82	-0,30	-1,48	-1,85	-2,37
DM-12	Patagua	316544,5	6235778,4	822,6	-1,21	0,00	-0,80	-1,74	-1,83
DM-120	Don leopoldo	316384,9	6235767,2	879,7	-0,59	-0,30	-2,15	-1,85	-2,72
DM-121	Don leopoldo	316385,1	6235768,7	878,1	-1,41	-0,30	-1,66	-2,15	-2,24
DM-122	Don leopoldo	316384,4	6235763,4	883,6	-0,04	1,08	-0,12	-0,33	-0,96
DM-123	Don leopoldo	316384,7	6235765,6	881,4	-0,61	0,00	-1,64	-1,74	-2,04
DM-124	Patagua	316542,3	6235768,7	724,1	-1,85	0,30	-1,96	-2,30	-1,90

DM-125	Patagua	316543,4	6235770,3	721,5	-2,05	0,00	-0,67	-1,34	-1,69
DM-126	Patagua	316544,2	6235771,5	719,6	-1,85	0,48	-1,08	-1,37	-2,39
DM-127	Patagua	316545,3	6235773,0	717,1	-2,10	0,30	-1,72	-2,05	-2,46
DM-128	Patagua	316541,9	6235768,1	725,2	-2,22	-0,60	-1,90	-2,19	-2,31
DM-129	Patagua	316536,2	6235759,9	738,4	-1,07	-0,60	-0,63	-1,39	-2,43
DM-13	Patagua	316544,5	6235778,4	822,6	-1,21	0,00	-0,80	-1,74	-1,83
DM-130	Don leopoldo	316476,6	6235660,4	905,5	-0,86	0,70	-0,91	-2,00	-2,04
DM-131	Don leopoldo	316476,7	6235660,8	904,9	0,64	1,08	-0,66	-1,07	-1,53
DM-132	Don leopoldo	316476,7	6235660,8	904,9	0,64	1,08	-0,66	-1,07	-1,53
DM-133	Don leopoldo	316477,1	6235661,5	903,6	-0,65	0,95	-0,69	-1,16	-1,21
DM-134	Don leopoldo	316477,4	6235662,0	902,8	-0,50	1,08	-0,61	-1,15	-1,10
DM-135	Don leopoldo	316478,2	6235663,4	900,4	-0,57	0,30	-0,70	-1,11	-1,04
DM-136	Don leopoldo	316478,7	6235664,5	898,7	-1,12	0,26	-1,26	-1,48	-1,39
DM-137	Patagua	316151,8	6235900,7	606,9	-0,91	-0,30	-1,27	-1,31	-2,17
DM-138	Patagua	316146,0	6235896,4	595,7	0,06	0,52	-0,23	-0,01	-1,43
DM-139	Patagua	316145,3	6235895,8	594,3	-0,54	0,59	-0,27	0,06	-1,37
DM-14	Patagua	316545,0	6235779,3	821,7	-1,33	0,30	-1,59	-2,10	-1,98
DM-140	Patagua	316142,6	6235893,8	589,0	-1,28	0,41	-0,66	-0,84	-1,60
DM-141	Don leopoldo	316437,8	6235728,7	901,9	0,50	1,23	0,17	-1,07	-1,00
DM-142	Don leopoldo	316437,8	6235728,7	901,9	0,50	1,23	0,17	-1,07	-1,00
DM-143	Don leopoldo	316437,3	6235725,2	905,4	-0,92	0,30	-1,06	-1,39	-2,15
DM-144	Don leopoldo	316437,4	6235725,9	904,7	-0,93	0,48	-1,14	-1,41	-2,44
DM-145	Don leopoldo	316438,2	6235731,5	899,0	-1,46	-0,22	-1,97	-2,26	-2,30
DM-146	Don leopoldo	316438,4	6235732,9	897,6	-1,60	-0,60	-1,97	-2,35	-2,52
DM-147	Don leopoldo	316438,6	6235734,3	896,1	-2,60	-0,60	-2,11	-2,60	-2,82
DM-148	Don leopoldo	316438,7	6235735,3	895,1	-1,59	-0,60	-2,04	-2,46	-2,44
DM-149	Patagua	316456,3	6235828,9	803,0	1,27	1,00	0,56	0,17	-1,66
DM-15	Patagua	316545,4	6235779,9	821,1	-1,26	0,00	-1,60	-1,68	-1,92
DM-150	Patagua	316456,4	6235829,4	802,5	1,62	1,40	0,52	0,54	-1,15
DM-151	Patagua	316456,4	6235829,4	802,5	1,62	1,40	0,52	0,54	-1,15
DM-152	Don leopoldo	316424,6	6235689,5	830,4	-0,77	0,00	-1,57	-1,99	-1,91
DM-153	Don leopoldo	316424,6	6235690,2	829,1	-0,98	0,32	-1,49	-1,78	-2,12
DM-154	Don leopoldo	316424,6	6235691,0	827,6	-0,27	0,20	-0,92	-1,14	-1,57
DM-156	Don leopoldo	316424,5	6235694,3	821,1	-1,57	-0,60	-1,96	-2,28	-2,18
DM-157	Don leopoldo	316424,5	6235693,6	822,4	-1,40	-0,60	-1,88	-2,15	-2,25
DM-158	Don leopoldo	316424,5	6235694,7	820,2	-1,17	-0,60	-1,63	-1,70	-2,22
DM-159	Don leopoldo	316424,5	6235695,2	819,3	-0,28	-0,60	-1,58	-1,87	-1,67
DM-16	Patagua	316548,8	6235785,8	815,3	-0,14	0,30	-0,46	-1,26	-1,28
DM-160	Pat/D.Leo	316422,0	6235804,7	594,9	-0,27	0,85	-0,71	-0,94	-1,08
DM-161	Pat/D.Leo	316422,0	6235805,1	594,0	-0,85	0,67	-1,04	-1,43	-0,70
DM-162	Pat/D.Leo	316422,0	6235805,7	592,7	-0,97	0,49	-1,11	-1,34	-1,24
DM-163	Pat/D.Leo	316422,1	6235807,1	589,9	-0,32	0,32	-0,76	-0,90	-1,42
DM-164	Pat/D.Leo	316422,1	6235807,7	588,7	-0,95	0,41	-0,27	-0,77	-1,32
DM-165	Pat/D.Leo	316422,1	6235808,8	586,6	-1,51	-0,60	-1,79	-1,78	-2,74
DM-166	Pat/D.Leo	316422,1	6235809,2	585,7	-1,85	-0,60	-1,76	-2,08	-2,37
DM-167	Pat/D.Leo	316422,1	6235809,7	584,8	-1,92	-0,60	-1,92	-2,18	-2,82

DM-168	Patagua	316535,5	6235776,0	882,1	-1,59	-0,60	-1,76	-2,05	-2,13
DM-169	Patagua	316535,8	6235776,5	881,6	-1,19	-0,15	-1,76	-2,25	-2,43
DM-17	Patagua	316549,2	6235786,4	814,6	-0,13	0,85	-0,62	-0,32	-1,75
DM-170	Patagua	316536,3	6235777,4	880,8	-1,09	-0,30	-1,69	-1,88	-2,02
DM-171	Patagua	316536,6	6235777,9	880,3	-1,48	-0,22	-1,78	-1,94	-2,05
DM-172	Patagua	316536,9	6235778,3	879,9	-1,12	-0,60	-1,96	-2,20	-2,34
DM-173	Patagua	316537,4	6235779,1	879,1	-0,57	-0,30	-1,73	-1,98	-2,89
DM-174	Patagua	316538,7	6235781,4	877,0	1,06	0,90	-0,39	-1,82	-1,64
DM-175	Don leopoldo	316480,6	6235665,3	943,6	-1,59	0,23	-1,06	-1,28	-2,57
DM-176	Don leopoldo	316481,1	6235666,2	942,6	-1,68	-0,22	-1,65	-1,76	-2,62
DM-177	Don leopoldo	316481,7	6235667,4	941,2	-1,06	0,68	-1,07	-1,48	-2,16
DM-178	Don leopoldo	316483,3	6235670,4	937,8	-1,47	0,04	-1,56	-2,43	-2,36
DM-179	Don leopoldo	316485,0	6235673,6	934,2	-0,72	0,70	-0,75	-1,00	-0,90
DM-18	Patagua	316550,5	6235788,7	812,4	-1,43	0,30	-1,03	-0,98	-1,69
DM-19	Patagua	316455,1	6235823,4	808,2	-0,10	0,00	-0,43	-1,24	-1,47
DM-2	Patagua	316402,1	6235847,5	873,9	-0,88	0,00	-0,59	-1,52	-1,71
DM-20	Patagua	316455,8	6235826,5	805,2	-1,23	-0,30	-1,39	-1,89	-1,66
DM-21	Patagua	316456,2	6235828,2	803,6	-0,27	-0,30	-0,38	-1,06	-1,69
DM-22	Patagua	316457,0	6235831,8	800,2	0,92	0,70	0,43	-0,63	-1,24
DM-23	Patagua	316457,1	6235832,5	799,5	0,88	1,08	0,70	0,00	-1,10
DM-24	Patagua	316282,8	6235829,9	687,5	-2,22	-0,60	-1,95	-2,43	-2,21
DM-25	Patagua	316302,3	6235893,7	779,6	-0,22	0,60	0,33	-0,25	-1,44
DM-26	Patagua	316302,0	6235892,5	777,9	0,67	1,30	0,90	0,33	-0,98
DM-27	Patagua	316301,5	6235890,7	775,1	-0,96	0,78	0,24	-0,10	-1,35
DM-28	Patagua	316315,2	6235942,4	853,9	-1,18	-0,22	-0,62	-0,47	-2,06
DM-29	Pat/D.Leo	316422,2	6235782,4	986,5	-0,43	0,30	-0,76	-1,24	-1,90
DM-3	Patagua	316402,1	6235848,1	873,1	-0,52	0,48	-0,02	-0,97	-1,50
DM-30	Pat/D.Leo	316422,2	6235783,3	985,5	-1,48	0,00	-1,39	-1,44	-1,63
DM-31	Pat/D.Leo	316422,3	6235786,9	980,7	-1,39	-0,30	-1,55	-2,10	-2,15
DM-32	Pat/D.Leo	316422,3	6235793,2	972,5	-0,35	1,00	-1,09	-1,34	-1,96
DM-33	Pat/D.Leo	316422,4	6235793,9	971,7	-0,71	0,30	-0,52	-1,52	-1,55
DM-34	Pat/D.Leo	316422,4	6235795,3	969,7	0,42	0,90	0,31	-1,22	-1,06
DM-35	Pat/D.Leo	316422,4	6235796,6	968,1	0,04	1,08	0,38	-0,97	-0,23
DM-36	Pat/D.Leo	316422,4	6235796,6	968,1	0,04	1,08	0,38	-0,97	-0,23
DM-37	Pat/D.Leo	316422,4	6235799,4	964,5	-1,47	0,30	-1,19	-1,60	-1,86
DM-38	Pat/D.Leo	316422,3	6235792,2	973,9	-0,61	0,60	-1,20	-1,44	-2,41
DM-39	Pat/D.Leo	316405,8	6235775,1	972,6	-0,67	0,30	-1,35	-1,57	-2,74
DM-4	Patagua	316402,0	6235849,7	871,0	1,60	1,11	-1,24	-1,77	-2,92
DM-40	Pat/D.Leo	316405,3	6235781,5	963,5	-1,08	0,00	-1,55	-2,15	-1,95
DM-41	Pat/D.Leo	316405,2	6235782,0	962,8	-0,92	-0,30	-2,10	-2,40	-2,28
DM-42	Pat/D.Leo	316404,9	6235785,7	957,5	-0,84	0,30	-1,15	-1,37	-1,97
DM-43	Pat/D.Leo	316404,8	6235786,8	956,0	-0,52	0,30	-1,31	-1,57	-1,99
DM-44	Patagua	316397,2	6235860,4	682,7	-1,89	-0,60	-0,55	-1,42	-2,14
DM-45	Patagua	316397,6	6235863,0	679,2	-1,51	-0,22	-1,07	-1,12	-2,08
DM-46	Patagua	316397,8	6235864,5	677,4	-1,43	0,90	0,13	0,14	-0,92
DM-47	Patagua	316397,9	6235865,1	676,6	-1,16	0,90	0,40	-0,08	-0,65

DM-48	Patagua	316398,3	6235867,7	673,1	-1,57	-0,60	-1,57	-2,32	-3,70
DM-49	Patagua	316398,3	6235867,7	673,1	-1,57	-0,60	-1,57	-2,32	-3,70
DM-5	Patagua	316402,0	6235850,8	869,6	0,82	0,70	0,50	-1,05	-1,40
DM-50	Patagua	316395,7	6235849,6	696,9	-0,39	0,81	0,31	-0,01	-1,01
DM-51	Patagua	316395,7	6235849,6	696,9	-0,39	0,81	0,31	-0,01	-1,01
DM-52	Patagua	316395,9	6235851,3	694,7	-1,42	0,11	-0,42	-0,56	-1,61
DM-53	Patagua	316396,2	6235853,2	692,2	-1,32	0,26	-0,20	-0,55	-1,43
DM-54	Patagua	316396,2	6235853,6	691,6	-1,46	0,04	-0,37	-0,74	-1,38
DM-55	Don leopoldo	316392,1	6235790,2	982,8	-1,09	-0,30	-2,05	-2,22	-2,47
DM-56	Don leopoldo	316391,5	6235792,7	979,9	-1,52	-0,30	-2,30	-2,70	-3,52
DM-57	Don leopoldo	316391,1	6235794,4	977,8	-2,05	-0,30	-2,40	-3,00	-3,40
DM-58	Don leopoldo	316384,0	6235826,6	940,2	-1,01	-0,30	-1,55	-1,77	-1,64
DM-59	Don leopoldo	316383,7	6235828,1	938,5	-1,14	-0,30	-1,55	-1,89	-2,27
DM-6	Patagua	316535,6	6235763,3	837,9	-0,60	0,00	-1,04	-1,74	-1,87
DM-60	Don leopoldo	316383,5	6235829,2	937,2	-1,13	0,00	-1,25	-1,66	-2,12
DM-61	Don leopoldo	316382,6	6235833,4	932,3	-0,35	-0,30	-1,33	-1,74	-1,76
DM-62	Patagua	316013,3	6236128,0	777,0	-0,08	0,90	-1,37	0,71	-1,96
DM-63	Patagua	316016,1	6236128,9	776,9	-1,28	0,00	-1,15	-0,95	-2,10
DM-64	Patagua	316018,7	6236129,6	776,9	-1,43	0,30	-1,42	-0,93	-2,48
DM-65	Patagua	316018,7	6236129,6	776,9	-1,43	0,30	-1,42	-0,93	-2,48
DM-66	Patagua	315984,6	6236121,0	716,5	-1,21	0,48	-1,17	-1,17	-2,08
DM-67	Patagua	315984,6	6236121,0	716,5	-1,21	0,48	-1,17	-1,17	-2,08
DM-68	Patagua	315985,5	6236121,3	716,0	-0,27	-0,30	-0,79	-0,90	-1,98
DM-69	Patagua	315986,1	6236121,5	715,6	0,72	0,30	0,12	-0,08	-1,63
DM-7	Patagua	316536,3	6235764,5	836,6	-1,06	-0,30	-1,39	-1,85	-2,12
DM-70	Patagua	315986,5	6236121,6	715,3	-1,43	-0,30	-0,94	-1,06	-1,94
DM-71	Patagua	315995,5	6236124,4	709,7	-1,16	0,00	-1,49	-1,17	-1,87
DM-72	Patagua	315996,2	6236124,6	709,2	-0,99	-0,30	-1,23	-0,83	-1,92
DM-73	Patagua	315998,6	6236125,3	707,8	0,56	1,57	0,19	0,81	-1,53
DM-74	Patagua	315999,6	6236125,6	707,1	-0,96	-0,30	-1,26	-0,95	-1,98
DM-75	Patagua	316597,6	6235756,8	907,9	-1,22	0,04	-1,08	-1,72	-1,59
DM-76	Patagua	316598,3	6235757,6	907,3	-1,27	0,15	-1,00	-1,65	-1,64
DM-77	Patagua	316599,1	6235758,5	906,7	-0,82	-0,15	-0,94	-1,51	-1,52
DM-78	Patagua	316602,3	6235761,9	904,2	-0,26	-0,22	-1,39	-1,65	-2,74
DM-79	Patagua	316602,8	6235762,4	903,7	-0,51	-0,60	-1,70	-1,86	-2,00
DM-8	Patagua	316537,5	6235766,5	834,6	0,54	0,48	0,24	-1,18	-1,43
DM-80	Patagua	316603,5	6235763,1	903,2	-1,29	-0,60	-1,93	-2,72	-3,40
DM-81	Patagua	316604,5	6235764,2	902,4	-1,51	0,30	-1,30	-1,89	-1,89
DM-82	Patagua	316604,8	6235764,5	902,2	-1,82	0,00	-1,42	-1,82	-1,63
DM-83	Patagua	316066,3	6236074,2	718,6	-1,28	-0,30	-1,82	-1,96	-3,15
DM-84	Patagua	316067,5	6236075,5	718,5	-1,62	0,00	-1,42	-1,80	-3,05
DM-85	Patagua	316068,6	6236076,8	718,4	-1,25	0,00	-1,59	-1,22	-2,44
DM-86	Patagua	316069,8	6236078,2	718,2	-0,94	0,00	-1,72	-1,82	-2,41
DM-87	Patagua	316070,8	6236079,3	718,1	-0,95	-0,30	-2,05	-2,10	-2,06
DM-88	Patagua	316121,6	6236021,8	706,3	-0,70	0,00	-1,20	-1,40	-2,62
DM-89	Patagua	316122,2	6236022,2	706,2	-0,99	-0,30	-1,28	-1,48	-2,77

DM-9	Patagua	316537,8	6235767,1	827,2	-0,01	-0,30	-1,42	-1,96	-1,70
DM-90	Patagua	316125,0	6236024,0	705,8	-0,85	0,00	-0,75	-1,19	-2,04
DM-91	Patagua	316125,0	6236024,0	705,8	-0,85	0,00	-0,75	-1,19	-2,04
DM-92	Patagua	316126,9	6236025,2	705,6	-1,15	-0,30	-1,41	-1,38	-2,55
DM-93	Patagua	316296,6	6235800,2	749,6	0,38	1,11	0,50	0,49	-1,27
DM-94	Patagua	316296,6	6235800,2	749,6	0,38	1,11	0,50	0,49	-1,27
DM-95	Patagua	316296,6	6235800,2	749,6	0,38	1,11	0,50	0,49	-1,27
DM-96	Patagua	316296,4	6235799,1	748,5	-0,08	0,60	0,20	-0,30	-1,23
DM-97	Patagua	316296,2	6235798,0	747,3	-0,07	1,57	0,18	-0,30	-1,24
DM-98	Patagua	316295,9	6235796,7	746,0	0,23	0,78	0,56	0,01	-1,13
DM-99	Patagua	316295,5	6235794,9	744,1	0,05	0,95	0,68	0,19	-0,73



# Anexo E

Tabla de Inclusión Fluida presente. L:liquido, V:vapor; H:halita; S:solido; n.s: no selección; Spl: esfalerita; V.A: valor alto

Sample ID	Sector Veta	L	V	L+V	L+H/S	Valor mini drill	Doble Pulido
DM-1	Patagua	0	1	1	0	Alto	n.s
DM-10	Patagua	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-100	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-101	Patagua	0	0	0	0	n.s	V.A Spl
DM-102	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-103	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-104	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-105	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-106	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-107	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-108	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-109	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-11	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-110	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-111	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-112	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-113	Don leopoldo	0	1	0	0	Alto	V.A Spl
DM-114	Don leopoldo	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-115	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-116	Don leopoldo	0	0	1	0	n.s	n.s
DM-117	Don leopoldo	0	0	1	0	Alto	n.s
DM-118	Don leopoldo	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-119	Don leopoldo	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-12	Patagua	1	1	1	0	n.s	n.s
DM-120	Don leopoldo	1	1	0	1	n.s	n.s
DM-121	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-122	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-123	Don leopoldo	1	1	0	0	n.s	n.s

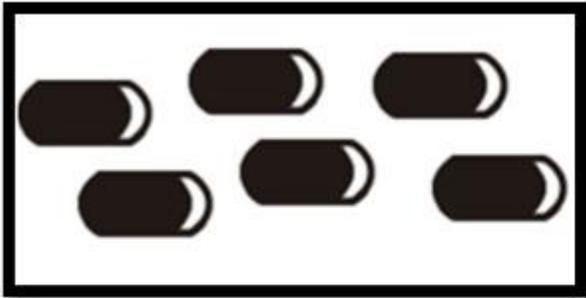
DM-124	Patagua	0	1	0	0	Bajo	n.s
DM-125	Patagua	1	1	0	0	Bajo	V.B
DM-126	Patagua	0	1	0	0	Bajo	n.s
DM-127	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-128	Patagua	0	0	0	0	Bajo	n.s
DM-129	Patagua	1	1	0	1	Bajo	V.B
DM-13	Patagua	1	1	1	0	n.s	n.s
DM-130	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-131	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-132	Don leopoldo	1	0	0	0	Alto	V.A Pat
DM-133	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-134	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-135	Don leopoldo	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-136	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-137	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-138	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-139	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-14	Patagua	1	1	0	1	n.s	n.s
DM-140	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-141	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-142	Don leopoldo	1	0	0	0	Alto	V.A D.Leo
DM-143	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-144	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-145	Don leopoldo	0	0	0	0	Bajo	n.s
DM-146	Don leopoldo	1	1	1	0	Bajo	V.B
DM-147	Don leopoldo	0	0	0	0	Bajo	n.s
DM-148	Don leopoldo	1	1	1	0	Bajo	V.B
DM-149	Patagua	0	1	0	0	Alto	V.A Pat
DM-15	Patagua	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-150	Patagua	0	1	0	0	Alto	V.A Pat
DM-151	Patagua	0	1	0	0	Alto	V.A Pat
DM-152	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-153	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-154	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-156	Don leopoldo	1	0	0	0	Bajo	n.s
DM-157	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-158	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-159	Don leopoldo	0	1	0	0	Alto	n.s
DM-16	Patagua	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-160	Pat/D.Leo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-161	Pat/D.Leo	1	1	0	0	Alto	n.s
DM-162	Pat/D.Leo	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-163	Pat/D.Leo	0	1	0	0	Alto	n.s
DM-164	Pat/D.Leo	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-165	Pat/D.Leo	1	1	0	0	Bajo	n.s
DM-166	Pat/D.Leo	0	1	0	1	Bajo	n.s

DM-167	Pat/D.Leo	0	1	0	1	Bajo	n.s
DM-168	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-169	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-17	Patagua	1	1	0	0	Alto	n.s
DM-170	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-171	Patagua	0	1	0	1	Bajo	n.s
DM-172	Patagua	0	1	1	0	Bajo	V.B
DM-173	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-174	Patagua	0	1	0	0	Alto	n.s
DM-175	Don leopoldo	0	0	0	0	Bajo	n.s
DM-176	Don leopoldo	1	0	0	0	Bajo	n.s
DM-177	Don leopoldo	0	1	0	0	Alto	n.s
DM-178	Don leopoldo	1	0	0	0	Bajo	n.s
DM-179	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-18	Patagua	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-19	Patagua	1	1	1	1	Alto	n.s
DM-2	Patagua	1	1	1	0	n.s	n.s
DM-20	Patagua	1	1	0	1	n.s	n.s
DM-21	Patagua	1	1	1	1	n.s	n.s
DM-22	Patagua	1	1	0	0	Alto	n.s
DM-23	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-24	Patagua	1	1	1	1	n.s	n.s
DM-25	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-26	Patagua	1	1	1	1	Alto	n.s
DM-27	Patagua	1	1	1	1	Alto	n.s
DM-28	Patagua	0	0	1	0	n.s	n.s
DM-29	Pat/D.Leo	0	1	0	1	Alto	n.s
DM-3	Patagua	0	1	1	0	n.s	n.s
DM-30	Pat/D.Leo	1	1	1	0	n.s	n.s
DM-31	Pat/D.Leo	1	1	1	1	n.s	n.s
DM-32	Pat/D.Leo	1	1	1	0	Alto	n.s
DM-33	Pat/D.Leo	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-34	Pat/D.Leo	0	1	1	1	Alto	V.A Spl
DM-35	Pat/D.Leo	1	1	0	0	Alto	V.A D.Leo
DM-36	Pat/D.Leo	0	1	1	0	n.s	V.A Spl
DM-37	Pat/D.Leo	1	1	1	1	Bajo	V.B
DM-38	Pat/D.Leo	1	1	1	1	n.s	n.s
DM-39	Pat/D.Leo	1	1	1	0	n.s	n.s
DM-4	Patagua	1	1	0	1	n.s	n.s
DM-40	Pat/D.Leo	1	1	0	1	n.s	n.s
DM-41	Pat/D.Leo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-42	Pat/D.Leo	1	1	0	0	n.s	n.s
DM-43	Pat/D.Leo	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-44	Patagua	1	1	1	1	n.s	n.s
DM-45	Patagua	0	1	0	0	Bajo	n.s
DM-46	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s

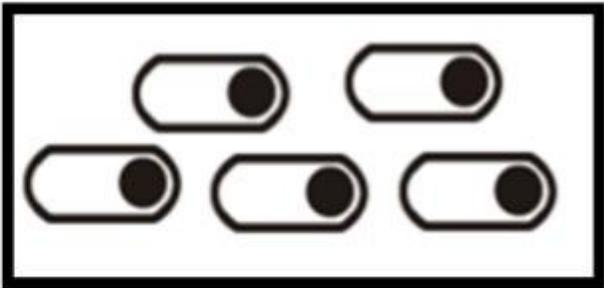
DM-47	Patagua	1	1	1	1	Bajo	V.B
DM-48	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-49	Patagua	0	1	0	0	Bajo	n.s
DM-5	Patagua	1	1	1	1	Alto	n.s
DM-50	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-51	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-52	Patagua	0	1	0	0	Bajo	n.s
DM-53	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-54	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-55	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-56	Don leopoldo	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-57	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-58	Don leopoldo	1	0	0	1	n.s	n.s
DM-59	Don leopoldo	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-6	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-60	Don leopoldo	1	0	0	1	n.s	n.s
DM-61	Don leopoldo	0	1	0	0	Alto	n.s
DM-62	Patagua	1	1	0	0	Alto	n.s
DM-63	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-64	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-65	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-66	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-67	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-68	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-69	Patagua	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-7	Patagua	1	1	1	1	n.s	n.s
DM-70	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-71	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-72	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-73	Patagua	1	1	0	0	Alto	n.s
DM-74	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-75	Patagua	1	0	0	0	n.s	n.s
DM-76	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-77	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-78	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-79	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-8	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-80	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-81	Patagua	0	1	0	1	Bajo	n.s
DM-82	Patagua	0	1	0	0	Bajo	n.s
DM-83	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-84	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-85	Patagua	0	1	0	0	n.s	n.s
DM-86	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-87	Patagua	0	1	0	1	n.s	n.s
DM-88	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s

DM-89	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-9	Patagua	0	1	0	0	Alto	n.s
DM-90	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-91	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-92	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-93	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-94	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-95	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-96	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-97	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s
DM-98	Patagua	0	0	0	0	n.s	V.A Spl
DM-99	Patagua	0	0	0	0	n.s	n.s

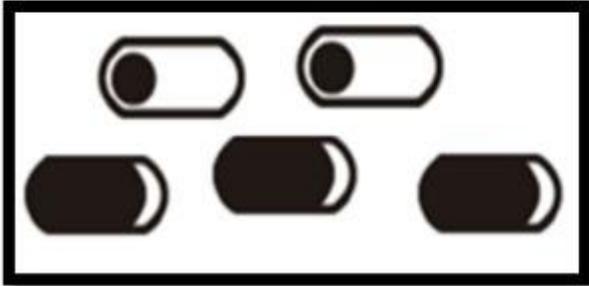
Ricas en Vapor



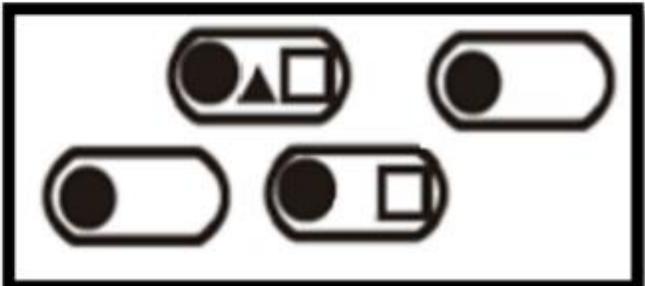
Ricas en Liquido

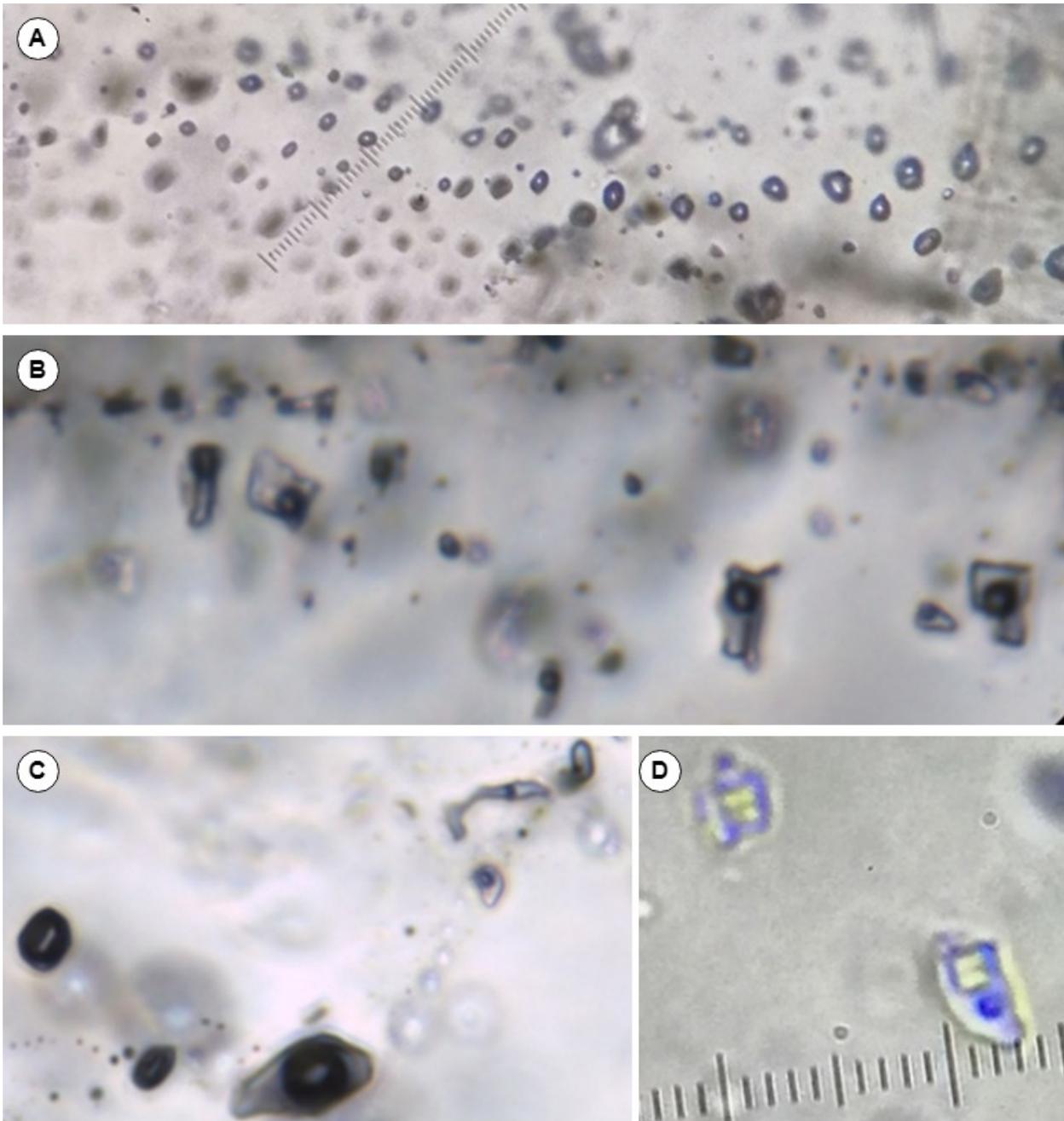


Liquido coexistiendo con Vapor



Liquido con Halita con o sin Solido





**FIG. 6.3:** Tipo de inclusión fluidas. (a) ricas en vapor. (b) ricas en líquido. (c) inclusiones ricas en líquido coexistiendo con ricas en vapor. (d) inclusiones ricas en líquido coexistiendo con ricas en halita con o sin sólido.

# Anexo F

Tabla de texturas presente en las muestras

Sample ID	Sector Veta	masive	coloforme	comb	zonal	crusti-forme	cockade	moss	jigsaw	feathery	flo-m-boyant	ghost sphere	pseudo bladed	sacaroidal	pseudo acicular
DM-1	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
DM-10	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-100	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-101	Patagua	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
DM-102	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-103	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-104	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-105	Patagua	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-106	Patagua	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-107	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-108	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-109	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-11	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-110	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-111	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-112	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-113	D.Leo	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
DM-114	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DM-115	D.Leo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-116	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-117	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-118	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-119	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-120	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-121	D.Leo	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-122	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-123	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-124	Patagua	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-125	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-126	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-127	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-128	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-129	Patagua	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-130	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-131	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-132	D.Leo	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-133	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-134	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-135	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-136	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-137	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-138	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-139	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-140	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-141	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-142	D.Leo	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
DM-143	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-144	D.Leo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-145	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

DM-146	D.Leo	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-147	D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-148	D.Leo	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
DM-149	Patagua	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
DM-15	Patagua	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-150	Patagua	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
DM-151	Patagua	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-152	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-153	D.Leo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-154	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-156	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-157	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-158	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-159	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-16	Patagua	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
DM-160	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-161	Pat/D.Leo	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-162	Pat/D.Leo	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-163	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-164	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-165	Pat/D.Leo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-166	Pat/D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-167	Pat/D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-168	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-169	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-17	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-170	Patagua	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-171	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-172	Patagua	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-173	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-174	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-175	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-176	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-177	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DM-178	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-179	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-18	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-19	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-2	Patagua	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-20	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
DM-21	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-22	Patagua	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
DM-23	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-24	Patagua	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-25	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-26	Patagua	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
DM-27	Patagua	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-28	Patagua	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-29	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-3	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
DM-30	Pat/D.Leo	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-31	Pat/D.Leo	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-32	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
DM-33	Pat/D.Leo	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-34	Pat/D.Leo	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
DM-35	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
DM-36	Pat/D.Leo	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
DM-37	Pat/D.Leo	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-38	Pat/D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-39	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-4	Patagua	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
DM-40	Pat/D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-41	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-42	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-43	Pat/D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-44	Patagua	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-45	Patagua	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-46	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DM-47	Patagua	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-48	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-49	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-5	Patagua	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
DM-50	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-51	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-52	Patagua	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-53	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-54	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-55	D.Leo	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-56	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-57	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-58	D.Leo	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-59	D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-6	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-60	D.Leo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-61	D.Leo	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-62	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-63	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-64	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-65	Patagua	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-66	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-67	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-68	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-69	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-7	Patagua	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-70	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-71	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-72	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-73	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-74	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-75	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-76	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-77	Patagua	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DM-78	Patagua	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-79	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-8	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-80	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-81	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-82	Patagua	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-83	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-84	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-85	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-86	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-87	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-88	Patagua	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-89	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-9	Patagua	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-90	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-91	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-92	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-93	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-94	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-95	Patagua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DM-96	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-97	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
DM-98	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
DM-99	Patagua	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

# Anexo G

## Tabla informativa de los mini drill realizados para cromatografía de gases

HIGH VALUES						
Sample MiniDrill	Weight (gr)	#pieces	Observación	Aspectos de la Zona seleccionada	Descripción del drill obtenido	Valor
DM 01	0,4	2		Zona con I.F. ricas en vapor	2 Trozos. Qz masivo no blanco ni lechoso + grisáceo. Con zonas verdosas. Sin roca caja, alt, con mnx de py.	Alto
DM 05	2,6	5		Escasas, difíciles de observar, muy pequeñas	5 Trozos. Qz masivo. Posee Magnetismo en trozos negros. Py en estos círculos, diseminada también en el cuarzo. Zonas de color rojizo tipo oxido de Fe.	Alto
DM 09	1,2	6		Sector con I.F primarias. En círculo hay primarias y secundarias.	6 Trozos, con 2 pequeños. Cuarzo masivo, sin roca caja. 1 Sulfuro de pirita bien formado. Sin alteración.	Alto
DM 17	0,2	n.d		No resalta ningún sector en particular en la distribución de I.F. Selección de zona por la claridad de identificar I.F. vapor	QZ Masivo cristalino blanco. Con manchas negras entre los cristales mosaico.	Alto
DM 19	1,7	3		Inclusiones primaria en círculo sub p, ricas en vapor, al borde. En círculo sub S, secundarias ricas en vapor; son abundantes	3 Trozos. Cuarzo masivo y bandeado. Con roca caja. Minerales verdosos claros en la rx caja ~ alt prop. Sulfuros en el cuarzo	Alto
DM 22	0,5	5		Abundante cantidad de I.F. vapor, pero pequeñas, en cuarzo.	5 Trozos. Qz masivo, sucia por sedimentos del proceso. Algo brillante-azucarado. Sin roca caja, ni alt, ni mnx.	Alto
DM 26	0,5	4		I.F primarias y secundarias. ¿Presencia de calcita hojosa? Zona con Qz bandeado	4 Trozos. Qz masivo y comb, blanquecino, entre crx hay cosas plomas u patinas. ¿Sedimento o mx? Sin rx,mnx,alt.	Alto

DM 27	0,2	2		I.F en interseccion de 2 vetillas	2 Trozos. Cuarzo masivo con roca caja. Vetillas de oxido por su color rojo que corto el Qz y la Rx caja. Minerales de sulfuros en la roca caja.	Alto
DM 29	0,6	2		I.F primarias en cuarzo bandeado y drusa. O	2 Trozos. Qz masivo con sectores verdoso-. Alt prop. Con mini mineralización de sulfuros. Qz>alt+minx	Alto
DM 32	0,4	7			7 Trozos. Qz, roca caja, vetilla de óxidos, sulfuros diseminado en rx caja.	Alto
DM 34	1	2		Puldo de cuarzo ehedral. Muchas I.F primarias y secundarias.	2 Trozos. Cuarzo masivo, sin roca caja. Sin Alteración. Sin mineralización	Alto
DM 35	2,5	4	1.7g big piece	Sector entorno a una Pirita.	4 Trozos. Qz masivo. Con mineralización de Py y Ccp. Pequeños trozos de roca caja. Patina de color verdoso. Minerales rojizo (¿será granate u óxidos de Fe o Py oxidada?). Efervece al HCl => carbonatos. Probable alt. Prop.	Alto
DM 35 dp	0,5	4	Doble pulido		4 Trozos. Cuarzo masivo sin roca caja y con asociación mineral de PY-Ccp-Brn	Alto
DM 47	0,6	n.d			Cuarzo masivo y con roca caja. Rx caja con círculos verdosos y líneas rojas de "vetillitas". diseminación de pequeños puntos de brillo metálico en el cuarzo y la roca caja.	Alto
DM 61	0,6	2		Zona cn I.F primaria. Abundantes I.F. vapor. Tamaño pequeño: 1 espacio entre líneas a 80x. Circulo en zona de primarias y secundarias.	2 Trozos. Cuarzo con roca caja, ¿Estas son tobas rojizas?- ¿Brechas?, Hay una patina verdosa, sulfuros diseminado. Con alt prop, Con mnx de	Alto
DM 62	1,9	1	Fragm. rock		1 Trozo. Trozo de roca caja enviada a analizar, alteración argilica. El trozo es equivalente al rechazo.	Alto
DM 73	0,5	2		Zona alta del corte caracterizada por I.F. liquidas. Zona baja por I.F. vapor. Se solapan ambas al medioo.	2 Trozos. Cuarzo masivo, sin roca caja. Sin Alteración. Pequeña mineralizacion de sulfuros.	Alto
DM 113	0,3	3	Rechazo	En sector de curazo asociado con granate, presentando I.F. primarias y sec, pequeñas pero abundantes.	3 Trozos. Qz masivo con delgadas vetillas rojizas. Con roca caj. Con alteración, con mineralización. Sucio por encontrarse cubierto por su propio sedimento al ser preparado.	Alto
DM 113grt	0,2	1	Hand-sample		1 Trozo. Cuarzo masivo. Sin roca caja, sin alt, sin mnx. Con vetillas de óxidos de Fe.	Alto

DM 117	0,6	3~4			3-4 Trozos. Qz masivo y al parecer comb. Efervescente al HCl. Posee grt-ept-py-qz. Sin roca caja, Alt prop. Puntos rojizos; posible esfalerita u ox de Fe.	Alto
DM 132	0,6	4			4 Trozos. Cuarzo masivo, a veces más claro. Diseminación de sulfuros escasa en Rx caja, arcillas-oxidados... Alt-Argl	Alto
DM 142	0,3	2			2 Trozos. Qz masivo sin roca caja. Pequeños sulfuros diseminado. Se destaca una especie de evento interno de color Rojizo claro que recorre el cilindro.	Alto
DM 149	0,6	n.d			Qz masivo, con oquedades en zonas. Trozos de roca caja tipo brecha, le da tonalidad oscura. Sin mineralización, con alteracion prop- oxidada.	Alto
DM 150	3,2	5			5 Trozos. Un poco de epoxy. Qz masivo color no blanco. Con roca caja fragmentada, tipo brecha. ¿Qz azucarado? Nuevamente puntos rojos intensos ¿esfalerita, óxidos de fe? Sin py, ni ccp.	Alto
DM 151	0,4	2			2 Trozos. Cuarzo masivo no blando. Con zona verdosa pasando a blanqueado. Sin alt, Con alt prop. Con o Sin rx caja.	Alto
DM 159	0,5	2			2 Trozos. Cuarzo masivo con roca caja. Mnx de sulfuros y mnx verdes en roca caja. No se ven en el Qz.	Alto
DM 161	2	2		Al centro de la vetilla de qz bandeado.	2 Trozos. Cuarzo masivo más roca caja. Sulfuro y sulfosales?	Alto
DM 163	0,5	2		I.F primaris y secundarias por los bordes del cristal de qz. Ricas en vapor.	4 Trozos. Qz masivo blanco y más oscuro. Con roca caja. mineralización Py y posible sulfosal, esto cerca de la roca caja.	Alto
DM 174	1,2	4			4 Trozos. Qz masivo blanco y más oscuro. Con roca caja. mineralización Py y posible sulfosal, esto cerca de la roca caja.	Alto
DM 177	0,8	5			5 Trozos. Qz sucio, roca caja y polvo de roca. Arcilla-zonas con alteración arg.	Alto

LOW VALUE						
Sample MiniDrill	Weight (gr)	#pieces	Observación	Aspectos de la Zona seleccionada	Descripción del drill obtenido	Valor Bajo
DM 37	0,6	2		marca azul	2 Trozos. Cuarzo masivos blanco con roca caja. Sin altn, Sin mnxn.	Bajo
DM 45	0,5	4		I.F pequeñas, secundarias, ricas en vapor. 2 eventos. Cortar el cruce de ambos. OenX	4 Trozos. Qz masivo blanquecino. 1 trozo de roca caja. Mnxn de Py. Zona verdosa algo arcillada, altn prop.	Bajo
DM 49	0,5	6		I.F pequeñas, pocas y secundarias, ricas en vapor	6 Trozos. Zonas negras magnéticas. Qz masivo claro. Posible trozo de roca caja. No mnx. No altx. Sucio con sedimentos del proceso de preparacion.	Bajo
DM 52	0,4	2		Veta con I.F. secundarias V con L, y posible L-V. Cerca de clasto fragmentado hay mayor concentracion de I.F	2 Trozos. Qz con trozo de roca caja. Mnx de sulfuros negros de brillo metálico no mangneticos.	Bajo
DM 81	0,3	6		Hartas I.F. secundarias. Varios sectores parece presentar I.F. primarias decrepitadas	6 Trozos. Qz masivo blanco con pintas anaranjadas de arcillas. Sin roca caja, ni mnx, ni altn.	Bajo
DM 82	0,4	3		Varias I.F. secundarias en un relleno de qz hidrothermal ricas en vapor, tanto que parece sucio.	3 Trozos. Cuarzos masivos blanco y otro más grisáceo. El blanco a demas esta bandeado. Vetilla de óxidos de Fe. Zona algo verdoso. Con alteración prop. Actualmente lixiviada-argilizada.	Bajo
DM 124	1	2		I.F. ricas en vapor, secundarias	2 Trozos. Cuarzo masivo, quizás bandeado en el borde de la veta. Roca caja sin altn ni mnxn.	Bajo
DM 125	0,9	4		I.F ricas en V y L-V. Abundantes, mayor cantidad de secundarias	4 Trozos. Qz masivo con pequeños pts de sulfuros diseminados en debilidades. Sin altx, sin roca caja.	Bajo
DM 126	0,3	6		I.F. ricas en vapor, secundarias	6 Trozos. Qz masivo. No se distingue Roca caja. Mnxn de sulfuros, sin alteración.	Bajo
DM 128	0,2	2		Sector con L-V-H coexistiendo con V rich y L-rich, por separado. Son secundarias. Existe también I.F. V-rich primarias. Pulso inferior con I.F secundarias, y al centro primarias.	2 Trozos. Qz masivo blanco y cristalino. ¿Txt mosaico-drusa? Sin roca caja, ni altx, ni mnxn.	Bajo

DM 129	0,6	2		Entorno a la mineralización de la veta. Abundante presencia de I.F. ricas en vapor, tanto primarias como secundarias	2 Trozos. Qz masivo y bandeado, con roca caja. Veta corta el cuarzo y es de mineral oscuro, no magnético, brillo metálico. Zona verdosa en roca caja.	Bajo
DM 145	0,8	3			3 Trozos. magnético en zonas negro. Mx verde, zona con efervescencia al HCl. Fragmentos rozados ( toba riolítica, ¿fragmentos con altnx potásica?). Qz masivo, sulfuros, con altn prop, con mnxn, con roca caja.	Bajo
DM 146	0,2	1		I.F ricas en V, ricas en L y parece L-V	1 Trozo. Cuarzo masivo con zonas azules oscuro con sulfuros. Sin altnx, con roca caja.	Bajo
DM 147	0,6	2		corte con dificultad de observación.	2 Trozos. Veta de cuarzo con roca caja. Bandeado y comb, masivo. Sin altn, Sin mnxn.	Bajo
DM 148	0,5	4		I.F L rich and Vrich, separadas.		Bajo
DM 156	0,9	8		muy pocas y pequeñas, difícil distinguir si son L o V - rich	8 Trozos. Trozo color café, ¿qz o apatito? ¿Solo roca caja? ¿Roca caja lixiviada u alterada?	Bajo
DM 165	0,3	2		Muy pequeñas, hay presencia de I.F decrepitada. I.F ricas en L, V abundante en los bordes de los cristales	2 Trozos . Trozos negros magnéticos. Qz masivos con sulfuros desiminada. Con roca caja o ¿trozo negro es la roca caja?. Sin altnx	Bajo
DM 166	0,3	2		Marca azul, presencia de I.F. V, L-H, secundarias, pocas y hay presencia de i.f. decrepitada	2 Trozos. Qz masivo, sucio por polvo de preparación, mini patina de sulfuro. Sin roca caja, Sin alt.	Bajo
DM 167	0,4	n.d		I.F. primarias y secundarias ricas en V, posible presencia de L-V	Qz masico con roca caja rosada tipo toba. Qz bandeado entorno a la roca caja. Veta dentro de la veta de cuarzo que corta tmbn la roca caja. Mnx de Py y mx negro. Roca caja con alteracion verdosa, pseudo brecha. No efervese.	Bajo
DM 171	0,2	2		I.F ricas en vapor, y L-V. Abundantes, tanto primarias como secundarias. Presencia de I.F. decrepitadas	2 Trozos. Qz blanco masivo con roca caja. Verdoso grisaseo. Sin altx, Sin mnxn.	Bajo
DM 172	0,8	3		**	3 Trozos. Cuarzo masivo y bandeado con roca caja, oxidada. Sin mnxn, con altn de oxido.	Bajo
DM 175	0,7	3		I.F primarias decrepitadas. I.F secundarias tipo L, V, L-V	3 Trozos. Cuarzo y roca caja. ¿Altx potásica? Leve propilitacion y lixivación. Sin mnxn.	Bajo

DM 176	0,7	4	Escasa presencia de I.F en las vetillas, casi nula. Se observa muy aisladamente y pequeña I.F tipo L rich	4 trozos sucios. Qz masivo y roca caja. Rozado algo verdoso no claro la alteración o mnxn.	Bajo
DM 178	0,4	2	el corte tiene pocas y pequeñas I.F ricas en vapor y ricas en liquido. Secundarias	2 Trozos. Qz masivo con roca caja. ¿Altx potásica? No mnx ni altn.	Bajo





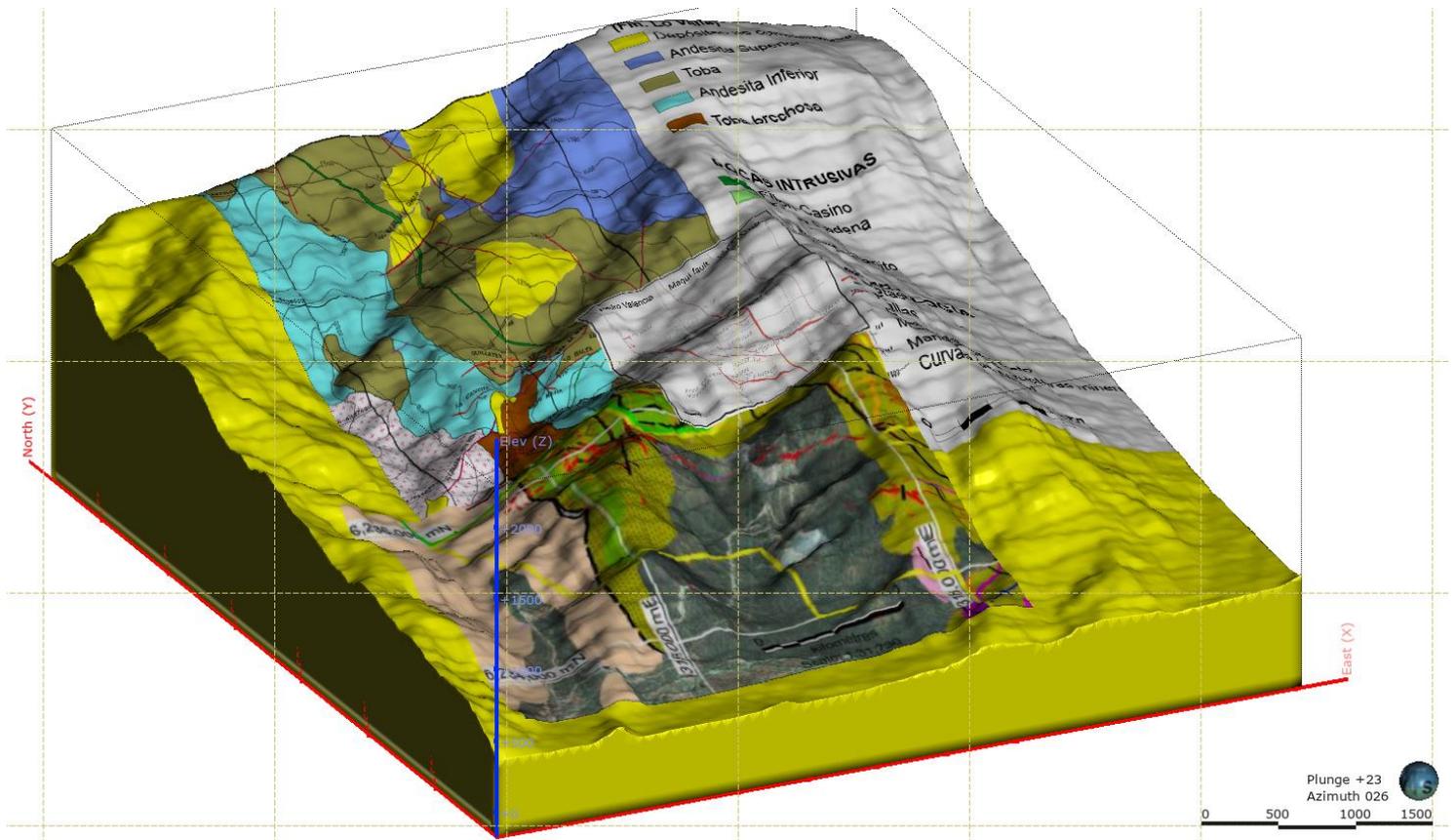


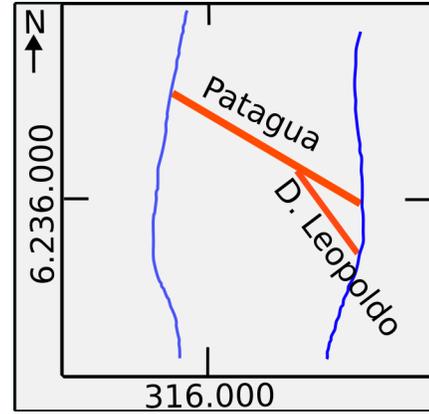
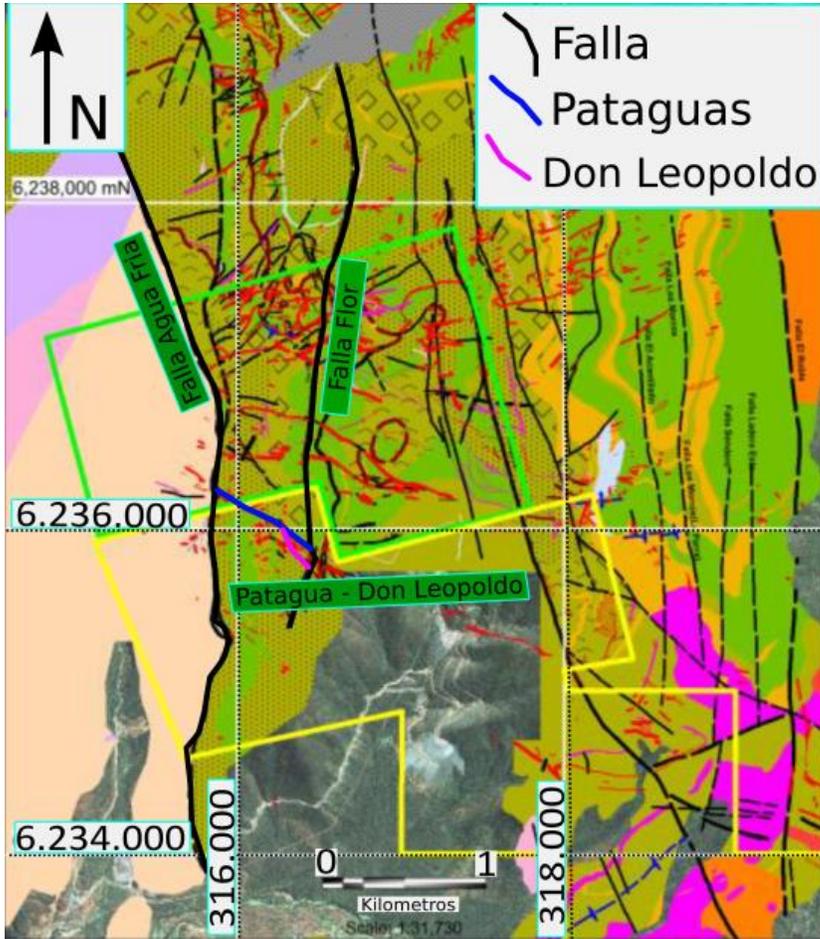
Esta confección de toma de muestras, explicada en la metodología, tiene la finalidad de conseguir un estudio de cromatografía de gases al pulverizarlas luego en una cámara al vacío. Cada imagen con su código de mini drill, tiene su descripción asociada en la tabla que se encuentra en la parte superior. A recordar, cabe destacar que en todos los sectores muestreados tiene presencia de inclusiones fluidas ricas en Vapor, y fueron separado en grupo de valores altos y valores bajo de metales según la geoquímica de la muestra, la cual puede verse en el Apéndice D. Teniendo este muestreo puede luego de realizarse el estudio de los volátiles en los minidrill, reconocer alguna relación entre la presencia de metales y volátiles presentes, como también porcentaje de volátil.

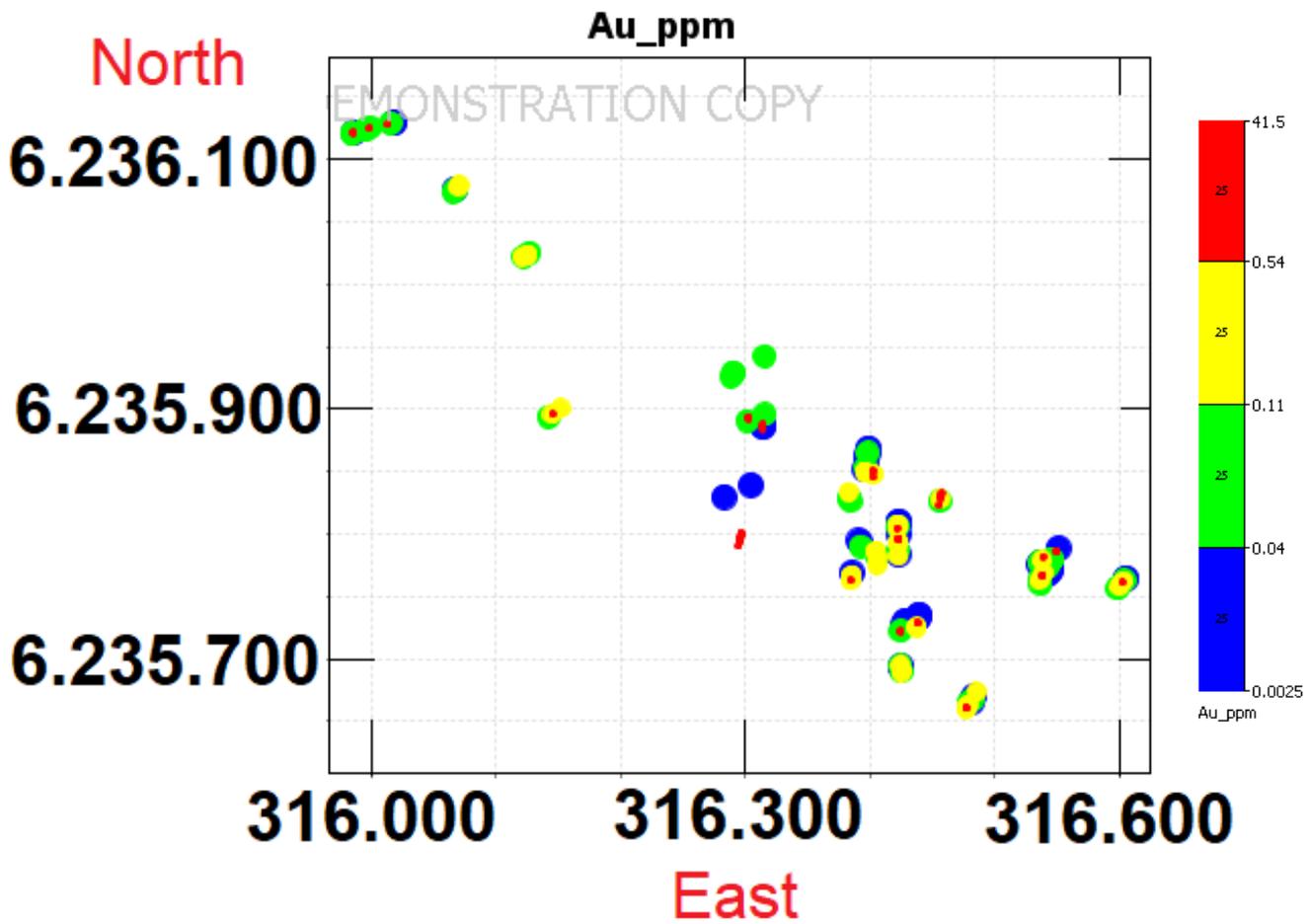


# Anexo H

## Modelo de la zona de estudio y las muestras



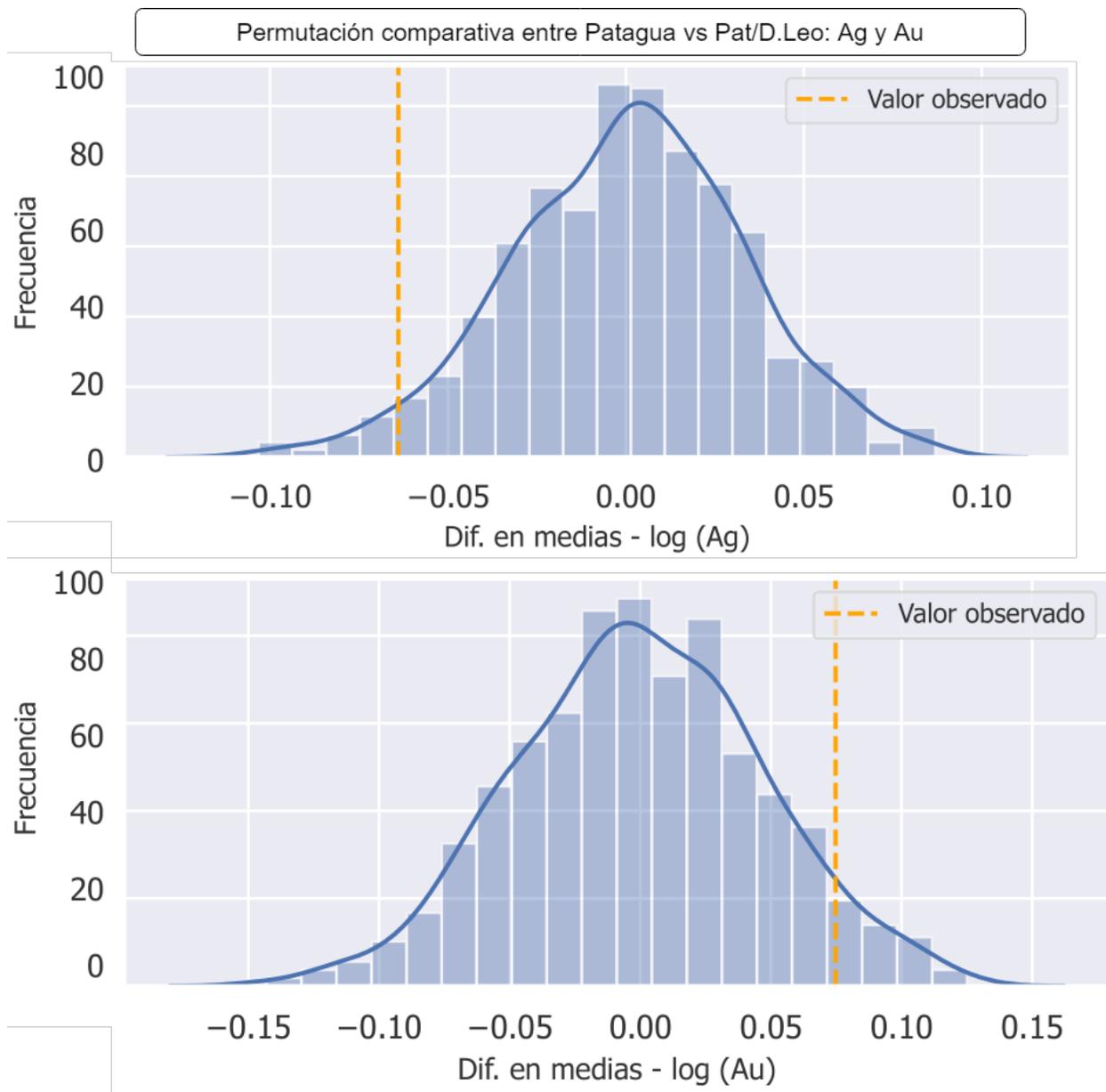




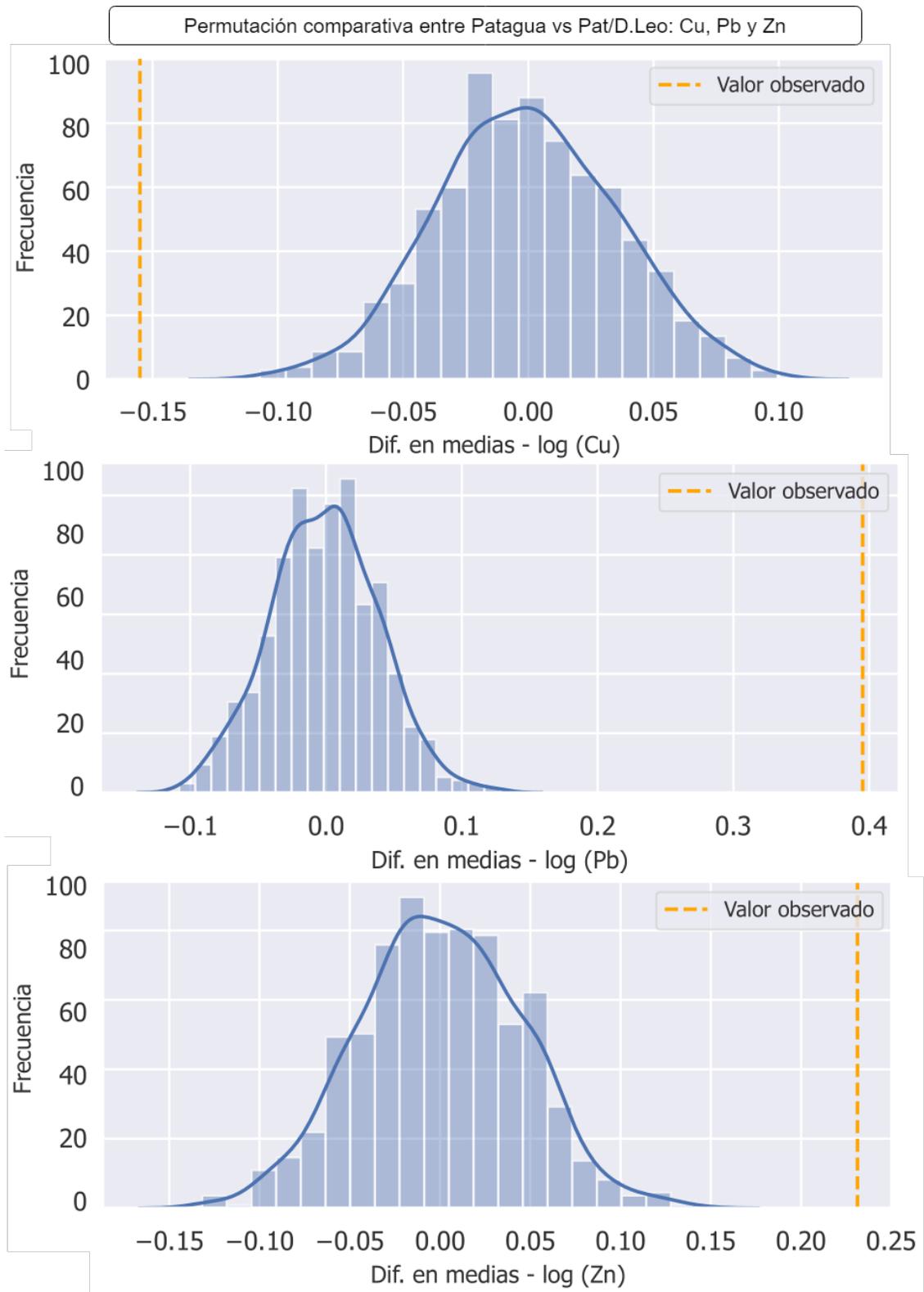


## Anexo I

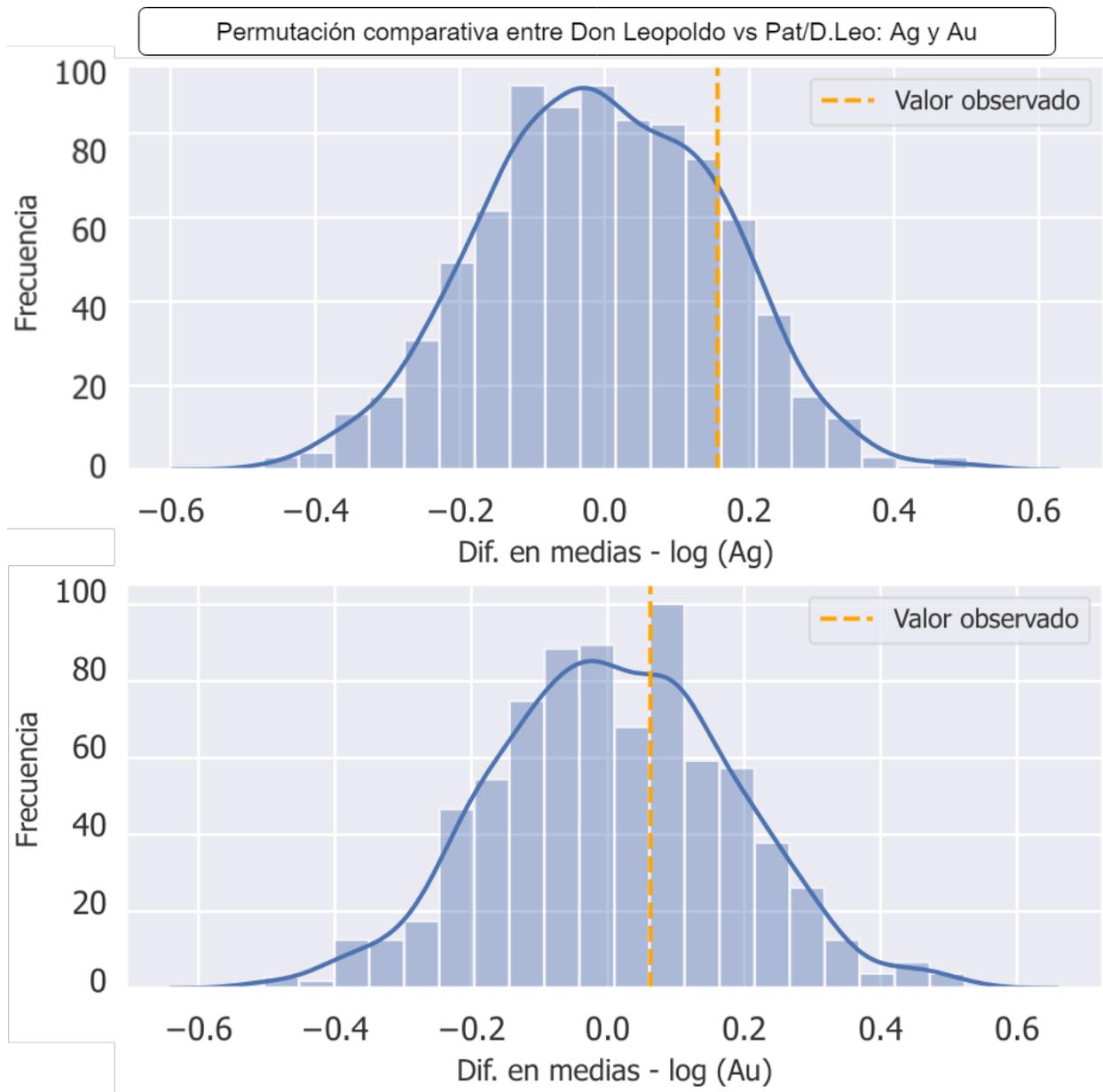
Permutación de la concentraciones de las muestras de cada veta comparada con respecto a los valores de la zona donde estas se cortan



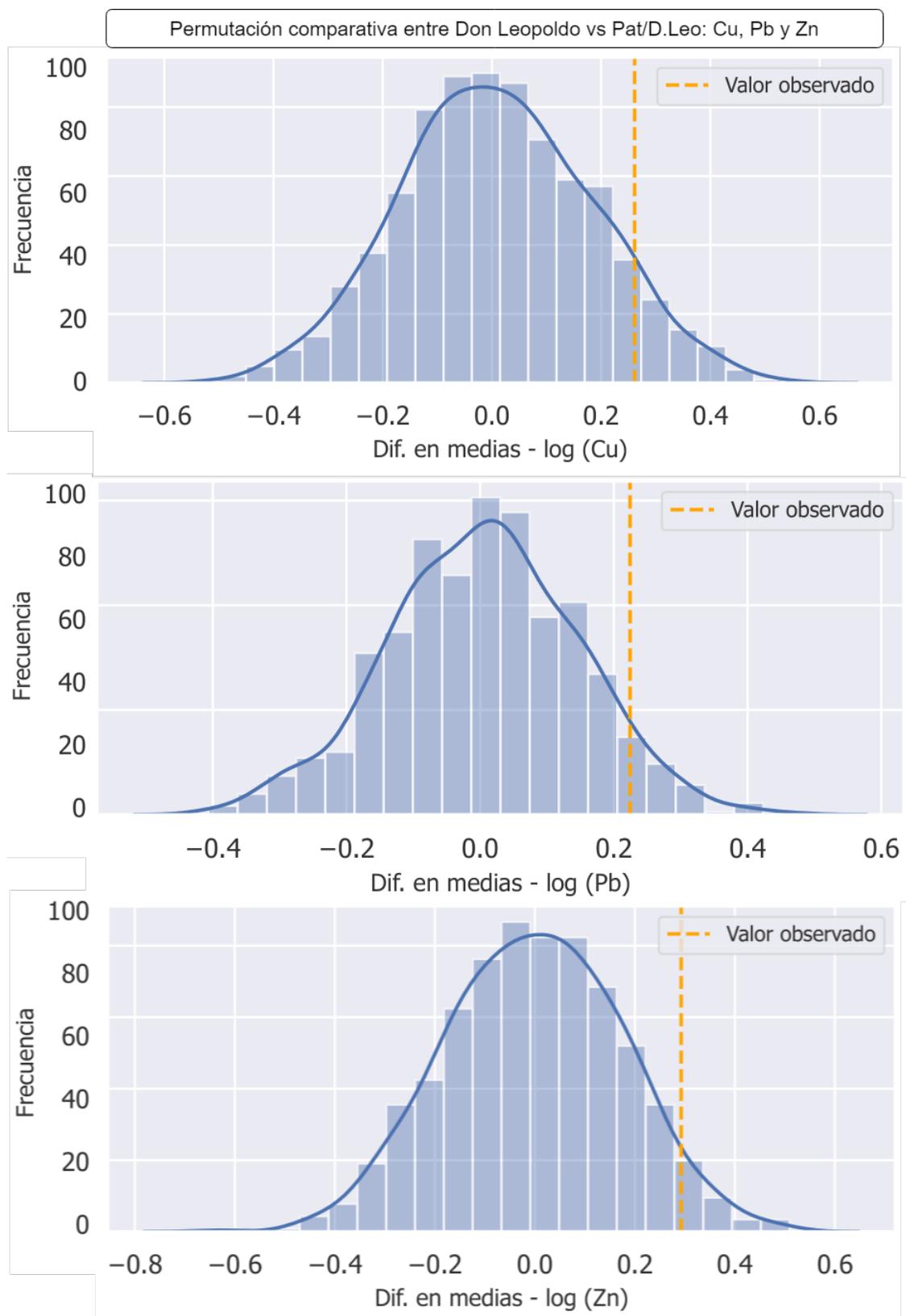
**FIG. 6.4:** Gráfica comparativa de los elementos de Plata y Oro entre la veta Patagua y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se está en un caso de aceptar la hipótesis de considerarse no comparativo, por lo tanto **no** son comparables las concentraciones de estos elementos en estas dos zonas.



**FIG. 6.5:** Gráfica comparativa de los elementos de Cobre, Plomo y Zinc entre la veta Patagua y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se está en un caso de rechazar la hipótesis de considerarse indiferente, no comparativo, misma situación, y por lo tanto son comparables las concentraciones de estos elementos en estas dos zonas para estudiar la influencia de los volátiles en cada escenario.



**FIG. 6.6:** Gráfica comparativa de los elementos de Plata y Oro entre la veta Don Leopoldo y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se está en un caso de aprobar la hipótesis de considerarse indiferente, no comparativo, misma situación.



**FIG. 6.7:** Gráfica comparativa de los elementos de Cobre, Plomo y Zinc entre la veta Don Leopoldo y la zona de intersección entre Patagua y Don Leopoldo. La permutación indica que se está en un caso de aprobar la hipótesis de considerarse indiferente, no comparativo, misma situación.