



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

DOCUMENTOS SOBRE INCLUSIONES FLUIDAS IV; FLUIDOS QUE
FUERON ATRAPADOS CON MICROORGANISMOS EN EL NORTE DE
CHILE, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

ARACELY MELANIA RAMÍREZ CABELLO

PROFESOR GUÍA:

DANIEL MONCADA DE LA ROSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CLAUDIA CANNATELLI

DOLORINDA DANIELE

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Aracely Melania Ramírez Cabello
FECHA: 05/12/17
PROF. GUÍA: Daniel Moncada

“Documentos sobre inclusiones fluidas IV; Fluidos que fueron atrapados con microorganismos en el norte de Chile, región de Atacama, Chile.”

La región de Atacama presenta sectores que poseen condiciones sumamente hostiles para la vida, la combinación entre un clima extremadamente árido con la alta radiación UV que recibe, lo ha instalado dentro de la comunidad científica como un potencial análogo terrestre a la superficie marciana, en el que además, se han reportado microorganismos y componentes orgánicos. Bajo este contexto se desarrolla este estudio, el cual analiza al salar Azufrera y a un sistema hidrotermal en sus cercanías, ambos ubicados en la parte noreste de la región, específicamente en el sector más cordillerano, donde si bien las condiciones imperantes no son tan adversas como las que se encuentran en el desierto de Atacama como tal, sí lo son para el desarrollo de la vida.

El objetivo de este trabajo es caracterizar los fluidos que permiten la posible existencia de microorganismos en estos depósitos, intentar bosquejar su evolución y compararlos con fluidos que eventualmente podrían existir en la superficie marciana. Para esto se requiere una recopilación representativa de las zonas a estudiar, luego una caracterización petrográfica de los minerales de la zona y de las inclusiones fluidas primarias y secundarias que hayan albergado idealmente microorganismos. Con los datos obtenidos de estos procedimientos se realiza un análisis microtermométrico para determinar la composición de los fluidos.

Se identificaron en las muestras del salar Azufrera diatomeas, coccis, algas y componentes orgánicos. Sin embargo, las inclusiones que aportan información válida para este estudio, lamentablemente no contienen ni microorganismos ni materia orgánica. Además un gran porcentaje de las inclusiones resultaron ser metaestables, lo cual imposibilitó la obtención de datos de un gran número de FIAs. En el sistema hidrotermal se encontraron filamentos, diatomeas e insectos alados afuera de las inclusiones desafortunadamente, por lo tanto no fue posible caracterizar los fluidos que permitieron su existencia en este sistema.

Con el software Frezchem se modelaron los fluidos primarios del salar Azufrera y se intentó estimar la concentración de estos en un ambiente similar a Marte. Las condiciones ambientales fueron modeladas con pH 7.7 y 3.0. El pH neutro prevalece en el suelo marciano (Marion et al. (2010)) y en la mayoría de los salares de la zona de estudio; el pH ácido se justifica por la presencia de jarosita en Marte y la presencia de alteraciones hidrotermales en la tierra. Los resultados indican que las composiciones iónicas son tres órdenes de magnitud diferentes y por lo tanto poco comparables, además las variaciones en el pH no tendrían repercusiones en las concentraciones iónicas, no obstante, bajo ambos escenarios podría precipitar yeso, mineral con propiedades que permiten la preservación adecuada de microorganismos bajo condiciones adversas. Dado lo anterior no es posible concluir tajantemente al respecto.

*“Un ganador es
tan solo un perdedor
que lo intentó más de una vez”*

Agradecimientos

Esta memoria fue apoyada por FCFM-UCHile concedida a Moncada D., en el marco de los Proyectos Fondecip EQM140009 y FONDECYT N° 11170210.

Quiero agradecer a mi núcleo familiar (mamá, papá Muri) por todo el apoyo y amor incondicional que me han dado durante toda mi existencia, por haber estado ahí cuando los he necesitado, por haberme puesto límites cuando me he sobrepasado y por todos los momentos felices que me han regalado. Quiero agradecer también a mi tía Sandra y a mi tía Erika por haber cuidado de mí y de mi hermana, por haber aportado siempre su cuota de felicidad a mis desayunos y por las ricas comidas y tés que me preparaban para acompañar mis estudios.

Me gustaría agradecer también a mis abuelos, al Eduardo, a mis tíos y primos, por todo el amor que me entregaron durante mi infancia. A la Martita, a la Juli, al Marco, a la Carlita y a don José por ser una segunda familia.

Obviamente debo agradecer a mis amigos y amigas de la universidad, la Coni, la Fran, la Caro, la Javi C., la Gabi S., la Jesu, Robert, el Pedro, el Rojas, la Lara, la Vale Lingán, el Leo Camus, el Jercko y el otro Yerko, el mono, el Fonsi, el Fonseca, el Ariel, el Nico Cadiz, el Marco, el Jasson, la Marry Ann, el Vicho L., el Pablo T., el Andrade, el Soto, el Mati y el Seba Cortés. Cuántas historias y buenas anécdotas tengo con cada uno de ustedes, infinitas lecciones que fueron transformando a la ara mechona hasta ser la persona que soy hoy en día. Agradezco a la Martina, por ser un oído las infinitas veces que la he necesitado. A mis compañeros de la Universidad Popular Patricio Manzano (Macka, Caro, Coté, Dimi, Jose, Andrew, Martín, la Vale, la Reno y la Seve), por devolverme la esperanza en el actuar cotidiano, por mantener firmes las convicciones de que el bien común sí importa y que el trabajo colectivo sí tiene frutos. A mis tías de la universidad popular: a la Paty Erices, a la Bellita, a la Juana, a la Anita, a la Michelle, a la Abueli, por los buenos momentos compartidos, por revitalizarse con las clases y de paso revitalizarme a mí.

A mis profesores del colegio: al profe Pezet, a la profe Claudia, a la profe Karen y al profe Augusto, porque a pesar de ser un colegio malo, tuvieron fé en que me iría bien y me traspasaron esa fé en ganas de estudiar. Al profe Carlos y a la Yoyita, por alentarme a mejorar durante el tiempo que odiaba la matemática y la física y por enseñarme que la educación debe ser un proceso horizontal, entendido como un intercambio de saberes entre dos individuos. Me gustaría agradecer también a los profes Hector Augusto, Patricio Cordero y Luis Aguirre, por ser consecuentes en su actuar cotidiano, por enseñarme en la práctica que la universidad debe ser un espacio de reflexión más allá de la mera docencia.

Debo agradecer a JP, por su infinita paciencia y ayuda desinteresada durante este proceso de titulación, a mis compañeros memoristas: chinchón, la coní, David, el negro y el Basti por la ayuda y contención durante este último tiempo. Agradezco también al profesor Daniel Moncada y a las profesoras Claudia Cannatelli y Linda Daniele, por guiarme en este proceso y por las críticas constructivas. Por último y no menos importante agradecer a la Blanca y a don Carlos, porque sin ellos probablemente no me estaría titulado.

Tabla de Contenido

Introducción	1
Objetivos	2
Zona de trabajo	3
Marco Teórico.....	4
Marco Geológico.....	4
Unidades Morfoestructurales.....	4
Evolución Geológica	6
Salares en el norte de Chile	9
Climatología e Hidrografía	9
Tipos de salares e influjos.....	12
Evolución de los influjos y su relación con la composición química predominante del salar.....	13
Precipitación de la calcita.....	13
Precipitación de sales de magnesio	14
Precipitación de yeso.....	14
Litología de la cuenca	17
Componentes de las aguas	19
Comparación entre aportes atmosféricos e influjos	19
Termalismo	19
Sistemas Hidrotermales en el norte de Chile.....	20
Microorganismos en cristales de yeso.....	21
Marte	24
Condiciones ambientales y composición química de la superficie marciana.....	24
H ₂ O en Marte.....	28
Modelo Frezchem	29
Aproximación de Pitzer	29
Inclusiones Fluidas	31
Metaestabilidad.....	33
Sistemas Composicionales	34
Nucleación de compuestos	36
Descripción de la zona de trabajo	37
Salar Azufrera.....	38

Área de Control	40
Geología Local	42
Metodología	46
Observaciones de campo y selección de muestras	46
Preparación de muestras.....	48
Petrografía	50
Análisis microscópico	51
Microtermometría.....	52
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	53
Resultados	55
Petrografía	55
Inclusiones Fluidas Primarias y Secundarias.	57
Microorganismos dentro y fuera de inclusiones fluidas en el salar Azufrera	66
Microtermometría.....	68
Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	78
Nucleación del Yeso.....	79
Discusiones	84
Conclusiones.....	87
Bibliografía	88
Anexos	93
Anexo A	93
Anexos B.....	94
Anexos C.....	102
Anexos D.....	109

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparación de las características distintivas de los cuatro sistemas de arco en el segmento de los Andes Centrales. Extraído y modificado de (Scheuber & Reutter, 1992).	8
Tabla 2: Características climáticas del norte de Chile. Extraído de Risacher et al. (2003).	10
Tabla 3: Concentración de sales en un regolito marciano "típico". Extraído y modificado de (Clark & Van Hart, The salts of Mars, 1981).	25
Tabla 4: Posibles componentes y concentraciones del suelo marciano. Extraído de Clark & Van Hart (1981).	26
Tabla 5: Puntos eutécticos de los sub-sistemas de H ₂ O-NaCl-KCl-CaCl ₂ -FeCl ₂ -FeCl ₃ . Extraído y modificado de Steele-MacInnis et al. (2016)	35
Tabla 6: Minerales de las costras salinas superficiales, salares andinos, determinados en base a análisis por rayos X; (') indica mineral principal; (") indica mineral traza. Extraído de Vila G. (2010)	38
Tabla 7: Características del salar Azufrera, extraído de Risacher et al. (2003).	38
Tabla 8: Mineralogía encontrada en salares Ignorado y Gorbea. Extraído de Risacher et al. (2002)	41
Tabla 9: Resultados de microtermometría de la Muestra 1.	69
Tabla 10: Resultados de la microtermometría de la Muestra 2.	70
Tabla 11: Resultados de la microtermometría de la Muestra 4.	71
Tabla 12: Concentraciones iónicas del salar Pajonales, extraído y modificado de Vila (2010)	74
Tabla 13: Composición química acuosa del suelo marciano basada en la misión Phoenix, entregada por Marion et al. (2010)	74
Tabla 14: Presiones parciales terrestres.	75
Tabla 15: Presiones parciales y atmosféricas marcianas.	75
Tabla 16: Composición química porcentual del mineral del salar Azufrera.	78
Tabla 17: Composición química porcentual de las imperfecciones dentro del mineral huésped, perteneciente al salar Azufrera. El oxígeno fue retirado de la tabla y el resto de las composiciones fueron estandarizadas para acentuar la presencia del resto de los elementos.	78
Tabla 18: Parámetros utilizados para los cálculos relacionados al proceso de nucleación del yeso.	79
Tabla 19: Concentraciones iónicas de las diferentes muestras bajo condiciones marcianas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.	109
Tabla 20: Fases a precipitar bajo condiciones marcianas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.	110
Tabla 21: Concentraciones iónicas bajo condiciones marcianas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.	111
Tabla 22: Fases a precipitar bajo condiciones marcianas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.	112
Tabla 23: Concentraciones iónicas bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.	113
Tabla 24: Tabla 22: Fases a precipitar bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.	114
Tabla 25: Concentraciones iónicas bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.	115
Tabla 26: Fases a precipitar bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.	116

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1: Ubicación de la zona de trabajo, extraído y modificado de Google Earth 13.06.2017 (12:10 hrs).....</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 2: Perfil geomorfológico extraído de los Andes del norte de Chile (a los 27°06'S). 1: Océano Pacífico, 2:Cordillera de la Costa;3 y 4: Depresión Central (3: salares fósiles, 4: abanicos aluviales o pediplanos); 5: Precordillera; 6 y 7: Depresión Pre-Andina (6:Cordillera de la sal, 7: salar de Atacama; 8, 9 y 10: Cordillera Occidental(8: basamento, 9: meseta ignimbrítica, 10: estratovolcanes), 11: salares contemporáneos, 12 antiguos salares enterrados (hipotético).. Extraído y modificado de Risacher & Fritz (2011).....</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 3: El ciclo tectónico Andino. Subdivisiones en etapas, sub-etapas, y eventos tectónicos que marcaron su desarrollo. Extraído de Charrier et al. (2009).....</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 4: Mapa del norte de Chile y sus secciones topográficas, se observan las unidades morfoestructurales principales y la localización de los salares desde Arica a Copiapó. Extraído de Risacher et al. (2003).....</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 5: Diagrama de vías evolutivas. Alcalina (I-IA), sulfato - alcalina (I-IIA-III), sulfato-neutral (II-III) y cálcica (II-IV). Extraído y editado de Risacher & Fritz (2009).....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 6: Resumen de composición vs. Vía evolutiva. Extraído de (Risacher , Alonso, & Salazar, Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones - Chile, 1999).....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 7: Relación entre la litología de la cuenca y la vía evolutiva. Extraído de Risacher et al. (1999).....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 8: Principales tipos de microorganismos en cortezas de yeso/anhidrita. 1. Microorganismos epilíticos (Líquenes epilíticos), 2. Microorganismos criptoendolíticos³ (microcolonias fungis), 3. Algas, 4. Algas asociadas con hifas⁴ fúngicas, 5. Hifas fúngicas sin algas asociadas, 6. Cianobacterias y bacterias no fototróficas, 7. Microorganismos endolíticos asociados con hifas fúngicas, imagen extraída de Wierzchos et al. (2010).....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 9: Microorganismos dentro de cristales de yeso presentes en los salares Gorbea e Ignorado. A: Diatomeas, A1 a luz transmitida y A2 a luz UV. B: Diatomea con célula de alga y propariontes. C: Algas (anaranjado pálido) y beta-caroteno (rojo). D: Alga Dunalialla (flecha). E: Células de algas rodeadas por un gel claro, E1 a luz transmitida y E2 a luz UV. F: Procariontes y algas en inclusiones fluidas, F1 a luz transmitida y F2 a luz UV. G: Procariontes cocci (círculos rojos), bacilli (flechas) y algas amarillas (cuadrado). Extraído de Benison et al. (2014).....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 10: Representación esquemática mostrando inclusiones primarias, secundarias y pseudosecunarias dentro de un cristal en crecimiento. Extraído de Bodnar, (2003).....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 11: Geología Local. En la imagen se muestra la ubicación del sistema hidrotermal y del salar Azufrera. Se puede observar que la zona de estudio se compone principalmente de volcanes de edad Mioceno y en el sector se encuentran distribuidos diversos sistemas hidrotermales (descripción detallada en el texto). Extraído y modificado de Naranjo et al. (2013).....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 12: Fotografía Panorámica del sector perteneciente al Salar Azufrera.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 13: Fotografía en detalle del sector del salar Azufrera. Se observan los cristales distribuidos en el suelo.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 14: Fotografía perteneciente al sector del área de control.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 15: Muestras tipo de cada lugar.. Imagen izquierda, cristales de crecimiento inferior pertenecientes al salar Azufrera. Imagen derecha, roca litificada perteneciente al área de control.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 16: Implementos a utilizar durante el proceso de pulido de las muestras.</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 17: Platina Linkam THMSG600.....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 18: Cressington 108C Auto carbon Coater. Equipop utilizado para la carbonización de la muestra</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 19:SEM-EDX-CL Quanta 250 de la Universidad de Chile.....</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 20: Imagen característica de los depósitos del salar Azufrera, donde se reconocen los minerales yeso y anhidrita, bajo luz transmitida. Microfotografía 1.1 sin polarizadores. Microfotografía 1.2 con polarizadores.....</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 21: Muestra del área de control. Microfotografías 1.1 y 1.2 (sin y con polarizadores, respectivamente) corresponden a una sección donde se puede observar dos minerales: M1, mineral similar al yeso pero cuya extinción se da a los 17° y M2, mineral que altera a otros a través de sus clivajes. Microfotografías 2.1 y 2.2 (sin y con polarizadores, respectivamente) corresponden a una sección donde se puede observar dos minerales: M3, mineral similar a la anhidrita; M4, mineral similar a la thenardita. Todas las imágenes se observan bajo luz transmitida.</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 22: Inclusiones primarias tipo I bajo luz transmitida.....</i>	<i>57</i>

<i>Ilustración 23: Inclusiones primarias tipo II. Microfotografía 1, muestra inclusiones en una zona de crecimiento bajo luz transmitida. Microfotografía 2 acercamiento del círculo de color rojo de la microfotografía 1, bajo luz transmitida.</i>	58
<i>Ilustración 24: Inclusiones primarias tipo III. Microfotografía 1, muestra FIA bajo luz transmitida. Microfotografía 2, muestra la presencia de diatomeas (fluorescencia) tanto dentro como fuera de las inclusiones, bajo luz UV. La flecha roja indica la presencia de una diatomea atrapada dentro de una inclusión.</i>	59
<i>Ilustración 25: Inclusiones primarias tipo IV, bajo luz transmitida.</i>	59
<i>Ilustración 26: Inclusiones primarias tipo IV, mostrando todas sus fases presentes. Microfotografía 1, presenta una inclusión que contiene una fase líquida, doble burbuja con una fase vapor y dos sólidos (S1 y S2, S1 es halita), bajo luz transmitida. Microfotografía 3, inclusión con dos fases: sólido y vapor, bajo luz transmitida. Microfotografía 3, se observan dos inclusiones con las tres fases presentes: sólido, líquido y vapor, el líquido es muy escaso en ambas inclusiones.</i>	60
<i>Ilustración 27: Zonas de crecimiento en los cristales de yeso. Microfotografía 1, obtenida del laboratorio, la elipse roja abarca la zona de crecimiento. Imagen 2, representación esquemática de la ubicación de las zonas de crecimiento dentro del cristal de yeso-anhidrita.</i>	61
<i>Ilustración 28: Inclusiones secundarias tipo I. Microfotografía 1, muestra inclusiones secundarias siguiendo trenes de micro fracturas bajo luz transmitida. Microfotografía 2, acercamiento del círculo rojo en la microfotografía 1, bajo luz transmitida.</i>	62
<i>Ilustración 29: Inclusiones secundarias tipo II bajo luz transmitida.</i>	62
<i>Ilustración 30: Inclusiones secundarias tipo III. Microfotografía 1, muestras los trenes (sur-este) que siguen este tipo de inclusiones, bajo luz transmitida. Microfotografía 2, acercamiento de la elipse roja marcada en la microfotografía 1, bajo luz transmitida.</i>	63
<i>Ilustración 31: Inclusiones fluidas primarias tipo I, en el área de control. Microfotografía 1, muestra inclusiones fluidas primarias siguiendo la dirección de clivaje del cristal huésped. Microfotografía 2, acercamiento de las zona inclusiones. Imágenes capturadas bajo luz transmitida.</i>	64
<i>Ilustración 32: IF primarias tipo II, en el área de control. Microfotografía 1, muestra a las inclusiones siguiendo el clivaje del mineral huésped. Microfotografía 2, acercamiento de la elipse roja, se observan las IF ricas en líquido. Imágenes capturadas bajo luz transmitida.</i>	64
<i>Ilustración 33: IF secundarias, en el área de control. Microfotografía 1, muestra el tren seguido por las inclusiones secundarias (línea roja recortada). Microfotografía 2, acercamiento de la elipse roja, en ella se puede observar las tasas consistentes líquido-vapor dentro de las inclusiones. Imágenes capturadas bajo luz transmitida.</i>	65
<i>Ilustración 34: Microorganismos dentro de los cristales de yeso-anhidrita del Salar Azufrera. Microfotografía 1, diatomea atrapada dentro de inclusión, bajo luz transmitida y UV. Microfotografía 2, diatomea libre dentro del cristal bajo luz transmitida. Microfotografía 3, presunta alga <i>Dunaliella</i> libre bajo luz transmitida. Microfotografía 4, materia orgánica libre bajo luz transmitida. Microfotografía 5. Coccis atrapados en inclusión fluida bajo luz transmitida y UV.</i>	66
<i>Ilustración 35: Filamentos dentro de los cristales salinos del área de control. Microfotografía 1, filamento bajo luz transmitida. Microfotografía , filamento bajo luz transmitida y UV.</i>	67
<i>Ilustración 36: Esquemas de la ubicación de cada familia de inclusiones dentro de cada muestra.</i>	68
<i>Ilustración 37: Resultados de las temperaturas eutécticas de la muestra 1.</i>	72
<i>Ilustración 38: Resultado de las temperaturas del último derretimiento de la Muestra 1.</i>	73
<i>Ilustración 39: Comparación entre las concentraciones iónicas terrestres y las concentraciones iónicas esperadas en Marte. Es importante destacar la gran diferencia entre las magnitudes de las concentraciones en ambos escenarios (de tres órdenes de magnitud).</i>	77
<i>Ilustración 40: Energía libre asociada a la formación de núcleos de yeso en función del número de moléculas en cada núcleo, para valores de log S en el rango 1.5 a 3.5 (valores especificados en las líneas de colores).Bajo una temperatura de 215 K.</i>	79
<i>Ilustración 41: Energía libre asociada a la formación de núcleos de yeso en función del número de moléculas en cada núcleo, para valores de log S en el rango 1.5 a 3.5 (valores especificados en las líneas de colores).Bajo una temperatura de 273 K.</i>	80
<i>Ilustración 42: Número de moléculas de yeso en un núcleo crítico en función del grado de saturación, bajo 215K.</i>	81
<i>Ilustración 43: Número de moléculas de yeso en un núcleo crítico en función del grado de saturación, bajo 273K.</i>	81
<i>Ilustración 44: Tasa de nucleación del yeso en base al grado de saturación, bajo diferentes temperaturas (215K y 273K) especificadas en las líneas coloreadas,</i>	82

<i>Ilustración 45: Representación esquemática de la muestra 1, con las FIAs asociadas y los datos obtenidos de la microtermometría de la FIA 2 (ex FIA 1).....</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 46: Muestra 1. Datos microtermométricos de las s2(ex FIA 2), s1 (ex FIA 3) y 4 (ex FIA 4)</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 47: Muestra 1. Datos microtermométricos de las FIAs 5 (ex FIA 5) , 1 (ex FIA 6) y 3 (ex FIA7).</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 48: Representación esquemática de la muestra 2, con las FIAs asociadas y los datos obtenidos de la microtermometría de la FIA s1 (ex FIA1).</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 49: Muestra 2. Datos microtermométricos de las FIAs 1(ex FIA2) y s2 (ex FIA 3).</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 50: Representación de la muestra 4, con las FIAs asociadas y los datos obtenidos de la microtermometría del FIA s3 (ex FIA1).</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 51: Muestra 4. Datos microtermométricos de las FIAs 3 (ex FIA2), 4 (ex FIA3) y FIA 1 (ex FIA4).</i>	<i>100</i>
<i>Ilustración 52: Muestra 4. Datos microtermométricos de las FIAs s1 (ex FIA5), s2 (ex FIA6) y 2 (ex FIA7)</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 53: FIA 5 perteneciente a la muestra 1 bajo luz transmitida. Se observan diferentes fases en su interior.</i>	<i>102</i>
<i>Ilustración 54: FIA s1 perteneciente a la muestra 1. Microfotografía 1, muestra las fases líquido, vapor y sólido presentes en las inclusiones bajo luz transmitida Microfotografía 2, muestra un posible cocci que fluoresce bajo la luz UV.....</i>	<i>103</i>
<i>Ilustración 55: FIA s2 perteneciente a la muestra 1. Microfotografía 1, se muestran las fases líquido, vapor y sólido presentes en las inclusiones, bajo luz transmitida. Microfotografía 2, muestra la fluorescencia que presenta la materia orgánica atrapada dentro de una de las IF, bajo luz UV</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 56: FIA1 perteneciente a la muestra 2. Microfotografía 1, Muestra las inclusiones ricas en vapor de esta familia, bajo luz transmitida. Microfotografía 2, muestra fluorescencia debido a la materia orgánica en el interior de una de las inclusiones, bajo luz UV.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 57: FIA 1 perteneciente a muestra 4. Se muestran las fases líquido y vapor presentes en las inclusiones de esta familia, bajo luz transmitida.</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 58: FIA 3 perteneciente a la muestra 4. Se muestran las fases líquido, vapor y sólido, bajo luz transmitida. Además se observa una superficie rugosa dentro de una de las inclusiones, la cual se mantuvo estable durante todo el proceso de microtermometría.</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 59: FIA s1 perteneciente a muestra 4. Se observan las fases líquido, vapor y sólido en su interior, bajo luz transmitida.....</i>	<i>108</i>

Introducción

La vida en la tierra se hizo paso entre condiciones ambientales sumamente desfavorables, en donde las condiciones anaerobias (Nisbet & Sleep, 2001) y la alta radiación ultravioleta imperaban (Cnossen et al., 2007). Bajo ese contexto, bacterias anaerobias y extremófilas lograron resistir e ir evolucionando a microorganismos cada vez más desarrollados, los cuales a su vez fueron cambiando las condiciones de su entorno (Cnossen et al., 2007). La Tierra, planeta rico en oxígeno y agua, que actualmente se presenta como un escenario que propicia la vida, requirió millones de años de evolución para lograr estas condiciones. Teniendo en cuenta estas premisas, cabe preguntarse si existen otros planetas que puedan albergar bacterias similares.

Marte ha sido el blanco de sucesivos estudios debido a que su estado actual es similar a la Tierra primitiva (Rothschild, 1990). Diversos científicos han realizado investigaciones que apuntan a bosquejar numerosos oasis posibles en el planeta rojo (Rothschild, 1990) o a compararlo con lugares terrestres que presenten condiciones extremas (McKay et al., 2003; Wierzchos et al., 2010; Vitek et al., 2010; Schopf et al., 2012; Benison & Karmanocky, 2014). De ahí que han comenzado a resonar dentro de la comunidad científica los salares del norte de Chile.

La región de Atacama es señalada como un posible análogo terrestre de Marte por su extrema aridez y sus depósitos sulfatados, en ella se ubican cuencas endorreicas intra-montañas que albergan lagos y cortezas salinas (Risacher, Alonso, & Salazar, 2003), cuyos principales depósitos son sulfatos, cloruros y carbonatos. El yeso y la halita presentes en estos salares han sido objeto de estudios, debido a que albergan microorganismos que logran resistir las condiciones imperantes, gracias a que estos minerales les brindan condiciones mínimas de humedad y protección contra la radiación ultravioleta (UV). A pesar de lo anterior, el núcleo hiper árido del Desierto de Atacama es una zona inhabitable según Wierzchos et al. (2010), los cuales señalan que la baja humedad relativa del ambiente sería la responsable de cruzar el umbral de “habitabilidad”.

En los años ochenta Clark & Van Hart (1981) proponían composiciones químicas para la superficie marciana, en donde se destacaba el porcentaje de sulfatos (8-15%), mientras que en los años dos mil Catling et al. (2006) mencionaban que los datos espectrales infrarrojos medidos por el instrumento OMEGA en Marte, mostraban signatures de sulfatos hidratados, en particular yeso y kieserita.

Las condiciones ambientales de Marte y de la región de Atacama logran traslaparse, y además los depósitos encontrados en ambos lugares involucran al mismo mineral, el yeso, el cual en ciertas áreas de la tercera región contiene microorganismos. Las preguntas a responder entonces son ¿qué salares presentan tales condiciones?, ¿algunos, todos?, ¿qué tipo de fluidos precursores de los depósitos de yeso permitieron la existencia de vida en ellos?, ¿se puede determinar la composición de estos?. En el presente estudio se investiga al salar Azufrera y un depósito hidrotermal ubicado al norte-este de la tercera región.

Objetivos

General

- ▶ Determinar las condiciones terrestres que permiten la existencia de microorganismos en dos depósitos salinos de la región de Atacama, el salar Azufrera y un sistema hidrotermal.

Específicos

- ▶ Identificar “fluids inclusions assemblages (FIAs)” consistentes.
- ▶ Determinar especies de microorganismos que se encuentran dentro de las inclusiones fluidas y cristales.
- ▶ Determinar condiciones de los paleofluidos que preservan estos microorganismos.

Zona de trabajo

La zona de trabajo comprende al salar Azufrera (sistema evaporítico) y a un depósito salino que se denominará área de control. Ambos se ubican en el extremo norte-este de la región de Atacama (III), cercanos al límite con Argentina (Ilustración 1).

Para llegar a la zona se debe seguir la ruta 5 hasta la altura del valle de la Luna y luego se debe tomar la ruta de los salares de Tal-Tal hasta llegar a su último punto en donde se ubica el salar Azufrera, este se encuentra a 222 km al este de la ruta 5. El sistema de estudio se sitúa en el kilómetro 200 de la ruta de los salares de Tal-Tal, y desde ahí se debe descender caminando para llegar al sistema hidrotermal.

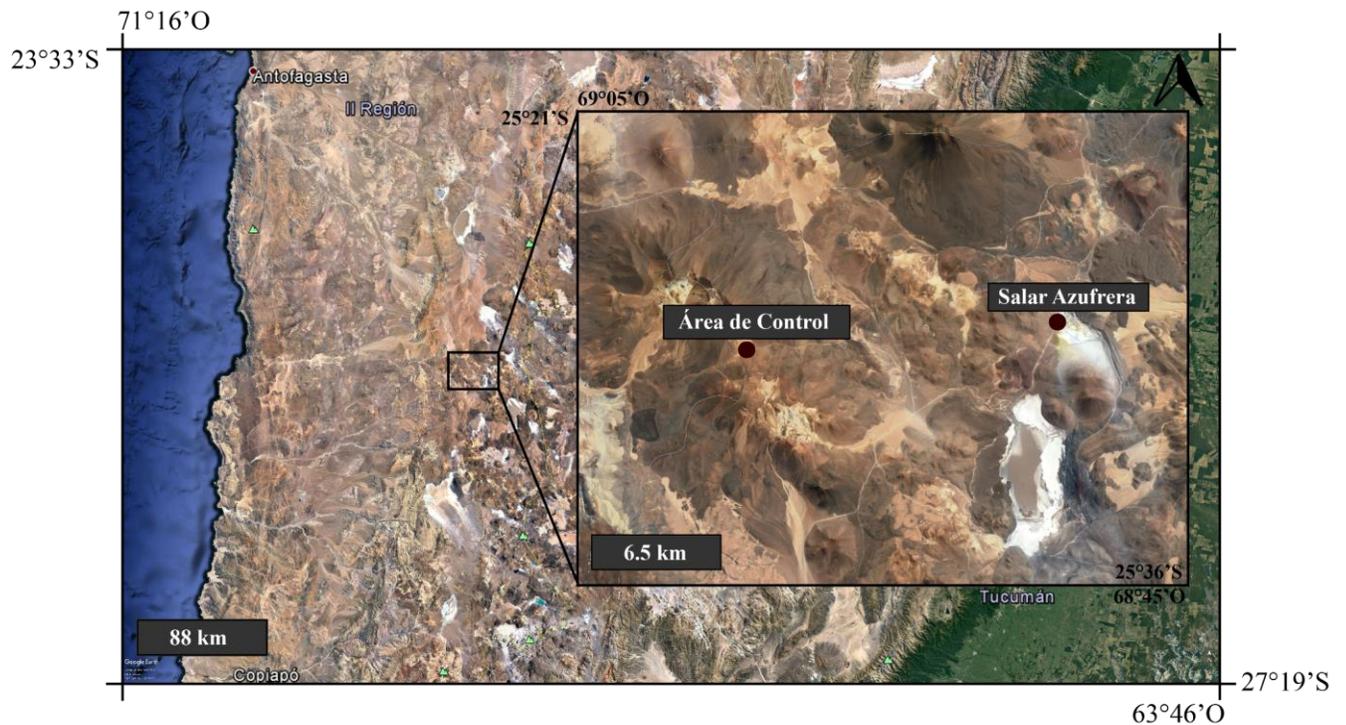


Ilustración 1: Ubicación de la zona de trabajo, extraído y modificado de Google Earth 13.06.2017 (12:10 hrs)

Marco Teórico

Marco Geológico

Unidades Morfoestructurales

La morfología de la costa chilena ha estado determinada entre otros factores por la tectónica entre las placas de Nazca y Sudamericana, el volcanismo y las condiciones climáticas asociadas a cada zona (Risacher et al., 1999).

Los principales rasgos geomorfológicos de los Andes del norte de Chile (Ilustración 2), se detallan a continuación:

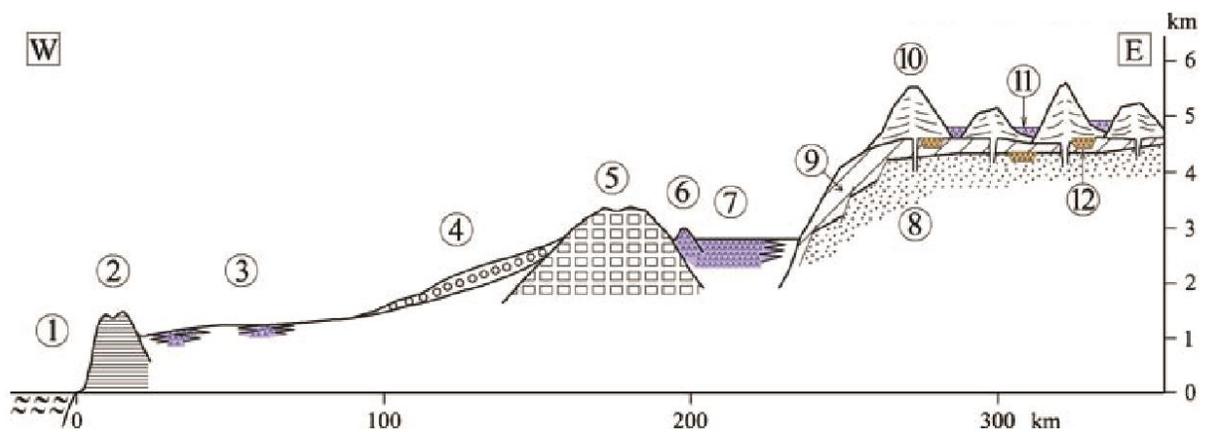


Ilustración 2: Perfil geomorfológico extraído de los Andes del norte de Chile (a los 27°06'S). 1: Océano Pacífico, 2: Cordillera de la Costa; 3 y 4: Depresión Central (3: salares fósiles, 4: abanicos aluviales o pediplanos); 5: Precordillera; 6 y 7: Depresión Pre-Andina (6: Cordillera de la sal, 7: salar de Atacama; 8, 9 y 10: Cordillera Occidental (8: basamento, 9: meseta ignimbrítica, 10: estratovolcanes), 11: salares contemporáneos, 12 antiguos salares enterrados (hipotético)). Extraído y modificado de Risacher & Fritz (2011)

Cordillera de la Costa: Cadena montañosa de elevación moderada (1500 m en promedio) (Risacher et al., 2003) cuya longitud estimada es de 900 kms (Risacher et al., 1999). Se trataría de un bloque levantado y dislocado por el Sistema de Fallas de Atacama y entre sus cerros se ubican depresiones rellenas de sedimentos continentales. Hacia el borde oriental se presentan planos coluviales y salares (Risacher et al., 1999) en tanto que en el borde occidental un gran acantilado originado en escarpes tectónicos sería la característica distintiva (Paskoff, 1979). Las rocas aflorantes son de dos tipos, sedimentarias marinas y andesitas del Cretácico y Jurásico, estas son alcanzadas y alteradas por batolitos graníticos del Jurásico tardío al Cretácico. La ubicación actual de la cordillera correspondería al lugar donde se emplazó el arco magmático del Jurásico al Cretácico temprano (Scheuber & Reutter, 1992).

Depresión Central o Valle Longitudinal: Se trata de un graben que configura una cuenca elongada en sentido norte-sur, se ubica entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera (Risacher et al., 1999), el relleno de la cuenca se conforma de sedimentos detríticos y lacustres (grava, arena, arcilla, limo) de edad Terciaria a Holocena, los que se encuentran usualmente cubiertos por cortezas salinas remanentes de antiguos salares (Risacher et al., 2003). La depresión se ubicaría en la misma zona donde se habría emplazado el arco magmático del Cretácico medio, y en algunos sectores también se habría emplazado el arco del Cretácico Tardío al Paleógeno (Scheuber & Reutter, 1992). Entre los 22° y los 25°S de latitud en esta posición se encuentra el Desierto de Atacama.

Precordillera: Según Risacher et al. (1999) esta geomorfología se compone de la Cordillera del Medio y de la Cordillera de Domeyko, esta última se ubica entre los 22°20' y los 25°30'S, con una longitud de 450 km y un ancho que alcanza los 30 km. La precordillera presenta una altura promedio de 3000 m, sigue un eje convexo hacia el oeste y se encuentran delimitada por fallas normales y transcurrentes. Se constituye principalmente de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias de edades Paleozoicas y Mesozoicas. En su flanco este se encuentran formaciones evaporíticas continentales. En esta ubicación se habría emplazado el arco magmático del Cretácico tardío al Paleógeno y se ubicarían depósitos cupríferos. (Risacher et al., 2003).

Depresión Preandina: Es una cuenca intramontañosa ubicada en un graben tectónico entre la Precordillera y la Cordillera Occidental, su altura es de 2500 m aproximadamente, y se encuentra rellena con sedimentos clásticos y evaporíticos de origen continental de edad Terciaria a Holocena. En su interior contiene cuencas evaporíticas, entre las cuales se destacan el salar de Atacama y el salar Punta Negra. La Cordillera de la sal es un salar que fue deformado durante el Cenozoico y que en la actualidad se compone de pliegues anticlinales, domos de yeso y rocas de sal, este depósito se sitúa bordeando al salar de Atacama por su flanco oeste (Risacher et al., 1999; Risacher et al., 2003).

Cordillera Occidental: Se trata de un horst tectónico que conforma una meseta de 4000 m de altura media, se compone de ignimbritas y estratovolcanes andesíticos. En ocasiones estos últimos delimitan cuencas de drenaje que son rellenas con cortezas o lagos salinos (Risacher et al., 1999; Risacher et al., 2003). Las ignimbritas presentes pertenecen a la Formación Riolfítica en tanto que los estratovolcanes a la Formación Andesítica (Zeil & Pichler, 1967), las edades de estas formaciones son Mioceno temprano y Mioceno medio respectivamente (Risacher et al., 1999). El origen del magmatismo ácido se habría generado por fusión parcial de la corteza superior, en tanto que el origen del magmatismo intermedio aún no se esclarecería, pero se sugiere que se habría generado por fusión parcial del manto superior o de la corteza inferior (Pichler, Zeil, & , 1967). Por último cabe señalar que el arco magmático contemporáneo se habría emplazado durante el Oligoceno-Mioceno a lo largo de esta cordillera (Scheuber & Reutter, 1992).

Los salares de este estudio se ubican en la Cordillera Occidental, en donde la efusión de las lavas permitió la formación de cuencas cerradas intramontañosas, que actualmente albergan lagunas y salares.

Evolución Geológica

Las geomorfologías anteriormente descritas obedecen a la evolución geológica que ha tenido la costa sudamericana desde hace millones de años, en los que han ocurrido etapas extensivas, eventos compresivos, deslizamientos transcurrentes, desplazamiento del arco magmático, entre otros. En la ilustración 3 se puede observar que durante el ciclo Andino predomina la tectónica extensiva, sin embargo entre las etapas y las sub-etapas de él se dio lugar a eventos compresivos (orogenias).

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

Ilustración 3: El ciclo tectónico Andino. Subdivisiones en etapas, sub-etapas, y eventos tectónicos que marcaron su desarrollo. Extraído de Charrier et al. (2009).

La evolución de la zona durante este último ciclo tectónico estuvo caracterizada por la migración del arco hacia el este, dando lugar a la existencia de cuatro arcos desde el Jurásico a la fecha, los cuales se describen a continuación:

Jurásico Inferior – Cretácico temprano

El primer sistema de arco se comenzó a formar durante el Sinemuriano en la primera etapa del ciclo Andino, su actividad tectónica y magmática finalizó durante el Barremiano. Se ubicó en lo que hoy se conoce como la Cordillera de la Costa y sus depósitos sobre-yacen de manera discordante a rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias foliadas de edad Paleozoica. Durante su periodo de actividad magmática sufrió movimientos de cizalle paralelos a la cadena montañosa (sistema de Falla de Atacama), extensión normal orogénica, intrusiones de grandes batolitos y se desarrolló el tras-arco donde se intercala material volcánico proveniente del arco con sedimentos marinos no volcánicos. Las lavas asociadas a este periodo fueron depositadas en una cuenca superficial marina que sufría fenómenos de subsidencia (Scheuber & Reutter, 1992).

Cretácico Medio

Según Scheuber & Reutter (1992) este segundo sistema de arco se comenzó a formar durante el Albiano – Cenomaniano, se ubicó en el actual Valle Longitudinal (tras-arco del arco Jurásico) y el volcanismo asociado era de carácter calco-alcalino (Risacher et al., 1999). Durante su existencia habría existido un cambio en la configuración tectónica, desde un sistema extensional entre las placas Aluk y Sudamérica a uno compresional entre las placas Farallon y Sudamericana, este último estadio habría generado acortamiento orogénico normal en el sector (Scheuber & Reutter, 1992).

Cretácico Tardío – Paleógeno

El sistema de arco se ubicó al norte de Antofagasta en la actual Precordillera y al sur de Antofagasta en la Precordillera y el Valle Central, fue emplazado en un ambiente tectónico no extensivo y se desarrolló además en este periodo el tras-arco (Scheuber & Reutter, 1992). En la Precordillera el Sistema de Falla Precordillerano acomodó la convergencia oblicua entre las placas a través de movimientos transcurrentes (Risacher et al., 1999; Scheuber & Reutter, 1992). la deformación en ella ocurrió entre el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano, extendiendo el acortamiento a la zona del trasarco, lo anterior se habría generado debido a un aumento en la tasa de convergencia de las placas de Nazca/Farellon a Sudamericana (Scheuber & Reutter, 1992). Las lavas, ignimbritas y tobas provenientes de este arco se depositaron sobre rocas Paleozoicas y Cretácicas (Risacher et al., 1999).

Mioceno – Holoceno

El arco magmático moderno es el más amplio de los cuatro descritos y se encuentra emplazado en la Cordillera Occidental (Risacher et al., 1999), sus depósitos sobre-yacen a rocas Paleozoicas y Oligocenas (Scheuber & Reutter, 1992). La tasa de convergencia habría sido menor a finales del Oligoceno, generando una disminución del stress compresivo que a su vez provocó adelgazamiento cortical y la consecuente formación de cuencas intramontañosas (Scheuber & Reutter, 1992). La oblicuidad de convergencia desde el Mioceno a la fecha ha sido de $<20^\circ$. (Scheuber & Reutter, 1992).

En la tabla 1, se resumen las características distintivas de cada arco.

Tabla 1: Comparación de las características distintivas de los cuatro sistemas de arco en el segmento de los Andes Centrales. Extraído y modificado de (Scheuber & Reutter, 1992).

Arco ^a	(1)	(2)	(3)	(4)
Edad (Ma)	200-120	110-180	70-32	26-0
Periodos de deformación (\approx Ma)	150-120	90-80	40-35	26-0
Coincidencia de actividad ígnea y deformación	++	(+) algunos datos	++	++
Acortamiento orogénico normal (s) o extensión (e)	e	e-s	s	s
Desplazamiento transcurrente, Sinistral (s), dextral (d)	fuerte s	? ?	detectable d	detectable d
Plegamiento del trasarco (antepaís) y deformación del cinturón de empuje	-	-	+	+
Profundidad del nivel expuesto (km)	0-12	?	0-7	0

^a (1) Jurásico - Cretácico temprano, (2) Cretácico medio, (3) Cretácico tardío - Paleógeno, (4) Mioceno – Holoceno

Volcanismo Cenozoico y Depósitos Evaporíticos

Desde el emplazamiento del último sistema de arco, se han desarrollado dos tipos de volcanismo asociados a periodos compresivos y extensionales. El primero ocurrió durante el Mioceno inferior, fue de tipo fisural y sus depósitos corresponden a ignimbritas dacíticas a riolíticas intercaladas con lavas andesíticas, que conforman el plateau riolítico. El segundo, de edad Plio-Pleistoceno depositó lavas dacíticas a riolíticas y generó estrato-volcanes andesíticos a dacíticos. Posteriormente hubo un decrecimiento de la actividad volcánica y un intenso periodo erosivo, los que en conjunto con el clima árido de la zona provocaron la deposición de sedimentos clásticos y evaporíticos (Risacher et al., 1999).

En resumen la tectónica de placas, el volcanismo y la intensa aridez de la zona han sido claves para conformar los rasgos geomorfológicos que se reconocen hoy en día.

Salares en el norte de Chile

El estudio de los salares chilenos (Risacher et al., 1999; Risacher et al., 2002; Risacher et al., 2016) ha abarcado desde su morfología, génesis e hidroquímica hasta los microorganismos que estos albergan (Benison & Karmanocky, 2014; Wierzchos et al., 2010).

Se encuentran distribuidos entre Arica y Copiapó, y se ubican principalmente entre el flanco este de la Precordillera y la cordillera Occidental. Las rocas asociadas a cada unidad morfológica son principalmente sedimentarias y volcánicas, respectivamente, aportando de esta manera gran cantidad de sales y minerales sulfurosos.

Los volcanes pertenecientes a la cordillera Occidental en ocasiones delimitan cuencas de drenaje, las cuales albergan estos depósitos salinos si en ellas se cumple que la pluviosidad es menor que la evaporación (Risacher, 1999)

Los factores claves para conformar este tipo de depósito son: la climatología, hidrografía y litologías de la zona.

Climatología e Hidrografía

Entre las características climáticas de la zona donde se ubican estos se cuentan:

- El clima se ha mantenido árido a semi-árido desde el Mioceno (Risacher, 2003).
- Las precipitaciones aumentan en dirección oeste a este y con la altura, comenzando a los 2000 m.s.n.m, además se ven afectadas por un sistema tropical convectivo que genera lluvias de corta duración, poca extensión territorial y de baja intensidad en el altiplano (20 mm/día) (Risacher et al., 1999).
- El 10% a 20% de las precipitaciones ocurren en forma de nieve (Risacher et al., 2003).
- La temperatura promedio anual disminuye de norte a sur (Risacher et al., 2003).
- La dirección del viento es de océano a cordillera, de esta forma sales marinas y polvo salino es transportado desde el valle central hacia el este. (Risacher et al., 2003)

Estas características han permitido la formación de diversos salares o lagos salinos que se pueden observar en la ilustración 4. Las principales características climáticas de la zona se resumen en la tabla 2.

Tabla 2: Características climáticas del norte de Chile. Extraído de Risacher et al. (2003).

	Rango Costero	Valle Central	Precordillera	Depresión Pre-Andina	Cordillera Occidental
Precipitación	<10	<10	10-25	25-50	50-300
Evaporación Potencial	1000	1500	1500	1500	600-1200
Temperatura Promedio	15-18	18-20	8-12	12	0

Precipitación y evaporación en mm/año y la temperatura en °C

En cuanto a la hidrografía Risacher et al. (1999) indican que los “salarés y lagunas pueden considerarse como pozas de evaporación para las aguas superficiales y subterráneas que fluyen en la cuenca. Los acuíferos están constituidos principalmente por material aluvial y rocas fracturadas del basamento, como ignimbritas, andesitas, riolitas e intrusivos ígneos”.

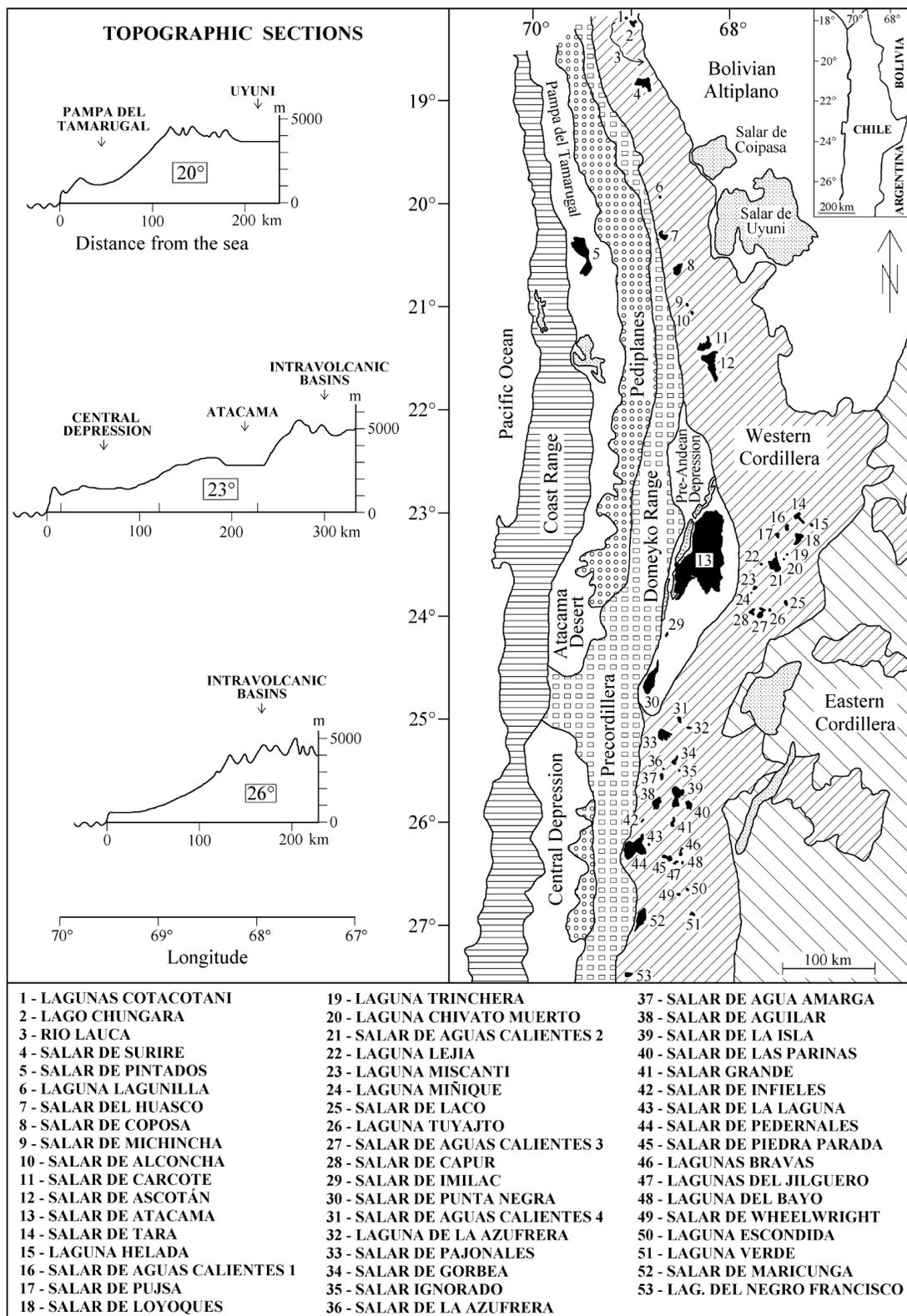


Ilustración 4: Mapa del norte de Chile y sus secciones topográficas, se observan las unidades morfoestructurales principales y la localización de los salares desde Arica a Copiapó. Extraído de Risacher et al. (2003).

Tipos de salares e influjos

Según su morfología los salares del norte de Chile se pueden clasificar en lagunas salinas, playas o cortezas salinas (Risacher et al., 2003).

- Los lagos salinos poseen una profundidad de decímetros hasta algunos metros y se caracterizan porque el agua abarca toda el área del salar (Risacher et al., 2003).
- Las playas son piscinas salinas superficiales (del orden de centímetros) y efímeras, contienen sedimentos fino y casi impermeables (Risacher et al., 1999). Bajo ellas se encuentran acuíferos que son rellenos por salmueras intersticiales y a veces se depositan precipitados de sales como el yeso o la halita.
- Las cortezas salinas se dividen en activas y fósiles. Activas se les denomina a aquellas que se han formado producto de la saturación debido a la evaporación de salmueras, su espesor es centimétrico y se encuentran en la Cordillera Occidental. Fósiles son aquellas que se localizan en zonas más áridas, su grosor alcanza las decenas de centímetros y se pueden encontrar desde la Cordillera de la Costa hasta la Cordillera Occidental (Risacher et al., 2003). Como su nombre lo indica se trata de costras de sales principalmente halita y yeso (Risacher et al., 1999).

Los influjos que alimentan a los salares pueden provenir según Risacher et al. (1999) y Risacher et al. (2003) de:

- Manantiales, cuyos caudales se encuentran en el rango de 0.1 a 100 l/s y en general poseen la misma composición química entre ellos.
- Vertientes difusas, fuentes en las que el agua percola lentamente hacia el salar, sus caudales asociados no son medibles. Las vertientes se salinizan a través de dos mecanismos: la evaporación, y la mezcla del agua con una cuña salina del salar.
- Ríos, el caudal asociado no supera los 500 l/s.
- Aguas Subterránea, usualmente se encuentran rellenoando acuíferos y alcanzan la cuenca a través de manantiales o vertientes.

Según la cantidad de sólidos disueltos en el agua (TDS), los influjos se pueden clasificar en diluidos $TDS < 500$ mg/l o concentrados $TDS > 500$ mg/l. Risacher et al. (2003) señala que las fuentes principales de sales en el sector son: los aportes atmosféricos (a través de precipitaciones o polvo desértico), la alteración de rocas volcánicas y el reciclaje de salmueras. Si bien los aportes atmosféricos se dan en toda la región, sólo afectan a salares cuyos influjos son muy diluidos. La alteración de rocas volcánicas genera influjos cuyas concentraciones de TDS se ubican en el rango 100 a 600 mg/l. El reciclaje de salmueras se considera el principal responsable de la alta concentración de sólidos disueltos alcanzada por la mayoría de los influjos en la zona (3230 mg/l en promedio, (Risacher et al., 2003)).

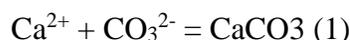
Evolución de los influjos y su relación con la composición química predominante del salar.

Las condiciones ambientales imperantes en el sector provocan la evaporación de los influjos, este proceso genera que se sobresaturen en sus componentes disueltos y precipiten minerales según su solubilidad. La composición química inicial de cada influjo ($[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$, $[\text{SO}_4^{2-}]$ y [Alcalinos]) y los componentes que vaya adquiriendo en su trayectoria hacia el salar, pueden generar cuatro tipos de circuitos evolutivos: alcalino, sulfato-alcalino, sulfato-neutro y cálcico.

Debido a que muchos salares son alimentados por influjos con diferentes vías evolutivas, se dividen según el tipo de salmuera predominante, en el caso de que dos tipos de salmueras alimenten al salar en la misma proporción, entonces se clasifica al salar según ambas composiciones (p.ej. SO_4/Ca) (Risacher & Fritz, 2009). A continuación se presenta la modelación de las vías evolutivas propuestas por Risacher et al. (1999) y Risacher & Fritz(2009).

Precipitación de la calcita

En las salmueras presentes en las cuencas, la calcita es el primer mineral en precipitar debido a su baja solubilidad siguiendo la reacción indicada en la ecuación 1:



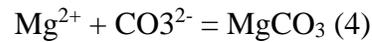
Durante el proceso de precipitación, el producto de solubilidad de la calcita se puede calcular como el producto de las actividades iónicas cuando se alcanza el equilibrio. A su vez, las actividades iónicas varían de igual forma que las concentraciones iónicas, si las salinidades son bajas, el producto entre las concentraciones de calcio y carbonato permanece constante, siguiendo la ecuación 2:



Se desprende por lo tanto que si aumenta el calcio, debe disminuir el carbonato y viceversa. Lo anterior implica que al precipitar la calcita, se pueden seguir dos vías evolutivas: una enriquecida en Ca^{2+} (cálcica) con $\text{pH} < 9$ o una enriquecida en CO_3^{2-} (alcalina) con $\text{pH} > 10$.

Precipitación de sales de magnesio

Los segundos minerales en precipitar son los silicatos o carbonatos de magnesio, siguiendo las ecuaciones (3 y 4):



Los protones liberados durante la formación de silicatos de magnesio neutralizan los carbonatos y bicarbonatos de la solución, y provocan la liberación de dióxido de carbono. Esto podría generar que la cantidad de carbonato se volviese inferior a la del calcio, y por lo tanto hubiese una transformación de una vía alcalina a una sulfatada. A su vez, la precipitación de magnesita al consumir carbonato tiene el mismo efecto que la precipitación de silicatos de magnesio.

Si a pesar de la precipitación de estos minerales sigue existiendo mucho carbonato, entonces se formarán salmueras carbonatadas del tipo Na/CO₃-Cl.

Precipitación de yeso

El yeso precipita si la evolución de las aguas sigue una vía sulfatada neutra, sulfatada alcalina o cálcica, según la siguiente ecuación 5:



En esta reacción, al igual que en la calcita, las actividades varían como las concentraciones en el equilibrio, si se tiene en cuenta además que la actividad del agua es cercano a la unidad, entonces el producto entre las concentraciones de calcio y sulfato debe permanecer constante (ecuación 6).



Esto quiere decir que si el calcio aumenta, el sulfato necesariamente debe disminuir y viceversa. Si en este punto, la cantidad de sulfato es mayor que la del calcio entonces se tendrán salmueras sulfatadas del tipo Na/SO₄-Cl, por el contrario, si hay más calcio que sulfato se formarán salmueras cálcicas del tipo Na-Ca/Cl.

La precipitación de estos minerales posibilita cuatro vías evolutivas para los influjos de las cuencas cerradas (Ilustración 5). Estas son:

- Alcalina: las altas concentraciones de carbonato y bicarbonato en la solución no logran ser contrarrestadas por los silicatos y carbonatos de magnesio.
- Sulfatada – Alcalina: la solución posee una concentración en la que carbonatos y bicarbonatos son neutralizados por los minerales de Mg.
- Sulfatada – Neutra: la concentración de la solución sigue enriquecida en calcio incluso después de depositar calcita, a su vez hay gran cantidad de sulfato, logrando precipitar yeso.
- Cálctica: en todo momento hay una gran concentración de calcio.

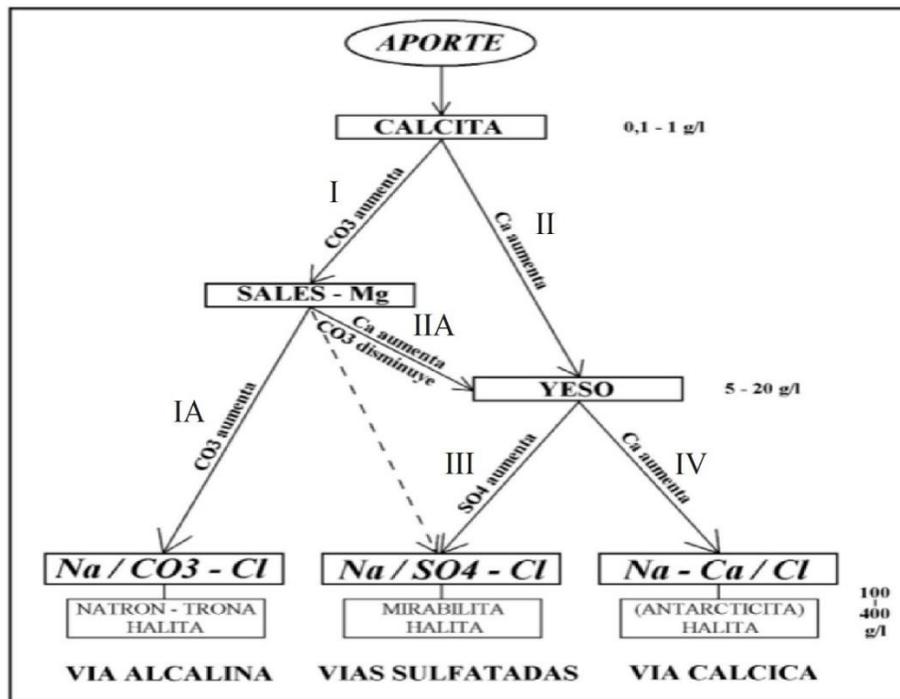


Ilustración 5: Diagrama de vías evolutivas. Alcalina (I-IA), sulfato - alcalina (I-IIA-III), sulfato-neutral (II-III) y cálctica (II-IV). Extraído y editado de Risacher & Fritz (2009)

Cabe mencionar que los elementos característicos de cada salmuera no son los únicos que existen en ellas, ni siquiera son los mayoritarios, pero son los que permiten diferenciarlas. Por otra parte la evaporación potencia las diferencias iniciales composicionales de cada influjo

En resumen, las vías evolutivas de los diferentes influjos (Ilustración 6) que llegan al salar, determinarán su tipo: rico en Ca, rico en SO₄, rico en Ca/SO₄.

$[alc] > [Ca]$ y $[alc] > [Ca] + [Mg]$	====>	vía carbonatada
$[alc] > [Ca]$ y $[alc] < [Ca] + [Mg]$	====>	vía sulfatada alcalina o directa
$[alc] < [Ca]$ y $[alc] + [SO_4] > [Ca]$	====>	vía sulfatada neutra
$[alc] < [Ca]$ y $[alc] + [SO_4] < [Ca]$	====>	vía cálcica

Ilustración 6: Resumen de composición vs. Vía evolutiva. Extraído de (Risacher, Alonso, & Salazar, Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones - Chile, 1999)

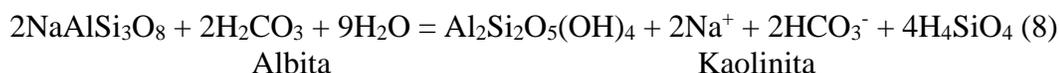
Litología de la cuenca

La litología de la cuenca determina la composición de las aguas meteóricas que circulan a través de ella, estas a su vez inciden en las vías evolutivas de los influjos (Ilustración 7) que se dirigen a los salares.

El agua de lluvia en ocasiones reacciona con el dióxido de carbono presente en la atmósfera para producir ácido carbónico (ecuación 7).

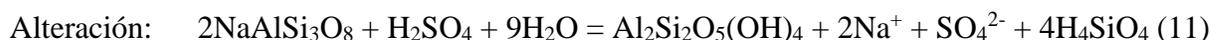
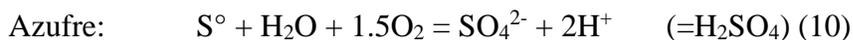
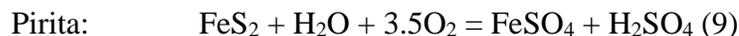


Las rocas plutónicas o volcánicas, que en su mayoría están compuestas por silicatos de Na, K, Mg y Ca, reaccionan con el ácido formando arcillas (generalmente) y liberando cationes, sílice disuelta y bicarbonato. Como ejemplo se presenta la alteración de la albita a continuación (ecuación 8):



El bicarbonato proveniente de la atmósfera balancea la ecuación y los cationes liberados reemplazan a los protones generando que aumente el pH. Las aguas de alteración que se generan, producto de este tipo de reacción, son ricas en Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- , y al someterse a evaporación precipitan carbonatos, siguiendo la vía carbonatada (pH 10-11).

Diferente situación ocurre, si dentro de la cuenca existen mineralizaciones con azufre o minerales que contengan inclusiones fluidas que aporten sulfuros o azufre, ya que la oxidación de estos genera ácido sulfúrico (ecuación 9, 10 y 11).



Si bien la alteración por ácido carbónico y ácido sulfúrico actúan de manera similar (transformando silicatos a arcillas, liberando cationes en vez de protones y elevando ligeramente el pH de las aguas), el primero es un ácido débil que puede ser contrarrestado por la alteración de silicatos, en tanto que el segundo es un ácido fuerte que difícilmente logra ser neutralizado (soluciones con $\text{pH} < 4$). Además, el ácido carbónico se encuentra presente en concentraciones muy bajas en el agua de lluvia, mientras que el ácido sulfúrico dependerá de los sulfuros presentes.

Las aguas ácidas producto de este proceso tienen dos opciones de vía evolutiva: la vía sulfatada alcalina, cuando la concentración de sulfato no es tanto más que la del carbonato y la concentración de calcio es baja, o la vía sulfatada neutra en la que la concentración de sulfato es importante y la concentración de calcio muy baja (los protones que no logran ser neutralizados por la alteración de silicatos reaccionan con el bicarbonato para formar dióxido de carbono y agua).

La salinidad de las aguas aumenta con la intensidad de la oxidación de sulfuros o azufre, y por lo tanto las aguas que sigan la vía sulfatada neutra tienen mayores salinidades (500-1500 mg/l) que las aguas que siguen la vía carbonatada (50-200 mg/l).

Las rocas sedimentarias por su parte son más variadas composicionalmente, pero poseen una predominancia de calcio en comparación con las anteriores, esto genera que al evaporarse sigan en general la vía evolutiva cálcica. La salinidad de las aguas suele ser elevada (>500 mg/l).

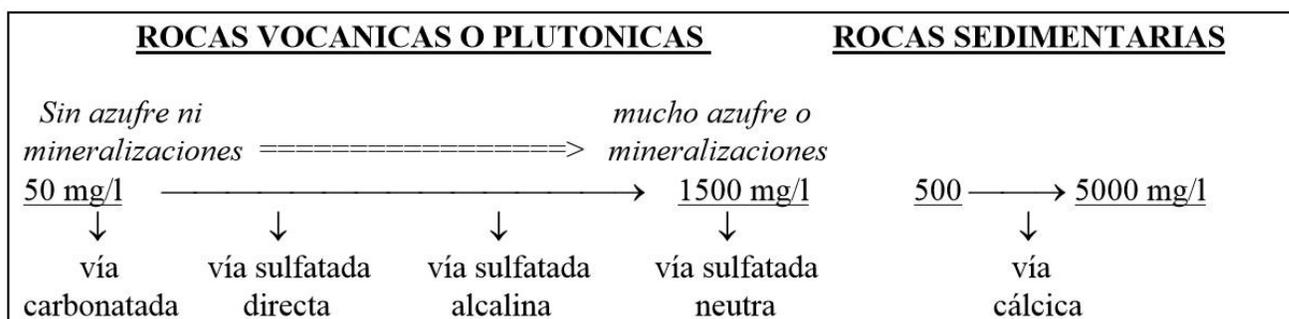


Ilustración 7: Relación entre la litología de la cuenca y la vía evolutiva. Extraído de Risacher et al. (1999)

Como síntesis se tiene que la vía evolutiva se encuentra determinada por la composición de los influjos y podría verse afectada por la litología de la cuenca, ambos factores determinarán por lo tanto, el tipo de salar presente en la cuenca (enriquecido en Ca, enriquecido en SO₄, etc). Para finalizar, se debe tener en consideración que la lixiviación de salares antiguos pueden modificar la salinidad de un salar sin cambiar su vía evolutiva.

Dadas las litologías imperantes en la Precordillera, se esperaría que los salares ubicados en su interior fuesen del tipo enriquecidos en Ca, tal como lo hace el salar de Atacama, por su parte, los ubicados en la cordillera Occidental, deberían ser del tipo enriquecidos en SO₄. Sin embargo, en determinados sectores de la cordillera Occidental existen salares tipo enriquecidos en Ca. Risacher et al. (2003) plantea dos hipótesis para explicar esta situación: el Ca podría provenir del reciclaje de antiguas salmueras del sector o se podría deber a que el asentamiento de los salares de este tipo se dio en un ambiente sedimentario, que luego fue cubierto por formaciones volcánicas.

Componentes de las aguas

Las aguas del norte de Chile poseen un amplio rango de salinidades, es por esto que es necesario entender el comportamiento de los elementos y compuestos para poder extraer mayor información acerca de la génesis de los salares. Las relaciones útiles encontradas por Risacher et al. (1999), se detallan a continuación:

- Relación Na/Cl: cuando esta relación es cercana a 1:1, significa que hubo disolución de NaCl, proceso que ocurre en general por lixiviación de antiguas costras salinas. En cambio, si la concentración de cloro es muy baja, probablemente hubo alteración de rocas volcánicas.
- Relación Ca/SO₄: si los datos de estos componentes se encuentran dispersos en las cercanías de la recta equimolar, se sugiere que hubo una redisolución de yeso o anhidrita de antiguas evaporitas.
- Relación Na+Ca/Cl: en aguas donde la concentración de Na+Ca > Cl, probablemente hubo alteración de rocas volcánicas. Las aguas que en cambio presentan concentraciones similares entre Na+Ca y Cl, se propone que han re-disuelto cloruro de sodio y calcio.

Comparación entre aportes atmosféricos e influjos

En el rango cordillerano del norte de Chile, las precipitaciones se dan fundamentalmente en forma de nieve, donde las concentraciones de los elementos mayores (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄) es notablemente menor que en los influjos diluidos. Estos últimos adquieren sus componentes mediante la alteración de rocas o por aguas percolantes que alcanzan la superficie a través de aguas subterráneas (Risacher et al., 2003). Por su parte, las concentraciones de los elementos menores (Br, I, NO₃, As) presentes en la nieve es mucho mayor que aquellas presentes en los influjos diluidos, por lo tanto la mayoría de estas concentraciones provendrían de sales marinas y polvo desértico (Risacher et al., 2003).

Las concentraciones de casi todos los componentes (excepto el NO₃) en la nieve son menores que las concentraciones de los influjos concentrados.

Finalmente se debe tener en consideración que hay sulfuros eólicos presentes en las cuencas que pueden provocar que una vía evolutiva alcalina se vuelva alcalina sulfatada.

Termalismo

El agua presenta influencia termal si su temperatura es al menos 5°C mayor que la temperatura anual del aire. Risacher et al. (2003) mencionan que entre los 24-27°S, se encuentran vertientes sin influencia termal localizadas al oeste en el límite con la Precordillera (sedimentaria), mientras que en la Cordillera Occidental sí se presentan influjos termales, en los que aquellos de alta temperatura (>20°C de diferencia) pertenecen a las vías sulfatadas.

Sistemas Hidrotermales en el norte de Chile.

En los andes del norte de Chile se han encontrado evidencias de sistemas hidrotermales en los que se presentan zonas de alteración tipo argílica, argílica avanzada y asociaciones silíceas (Cornejo, 1987). Estos sistemas se ubican en los flancos y los núcleos de estratovolcanes andecíticos y dacíticos pertenecientes a la cadena volcánica del Cenozoico Superior (CVZ), la cual se distribuye entre los 16 y los 28°S (Cornejo, 1987).

Las zonas de alteración hidrotermal poseen edades un poco más jóvenes que sus centros volcánicos asociados, su vida promedio fue de 1-2 Ma y su génesis se debió probablemente a la circulación de aguas meteóricas, que se acidificaron producto de la disolución de gases magmáticos (SO_2 y H_2S) y/o debido a posibles suministros de ácido sulfúrico proveniente de fuentes volcánicas (Cornejo, 1987). Estos fluidos hidrotermales ácidos (pH =3-5) y calientes habrían provocado una lixiviación intensa de los minerales originales y consecuentemente habrían depositado arcillas y alunita (Cornejo, 1987). Además, su alto contenido de azufre habría incentivado reacciones de oxidación en el caso de que los fluidos alcanzaran la superficie (Cornejo, 1987).

El volcanismo en el sector habría persistido de manera continua desde el Mioceno hasta el presente (Lahsen, 1982). Sin embargo las zonas de alteración de mayores dimensiones (10-20 km^2) se encuentran en los complejos volcánicos de edad Miocena (Cornejo, 1987). Sillitoe (1977) describió depósitos epitermales de menor importancia comercial en esta región de los Andes centrales, los cuales se asocian a estos sistemas hidrotermales.

Fenómenos supérgenos y la acción de aguas meteóricas posteriores generaron la deposición de sulfatos, principalmente yeso (Cornejo, 1987). Las condiciones de aridez extrema han permitido que se preserven las estructuras volcánicas y que se formen salares en las cuencas de drenaje de la zona.

Microorganismos en cristales de yeso

Dentro de la comunidad científica se considera al desierto de Atacama como un análogo terrestre a Marte. Su condición de aridez extrema, que ha permanecido constante por lo menos durante los últimos 10-15 Ma (McKay et al., 2003), la alta radiación UV que recibe y la presencia de cloratos, percloratos y sulfatos, lo ha posicionado como tal. Es por esto que los depósitos evaporíticos (salares) del norte de Chile han sido objeto de diversas investigaciones científicas, para entender la posible evidencia de vida en Marte (Benison & Karmanocky, 2014; Parro et al., 2011; Rasuk et al., 2014; Rothschild, 1990; Vitek et al., 2010; Wierzchos et al., 2010).+

En efecto, se han encontrado colonias de endoevaporitas (microorganismos que logran sobrevivir dentro de minerales salinos, gracias a que generan microclimas en su interior), algas y remanentes orgánicos ligados a este tipo de depósitos en cristales de yeso y halita (Rothschild, 1990). Si bien no se tiene claro el medio de transporte utilizado por los microorganismos para llegar a estos depósitos, Kellog & Griffin (2003) mencionan que el aire logra transportar bacterias hasta 1 km y que las bacterias asociadas con polvo desértico, pueden llegar a transportarse 5000 km. Los fluidos también son potenciales medios de transporte, sin embargo, debido a la extrema aridez de la zona, probablemente no sea el medio preponderante en este caso.

A pesar de las adversas condiciones ambientales que estos microorganismos afrontan, ellos son capaces de sobrevivir en estos minerales por varias razones. El yeso logra mitigar la radiación UV y la desecación, y puede presentar estructura micro-porosa, que le permite absorber vapor de agua cuando la humedad relativa es alta (Wierzchos et al., 2010). La halita, la anhidrita y los percloratos son higroscópicos, es decir son capaces de absorber humedad del aire (Parro et al., 2011) y por lo tanto pueden generar eventos de deliquesencia. Estas propiedades permiten mantener la humedad relativa del aire en valores por sobre el límite para la existencia de la vida (umbral del 60%, Wierzchos et al. (2010), además los microorganismos pueden soportar largos períodos de desecación seguidos por breves periodos húmedos (Wierzchos et al., 2010). La halita y el yeso, al ser minerales transparentes, permiten el paso de longitudes de onda en el rango 400-700 nm, que hace posible la fotosíntesis para algunas de las bacterias (Rothschild, 1990). Dentro de las salmueras, a partir de las cuales estos minerales se depositaron, pueden existir partículas ricas en hierro, otorgando protección contra los rayos UV (Rothschild, 1990). Los remanentes orgánicos corresponden a carotenoides, esciptonemia, clorofila, glicerol y aminoácidos; los primeros dos son generados por los microorganismos para protegerse de la radiación UV (Vitek et al., 2010).

Las condiciones que necesitan las diferentes comunidades de microorganismos, determinan su ubicación dentro del cristal de yeso, y en base a esto se han clasificado tal como se muestra en la ilustración 8. Bacterias cocci, bacilli y diatomeas (cianobacterias) han sido reconocidas por Benison & Karmanocky (2014) (Ilustración 9), en tanto que una clase de “filamentos de variada extensión” han sido descritos por Schopf et al. (2012).

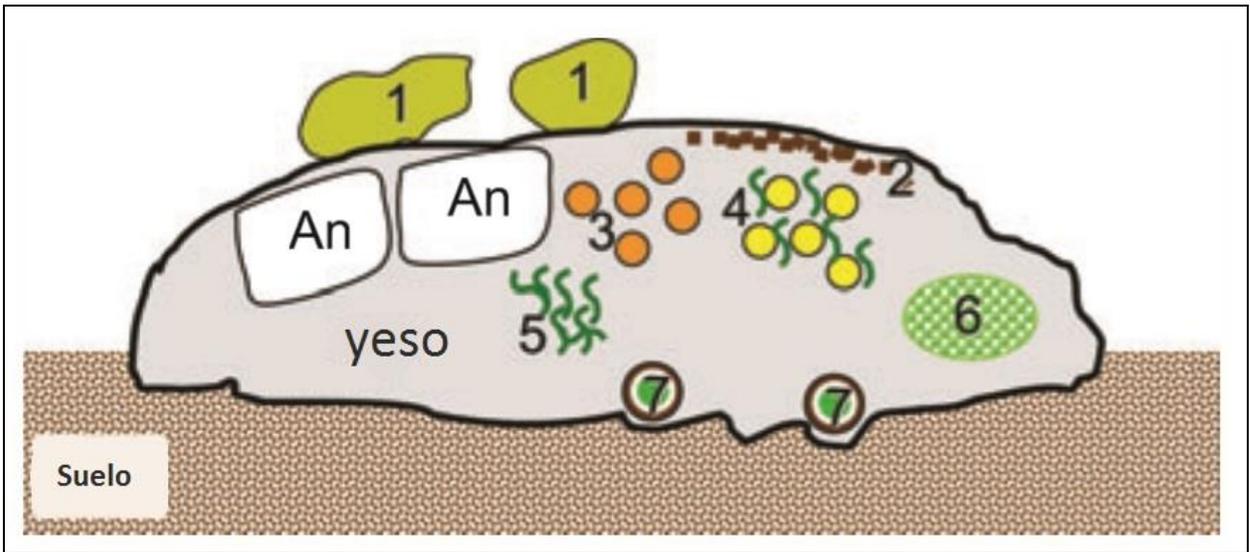


Ilustración 8: Principales tipos de microorganismos en cortezas de yeso/anhidrita. 1. Microorganismos epilíticos¹ (Líquenes epilíticos), 2. Microorganismos criptoendolíticos²³ (microcolonias fungus), 3. Algas, 4. Algas asociadas con hifas⁴³ fúngicas, 5. Hifas fúngicas sin algas asociadas, 6. Cianobacterias y bacterias no fototróficas, 7. Microorganismos endolíticos asociados con hifas fúngicas, imagen extraída de Wierzechos et al. (2010).

¹Epilíticos: Organismos que viven sobre las rocas.

²Endolíticos: organismos que viven dentro de las rocas.

³ Hifa: filamento de los hongos.

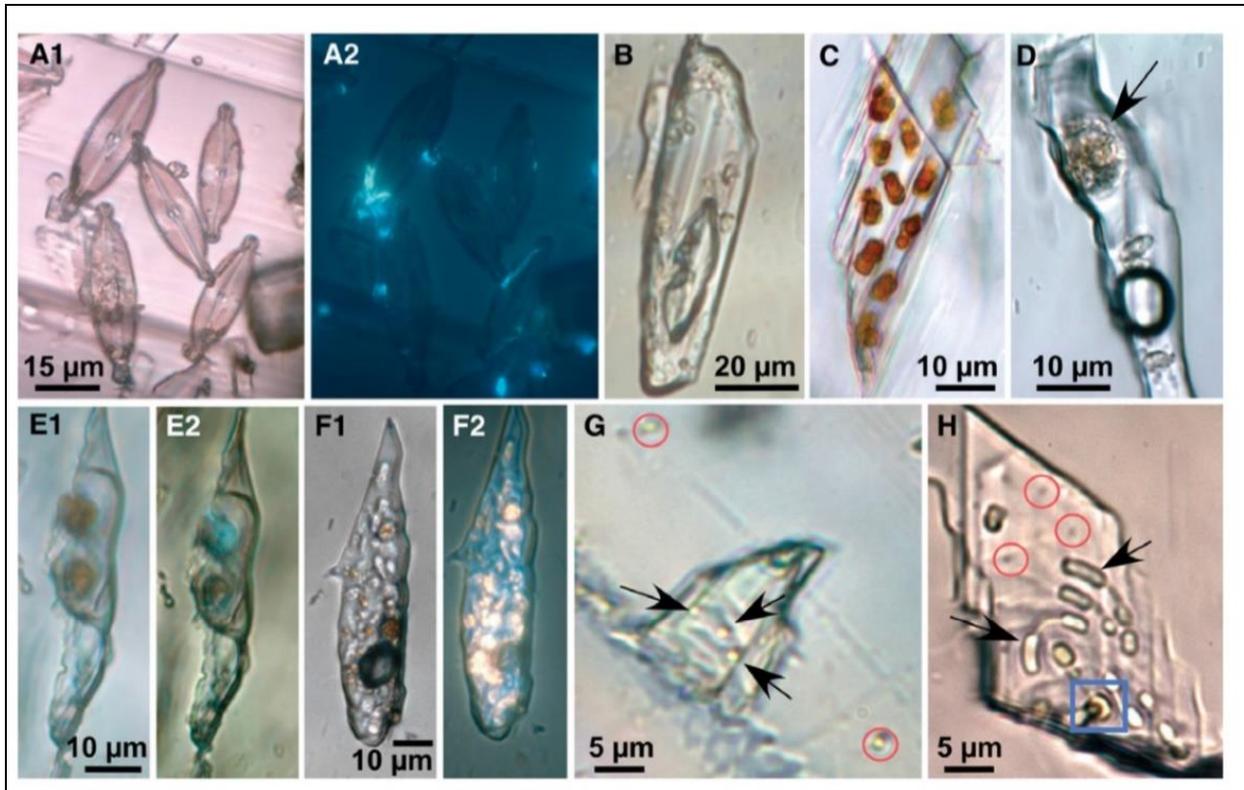


Ilustración 9: Microorganismos dentro de cristales de yeso presentes en los salares Gorbea e Ignorado. A: Diatomeas, A1 a luz transmitida y A2 a luz UV. B: Diatomea con célula de alga y propariontes. C: Algas (anaranjado pálido) y beta-caroteno (rojo). D: Alga *Dunaliella* (flecha). E: Células de algas rodeadas por un gel claro, E1 a luz transmitida y E2 a luz UV. F: Procariontes y algas en inclusiones fluidas, F1 a luz transmitida y F2 a luz UV. G: Procariontes cocci (círculos rojos), bacilli (flechas) y algas amarillas (cuadrado). Extraído de Benison et al. (2014)

Zuñiga (2016) investigó al salar Ignorado, ubicado en las cercanías del salar Azufrera. Sus resultados reportan la presencia de diatomeas, algas y bacterias tipo cocci. Sin embargo, ambas zonas no son del todo comparables, ya que no solo siguen vías evolutivas diferentes (sulfatada vs. cálcica) sino que además el salar Ignorado es uno de los dos salares ácidos presentes en la zona.

Adamsky et al. (2006) indican que la supervivencia de las diferentes comunidades de microorganismos se da en gran parte por el gran potencial de preservación de las soluciones salinas, además mencionan que la fluorescencia bajo luz UV, suministrada por el microscopio, puede deberse a que el microorganismo aún permanece vivo o que no ha existido una gran degradación (ya sea por hidrólisis o racemización) de sus componentes orgánicos.

Marte

La existencia de agua en el planeta rojo y sus condiciones ambientales son dos aspectos claves a considerar para intentar descifrar la interrogante que se ha mantenido por más de cincuenta años: ¿hay vida en Marte?. A continuación se detallan aspectos fundamentales en miras de resolver esta pregunta.

Condiciones ambientales y composición química de la superficie marciana

La presión atmosférica en Marte es muy baja (7-10 mbar) en comparación con la presión terrestre (Hecht, 2002). La temperatura promedio si bien es de ~215 K (-58.15°C) (Catling, 1999), sufre fluctuaciones diarias y estacionales importantes, llegando a alcanzar los -5°C (Rothschild, 1990). La atmósfera en Marte es rica en CO₂ (Catling, 1999; Knauth & Burt, 2002), contiene gases nobles como Ne, Ar, Kr y Xe (Moroz, 1998) y presenta estratificación del O₂, la cual no es suficiente para contrarrestar la alta y peligrosa radiación UV que recibe (Rothschild, 1990).

Dadas las condiciones de presión y temperatura imperantes, algunos compuestos presentan un rango de fusión-ebullición muy estrecho en Marte; por ejemplo, el agua posee una diferencia de 2-7°C entre estos cambio de fases (Hecht, 2002), permaneciendo en un estado líquido en un intervalo muy acotado de temperaturas. Debido a esto, la precipitación por congelamiento o por evaporación de diferentes compuestos toma relevancia en este estudio.

La composición química elemental en la superficie marciana se compone principalmente de Si, Al, Fe, Mg, Ca, Ti, S, Cl y Br, según las mediciones realizadas por el XRF (fluorescencia de rayos X, error asociado ~ 0.5-14, Rosseau (2001)) del Viking Landers. Entre estos elementos, el cloro y el azufre se presentan en altas concentraciones, encontrándose el último en un rango de 6-8% (muy concentrado en comparación con la tierra) (Banin et al., 1997; Brass, 1980).

Un aspecto característico del planeta rojo y trascendental para este estudio, es la gran cantidad de sales presentes en su superficie (8-25%, Tabla 3), entre las que se cuentan principalmente a los sulfatos⁴ y en menor medida a los cloruros (Clark & Van Hart, 1981), carbonatos (Romanek et al., 1994) y percloratos (Marion et al., 2010). Bullock & Moore (2004) proponen dos teorías para su origen: la sales se habrían formado por la interacción entre fluidos superficiales (o subsuperficiales) con basaltos, bajo una atmósfera similar a la actual, o las evaporitas se habrían formado en condiciones más ácidas, en una atmósfera aún más rica en gases con gran contenido de azufre. Esta última teoría si bien explica la gran cantidad de sulfatos presentes hoy en día, no explica la presencia de carbonatos, ya que las altas concentraciones de SO₂ suprimen su formación. Romanek et al (1994) analizaron los carbonatos presentes en el meteorito ALH84001, las observaciones químicas, isotópicas y texturales de estos minerales indicarían que existieron fluctuaciones de temperatura al momento de su deposición y que la atmósfera marciana habría sufrido un mínimo fraccionamiento durante un extenso período de tiempo, además, los autores proponen que la deposición de los carbonatos se llevó a cabo en un sistema abierto de circulación que relaciona la atmósfera con la hidrósfera y la litósfera.

Tabla 3: Concentración de sales en un regolito marciano "típico". Extraído y modificado de (Clark & Van Hart, *The salts of Mars*, 1981)

	Rango basado en las medidas realizadas por Viking (ppm)	Inventario de modelos (ppm)
Sulfatos	8-15·10 ⁴	12·10 ⁴
Cloruros	0.5-1.5·10 ⁴	1·10 ⁴
Bromuros	0-150	50·10 ⁴
Carbonatos	0-10·10 ⁴	0-4.5·10 ⁴
Nitratos		0-0.5·10 ⁴
Total	8-25·10 ⁴	13-18·10 ⁴

^aBasado sobre las medidas realizadas por Viking y el modelo Argón-40 de liberación de volátiles; Clark y Baird (1979b).

Entre quienes modelan la química marciana se cuentan a Marion et al. (2010) quienes plantean un sistema compuesto por Na-K-Mg-Ca-Fe (ferroso y férrico)-Al-H-Cl-Br-SO₄-NO₃-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-O₂-CH₄-Si-H₂O, incluyendo además una serie de sales de percloratos. El modelo propuesto por estos autores evalúa la precipitación de minerales a partir de los procesos de evaporación y congelamiento. Sus resultados muestran que sales como el yeso, la calcita, la hidromagnesita, KClO₄ y Mg(ClO₄)·8H₂O precipitan en ambos procesos, la epsomita(MgSO₄·7H₂O) y la NaClO₄·H₂O son favorecidas por la evaporación, en tanto que la meridianita (MgSO₄·11H₂O), MgCl₂·12H₂O y NaClO₄·2H₂O por el congelamiento. Marion et al. (2010) destacan que a pesar de la escasez de los percloratos en la Tierra, se sabe de su ocurrencia en el desierto de Atacama.

⁴ El generador de imágenes hiper-espectrales Omega/Marte identificó capas de terrenos "pálidas" que fueron reconocidas como sulfatos hidratados. (Gendrin, y otros, 2005)

Clark & Van Hart (1981) por su parte, proponen un sistema químico un tanto más simple, cuyos componentes y concentraciones se resumen en la tabla 4.

Tabla 4: Posibles componentes y concentraciones del suelo marciano. Extraído de Clark & Van Hart (1981)

Componentes y posibles medidas de suelo marciano medidos a través de XRF.		
Componentes	Concentración	
	En ppm	Moles/kg de suelo
Cationes		
Na	$(2 \cdot 10^4)$	(0.9)
Mg	$5 \cdot 10^4$	2.1
Al	$3 \cdot 10^4$	1.1
K	$<0.25 \cdot 10^4$	<0.06
Ca	$4 \cdot 10^4$	1.0
Fe	$12.7 \cdot 10^4$	2.3
Aniones		
SO ₄	$9.3 \cdot 10^4$	1.0
Cl	$0.7 \cdot 10^4$	0.2
CO ₃	$(6 \cdot 10^4)$	(1.0)
Otros		
Si	$21 \cdot 10^4$	7.4
Ti	$0.5 \cdot 10^4$	0.1

Adicionalmente, se menciona la presencia de jarosita en el suelo marciano (Marion et al., 2010), que sumado a la gran razón S/Cl (5:1) medida en él, confirman que hubo o hay condiciones ácidas en el ambiente.

La gran abundancia de sales es clave por dos razones: el yeso logra mitigar la radiación UV y la desecación propiciando condiciones favorables a la vida, y además el yeso y la basanita, se pueden formar a partir de sulfatos de magnesio y esmectita, sin la presencia de agua líquida en condiciones variables de humedad relativa y altas concentraciones de CO₂ (Wilson & Bish, 2011). Este proceso conlleva la liberación de una capa de agua del orden de micrómetros.

Lapen et al. (2017) aseveran que imágenes de alta resolución revelan reactivaciones de calderas de volcanes en las regiones de Tharsis y Elysium, confirmando que el planeta rojo sigue activo volcánicamente, además señalan que ha presentado magmatismo desde hace por lo menos 2.4 Ga. Clark & Baird (1979) por su parte, indican que la alta concentración de azufre presente en el planeta rojo se ha vinculado a liberación de gases volcánicos (SO₂). Banin et al. (1997) proponen que las concentraciones de cloruros podrían deberse a este mismo proceso, o ser producto de la actividad de fumarolas, mientras que Clark y Van Hart (1981) señalan que podría ser debida a la migración superficial de gases que provienen de cámaras magmáticas.

A pesar de las adversas condiciones para la vida, Rothschild (1990) propone a las “endoevaporitas” como posibles sobrevivientes a estas circunstancias. Las endoevaporitas son microorganismos que viven en depósitos evaporíticos, ya que existen minerales tal como el yeso y la halita que generan en su interior pequeños microclimas para su existencia. Rothschild (1990) menciona además a otro tipo de microorganismos, los “quimiótrofos”, los cuales podrían vivir gracias a la oxidación de sulfuros reducidos en las cercanías de emisiones volcánicas. Sin embargo, durante la expedición Vikingo no se encontró material orgánico en las muestras de suelo marciano, probablemente por su oxidación, debido a la presencia de oxidantes (tales como superóxidos, peróxidos o peroxynotratos, los cuales generarían gran reactividad por parte del suelo) o por la incidencia de radiación UV (Navarro-González et al., 2003).

H₂O en Marte

La existencia de H₂O líquido en Marte ha sido un tema controversial dentro de la comunidad científica.

Diversos autores sostienen que hubo y/o hay actividad hidrológica en la historia de Marte, las evidencias al respecto son: Cabrol & Grin (2000), Hecht (2002) y Malin & Edgett (2000) se basan en geomorfologías presentes en la superficie marciana análogas a geomorfologías terrestres, las cuales en la Tierra necesitan gran cantidad de agua líquida sostenida durante largos periodos de tiempo para su existencia, entre ellas se cuentan, paleolagos (ubicados en cráteres de impacto), gullies, deltas, junctiones de valles similares a morrenas, canales sinuosos, escorrentías superficiales, etc.. Banfield et al. (2000) identificaron la presencia de minerales hidratados (filosilicatos, ya sea arcillas o micas) en materiales volcánicos marcianos, años después Gendrin et al. (2005) identificaron además yeso, kieserita y sulfatos polihidratados en la superficie marciana a través de imágenes hiperespectrales infrarrojas.

Banin et al. (1997) y Knauth & Burt (2002) sostienen la idea de un pasado caliente y húmedo en la historia de Marte, que habría finalizado a principios del período Noachiano. Knauth & Burt (2002) proponen que durante la formación del planeta rojo, tras la acreción le siguió una etapa de desgasificación donde se liberó a la atmósfera HCl y H₂O, el ácido liberado en ese entonces, habría lixiviado Na, Ca y Mg de la corteza, propiciando la formación de salmueras ricas en NaCl, las cuales posteriormente se habrían congelado por la disminución de la temperatura superficial y se habrían segregado en diferentes fases debido a su densidad: en el techo se ubicaría el H₂O en forma de hielo, en la parte intermedia una salmuera eutéctica y en la base las sales. En tanto que Rothschild (1990) afirma que existiría agua en forma de hielo en los polos y propone una especie de hielo/nieve como un posible nicho que podría albergar microbios.

Al parecer existiría un consenso dentro de la comunidad científica acerca de la existencia de H₂O en Marte. Sin embargo, la baja presión atmosférica y la baja temperatura imperante actualmente sobre la superficie marciana no permiten que el agua líquida pura sea estable. Por esta razón, se han investigado sistemas alternativos, descubriendo que en los de tres (ternarios) o más componentes, las temperaturas de fusión pueden llegar a ser considerablemente menores (Brass, 1980; Bodnar., 2001; Knauth & Burt, 2002). Considerando la gran cantidad de sales antes mencionadas, se proponen diversos sistemas ternarios para explicar de manera simple la química marciana, que a su vez puede relacionarse con la química presente en las zonas de estudio.

Modelo Frezchem

Clark & Van Hart (1980), indican que de manera general, la superficie marciana se encuentra dominada por compuestos del estilo (Mg, Na) SO₄, NaCl, (Mg, Ca)CO₃. Debido a esto se han propuesto diversos sistemas entre los que se cuentan: H₂O-KCl-NaCl, H₂O-CaCl₂-NaCl y H₂O-CO₂-NaCl, todos en concordancia con la química presente en el planeta rojo, sin embargo dejan fuera a una gran cantidad de compuestos a evaluar.

Según Marion et al., (2009) el modelo termodinámico que se debe utilizar para modelar la química marciana es FREZCHEM, el cual se basa en un sistema compuesto por Na – K – Mg – Ca – Fe(II) – Fe(III) – Al – H – Cl – Br – SO₄ – NO₃ – OH – HCO₃ – CO₃ – CO₂ – O₂ – CH₄ – Si – H₂O, y que además incluye 95 fases sólidas (hielo, cloratos, sulfatos, carbonatos, percloratos, fases ácidas, nitratos, sales ácidas, óxidos e hidróxidos de fierro, hidróxidos de aluminio, minerales silicatados, minerales hidratados y bromuros). El modelo calcula los coeficientes de actividad (coeficiente asociado a la concentración efectiva de un compuesto en la solución) y el coeficiente osmótico (el cual define el comportamiento de un disolvente en una solución con respecto a su comportamiento ideal), para soluciones electrolíticas mediante la aproximación de Pitzer (Marion & S. Kargel, 2008).

Aproximación de Pitzer

Pitzer establece una relación entre las composiciones de la solución y el exceso de energía libre de Gibbs asociada a ella, y a partir de esto, logra establecer ecuaciones que relacionan los coeficientes de actividad de cationes, aniones, y especies neutras en función de la temperatura a una presión de 1.01 bar.

El modelo es una aproximación del conjunto de resultados que entregan las ecuaciones no lineales que controlan el equilibrio químico, estableciendo la mínima energía libre de Gibbs de la solución.

Su funcionamiento requiere de cuatro archivos (INPUT, SOLIDMASS, SOLIDPHASE, NUANCES). El primero de ellos alberga los parámetros proporcionados por el usuario: las concentraciones iónicas (m), las temperaturas eutécticas (T_e) de la solución (T_e en Kelvin (K), definida como la menor temperatura en que funde una muestra o la máxima de cristalización del solvente más el soluto, en el rango 173-239K), las presiones parciales y atmosféricas (la P_{atm} en el rango de 1-1000 bares), y la acidez, y se debe especificar además si la simulación se hará bajo procesos de evaporación o congelamiento y se debe mencionar si la precipitación de fases se desarrolla bajo cristalización fraccionada o equilibrio. El segundo de ellos permite agregar una fase sólida a la simulación, en tanto que el tercero de ellos permite remover una fase sólida de la simulación. Por último el cuarto archivo permite modificar, el decrecimiento en la temperatura y la cantidad de agua durante la simulación.

En un archivo .txt se guardan los resultados que entrega el programa: composiciones iónicas y fases a precipitar, asociadas a cada temperatura calculada por el programa según la tasa de decrecimiento.

Inclusiones Fluidas

Las inclusiones fluidas (IF) son cavidades dentro de un cristal que fueron rellenas con un fluido circundante y que posteriormente fueron selladas (Roedder, 1984). A partir de ellas se puede obtener la temperatura, la presión y la composición del fluido en el momento del atrapamiento (Roedder, 1984).

Los fluidos que pueden ser atrapados en un ambiente sedimentario son: aguas frescas de origen meteórico, mezcla de gases, fluidos de derivación meteórica (modificados por interacción agua-roca y/o evaporación), aguas salobres, y agua de mar (Goldstein, 2001). Estos fluidos responden a los sistemas compuestos de H₂O, metano, H₂O-NaCl, H₂O-NaCl-CaCl₂, H₂O-NaCl-CH₄ o petróleo.

Existen varias maneras de clasificar las IF (composición, origen, fases presentes). El criterio más utilizado (empleado en este estudio) se basa en el origen de las inclusiones (Ilustración 10).

Las inclusiones primarias se forman en imperfecciones del cristal mientras ocurre su crecimiento o recristalización, y se ubican en caras, aristas y vértices del cristal (Mangas & Sierra, 1991). La forma de identificarlas es a través de la petrografía, considerando las orientaciones preferenciales dentro del cristal o las morfologías que estas adquieren en las direcciones de crecimiento de cada mineral. En cristales de yeso grueso se distribuyen a lo largo de las zonas de crecimiento y se encuentran orientadas también en esta dirección (Goldstein, 2001). Las inclusiones primarias son las más representativas, ya que contienen información del fluido circundante que fue responsable de la fase diagenética presente (Goldstein & Reynolds, 1994).

Las inclusiones secundarias son aquellas que se forman cuando un fluido penetra en fracturas posterior al crecimiento del cristal. Estos fluidos disuelven y recristalizan parte del mineral, quedando atrapadas inclusiones fluidas secundarias. La información obtenida a partir de estas contiene datos acerca de alteraciones posteriores a la formación de la fase diagenética (Mangas & Sierra, 1991).

La distinción de las IF primarias es importante para conocer los procesos que ha sufrido el cristal a lo largo de su existencia, ya que el tiempo abarcado entre un grupo de inclusiones y otro puede llegar a tomar millones de años. Por esta razón, los fluidos desde los cuales fue formando el cristal pueden ser completamente diferente entre ellos (Mangas & Sierra, 1991) o bien pueden llegar a registrar las oscilaciones de temperaturas diarias (Benison & Goldstein, 1999; Lowenstein et al., 1998).

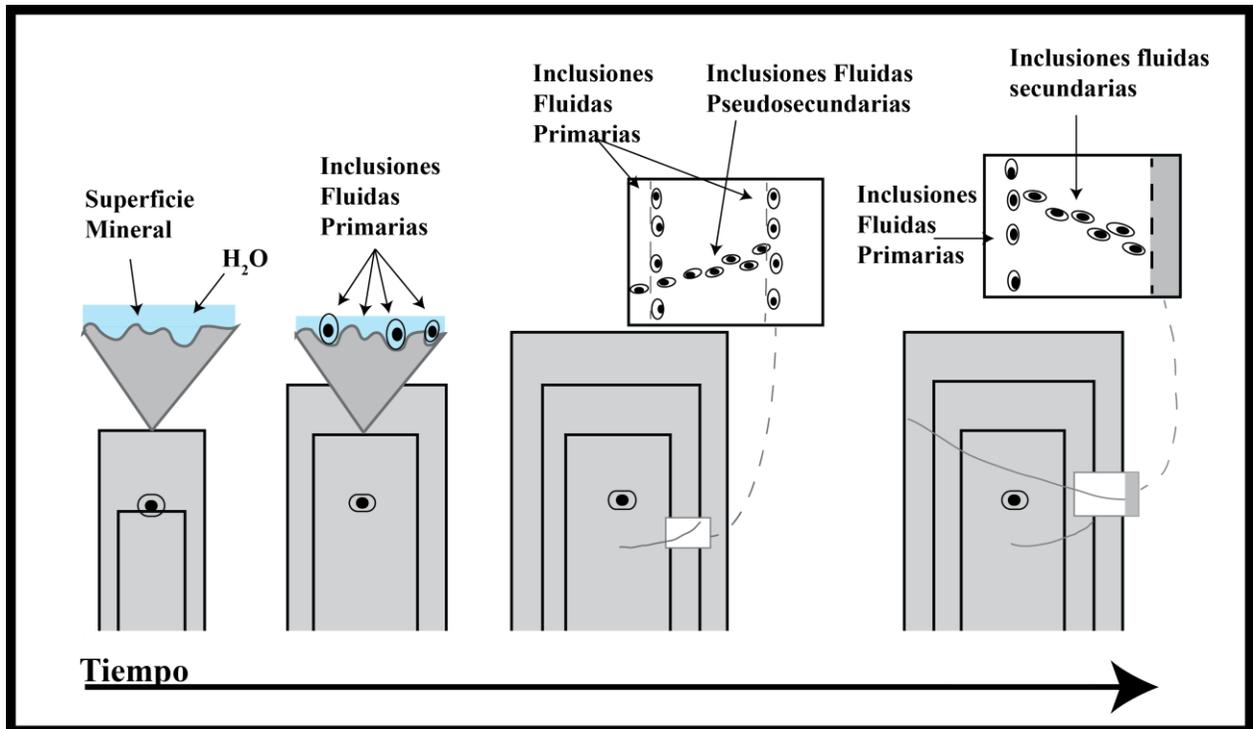


Ilustración 10: Representación esquemática mostrando inclusiones primarias, secundarias y pseudosecundarias dentro de un cristal en crecimiento. Extraído de Bodnar, (2003).

Además de tener especial cuidado con la identificación de las IF primarias, se debe tener en consideración que estas pueden sufrir procesos como re-equilibrio termal (estiramiento o decrepitación y posterior rellenado), atrapamiento heterogéneo o estrangulamiento (Goldstein, 2001), procesos que pueden conllevar a que la información obtenida a partir de estas sea errónea (por ej. la información recopilada a partir de inclusiones que han sufrido estrangulamiento, puede ser o no útil dependiendo si antes de este ha ocurrido algún cambio de fase). Todos los procesos antes mencionados, salvo por el re-equilibrio termal, se pueden identificar mediante observaciones petrográficas directas, ya sea midiendo el % de la burbuja en cada inclusión, observando las formas (planas o irregulares) de cada inclusión o verificando si existen emparejamiento entre inclusiones rellenas sólo de líquido con inclusiones rellenas solo de gas.

Para evaluar si ha ocurrido re-equilibrio termal, se definen los arreglos de inclusiones fluidas (FIAs) o también llamadas familias de inclusiones fluidas, en donde cada familia cumple la condición de haberse formado en un mismo período de tiempo y bajo las mismas circunstancias. Mediante las relaciones líquido-vapor, la medición de temperaturas de homogenización y salinidades, y la petrografía de estas, se puede determinar si efectivamente ocurrió alguno de estos procesos (Goldstein, 2001). Para mayor detalle de cada uno de estos procesos se recomienda visitar Goldstein, (2001).

En resumidas cuentas, para llevar a cabo un estudio con la ayuda de IF se debe verificar que estas sigan las reglas de Roedder (Bodnar, 2003), las cuales son:

1. El fluido dentro de la inclusión fue atrapado como una sola fase homogénea.
2. Cada inclusión debe representar un sistema isocórico.
3. Posterior al atrapamiento, nada se ha removido ni ha sido añadido de la inclusión.

Al equilibrarse con la temperatura ambiente: inclusiones que han sido atrapadas a altas temperaturas ($>50^{\circ}\text{C}$) nuclean una burbuja, en tanto que las atrapadas a bajas temperatura persisten como una fase fluida (Goldstein, 2001), puede ocurrir además la deposición de minerales hijos tales como halita, sulfatos o carbonatos (Goldstein & Reynolds, 1994).

Metaestabilidad

A pesar de que las IF son potenciales fuentes de información, pueden darse dentro de ellas equilibrios metaestables, es decir, pueden permanecer en una configuración cuyo estado energético asociado no sea el mínimo posible (Roedder, 1971). Existen tres tipos de metaestabilidad según Roedder (1971): imposibilidad de nuclear: una burbuja o formar cristales hijos durante el enfriamiento, hielo u otras fases cristalinas durante el enfriamiento o una burbuja durante el calentamiento de inclusiones congeladas. El autor indica que se puede llegar a una configuración metaestable de manera natural, si la forma de la IF no se re-equilibra con su medio, por ejemplo a través de la disolución y recristalización de sus paredes, a su vez menciona que existen procesos durante el tratamiento de las inclusiones en el laboratorio que pueden provocar perturbaciones en el equilibrio, los cuales frecuentemente no son completamente reversibles.

Sistemas Composicionales

Las sales principales en el estudio de IF son: NaCl, KCl, CaCl₂ y la FeCl₂ (Steele-MacInnis et al., 2016), las cuales son transcendentales a la hora de interpretar la información proporcionada por los fluidos. Para intentar determinar las salinidades y las temperaturas de atrapamiento es necesario establecer el sistema químico al cual obedece el líquido atrapado y por lo tanto saber con exactitud cuáles de estas sales u otras están presentes dentro de una inclusión determinada. Es necesario para esto realizar análisis petrográficos y microtermométricos, y en lo posible micro-analíticos (ej. LA-ICPMS).

El análisis petrográfico a temperatura ambiente entrega información probable de las sales presentes (por ejemplo la halita y la silvita poseen hábitos cúbicos), por su parte la microtermometría permite determinar el sistema químico a través de las mediciones de las temperaturas eutécticas, y las salinidades a partir de las temperaturas del último derretimiento en FIA (Steele-MacInnis et al., 2016). Por último, las herramientas como LA-ICPMS permiten determinar la composición de los elementos mayores (Steele-MacInnis et al., 2011).

Si bien la temperatura del punto eutéctico para cada sistema es única, se puede observar en la Tabla 5 que en algunos casos el rango de variación entre un sistema y otro es bastante acotado. Steele-MacInnis et al (2016) por esta razón recomiendan ocupar además procedimientos microanalíticos.

Tabla 5: Puntos eutécticos de los sub-sistemas de $H_2O-NaCl-KCl-CaCl_2-FeCl_2-FeCl_3$. Extraído Steele-MacInnis et al. (2016)

Sistema	T/°C	Fase(s) sólida(s) ^a	Composición ^b
Binarios			
H ₂ O-NaCl	-21,2	I, Hh	23.2
H ₂ O-KCl	-11	I, Sil	19.7
H ₂ O-CaCl ₂	-49,5	I, Ant	30.8
H ₂ O-MgCl ₂	-33	I, Mg12h	21.3
H ₂ O-FeCl ₂	-37	I, Fe6h	30.4
H ₂ O-FeCl ₃	-35	I, Fe10h	28.7
Ternarios			
Sistemas NaCl			
H ₂ O-NaCl-KCl	-23	I + Hh + Sil	20.6, 5.3
H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	-51 ^d	I + Hh + Ant	2.2, 29.1
H ₂ O-NaCl-MgCl ₂	-35	I + Hh + Mg12h	4.7, 18.6
H ₂ O-NaCl-FeCl ₂	-39 ^d	I + Hh + Fe6h	1.7, 29.5
H ₂ O-NaCl-FeCl ₃	-36,5	I + Hh + Fe10h	3.6, 25.3
Sistemas KCl			
H ₂ O-KCl-CaCl ₂	-51 ^d	I + Sil + Ant	1.7, 30.5
H ₂ O-KCl-MgCl ₂	-33 ^d	I + Sil + Mg12h	2.1, 20.4
H ₂ O-KCl-FeCl ₂	-39 ^d	I + Sil + Fe6h	1.1, 30.7
H ₂ O-KCl-FeCl ₃	-40 ^d	I + Sil + FeKh	5.9, 25.1
Sistemas CaCl₂			
H ₂ O-CaCl ₂ -MgCl ₂	-51.5	I + Ant + Mg12h	27.4, 33.5
H ₂ O-CaCl ₂ -FeCl ₂	-58	I + Ant + Fe6h	20.4, 14.4
H ₂ O-CaCl ₂ -FeCl ₃	-63	I + Ant + Fe10h	18.3, 16.7
Sistemas MgCl₂			
H ₂ O-MgCl ₂ -FeCl ₂	-39.5 ^d	I + Mg12h + Fe6h	7.1, 21.4
H ₂ O-MgCl ₂ -FeCl ₃	-45 ^d	I + Mg12h + Fe10h	9.9, 18.3
Sistemas FeCl₂			
H ₂ O-FeCl ₂ -FeCl ₃	-59 ^d	I + Fe6h + Fe10h	19.3, 18.1
Cuaternarios			
H ₂ O-NaCl-KCl-FeCl ₂	-40 ^d	I + HH + Sil+ Fe6h	2.0, 1.3, 28.4
H ₂ O-NaCl-CaCl ₂ -MgCl ₂	-52 ^d	I + HH + Ant + Mg12h	1.6, 26.0, 3.4
Senario			
H ₂ O-NaCl-KCl-CaCl ₂ -MgCl ₂ -FeCl ₂	-58.5 ^d	I + HH + Sil + Ant +Mg12h + Fe6h	1.0, 1.2, 20.0, 0.1, 13.5
Septenario			
H ₂ O-NaCl-KCl-CaCl ₂ -MgCl ₂ -FeCl ₂ -FeCl ₃	-64.5 ^d	I + HH + Sil + Ant + Mg12h + Fe6h + Fe10h	1.1, 1.9, 14.5, 0.0, 12.0, 8.3

^a Fases sólidas estables en el punto eutéctico saturado en vapor (en equilibrio con líquido+vapor). I = hielo; Hh = hidrohalita; H = halita; Sil = silvita; Ant = antarctica (CaCl₂·6H₂O); Mg12h = MgCl₂·12H₂O; Fe6h = FeCl₂·6H₂O; Fe10h = FeCl₃·10H₂O; y FeK₂Cl₅·H₂O.

^b Composición del líquido eutéctico, en wt% de sal(es). Para sistemas ternarios y de ordenes mayores tales como H₂O-XCl-ZCl₂, etc, las composiciones se reportan como wt% XCl, wt% ZCl₂, etc.

^d Basados en la extrapolación hasta temperaturas por bajo la parametrización.

Nucleación de compuestos

Para lograr formar un núcleo cristalino a partir de una solución sobresaturada, es necesario que el conjunto de moléculas que lo componen se unan de manera espontánea y alcancen un tamaño crítico, a partir del cual el crecimiento macroscópico es irreversible (Rimstidt, 2013).

La energía libre es un potencial termodinámico que mide el equilibrio y la espontaneidad de una reacción, en base a la temperatura, la entalpía (cantidad de energía absorbida o liberada por el sistema) y la entropía (grado de organización de un sistema). Valores negativos de este potencial significan reacciones espontáneas, en tanto que los valores positivos indican reacciones no espontáneas.

Es importante mencionar que el cambio de fase de un átomo (líquido a sólido) se encuentra determinada por la diferencia entre la energía libre volumétrica y la energía libre superficial. Esta última se opone a la formación de núcleos cristalinos.

La energía libre requerida (ΔG_c , J/moléculas del grupo) para formar un núcleo cualquiera, se encuentra en función del número de moléculas del núcleo (n), la constante de Boltzmann (k_B , J/K), la temperatura (T , en Kelvin), el grado de saturación de la solución (S), el volumen de una molécula (V_1 , volumen molar/número de Avogadro) y la energía libre para crear la interfase (σ , mJ/mol²). La ecuación 12 muestra esta relación:

$$\Delta G_c = -nk_B T \ln S + (36\pi)^{1/3} n^{2/3} (V_1)^{2/3} \sigma \quad (12)$$

El número de moléculas que componen el núcleo crítico se obtiene siguiendo la ecuación 13:

$$n^* = ((32\pi/3)V_1^2 \sigma^3)/(k_B T \ln S)^3 \quad (13)$$

La tasa de nucleación (N , núcleos/litros*segundos) por su parte, se encuentra determinada por el flujo de moléculas (Ω , cristalitos/litros*segundo, $\sim 33 \pm 3$) y por algunos de los parámetros antes mencionados, siguiendo la ecuación 14:

$$\log N = \log \Omega - ((16\pi/3)V_1^2 \sigma^3 (\log S)^{-2})/(\ln 10 k_B T)^3 \quad (14)$$

La obtención de estos datos permite comparar el crecimiento de cristales bajo diferentes condiciones ambientales.

Descripción de la zona de trabajo

En el esquema presentado por Karmanocky & Benison (2016), tanto el salar Azufrera como el área de control se ubican en la Cordillera de los Andes, cercanos al límite con la precordillera, en la tercera región, Chile.

Este sector alberga numerosas cuencas endorreicas intramontañosas donde se han depositado cinco salares que abarcan un área total de 160 km². En ellos se cree que el principal aporte de sales provendría de aguas subterráneas y en un menor grado por aporte de aguas superficiales. Las facies texturales principales encontradas en estos depósitos son (Naranjo et al., 2013):

- Superficies de material fino, compuestas principalmente por halita, que pueden estar inundadas o secas.
- Costras salinas, de superficie rugosa, compuestas principalmente por halita.
- Facies lacustres.

Por su parte las zonas de alteración hidrotermal se ubican uniformemente distribuidas en el sector y ocurren principalmente en los núcleos o faldas de los volcanes presentes en la zona (Naranjo et al., 2013). Dado que el sistema hidrotermal presentado en este estudio no ha sido investigado en particular, no se describe su geoquímica ni sus datos fisiográficos.

Dos salares con aguas termales se ubican en las cercanías de los depósitos estudiados: el salar de Aguas Calientes 4 y el salar de la Isla, además, en la región se presentan aguas termales no relacionadas a depósitos salinos: Río Negro, Laguna Verde y Negro Francisco.

Salar Azufrera

El salar azufrera posee una temperatura anual de 3°C, abarca un área de 3.3 km² y la superficie de agua en su interior no excede los 0.02 km² (Risacher et al., 2003), a partir de estos datos es posible inferir que esta zona se compondría principalmente de una corteza salina y de algunas playas.

No hay registros geoquímicos en particular del salar Azufrera, sin embargo se han estudiado los depósitos salinos andinos del norte de Chile. Gracias a estos estudios se conoce la existencia de una zonación composicional, debida a la solubilidad de los componentes presentes, donde desde la periferia hasta el centro del salar se presentan facies carbonatadas, sulfatadas y cloruradas (Vila, 2010). Los minerales que se han identificado se muestran en la Tabla 6; también se reportan en menor proporción sulfuros de arsénico, yoduros y nitratos (Vila, 2010).

Tabla 6: Minerales de las costras salinas superficiales, salares andinos, determinados en base a análisis por rayos X; (') indica mineral principal; (") indica mineral traza. Extraído de Vila G. (2010)

Mineral	Fórmula
Anhidrita	CaSO ₄ '
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O'
Tenardita	Na ₂ SO ₄
Mirabilita	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O'
Singenita	K ₂ SO ₄ ·CaSO ₄ ·H ₂ O''
Glaserita	(K,Na) ₃ Na(SO ₄) ₂ ''
Glauberita	(Na,Ca) ₂ SO ₄ ''
Leonita	(K ₂ Mg)(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O''
Polihalita	(K ₂ Ca ₂ Mg)(SO ₄)·2H ₂ O''
Bloedita	(Na ₂ Mg)(SO ₄) ₂ ·2H ₂ O''
Halita	NaCl'
Silvita	KCl''
Ulexita	(Ca,Na)B ₅ O ₉ ·16H ₂ O'
Kaliborita	(K,Mg)B ₁₁ O ₉ ·9H ₂ O''
Calcita	CaCO ₃

Dentro de la sistematización que describen Risacher et al. (2003), se detallan aspectos climáticos, composicionales y morfológicos del salar (Tabla 7).

Tabla 7: Características del salar Azufrera, extraído de Risacher et al. (2003).

Cuenca	Altitud del salar (m)	Altitud máxima (m)	Temp. promedio (°C)	Prec. (mm/año)	Evap. (mm/año)	TDS min (mg/l)	TDS max (mg/l)	Circuito Evolutivo	Área de cuenca (km ²)	Área del salar (km ²)	Área del agua (km ²)
Salar Azufrera	3,580	5,488	3	120	1100	548	323,473	Ca	214	3.3	0.02

Es importante recalcar que si bien se ha clasificado al salar como del tipo enriquecido en Ca, su contexto sigue siendo predominantemente volcánico (CVZ). Por esta razón, no es de extrañarse que existan importantes aportes de azufre a la cuenca o eventualmente la presencia de minerales característicos de alteraciones hidrotermales.

Área de Control

Si bien no se tiene información detallada del área de control, probablemente se trate de un sistema hidrotermal con alteraciones argílica y argílica avanzada. Según Naranjo et al. (2013) las alteraciones argílicas del sector se habrían desarrollado en zonas marginales y habrían formado bandas silíceas en los depósitos volcánicos como lavas y piroclastos. Además, se distinguirían arcillas del grupo de la caolinita y minerales como la limonita, micas blancas, clorita y alunita supérgena; por su parte las alteraciones argílicas avanzadas se encontrarían en los núcleos de las zonas alteradas y en fracturas en torno a vetas silíceas, en ellas los minerales predominantes son el yeso, la jarosita, alunita supérgena y diversos sulfatos.

La información disponible de salares aledaños al área de control, como lo son el salar Ignorado y el salar Gorbea que se ubican en un radio menor a 20 kms, han sido particularmente estudiados por su pH ácido, el cual se debe a la fuerte alteración hidrotermal sufrida por las rocas volcánicas de la zona, y al alto contenido de azufre presente en las cuencas (Risacher et al., 2002). Como ya se ha mencionado con anterioridad, Cornejo (1987) realizó su investigación en la zona del salar Gorbea, reportando alteraciones argílicas avanzadas y extremas silicificaciones, las cuales se deberían al contacto entre las rocas volcánicas del sector con las soluciones ácidas hidrotermales circundantes. Esto habría generado la lixiviación de los minerales primarios y a su vez la deposición de arcillas. La Tabla 8 resume la mineralogía de los salares Gorbea e Ignorado e incluye a los minerales reportados por Cornejo (1987)

Tabla 8: Mineralogía encontrada en salares Ignorado y Gorbea. Extraído de Risacher et al. (2002)

Cuencas de drenaje			
Limonita	Óxidos férricos hidratados		
Mica Blanca	$KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$		
Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$		
Clorita	$(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+})_6AlSi_3O_{10}(OH)_8$		
Arcillas Amorfás			
Calcedonia	SiO_2		
Ópalo	$SiO_2 \cdot nH_2O$		
Cuarzo	SiO_2		
Azufre	S		
Pirita	FeS_2		
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$		
Alunita	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$		
Natroalunita	$NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$		
Jarosita	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$		
Barita	$BaSO_4$		
Salares			
	Fórmula	Tipo de sal	Método
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Corteza Eflorescente	Rayos X
Thenardita	Na_2SO_4	Corteza Eflorescente	Rayos X
Halita	$NaCl$	Corteza Eflorescente	Rayos X
Bloedita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Eflorescencia	Rayos X
Starkeita	$MgSO_4 \cdot 4H_2O$	Eflorescencia	Rayos X
Bischofita	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	Eflorescencia	Rayos X
Jarosita	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	Eflorescencia	Rayos X
Polihalita?	$K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$	Eflorescencia	Rayos X
Celestita?	$SrSO_4$	Eflorescencia	Rayos X
Schoenita	$K_2Mg(SO_4) \cdot 6H_2O$	Eflorescencia	EDS
Carnalita	$KMgCl_3 \cdot 6H_2O$	Eflorescencia	EDS
Sulfatos-Mg	$MgSO_4 \cdot xH_2O$	Eflorescencia	EDS
Alunógeno	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	Eflorescencia	EDS
Glauberita	$Na_2Ca(SO_4)_2$	Eflorescencia	EDS
Alum K-Na	$(K,Na)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Eflorescencia	EDS
Otros minerales mencionados en el texto			
Mirabilita	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$		
Jurbanita	$Al(SO_4)(OH) \cdot 5H_2O$		
Basalunita	$Al_4(SO_4)(OH)_{10} \cdot 5H_2O$		

Minerales en la cuenca de drenaje corresponden a los reportados por Cornejo (1987). Determinaciones del Espectrómetro dispersivo de energía (EDS) son probables pero no definitivos. Los signos de preguntas indican la presencia probable de un mineral.

Geología Local

Como ya antes se señalaba, las zonas de estudio (Ilustración 11) se ubican en la CVZ. Naranjo et al. (2013) identifica en esta zona volcanes de diferentes edades: Mioceno Inferior (**Miv**), Mioceno Inferior a Medio (**Mimv**), Mioceno Medio a Superior (**Mmsv**) y Mioceno Superior – Plioceno (**MPv**), los cuales se encuentran repartidos en todo el sector. A estos volcanes, se les asocian depósitos de lavas (de composición principalmente andesítica a dacítica), depósitos de caída (tales como piroclastos de caída tamaño lapilli, bombas, bloques, etc) y ceniza. Contemporáneas a los volcanes, se depositan las Ignimbritas dacíticas Río Frío (**Mirf**) de edad Mioceno inferior, y Pajonales (**Mip**) de edad Mioceno inferior a medio, en esta última se distingue a la Ignimbrita Qataquiña que es un nivel basal de una brecha residual. Por último se depositan los depósitos aluviales (**PIHa**) asociados a abanicos y los depósitos salinos (**PIHs**), ambos de edad Pleistoceno – Holoceno.

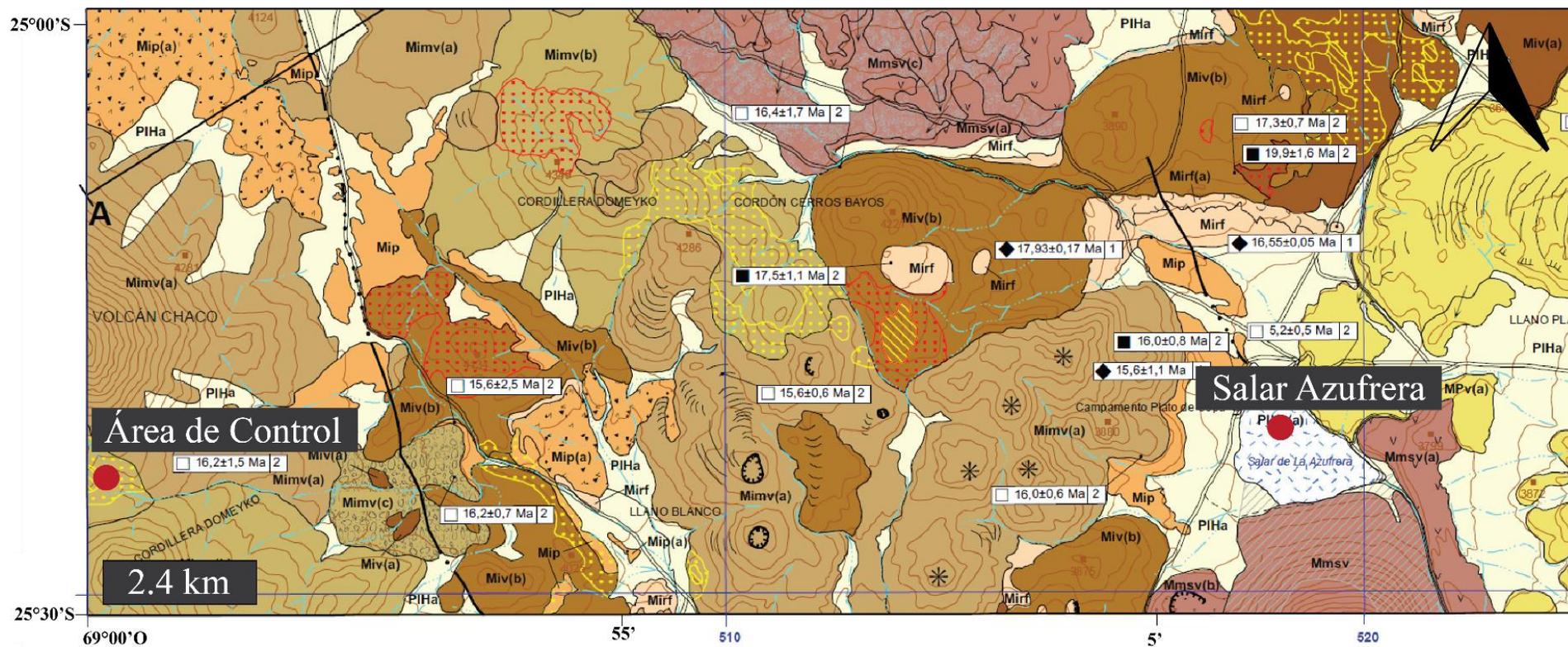


Ilustración 11: Geología Local. En la imagen se muestra la ubicación del sistema hidrotermal y del salar Azufrera. Se puede observar que la zona de estudio se compone principalmente de volcanes de edad Mioceno y en el sector se encuentran distribuidos diversos sistemas hidrotermales (descripción detallada en el texto). Extraído y modificado de Naranjo et al. (2013).

Las unidades descritas por Naranjo et al. (2013) y que se muestran en las ilustraciones 12, 13 y 14 son las siguientes:

Mimv = Unidad compuesta por estratovolcanes medianamente erosionados, lavas, depósitos piroclásticos de caída, y cenizas. Edad 16.5-15.6 Ma (Mioceno inferior a medio).

- (a) Lavas, andesitas de piroxenos y de hornblenda.
- (b) Depósitos piroclásticos de caída de lapilli, con escasas bombas y bloques, en bancos de hasta 5 m, y presencia de intercalaciones de lavas.
- (c) Depósitos de bloques y cenizas, con espesor hasta 10 m y matriz heterogénea.

Mip = Unidad compuesta por la Ignimbrita Pajonales, de edad 16.5-15.6 Ma (Mioceno inferior a medio). Presenta tobas dacíticas rosadas de cenizas y cristales (plagioclasa, biotita, anfíbola y piroxeno), y flujos ricos de pómez y líticos.

- (a) Ignimbrita Qataquiña: constituye el nivel basal de una brecha residual, se encuentra empobrecido en finos y enriquecido en líticos polimícticos, con presencia de bloques y bombas juveniles.

Miv = Unidad compuesta por estratovolcanes, esqueletos de volcanes, secuencias de lavas, piroclastos estratificados, cuellos y diques. Edad 23.7-16.4 Ma (Mioceno inferior).

- (a) Lavas, andesitas de orto y clinopiroxeno, andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino, y daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno.
- (b) Depósitos piroclásticos de caída, que corresponden a tefras de lapilli y líticos, bombas y bloques. Presencia de intercalaciones con coladas de lava.

Mirf = Unidad compuesta por la Ignimbritas Río Frío de edad 22.1-17.5 Ma (Mioceno inferior). Presenta tobas dacíticas de color rosadas a grises, con abundantes fiames, plagioclasa, anfíbola biotita y piroxeno..

- (a) Se presentan vitrófiras de color gris oscuro a negro.

PIHa = Depósitos Aluviales no consolidados de edad Pleistocena – Holocena compuestos de bloques, gravas, arenas y limos. Se asocian a abanicos aluviales y se formarían por procesos de meteorización, transporte y erosión de las superficies preexistentes. En general no se presenta estratificación.

Mmsv = Unidad compuesta por estratovolcanes y depósitos volcánicos de caldera de avalanchas y domos, de edad 13.1-10.7 Ma (Mioceno medio – superior). Grandes dimensiones, débil a medianamente erosionados.

- (a) Lavas en bloques, andesita de piroxeno, andesita basáltica de olivino y piroxeno, escasas dacitas de hornblenda y biotita, y lava domo-andecítico-dacítico.
- (b) Depósitos piroclásticos de caída con lavas intercaladas.

PIHs = Depósitos salinos de edad Pleistoceno – Holoceno, evaporíticos finos y sedimentos finos.
(a) Costra salina y lagunas de salmuera, mineral dominante es la halita. En las áreas inundadas predominan cloruros que se depositan sobre precipitados de sulfatos.

MPv = Unidad volcánica de edad 8.3-3.7 Ma (Mioceno Superior – Plioceno Inferior), compuesta por estratovolcanes y conos de escoria.

(a) Lavas en bloque, bien definidas, andesitas de dos piroxenos, y dacitas de piroxeno y biotita, se presenta andesita basáltica de olivino y piroxeno.

La alteración hidrotermal argílica en el mapa se observa como puntos amarillos, la alteración argílica avanzada como líneas oblicuas paralelas amarillas y la alteración indiferenciada como puntos rojos.

El área de control en el mapa geológico de la zona se ubica sobre los volcanes del Mioceno inferior a medio (Mimv), coincidiendo con los sistemas de las alteraciones hidrotermal propuestas por Cornejo (1987). El salar Azufrera en el mapa se ubica en los depósitos salinos, específicamente sobre una costra salina, lo cual se condice con las muestras utilizadas para el sector (que se verán más adelante).

Metodología

Para realizar un estudio exitoso a partir de los datos que se obtienen de las IF, es necesario plantear preguntas apropiadas y realistas que puedan ser resueltas con la información proporcionada por estas. Las muestras seleccionadas deben estar acorde al contexto geológico de la zona de investigación y con ellas se debe realizar una revisión petrográfica que logre determinar el contexto paragenético de los minerales y caracterizar petrográficamente a las IF. El paso siguiente es seleccionar las FIAs para realizar un análisis microtermométrico, con el cual se pueda obtener la salinidad de los fluidos primarios o secundarios según sea el caso.

Todos los laboratorios e implementos utilizados en esta investigación son ubicados en el departamento de Geología de la Universidad de Chile. A continuación se detallan los procesos descritos anteriormente paso a paso.

Observaciones de campo y selección de muestras

El trabajo de terreno propio de esta investigación se realizó durante el mes de marzo del año 2016 y consistió en recolectar muestras del salar Azufrera (Ilustraciones 12 y 13) y del área de control (Ilustración 14). En las zonas investigadas existen diferentes tipos de cristales. El salar Azufrera presenta depósitos que forman montículos, los cuales se componen de cristales prismáticos múltiples radiados, que se clasifican de crecimiento inferior, y cuyos tamaños son centimétricos; estos cristales se observan inactivos ya que no existe presencia de agua en la corteza salina. El área de control por su parte contiene depósitos litificados en su corteza salina, los cuales también se encuentran inactivos, ya que tampoco en esta área se presenta agua.



Ilustración 12: Fotografía Panorámica del sector perteneciente al Salar Azufrera.



Ilustración 13: Fotografía en detalle del sector del salar Azufrera. Se observan los cristales distribuidos en el suelo.



Ilustración 14: Fotografía perteneciente al sector del área de control.

Preparación de muestras

Las muestras seleccionadas de cada lugar debieron pasar por procesos de corte y pulido (y limpieza), para realizar los análisis petrográficos y microtermométricos. A continuación se presentan muestras tipo de cada lugar investigado (Ilustración 15).



Ilustración 15: Muestras tipo de cada lugar.. Imagen izquierda, cristales de crecimiento inferior pertenecientes al salar Azufrera. Imagen derecha, roca litificada perteneciente al área de control.

La muestra salina perteneciente al área de control (Ilustración 15) fue cortada con una sierra de disco de borde continuo CM41, mientras iba siendo lubricada con etanol para facilitar el corte. Luego cada lámina obtenida pasó por un proceso de pulido, que consiste en movimientos en forma de ocho, contra diferentes superficies abrasivas. La primera superficie consistía en un vidrio con polvo de carburo de silíceo de tamaño de grano 320, luego se utilizaron hojas de lija de tamaño de grano 1000, 1500, 3000 y 5000 (de la más gruesa a la más fina, Ilustración 16). Las muestras del salar Azufrera (Ilustración 15) en cambio, fueron separadas siguiendo su clivaje con un bisturí a lo largo del plano (010) y pasaron por el mismo proceso de pulido mediante las hojas de lijas con tamaños de grano 3000 y 5000.

**Carburo de Siliceo
Tamaño de grano 320**

Etanol **Limpiador
Ultrasonico**



Lijas de grano 1000 a 5000

Ilustración 16: Implementos a utilizar durante el proceso de pulido de las muestras.

Para la realización del pulido, es necesario humedecer la muestra con etanol (Ilustración 16) para que el desgaste sea suave y en frío. Para lograr que la fuerza se distribuya uniformemente, lo óptimo es pegar cada muestra a superficies planas horizontales (en este caso láminas de vidrio) con la gotita y aplicar la fuerza directamente sobre esta. El proceso se debe realizar por ambos lados de la muestra, y para despegarla del vidrio es necesario dejarla reposando en acetona durante una noche. Entre el cambio de un tamaño de grano y otro, es importante limpiar las muestras sumergiéndolas en un recipiente con etanol, el cual se introduce dentro de un limpiador ultrasónico (Ilustración 16) que genera movimientos que logran desprender las partículas residuales en ellas. Se tiene que verificar al microscopio que durante todo el proceso el pulido genere superficies cada vez más suaves.

Petrografía

Para realizar el análisis petrográfico, una muestra de cada zona es cortada utilizando la sierra antes mencionada para lograr las dimensiones del portaobjeto (27x46 mm), luego se desbastan con carburo de silicio o esmeril en la máquina de desbaste con tamaños de grano de 120 y/o 320 según se requiera. Posteriormente se pega el portaobjeto y se deja secar entre 8-12 hrs. a una temperatura de 25-35°C idealmente. Se vuelve a cortar con la sierra lo más delgado posible y a desbastar con esmeril a través de los tamaños de grano 120, 320, 600 y 1000. El proceso se debe ir chequeando a través del microscopio para ir generando superficies cada vez más suaves, hasta llegar a un espesor de 30 μm . Finalmente se pega el cubre objeto con methyl 2-cyanoacrylate o ethyl-2-cyanoacrylate, se cura de 8-12 hrs y se retiran los excedentes.

Este proceso permite el reconocimiento de minerales mediante el uso del microscopio BX51 TRF, con luz transmitida a nicoles paralelos y cruzados.

Análisis microscópico

Para la identificación de familias de inclusiones (FIAs) y el reconocimiento de microorganismos se utilizan las fuentes de luz transmitida y ultravioleta, y las magnificaciones de 4x hasta 80x del microscopio petrográfico Olympus BX53 F. Lo óptimo es que se cumplan al menos tres condiciones:

1. Cada FIA se debe ubicar en una zona de crecimiento.
2. Todas las inclusiones pertenecientes a la FIA seleccionada deben contener al menos dos fases.
3. La tasa entre las fases presentes debe ser consistente para todas las inclusiones de la familia, es decir, con una tasa líquido-vapor similar (para asegurarse de que estén sobre una curva cotéctica).

La identificación de FIAs útiles se realiza mediante la observación con luz transmitida. Los microorganismos se identifican mediante el uso de luz UV (U-RFL-T), ya que la materia orgánica fluoresce según sea su tipo: microorganismos procariontes fluorescen verde pálido, las algas azules y los carotenoides rojo, naranja o rosado (Benison & Karmanocky, 2014).

Microtermometría

La microtermometría consiste en enfriar o calentar muestras que contengan IF consistentes e ir registrando las temperaturas en las que se producen los cambios de fases en ellas, ya que con estas mediciones se puede obtener información acerca de la salinidad y/o la temperatura y/o la presión al momento del atrapamiento.

En esta investigación en particular las muestras solamente se enfriaron. El proceso consistió en bombear nitrógeno líquido para disminuir la temperatura hasta alcanzar los -190°C y así lograr congelar la muestra. Luego se aumentó progresivamente la temperatura y se registró el primer derretimiento y el último.

Todo este análisis fue realizado utilizando la platina Linkam THMSG600 (Ilustración 17), el microscopio Olympus BX53, las cámaras digitales conectadas a él y el software Lynksys32. Para la calibración del equipo se mide la temperatura de fusión del agua en inclusiones sintéticas, verificando que el error asociado a las mediciones no sea mayor a 1°C .

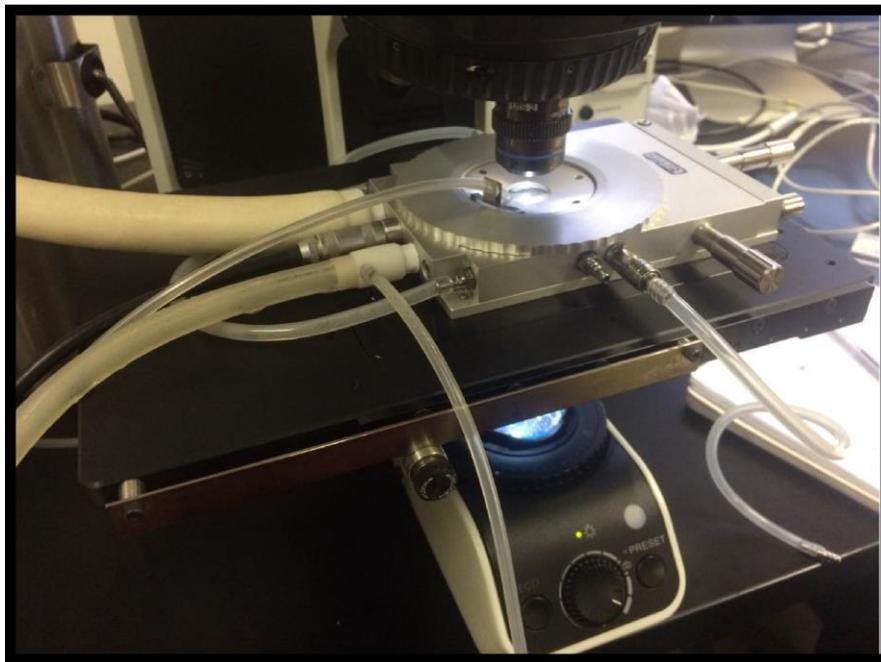


Ilustración 17: Platina Linkam THMSG600

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La muestra 1 fue seleccionada por ser aquella que poseía mayor cantidad de inclusiones fluidas. Mediante el uso del equipo Cressington 108C Auto carbon Coater (Ilustración 18), la muestra fue recubierta con una fina capa de carbón (metalización), la cual le proporcionó propiedades conductoras que permitieron su análisis composicional mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM) EDX-CL Quanta 250 con el detector de electrones retrodispersados (BSE) (Ilustración 19).

El procedimiento consiste en hacer incidir un haz de electrones sobre la muestra metalizada lo cual provoca la liberación de: electrones retro-dispersados, electrones secundarios y radiación electromagnética (rayos X). Estas partículas son capturadas por detectores que contiene el equipo en su interior, y genera a partir de ellas imágenes y datos. A partir de los electrones retro-dispersados se obtienen imágenes con gran contraste para visualizar de mejor manera la topografía, los electrones secundarios entregan imágenes de alta resolución y los rayos X permiten realizar un análisis composicional de la muestra.

Este tipo de análisis entrega resultados semi-cuantitativos, ya que identifica la concentración porcentual de los elementos presentes en un punto escogido. Los puntos analizados en esta investigación fueron de dos tipos: roca huésped e imperfecciones dentro de la roca huésped (potenciales inclusiones fluidas). Diferenciadas por los cambios de tono observadas en las imágenes proporcionadas por el SEM.

Los equipos utilizados son propiedad del departamento de Geología de la Universidad de Chile.



Ilustración 18: Cressington 108C Auto carbon Coater. Equipop utilizado para la carbonización de la muestra



Ilustración 19: SEM-EDX-CL Quanta 250 de la Universidad de Chile.

Resultados

Para hacerse una día general de los resultados, en el área de control se analizaron doce muestras pulidas, de las cuales ninguna es sometida a microtermometría. Por otro lado, de dieciocho muestras pulidas del salar Azufrera, solo tres pasaron por el proceso de microtermometría.

Petrografía

Las muestras seleccionadas en el salar Azufrera corresponden a los cristales de crecimiento inferior característicos del sector, cuyas dimensiones aproximadas son de hasta 3.5 cm de largo y 1 cm de ancho (Ilustración 15). La muestra del área de control es una roca salina de tonos claros de dimensiones 18 x 26 cm (Ilustración 15), la cual probablemente perteneció a la corteza salina como tal pero debido a procesos erosivos ya no es parte de ella.

Un corte delgado de cada zona (Anexo A) es analizado petrográficamente bajo el microscopio. Con la ayuda del atlas mineralógico (Melgarejo Draper, 1997) es posible identificar a la anhidrita como el principal mineral en los depósitos del salar Azufrera (Ilustración 20). Este sulfato anhidro se encuentra reemplazando al yeso debido a procesos de deshidratación. En la muestra es posible identificar una solución sólida que se forma entre ambos minerales, confirmada por la transición de colores de interferencia (desde grises de primer orden hasta el tercer orden) y por el ángulo de extinción de ambos minerales (mismo ángulo, 48°).

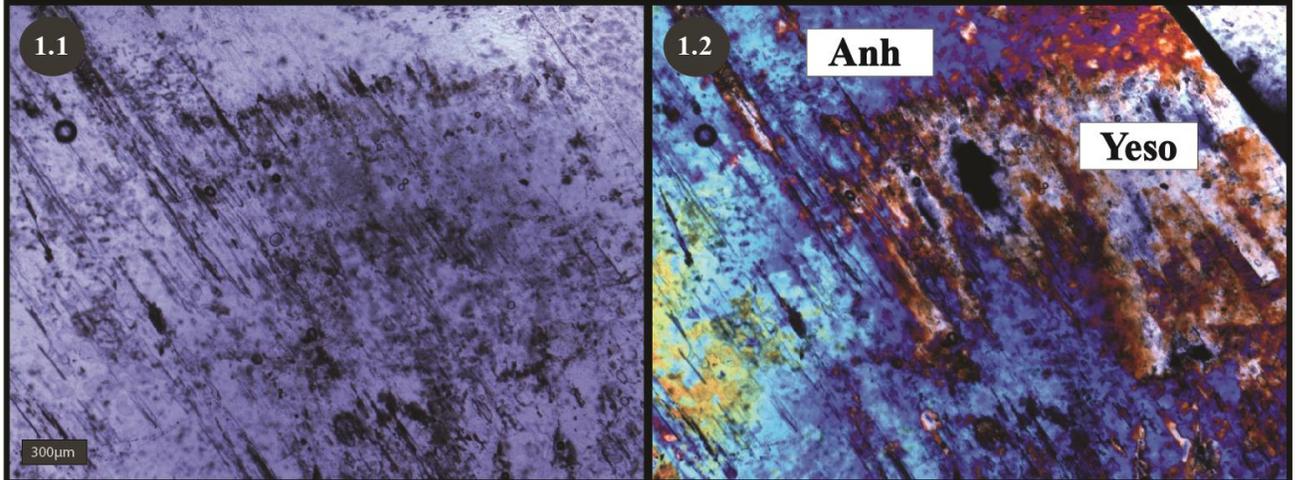


Ilustración 20: Imagen característica de los depósitos del salar Azufrera, donde se reconocen los minerales yeso y anhidrita, bajo luz transmitida. Microfotografía 1.1 sin polarizadores. Microfotografía 1.2 con polarizadores..

La muestra del área de control corresponde a un conjunto de minerales salinos (Ilustración 21) cuya petrografía aún sigue siendo una incógnita. A través de la observación petrográfica, se ha logrado identificar minerales como la thenardita, la polihalita y el yeso. Se ha observado un mineral similar a la anhidrita, pero que posee extinción a los 39° con respecto a la dirección de máximo crecimiento (la anhidrita posee extinción recta); por esta razón se descarta la presencia de anhidrita en esta muestra. Además, se ha observado un mineral que se encuentra alterando a otros a través de sus clivajes. Para una caracterización más detallada es necesario realizar un análisis químico.

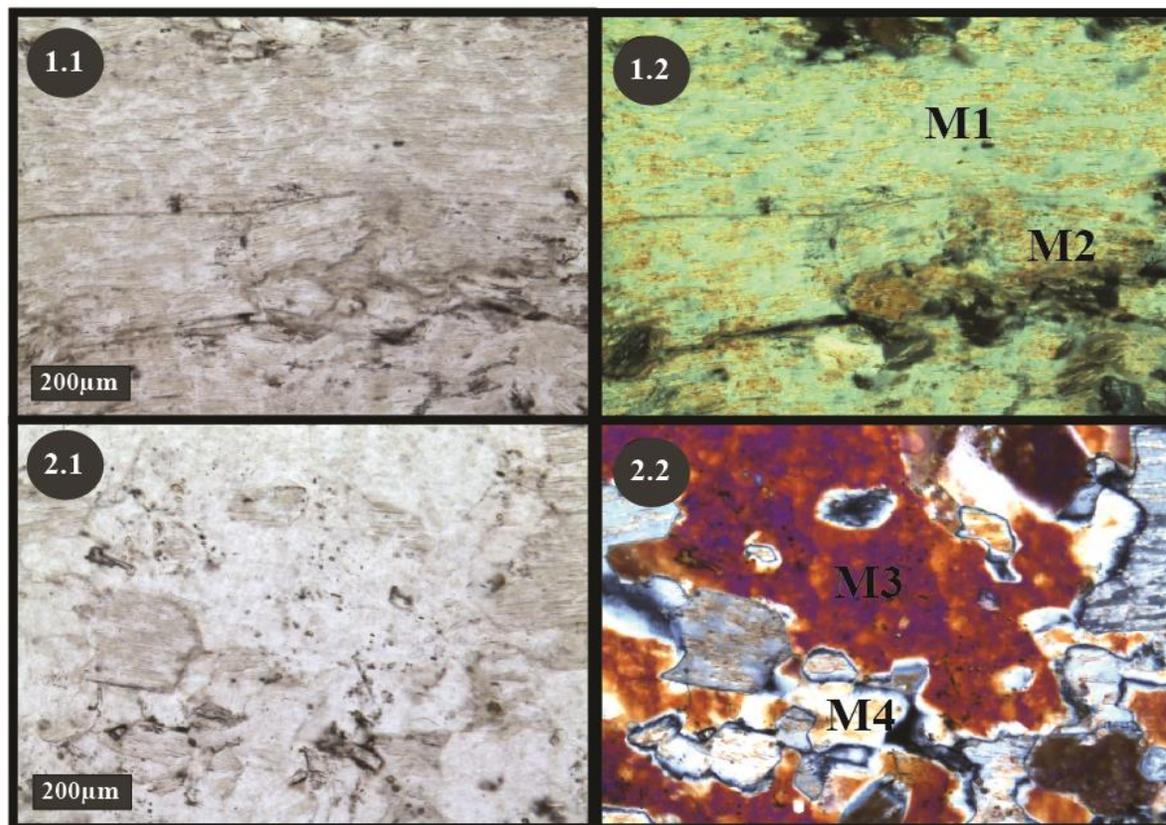


Ilustración 21: Muestra del área de control. Microfotografías 1.1 y 1.2 (sin y con polarizadores, respectivamente) corresponden a una sección donde se puede observar dos minerales: M1, mineral similar al yeso pero cuya extinción se da a los 17° y M2, mineral que altera a otros a través de sus clivajes. Microfotografías 2.1 y 2.2 (sin y con polarizadores, respectivamente) corresponden a una sección donde se puede observar dos minerales: M3, mineral similar a la anhidrita; M4, mineral similar a la thenardita. Todas las imágenes se observan bajo luz transmitida.

Las muestras pertenecientes al salar Azufrera contienen inclusiones primarias y secundarias, en las cuales se han reportado microorganismos y/o materia orgánica. Las muestras del sistema hidrotermal presentan microorganismos como filamentos o insectos con alas, pero estos no se encuentran dentro de IF (de hecho no se observan inclusiones en el cristal). Dado lo anterior, sólo las muestras del salar Azufrera son analizadas en detalle a continuación.

Inclusiones Fluidas Primarias y Secundarias.

Dieciocho cristales de anhidrita-yeso del salar Azufrera fueron analizados (Anexo A) y en ellos se identificaron cinco tipos de IF primarias, las cuales se caracterizan por ubicarse paralelas a la dirección de crecimiento del cristal.

Tipo I: IF de formas alargadas y delgadas, con dimensiones variables (muy grandes y muy pequeñas), ricas en líquido, las cuales en ocasiones albergan diatomeas (Ilustración 22).

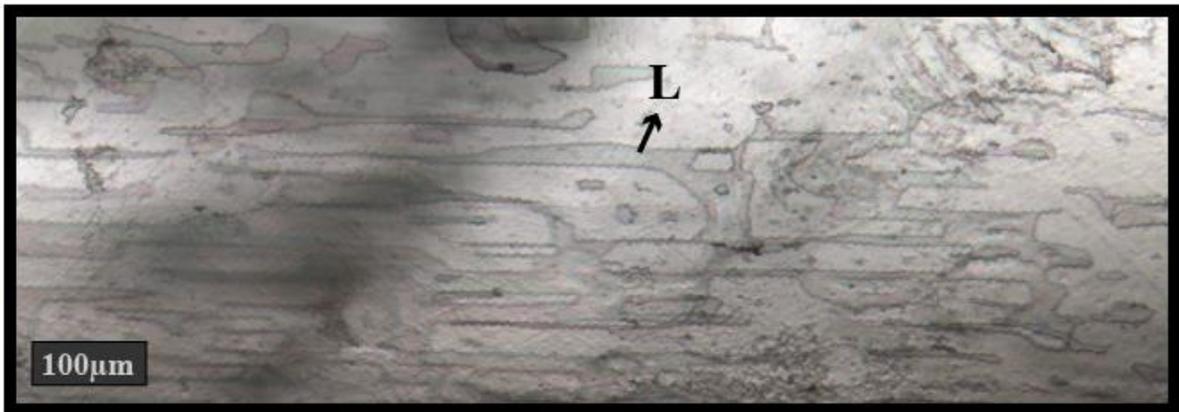


Ilustración 22: Inclusiones primarias tipo I bajo luz transmitida.

Tipo II: IF ubicadas en arreglos oblicuos a la cara (010) del cristal conformando zonas de crecimiento, sus formas son alargadas, elipsoidales y circulares, son de pequeñas dimensiones y la mayoría son ricas en líquido aunque existen arreglos ricos en vapor. Poseen tasas líquido/vapor poco consistentes entre ellas en general (Ilustración 23).

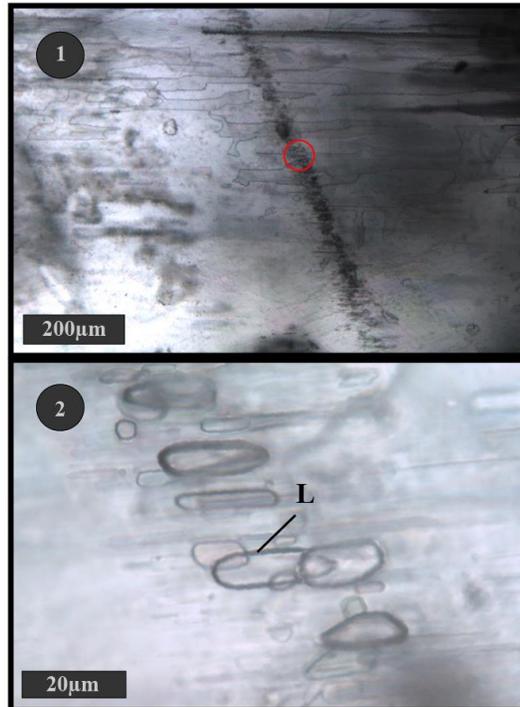


Ilustración 23: Inclusiones primarias tipo II. Microfotografía 1, muestra inclusiones en una zona de crecimiento bajo luz transmitida. Microfotografía 2 acercamiento del círculo de color rojo de la microfotografía 1, bajo luz transmitida..

Tipo III: IF de formas tabulares, con dimensiones intermedias entre las tipo I y II, son ricas en líquido, y albergan diatomea, algas y materia orgánica. Al igual que las tipo II, conforman zonas de crecimiento con arreglos oblicuos a la cara (010) (Ilustración 24).

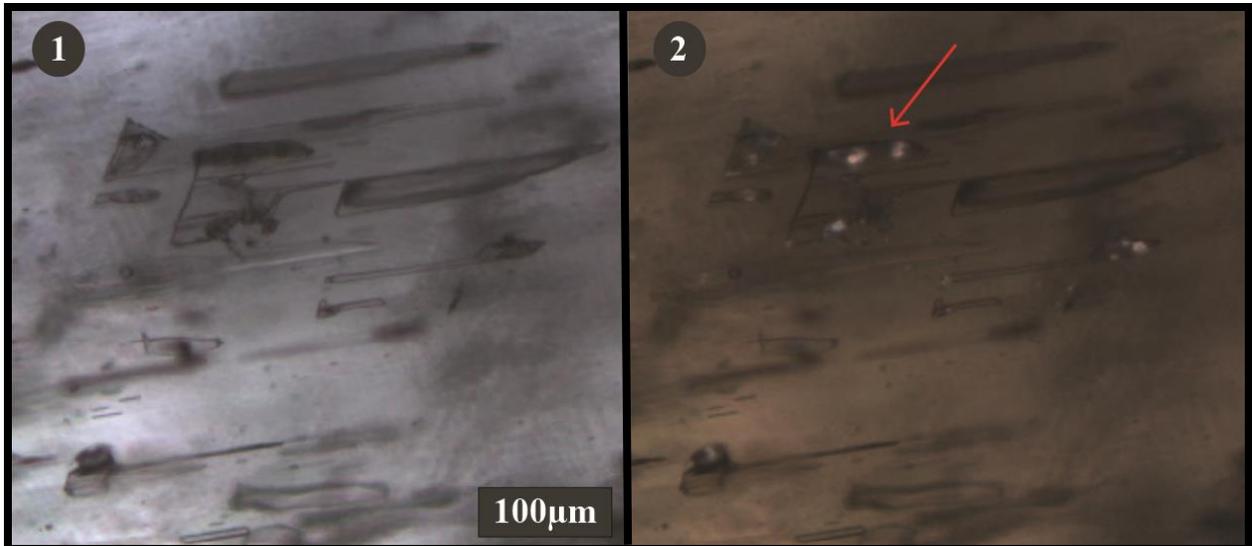


Ilustración 24: Inclusiones primarias tipo III. Microfotografía 1, muestra FIA bajo luz transmitida. Microfotografía 2, muestra la presencia de diatomeas (fluorescencia) tanto dentro como fuera de las inclusiones, bajo luz UV. La flecha roja indica la presencia de una diatomea atrapada dentro de una inclusión.

Tipo IV: IF de formas triangulares u ovaladas, contienen fases vapor y líquido, son de dimensiones relativamente pequeñas, pueden contener materia orgánica y su dirección es paralela a la dirección de crecimiento. En general la familia es poco numerosa (Ilustración 25).



Ilustración 25: Inclusiones primarias tipo IV, bajo luz transmitida.

Tipo V: IF de formas alargadas o amorfas, con fases líquidas, sólidas y gas en su interior (Ilustración 26). Las fases sólidas presentes exhiben hábito cúbico, por lo tanto, se puede tratar de halita o silvita. Dado el contexto de estudio, la halita es la opción más probable.

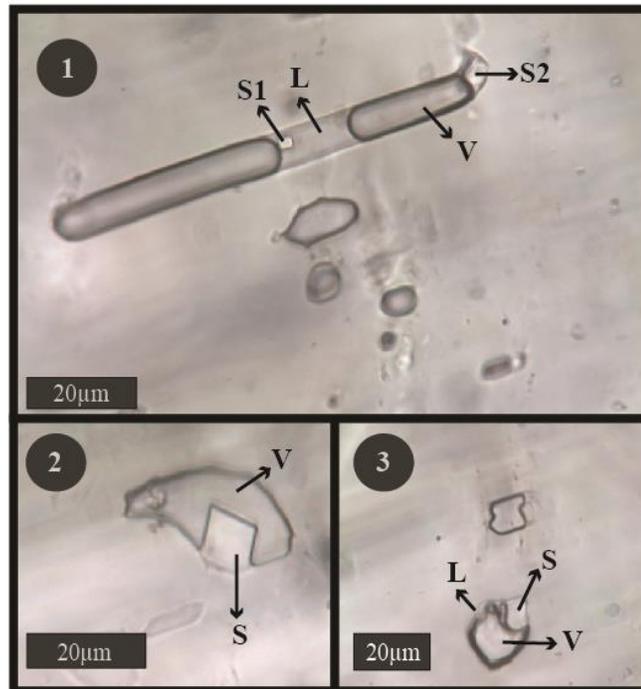


Ilustración 26: Inclusiones primarias tipo IV, mostrando todas sus fases presentes. Microfotografía 1, presenta una inclusión que contiene una fase líquida, doble burbuja con una fase vapor y dos sólidos (S1 y S2, S1 es halita), bajo luz transmitida. Microfotografía 2, inclusión con dos fases: sólido y vapor, bajo luz transmitida. Microfotografía 3, se observan dos inclusiones con las tres fases presentes: sólido, líquido y vapor, el líquido es muy escaso en ambas inclusiones,.

Las zonas de crecimiento conformadas por las inclusiones tipo II y III son esquematizadas en la Ilustración 27:

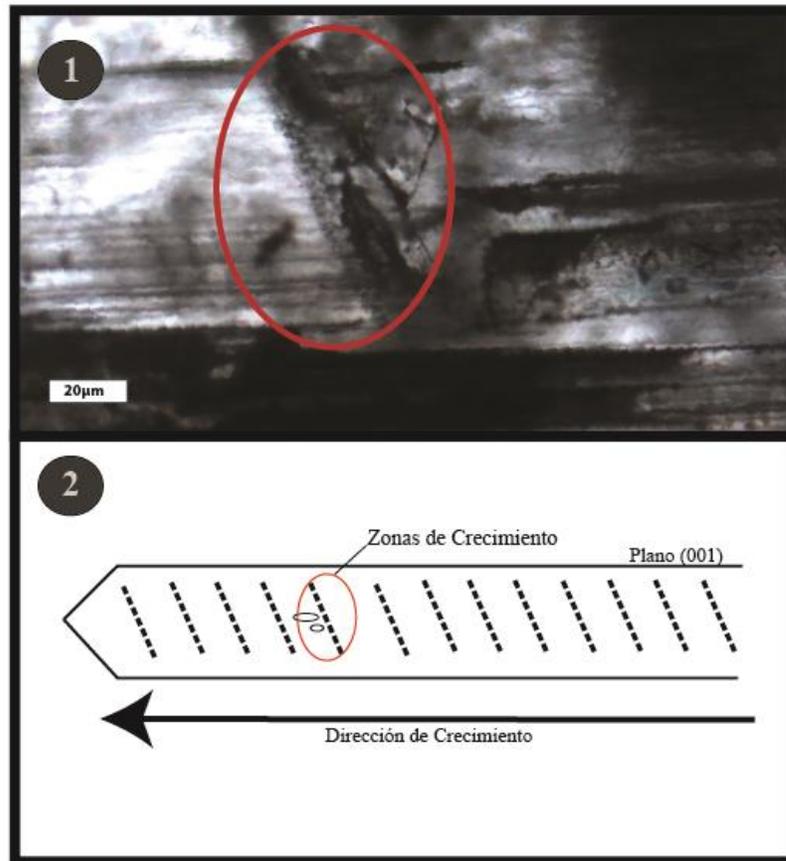


Ilustración 27: Zonas de crecimiento en los cristales de yeso. Microfotografía 1, obtenida del laboratorio, la elipse roja abarca la zona de crecimiento. Imagen 2, representación esquemática de la ubicación de las zonas de crecimiento dentro del cristal de yeso-anhidrita.

Por su parte, las inclusiones fluidas secundarias se pueden clasificar en tres tipos basándose en la ubicación dentro del cristal y en su tamaño.

Tipo I: IF ubicadas en la parte inferior del cristal, perpendiculares a la dirección de crecimiento, en general son de dimensiones muy pequeñas y algunas contienen una fase sólida (Ilustración 28).

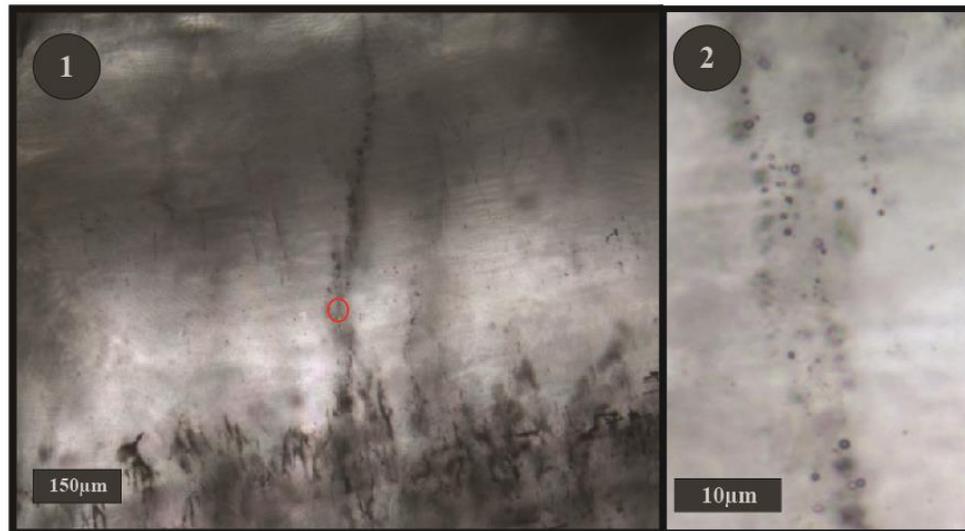


Ilustración 28: Inclusiones secundarias tipo I. Microfotografía 1, muestra inclusiones secundarias siguiendo trenes de micro fracturas bajo luz transmitida. Microfotografía 2, acercamiento del círculo rojo en la microfotografía 1, bajo luz transmitida.

Tipo II: IF de dimensiones un poco mayores a las tipo I y III. Su dirección es pseudo-perpendicular a la dirección de crecimiento del cristal, y la mayoría de las familias alcanzan la parte central del cristal. Algunas de ellas contienen materia orgánica (Ilustración 29).

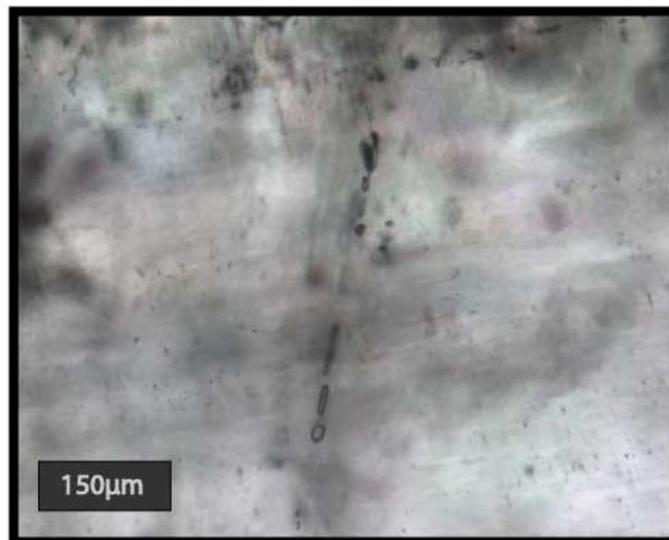


Ilustración 29: Inclusiones secundarias tipo II bajo luz transmitida.

Tipo III: IF ubicadas en la parte baja del cristal, se caracterizan por ser muy pequeñas y su traza es de poca extensión (Ilustración 30).

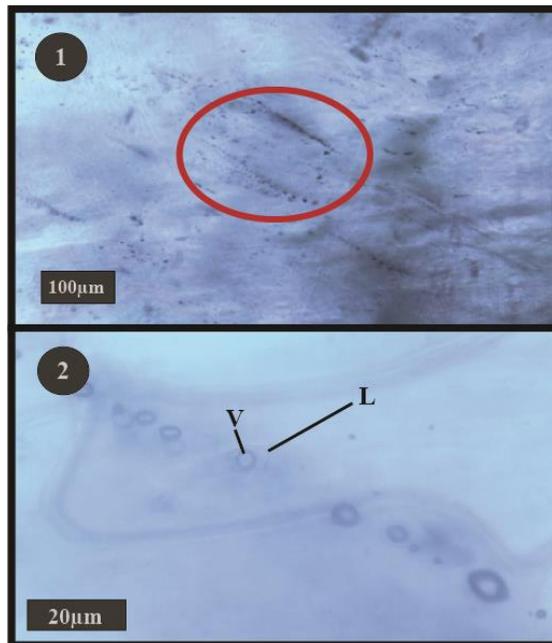


Ilustración 30: Inclusiones secundarias tipo III. Microfotografía 1, muestra los trenes (sur-este) que siguen este tipo de inclusiones, bajo luz transmitida. Microfotografía 2, acercamiento de la elipse roja marcada en la microfotografía 1, bajo luz transmitida.

Resulta difícil localizar familias de inclusiones consistentes, en especial de tipo primarias, ya que la mayoría de las FIAS presentan tasas líquido-vapor muy diferentes entre las inclusiones que la componen.

En el área de control por su parte, se pudo observar dos tipos de inclusiones fluidas primarias:

Tipo I: IF de formas alargadas ubicadas paralelas a la dirección del clivaje del mineral huésped, poseen tasas poco consistentes de líquido-vapor y no contienen microorganismos ni materia orgánica (Ilustración 31)

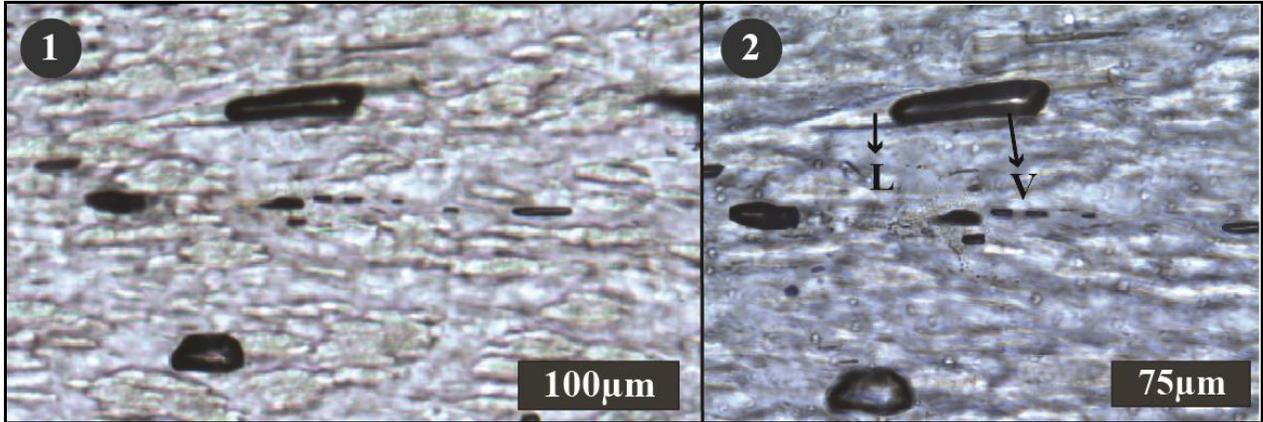


Ilustración 31: Inclusiones fluidas primarias tipo I, en el área de control. Microfotografía 1, muestra inclusiones fluidas primarias siguiendo la dirección de clivaje del cristal huésped. Microfotografía 2, acercamiento de las zona inclusiones. Imágenes capturadas bajo luz transmitida.

Tipo II: IF de formas alargadas e irregulares, ricas en líquido, se ubican paralelas a la dirección de clivaje del cristal huésped. No contienen microorganismos ni materia orgánica (Ilustración 32).

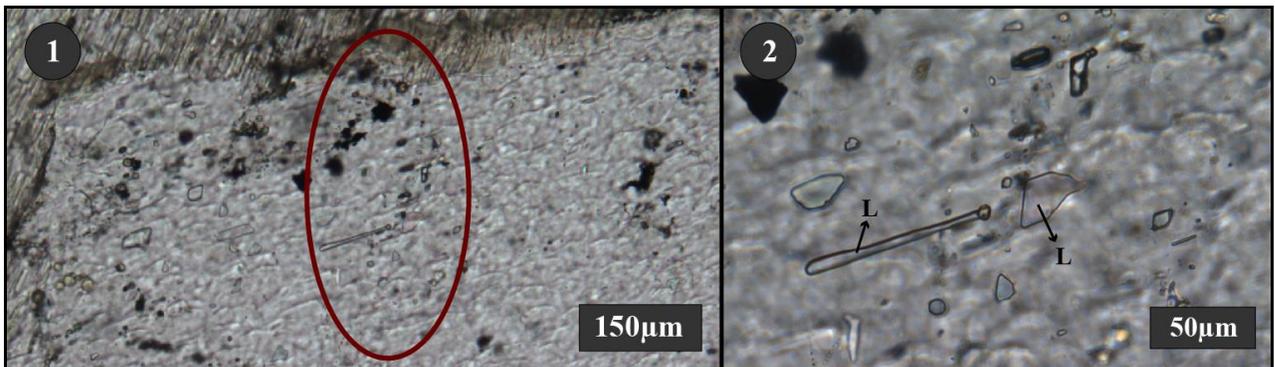


Ilustración 32: IF primarias tipo II, en el área de control. Microfotografía 1, muestra a las inclusiones siguiendo el clivaje del mineral huésped. Microfotografía 2, acercamiento de la elipse roja, se observan las IF ricas en líquido. Imágenes capturadas bajo luz transmitida.

Las inclusiones fluidas secundarias poseen forma circular, tasas líquido-vapor consistente, su traza delinea un ángulo aproximado de 45° con la dirección del clivaje y no poseen microorganismos ni materia orgánica (Ilustración 33).

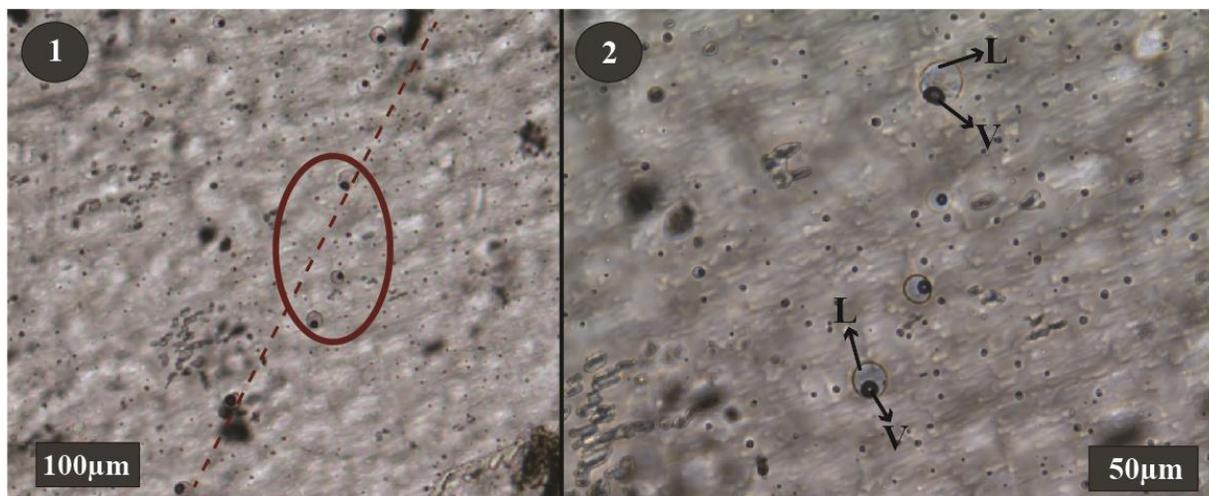


Ilustración 33: IF secundarias, en el área de control. Microfotografía 1, muestra el tren seguido por las inclusiones secundarias (línea roja recortada). Microfotografía 2, acercamiento de la elipse roja, en ella se puede observar las tasas consistentes líquido-vapor dentro de las inclusiones. Imágenes capturadas bajo luz transmitida.

Microorganismos dentro y fuera de inclusiones fluidas en el salar Azufrera

Los microorganismos encontrados en el salar Azufrera se compararon con aquellos descritos por Benison & Karmanocky (2014) y Zúñiga (2016), a partir de este procedimiento se identificaron diatomeas, coccis y algas (Ilustración 34), a los que se les suman pigmentos orgánicos que no se han podido identificar específicamente, pero que se han reconocido por su fluorescencia bajo luz UV. Se hace necesario puntualizar que el color de fluorescencia no ha sido un rasgo característico para distinguir a los microorganismos, ya que durante la extensión de esta investigación algunos de ellos han perdido la fluorescencia. Las algas en general se ubican dentro del cristal, pero fuera de las inclusiones, las diatomeas se observan tanto dentro como fuera de inclusiones, por su parte los coccis se han identificado solamente dentro de inclusiones.

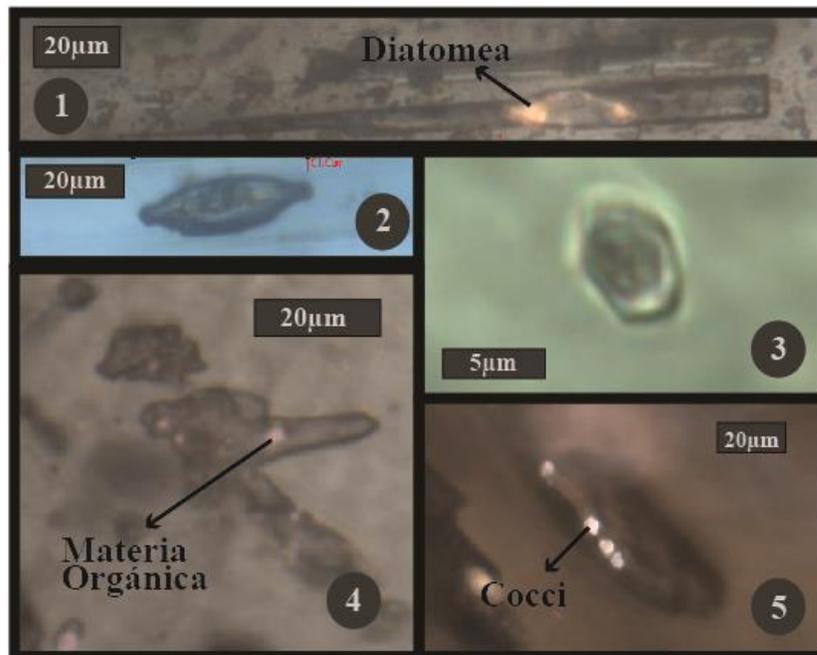


Ilustración 34: Microorganismos dentro de los cristales de yeso-anhidrita del Salar Azufrera. Microfotografía 1, diatomea atrapada dentro de inclusión, bajo luz transmitida y UV. Microfotografía 2, diatomea libre dentro del cristal bajo luz transmitida. Microfotografía 3, presunta alga *Dunaliella* libre bajo luz transmitida. Microfotografía 4, materia orgánica libre bajo luz transmitida. Microfotografía 5. Coccis atrapados en inclusión fluida bajo luz transmitida y UV.

Sumándose a los microorganismos anteriormente mencionados, se han identificado algunos filamentos (Ilustración 35) e insectos con alas, de grandes dimensiones (en comparación con lo antes descritos) en seis de las once láminas del área de control.

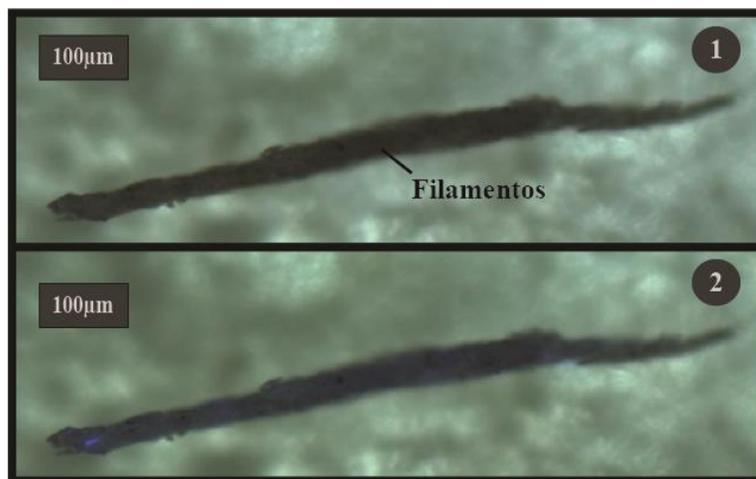


Ilustración 35: Filamentos dentro de los cristales salinos del área de control. Microfotografía 1, filamento bajo luz transmitida. Microfotografía 2, filamento bajo luz transmitida y UV.

Microtermometría

Sólo tres de las dieciocho muestras del salar Azufrera cumplen las condiciones necesarias para el análisis microtermométrico. Las cuales son: contener FIAs con tasas líquido-vapor consistentes, que alberguen en su interior microorganismos y/o materia orgánica y que el número de familias dentro del cristal fuese ≥ 3 . La distribución esquemática de las familias dentro de cada cristal se puede ver en la Ilustración 31. La nomenclatura utilizada asigna números enteros positivos a las familias primarias y las siglas “s1”, “s2”, etc. a las secundarias. Para un mejor entendimiento se reordenaron las familias para que los números asignados sigan un orden cronológico según la dirección de crecimiento del cristal (Ilustración 36) . Para mayor detalle revisar el anexo B. Ejemplos de familias seleccionadas para la microtermometría se pueden revisar en el Anexo C.

Los resultados de la microtermometría se presentan en las tablas 9, 10 y 11, en ellas se pueden observar dos situaciones: las temperaturas eutécticas y del último derretimiento son extremadamente bajas y, además una gran cantidad de familias no posee datos microtermométricos asociados debido a que las IF no cambiaban de fase durante el procedimiento o precipitaban sólidos que no se volvían a disolver.

A modo de ejemplo en la Ilustración 37 y 38, se observan los datos microtermométricos (T_e y T_m) de la muestra 1.

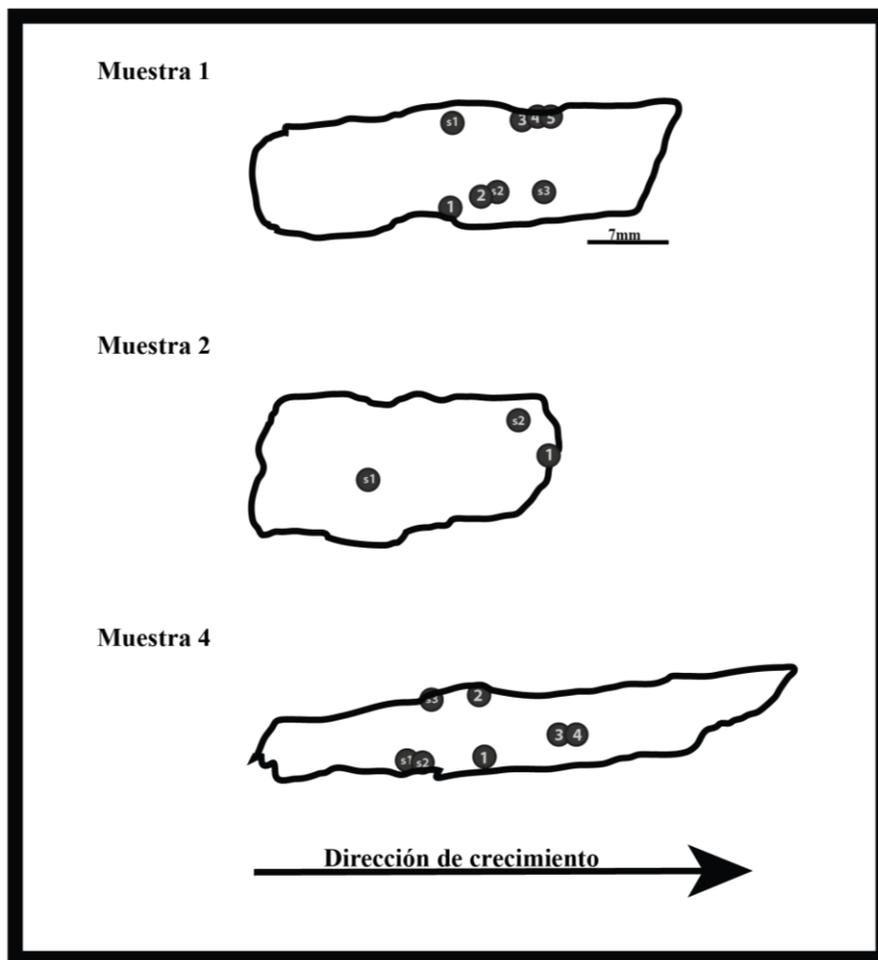


Ilustración 36: Esquemas de la ubicación de cada familia de inclusiones dentro de cada muestra.

Tabla 9: Resultados de microtermometría de la Muestra 1.

Muestra	FIA	Tipo	N° de IF	Te (°C)	Tm (°C)	Observaciones
1	1	p. IV	1	-71.2	-35	La IF2 es demasiado pequeña y por lo tanto no se observan los cambios de fase.
			2	-72.4	-28.2	
	2	p. IV	1	-85.6	-35	No se observan cambios de fase.
			2	-75.4	-30.7	
			3	ND	-60	
	2*	p	1	-72.4	-34.7	
			2	-72.4	-34.3	
	3	p. I	1	ND	ND	Debido al pequeño tamaño de las IF no se pueden obtener datos microtermométricos.
			2	ND	ND	
			3	ND	ND	
	4	p. V	1	ND	ND	Todas ellas presentan cristales de halita, además la IF1 presentaba en un principio el líquido dividido en dos. Al enfriar/calentar se forman minerales hijos que no se vuelven a disolver.
			2	ND	ND	
			3	ND	ND	
			4	ND	ND	
			5	ND	ND	
	5	p. V	1	ND	ND	Algunas de ellas presentan cristales de halita.
			2	ND	ND	
			3	ND	ND	
	s1	s. II	1	-69	ND	Presenta una fase sólida.
			2	-80.5	-40.3	
			3	-80	-33	
	s2	s. II	1	-84.7	ND	Esta inclusión contiene materia orgánica.
			2	-79.9	ND	Contiene tres sólidos circulares. No hubo cambios de fases.
			3	-80	-47.3	Le salió una burbuja dentro de su burbuja.
4			ND	ND	No presenta cambios de fases.	
s3	s. II	1	-79.9	-36.5	Demasiado ricas en vapor, por lo que las mediciones resultan dificultosas.	
		2	-80.6	-25		
		3	ND	ND		

ND = No datos.

* Dudas acerca de la medición del dato.

Tabla 10: Resultados de la microtermometría de la Muestra 2.

Muestra	FIA	Tipo	N° de IF	Te (°C)	Tm (°C)	Observaciones.
2	1	P. II	1	ND	ND	Demasiado ricas en vapor para medir cambios de fase.
			2	ND	ND	Demasiado ricas en vapor para medir cambios de fase. Presenta materia orgánica.
			3	ND	ND	Demasiado ricas en vapor para medir cambios de fase.
	s1	S. II	1	-75.2	-22.9	
			2	-75*	-18.3	
			3	-70.8	-21.8	
	s2	S. II	1	-76.3	-19.9	
			2	-74.2	-19.5	
			3	-72.4	-22.9	

ND = No datos.

* Dudas acerca de la medición del dato.

Tabla 11: Resultados de la microtermometría de la Muestra 4.

Muestra	FIA	Tipo	N° de IF	Te (°C)	Tm (°C)	Observaciones
4	1	p. IV	1	-79.9	-29.9	No se observan cambios de fase.
			2	ND	ND	
			3	ND	ND	
			4	ND	ND	
	2	p. IV	1	-79.9	-10.5	Nucleó un sólido que no volvió a aparecer hasta los 20°C.
			2	-63.4	-7.4	No se observan cambios de fase.
			3	ND	ND	Contiene sólidos. No se observan cambios de fase.
			4	ND	ND	No se observan cambios de fase.
	3	p. IV	1	ND	ND	No se observa cambio de fase. La IF3 cambia de forma durante la microtermometría.y además nuclea una burbuja extra al enfriarse. La IF 4 siempre se presenta rugosa sin ningún cambio. La IF5 nuclea un sólido que no se disuelve hasta los 24°C.
			2	ND	ND	
			3	ND	ND	
			4	ND	ND	
			5	ND	ND	
	4	p. IV	1	-81.6	-14.9	Su tamaño tan pequeño no permite observar los cambios de fases.
			2	ND	ND	
	s1	s. I	1	-70.3	ND	En la IF3 se observan dos sólidos hasta los 20°C.
			2	-90.1	-32.5	
			3	-100	-68.4	
			4	-85.4	-60	
	s2	s. II	1	ND	ND	La visión es escasa y no se observan cambios de fase.
2			ND	ND		
3			ND	ND		
s3	s. II	1	-60.2	ND	Contiene materia orgánica.	
		2	-56.9	-26.5		
		3	-63.6	ND		

ND = No datos..

* Dudas acerca de la medición del dato.

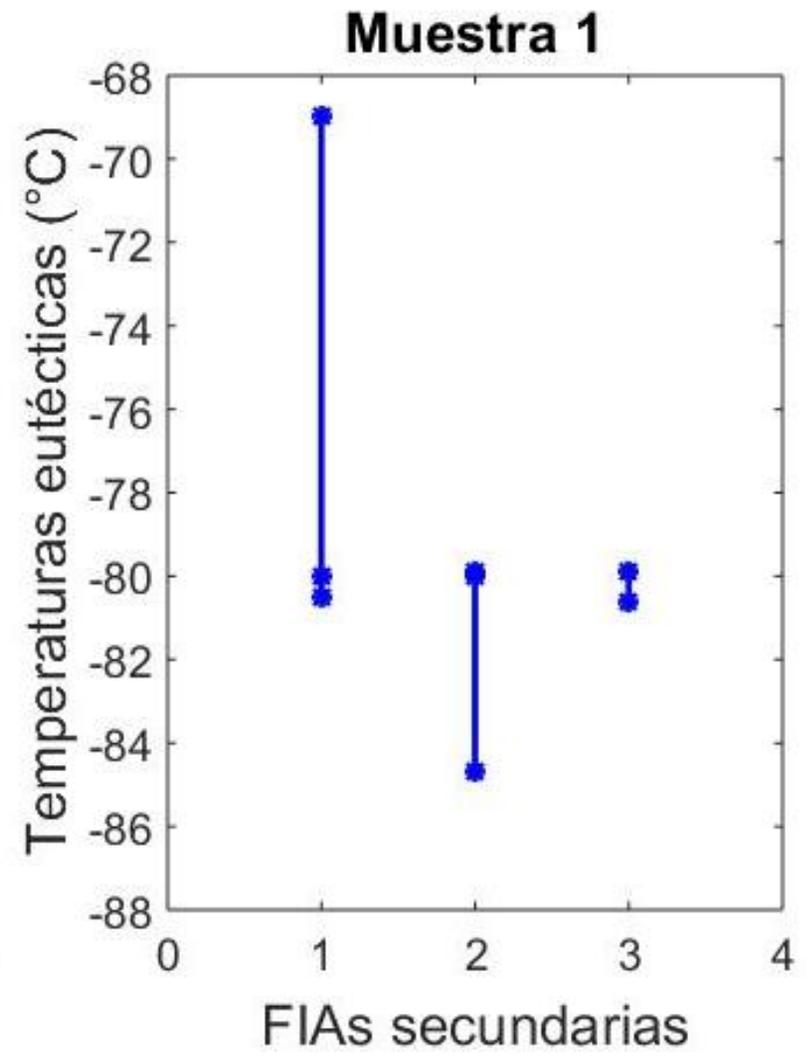
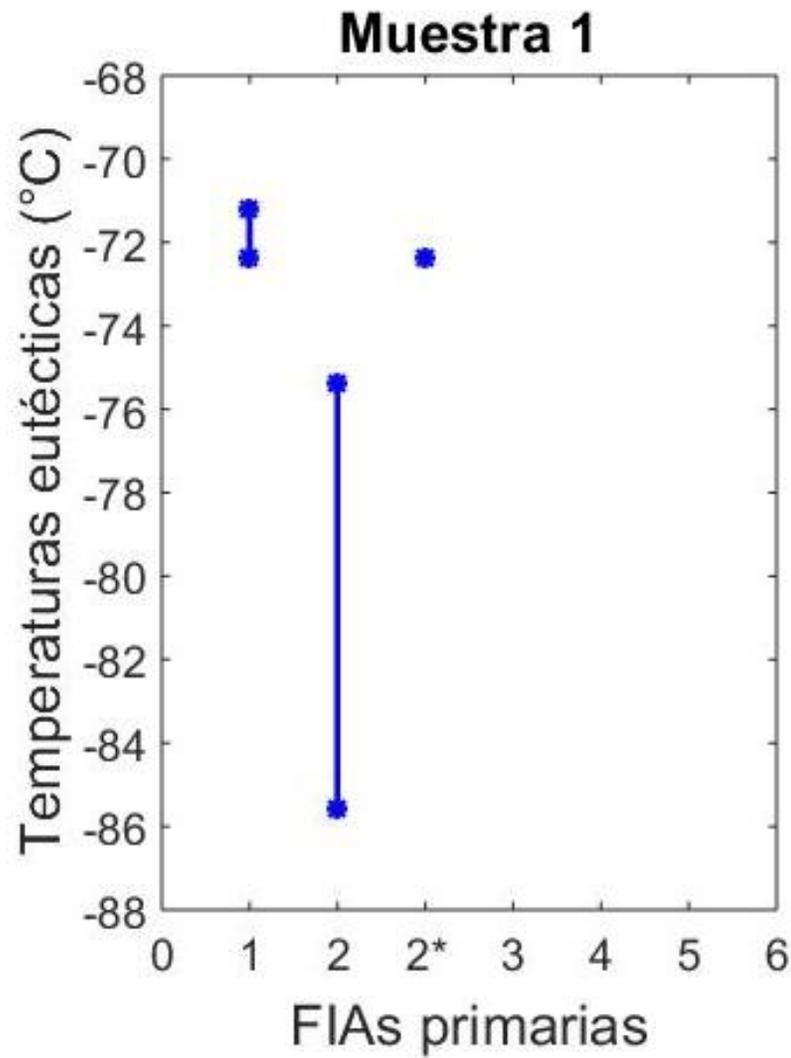


Ilustración 37: Resultados de las temperaturas eutécticas de la muestra 1.

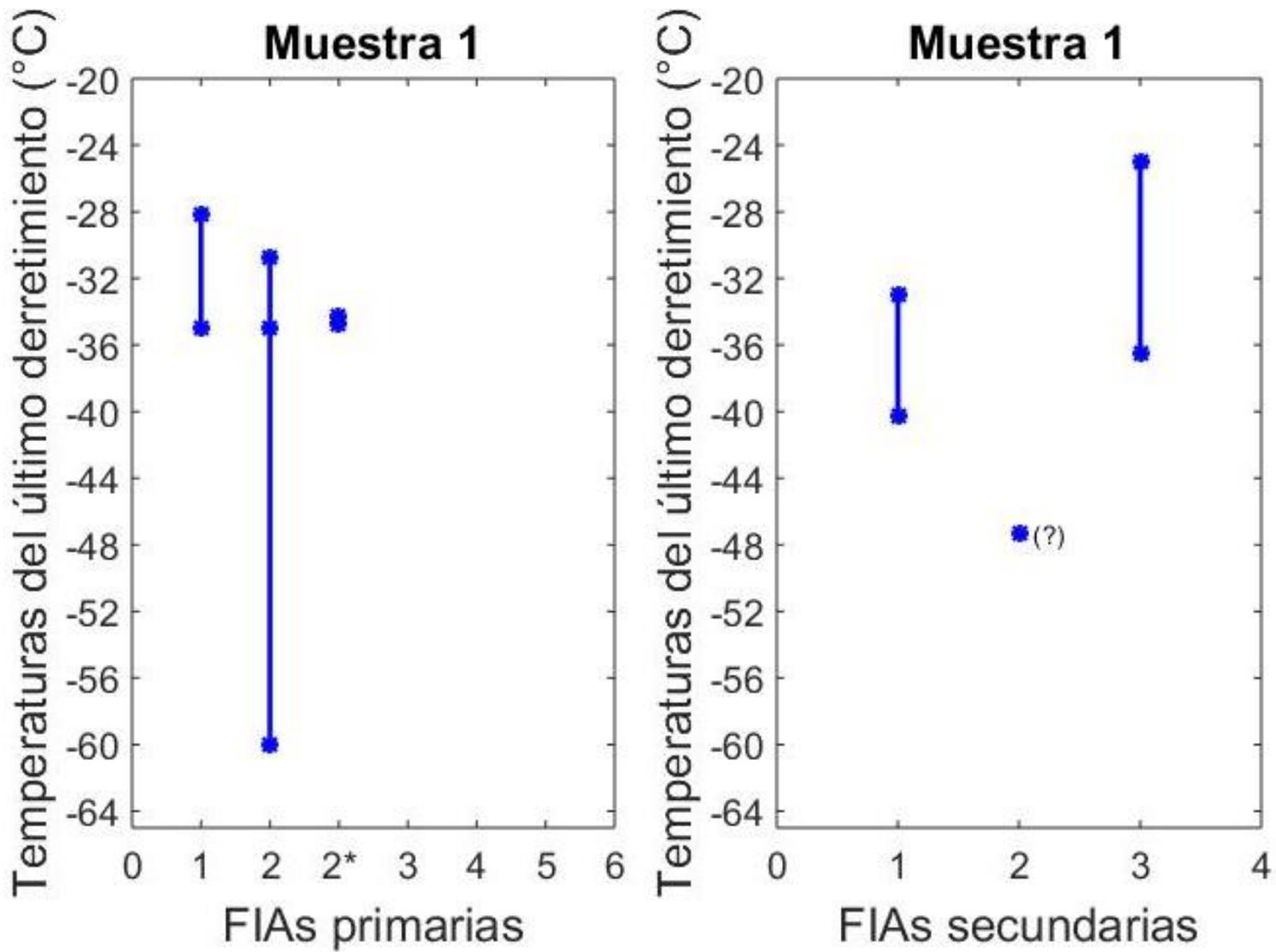


Ilustración 38: Resultado de las temperaturas del último derretimiento de la Muestra 1.

Las composiciones asociadas a cada dato se determinan en base al modelo termodinámico FREZCHEM (Marion et al., 2010), el cual calcula las concentraciones iónicas en base a la temperatura eutéctica y a la temperatura del último derretimiento, teniendo como referencias las concentraciones iónicas ambientales que el usuario le asigne. Debido a que no se encuentran datos geoquímicos del salar Azufrera, se ha seleccionado al salar Pajonales como un potencial reemplazante de su composición ya que se encuentra en sus cercanías (~30 kms), sigue la misma vía evolutiva (cálcica) y, se disponen sus datos composicionales (Vila, 2010) (Tabla 12) y de acidez (pH 7.4). Además se modelan las concentraciones que se obtendrían en un posible ambiente marciano según Marion et al. (2010) (Tabla 13).

Las Tablas 12 y 13 muestran las composiciones ingresadas al programa Frezchem para el modelamiento de las concentraciones iónicas en el salar “Azufrera” y en Marte respectivamente. Los datos para el salar terrestre se extrajeron a partir del estudio realizado por Vila (2010) en salares chilenos, por su parte los datos utilizados para Marte se extrajeron del estudio realizado por Marion et al. (2010) en el cual se modelan las concentraciones presentes en el suelo marciano.

Tabla 12: Concentraciones iónicas del salar Pajonales, extraído y modificado de Vila (2010)

Especies Iónicas	Concentración (m)
Na	1.069
K	0.034
Mg	0.112
Ca	0.156
Cl	1.634
SO ₄	0.005
HCO ₃	0.003
B	0.011

Tabla 13: Composición química acuosa del suelo marciano basada en la misión Phoenix, entregada por Marion et al. (2010)

Especies Iónicas	Valores
Na	$1.40 \cdot 10^{-03}$ m
K	$0.38 \cdot 10^{-03}$ m
Mg	$3.30 \cdot 10^{-03}$ m
Ca	$0.58 \cdot 10^{-03}$ m
Cl	$0.54 \cdot 10^{-03}$ m
ClO ₄	$2.40 \cdot 10^{-03}$ m
SO ₄	$1.70 \cdot 10^{-03}$ m
pH	7.7
PCO ₂	$3.3 \cdot 10^{-03}$ bar
T	7.5°C
Patm	1.0 bar

Las presiones ingresadas al programa para la Tierra y Marte son indicadas en las Tablas 14 y 15, respectivamente.

Tabla 14: Presiones parciales terrestres.

P _{atm}	1.013 bar
CO ₂	3.0·10 ⁻⁴ bar
O ₂	0.212 bar
N ₂	0.79 bar

Tabla 15: Presiones parciales y atmosféricas marcianas.

P _{atm}	1 bar
CO ₂ ^a	3.0·10 ⁻⁰³ bar
O ₂ ^b	1.0· 10 ⁻⁰⁵ bar
N ₂ ^b	2.2· 10 ⁻⁰⁴ bar

^a Tomado de Marion et al (2010).

^b Tomado de Rothschild (1990).

Tanto en el salar Pajonales como en Marte, se utiliza una concentración de NH₃ equivalente a 10 m, esto debido a que el programa trae por defecto esa concentración y al intentar cambiarla (disminuirla) deja de funcionar. La presión utilizada para modelar marte es de 1 bar, ya que es la mínima admitida por el programa.

El tipo de reacción escogida es la cristalización fraccionada, la cual consiste en enfriar lentamente una solución caliente para generar la precipitación de fases minerales según sus diferencias de solubilidad. Este procedimiento es elegido debido a tres razones: el proceso no permite disolver minerales ya precipitados, permite conocer la mayor cantidad de fases posibles a precipitar (a diferencia de las reacciones en equilibrio) y es análogo a lo que ocurre dentro de las inclusiones durante el congelamiento de las muestras para la microtermometría, ya que las tasas de disminución de temperatura (50°C/min) no permiten que la solución llegue al equilibrio.

Se intentó modelar los escenarios marcianos y terrestres con pH 3.0 y 7.7, bajo los procesos de congelamiento y evaporación respectivamente. Sin embargo Frezchem presentó problemas para calcular los resultados durante el proceso de evaporación, específicamente, sólo entregó los resultados asociados a la última temperatura calculada (T_m). Por otra parte, los resultados muestran que las últimas concentraciones iónicas calculadas para los procesos de congelamiento y evaporación son exactamente iguales. Por lo tanto, es probable que las concentraciones asociadas al resto de las temperaturas también hayan sido las mismas.

Los escenarios son modelados utilizando las concentraciones iónicas finales entregadas por el programa (asociadas a la temperatura del último derretimiento, T_m). Estos escenarios son: congelamiento en la superficie marciana bajo condiciones neutras (Anexo D.1 y Anexo D.2) y congelamiento en la superficie marciana bajo condiciones ácidas (Anexo D.3 y Anexo D.4). Además debido a que las concentraciones finales calculadas para los procesos de evaporación y congelamiento son las mismas, se modelan escenarios evaporíticos utilizando las concentraciones asignadas bajo el proceso de congelación, por lo tanto se calculan: concentraciones iónicas bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH neutro (Anexo D.5 y Anexo D.6) y concentraciones iónicas bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 3.0 (Anexo D.7 y Anexo D.8).

La ilustración 39 muestra la gran diferencia (tres órdenes de magnitud) entre las concentraciones iónicas en el salar y en Marte. Si bien el cloro y el potasio se comportan de igual manera en ambos gráficos, el resto de los elementos no. En el salar se estima una alta concentración de sodio, lo cual se condice con las IF encontradas en los cristales del salar Azufrera que presentan sólidos de halita en su interior, en tanto que en Marte, la concentración de este elemento es prácticamente nula. La relación entre las concentraciones de Ca y SO_4 en Marte es muy estrecha, sin embargo, en el salar la concentración de SO_4 es mínima en comparación con el calcio. El salar Azufrera y Pajonales han sido clasificados como ricos en Ca según Risacher (2003) lo cual concuerda con una mayor proporción de calcio por sobre el sulfato.

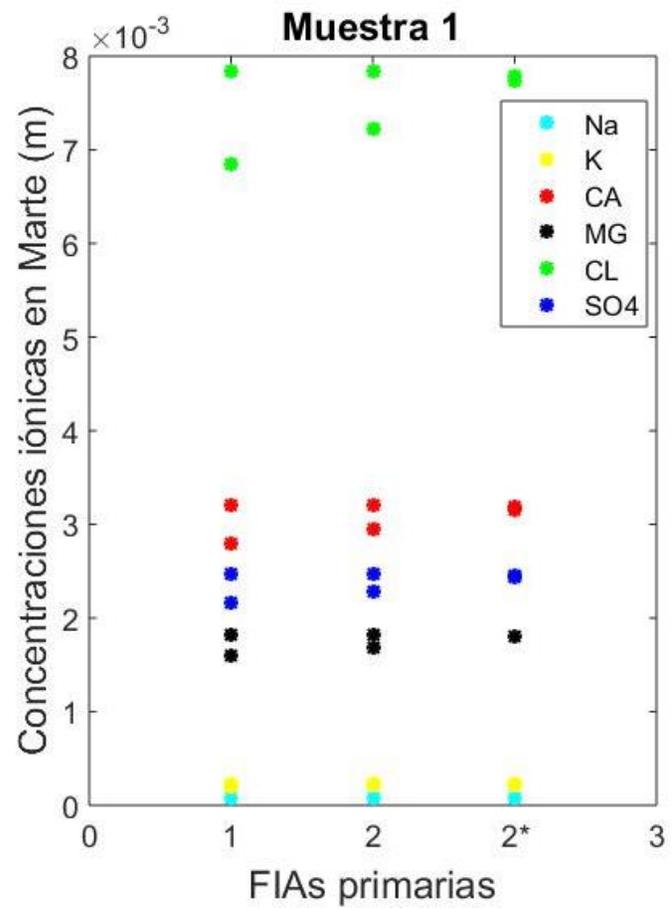
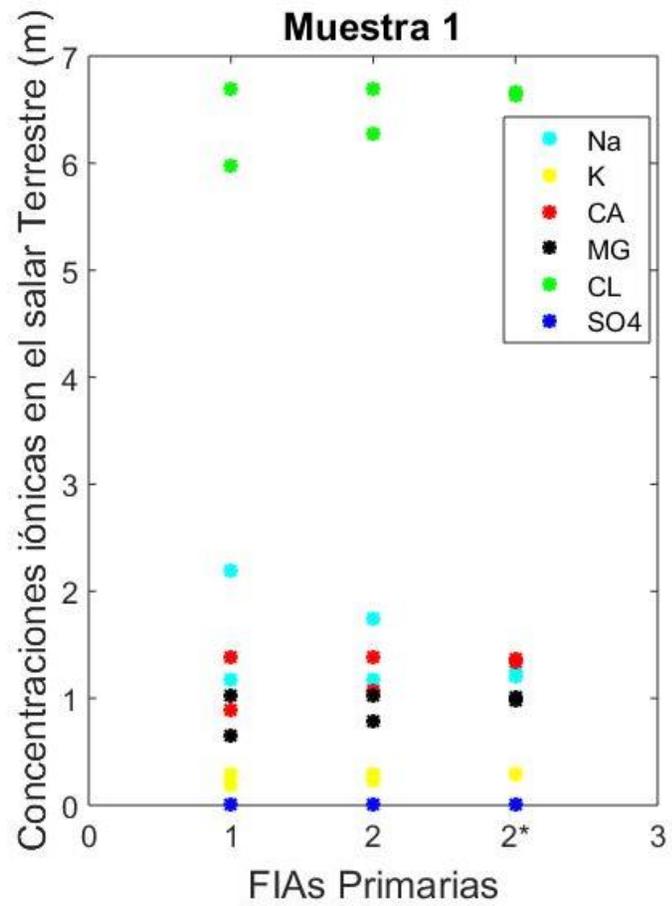


Ilustración 39: Comparación entre las concentraciones iónicas terrestres y las concentraciones iónicas esperadas en Marte. Es importante destacar la gran diferencia entre las magnitudes de las concentraciones en ambos escenarios (de tres órdenes de magnitud).

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Los resultados entregados por el SEM para la muestra 1, indican que el mineral huésped se compone de azufre, calcio y oxígeno (tabla 16), lo cual concuerda con los elementos presentes en la anhidrita o el yeso.

Tabla 16: Composición química porcentual del mineral del salar Azufrera.

Elemento	% Atómico
S	17.2
Ca	15.5
O	67.3

Por su parte las imperfecciones contienen aluminio, silicio, azufre, potasio, calcio, oxígeno \pm sodio, magnesio u hierro (Tabla 17). Esta gran cantidad de elementos encontrados, se condice con la alta complejidad química esperada de las salmueras presentes dentro de las inclusiones fluidas.

Tabla 17: Composición química porcentual de las imperfecciones dentro del mineral huésped, perteneciente al salar Azufrera. El oxígeno fue retirado de la tabla y el resto de las composiciones fueron estandarizadas para acentuar la presencia del resto de los elementos.

Elemento	% Atómico
Na	1.6
Mg	1.4
Al	3.8
Si	4.9
S	47.7
K	1.3
Ca	38.2
Fe	0.6

Ambos resultados concuerdan con lo esperado: mineral huésped cálcico sulfatado y salmueras dentro de inclusiones con alta complejidad, las cuales resultan ser grandes supresoras del punto eutéctico.

Nucleación del Yeso

Si bien las condiciones ambientales en Marte y la zona de estudio logran traslaparse, no son exactamente las mismas. Debido a esto cabe preguntarse si los cristales de yeso presentan alguna variación durante la nucleación producto de estas diferencias.

Para realizar los gráficos relacionados con la nucleación del yeso (Ilustración 40, 41, 42, 43, 44) se utilizaron las ecuaciones 12, 13, 14 y los datos siguientes (Tabla 18):

Tabla 18: Parámetros utilizados para los cálculos relacionados al proceso de nucleación del yeso.

Parámetro	Valor (unidad de medida)
k_B	$1.38 \cdot 10^{-23}$
T	215 y 273 K
V_m	$17.24 \text{ m}^3/\text{mol}$
σ^a	100 mJ/m ²
Ω^b	1.42

^a Tomado de Teng et al (2011).

^b Tomado Reznik (2009).

A continuación se presentan dos gráficos en los que se muestra la energía de formación del yeso (CaSO_4) en función del número de moléculas en un núcleo cualquiera. Los valores específicos de grados de saturación ($\log S$) son representados por las líneas de colores. Para los modelos se utilizan temperaturas de 215 K y 273K, las cuales son comparables con las que se encuentran en Marte y en la zona de estudio respectivamente.

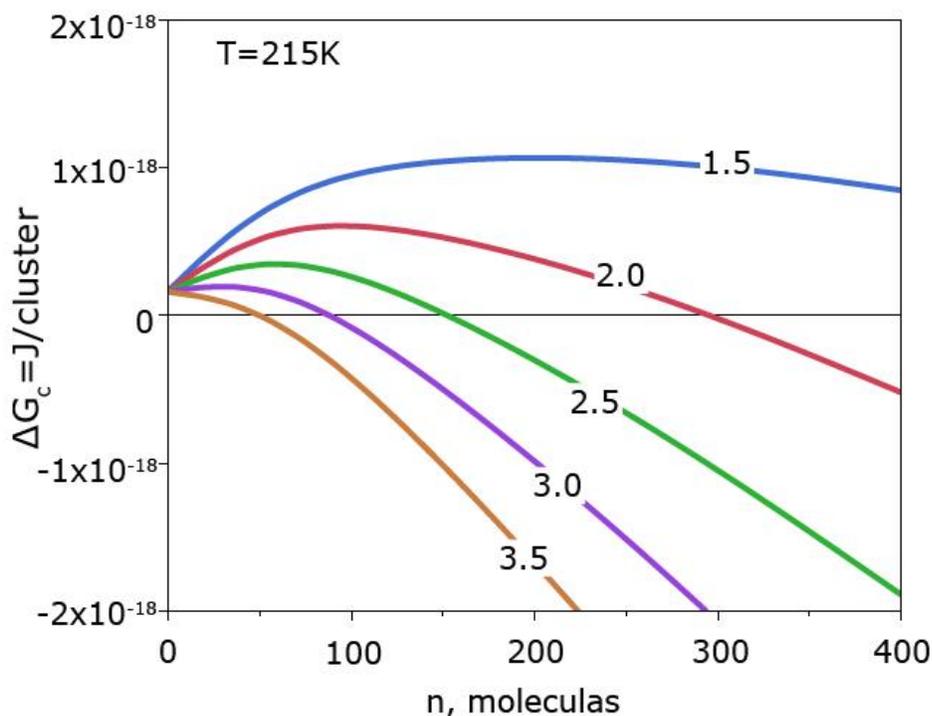


Ilustración 40: Energía libre asociada a la formación de núcleos de yeso en función del número de moléculas en cada núcleo, para valores de $\log S$ en el rango 1.5 a 3.5 (valores especificados en las líneas de colores). Bajo una temperatura de 215 K.

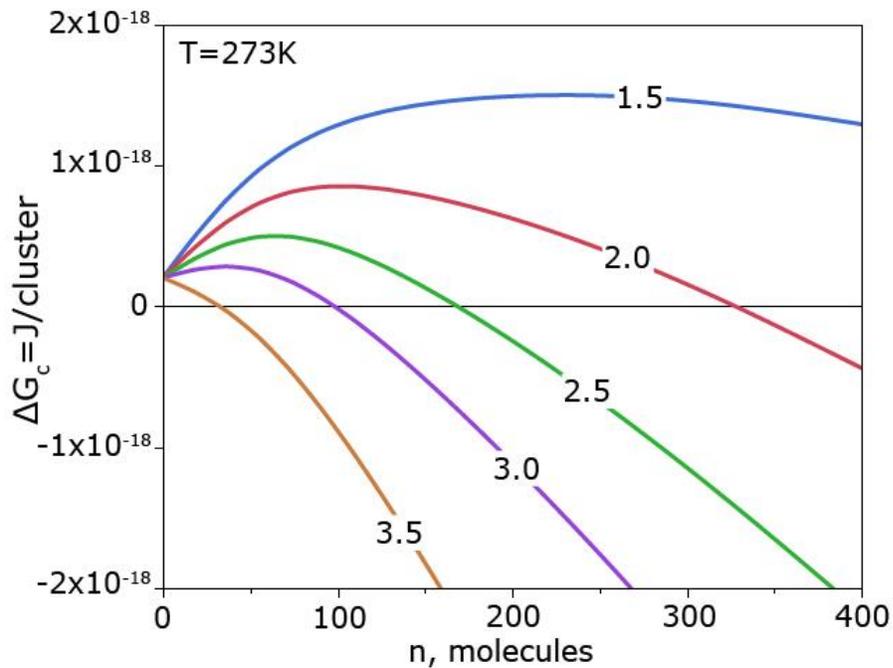


Ilustración 41: Energía libre asociada a la formación de núcleos de yeso en función del número de moléculas en cada núcleo, para valores de $\log S$ en el rango 1.5 a 3.5 (valores especificados en las líneas de colores). Bajo una temperatura de 273 K.

En ambos gráficos se observa que el máximo alcanzado por ΔG_c disminuye a medida que el grado de saturación aumenta, implicando que la barrera de la nucleación disminuye a medida que la solución se sobresatura, sin embargo al comparar ambos gráficos se tiene que la energía necesaria para formar los núcleos en condiciones marcianas bajo un mismo grado de saturación, es menor que la requerida en un contexto terrestre. Por otra parte, bajo el mismo grado de saturación (p.ej. $\log S = 3.0$) los núcleos contendrán mayor cantidad de moléculas a menores temperaturas (A una $T = 215\text{K}$, $n \sim 300$; en tanto que a una $T = 273\text{K}$, $n < 300$), lo cual concuerda con lo esperado, ya que a menor temperatura los fluidos tienden a cristalizar y la cantidad de choques de partículas disminuye, permitiendo que la cantidad de moléculas que compongan los núcleos sea mayor.

A continuación se presentan dos gráficos en los que se muestra el número de moléculas de yeso en un núcleo crítico en función del grado de saturación ($\log S$), para las temperaturas de 215K y 273K.

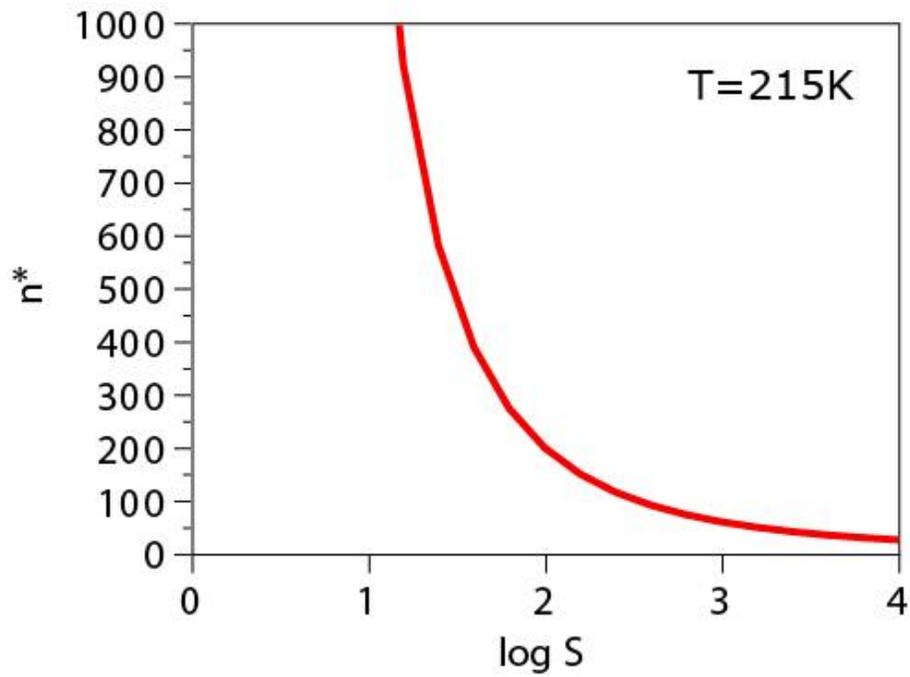


Ilustración 42: Número de moléculas de yeso en un núcleo crítico en función del grado de saturación, bajo 215K.

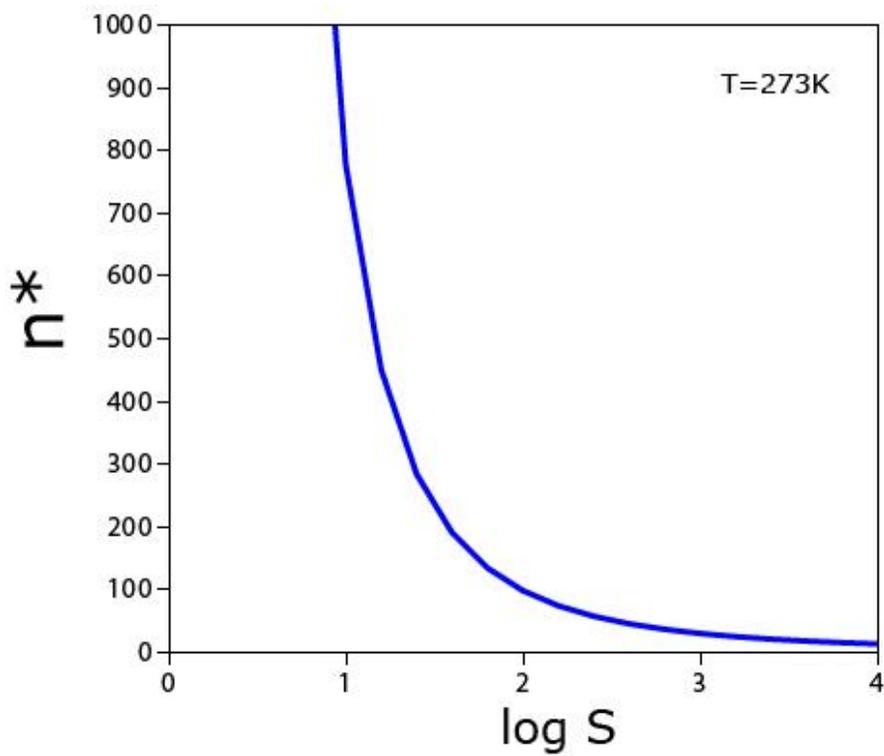


Ilustración 43: Número de moléculas de yeso en un núcleo crítico en función del grado de saturación, bajo 273K.

En ambos gráficos se observa que la cantidad de moléculas que componen un núcleo crítico aumenta considerablemente cuando el grado de saturación cae a 10 ($\log S \sim 1$), lo cual quiere decir que soluciones muy saturadas tendrán núcleos de menor tamaño, esto se explica, ya que al encontrarse sobresaturada la probabilidad de choque con otros núcleos (y por lo tanto su desintegración) aumenta. Al comparar los gráficos se tiene que el número de moléculas que compone un núcleo crítico a mayor temperatura, bajo el mismo grado de saturación (p.ej $\log S \sim 2$), es menor, esto concuerda con lo anteriormente explicado, ya que a mayor temperatura los choques entre las partículas contienen más energía.

A continuación se presenta un gráfico que esquematiza la tasa de nucleación del yeso en función del grado de saturación, a las temperaturas de 215K y 273 K.

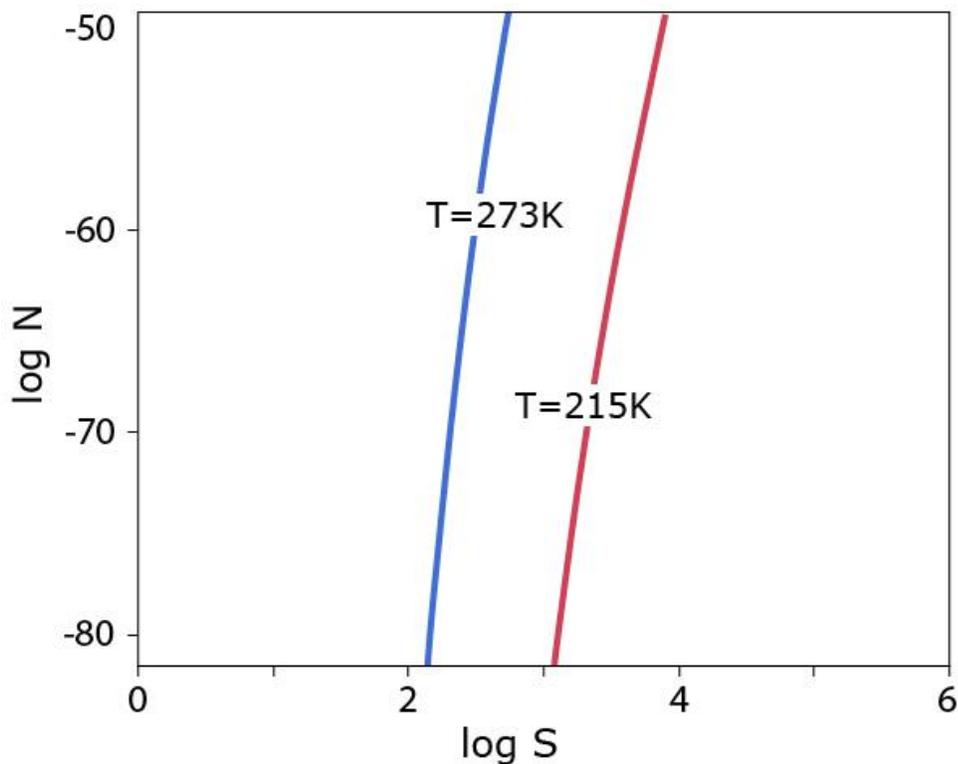


Ilustración 44: Tasa de nucleación del yeso en base al grado de saturación, bajo diferentes temperaturas (215K y 273K) especificadas en las líneas coloreadas,

En el gráfico se observa que las curvas asociadas a ambas temperaturas poseen pendientes bastante pronunciadas, sin embargo las tasas de nucleación son muy bajas en ambos contextos (observar el eje Y). Las soluciones en Marte ($T=215K$) serían más sobresaturadas que aquellas presentes en la Tierra, y a su vez las tasas de nucleación bajo este contexto requieren un mayor grado de saturación que las terrestres ($T = 273K$), o en otras palabras, bajo el mismo grado de saturación, las tasas de nucleación son mayores en un contexto terrestre.

De el grafico 44, se puede ver que la curva asociada a las condiciones terrestres, es cercana a la vertical $\log S \sim 2.0$ en tanto que la curva asociada a Marte es cercana a la vertical $\log S \sim 3.0$, estos datos en conjunto con los gráficos 40 y 41, reportan que la energía requerida para formar los núcleos en Marte, es muy pequeña (son reacciones casi instantáneas $\Delta G_c < 0$, cuando $\log S \sim 3.0$), en comparación con la energía requerida para formar núcleos en los salares de Chile ($1 \cdot 10^{-18}$ J/núcleo). Por otra parte, los núcleos formados bajo condiciones marcianas, poseen menor cantidad de moléculas que las terrestres.

A modo de resumen, la nucleación de cristales de yeso sería más acelerado en Marte que en la Tierra.

Discusiones

En las muestras salinas del área de control no se identificaron microorganismos dentro de inclusiones y por lo que su modelamiento no es relevante para este estudio.

La presencia de microorganismos en el salar Azufrera indican que al menos las diatomeas y los coccis pueden sobrevivir ambientes enriquecidos en calcio y sulfato (Benison & Karmanocky; Zuñiga, 2016).

El seguimiento adecuado de los fluidos primarios que formaron al salar Azufrera resulta dificultoso debido a que un gran porcentaje de las familias encontradas en las muestras tenían tasas líquido-vapor poco consistentes, no presentaron cambios de fase en su interior durante la microtermometría o en su defecto precipitaron sólidos que no volvieron a disolverse, las últimas dos situaciones mencionadas coinciden con las descritas por Roedder(1971) como fenómenos de metaestabilidad. Lamentablemente la totalidad de las FIAs con microorganismos o materia orgánica seleccionadas para la microtermometría, presentaron metaestabilidad y por lo tanto no se pudo obtener a partir de ellas información composicional.

Los escenarios planteados para el cálculo de concentraciones se estiman a partir de los procesos y condiciones que se espera existan en el salar Azufrera y en Marte (Tablas 12, 13, 14 y 15) en ambientes de evaporación y congelamiento respectivamente. Sin embargo el programa Frezchem solamente entrega las concentraciones y las fases a precipitar finales durante el proceso de evaporación, las cuales son exactamente iguales a las concentraciones finales durante el proceso de congelamiento. Por lo tanto se consideran como válidas las concentraciones entregadas por el proceso de congelamiento para un ambiente evaporítico. Para modelar la química en el salar Azufrera se utiliza como referencia los datos composiciones y de acidez del salar Pajonales, ya que ambos siguen vías evolutivas similares y se encuentran separados por una distancia menor a 30 km.

Los pH utilizados para ambos procesos son 7.7 y 3.0; el primero de ellos se utiliza porque el pH en registros de suelo marciano (7.7, Marion et al., 2010) y el pH en el salar Pajonales (7.4, Vila (2010)) coinciden en ser relativamente neutros y el segundo debido a que en la superficie marciana se ha identificado jarosita (Marion et al., 2010) y en la zona de estudio se distribuyen alteraciones argílicas y argílicas avanzadas, y por lo tanto, pueden existir condiciones ácidas en los dos lugares.

La congelación en Marte permitiría la deposición de yeso, hielo y $\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$, en condiciones ácidas y neutras. En el salar en tanto las fases a precipitar (bajo ambos contextos: ácido y neutro) son cloruradas: hielo, yeso, $\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$, NaCl, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, KCl, NaBr, NH_4Cl , $\text{NaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MgBr_2 y $\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Se puede destacar que en los ambientes modelados se observa que aquellas inclusiones que poseen temperaturas eutécticas más bajas son las que usualmente precipitan más minerales, lo cual se encuentra en concordancia con lo que se esperaba dado que entre más complejo es el sistema composicional del fluido menores temperaturas de fusión presenta.

Los efectos del pH sobre el escenario marciano se hace notar, en general la mayoría de las concentraciones disminuye bajo condiciones ácidas, salvo el CO₂, el HSO₄⁻ y el N₂, que presentan un aumento ligero, casi imperceptible. En el salar se sigue el mismo patrón, pero en este caso las variaciones del pH no poseen un efecto notorio sobre las concentraciones del depósito salino.

Al comparar ambos escenarios (Marte y salar Pajonales) queda a la vista que la magnitud de las concentraciones en ambos lugares son muy diferentes, lo cual se podía presuponer puesto que las concentraciones ingresadas para el modelamiento también lo son.

Estas diferencias de magnitud pueden explicar por qué el pH no tuvo gran repercusión en el salar, ya que las concentraciones iónicas eran muy elevadas a diferencia de lo que ocurre en Marte. La gran diferencia en la cantidad de fases a precipitar en ambos escenarios también podría deberse a que habría mayor cantidad de iones disponibles en el salar. A pesar de lo anterior, se observa que efectivamente existe una fase común a precipitar en todos los escenarios: el yeso.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que los fluidos analizados no se asemejan a aquellos que se esperaría encontrar en Marte, sin embargo sí se podría decir que al menos bajo condiciones similares a las marcianas probablemente se podría precipitar yeso a una velocidad superior a la precipitación en la tierra. Lo cual es de gran relevancia ya que este mineral posee un gran potencial en la preservación de microorganismos.

El sistema terrestre está compuesto por Na – K – Mg – Ca – Cl – SO₄ – B – HCO₃ principalmente y las fases que más precipitan bajo ese contexto son aquellas que contienen Cl, Na, Ca y Mg. Los fluidos precursores probablemente se encontraban enriquecidos en Ca y SO₄, evidenciado por las descripciones petrográficas en donde el yeso y la anhidrita componen un 98% de los cristales estudiados.

La existencia de cristales de halita dentro de inclusiones fluidas primarias tiene dos posibles explicaciones: algunos de los fluidos primarios se encontraban enriquecidos en sodio y por lo tanto los fluidos atrapados en las IF precipitaron halita o en su defecto ocurrió una alteración que logró abrir el sistema y permitió el ingreso de fluidos sódicos a las IF primarias. La primera teoría se considera poco probable, ya que de haber existido fluidos primarios sobresaturados en sodio (26.6% NaCl eq.) probablemente la mineralogía lo habría representado. Se desconoce qué tipo de alteración podría haber generado que el sistema se abriera, sin embargo las alteraciones hidrotermales circundantes en el sector podrían ser la clave de esta interrogante.

Según Steele-MacInnis et al. (2016) los cationes mayores en los fluidos magmáticos-hidrotermales siguen un orden descendente: Na > K > Mn > Ca (en molalidad), sin embargo con la información obtenida a partir de las inclusiones, no es factible concluir algo al respecto, ya que no se tiene la concentración de Mn y además la tendencia catiónica entregada por Steele-MacInnis et al (2016) no considera que las rocas circundantes se tratarían de depósitos evaporíticos.

Por último cabe mencionar que los fluidos analizados con microtermometría de la muestra 1, no logran bosquejar una evolución del fluido primario en el tiempo debido a que las FIAs sometidas a microtermometría se ubican en un lugar muy acotado del cristal.

La escasa cantidad de FIAs útiles encontradas en las muestras sometidas a pulido, limpieza, análisis mineralógicos y petrográficos, conlleva a cuestionar qué procedimientos se podrían mejorar en eventuales futuras investigaciones. La falta de técnica para realizar labores como el pulido genera que las muestras se rompan o que las superficies queden disparejamente pulidas lo cual genera pérdidas de tiempo y dificulta las observaciones petrográficas, en este caso se recomienda que se pegue de antemano la muestra a una superficie lisa tal como se indica en la metodología, ya que facilita en gran medida el procedimiento; la falta de experiencia identificando inclusiones fluidas consistentes provoca que se pierda tiempo seleccionando familias que no proporcionan información válida, para esto es recomendable que una persona con experiencia verifique, al menos las primeras veces, que las tasas líquido-vapor seleccionadas sean consistentes.

Por último, las temperaturas eutécticas y del último derretimiento que se miden son tan bajas que encontrar un programa que las modelase no resulta fácil, pues la mayoría de los modelos conocidos realizan sus cálculos para $T_e < 64.5^\circ\text{C}$ y en este caso el promedio es de $\sim 75^\circ\text{C}$, es por esta razón se utilizó Frezchem, ya que este programa es capaz de modelar temperaturas que llegan a los -100°C :

De todas maneras gracias a investigaciones previas se sabe que pocos científicos habían trabajado con cristales de yeso debido a que se altera muy fácilmente (Karmanocky & Benison, 2016), es por esto que tampoco es de extrañarse los escasos resultados. Para una obtención de datos más precisos se recomienda utilizar técnicas microanalíticas tales como LA-ICPMS, que puedan complementar los resultados microtermométricos.

Conclusiones

En el estudio se identifican pocas FIAs primarias y secundarias consistentes en las muestras de anhídrita-yeso del salar Azufrera, es decir, familias de inclusiones donde todas sus integrantes presentan la misma razón de líquido y vapor. Además se reconocen diversos microorganismos tales como diatomeas, coccis y algas, al igual que diversos componentes orgánicos, que si bien no se logran particularizar, se pueden proponer que se tratarían de pigmentos como carotenoides, specitonimia o aminoácidos (Vítek et al., 2010). A pesar de esto, la mayoría de las inclusiones primarias y un buen porcentaje de las secundarias son metaestables o en su defecto precipitan una fase sólida durante el congelamiento que no se vuelve a disolver al aumentar la temperatura, imposibilitando el registro de T_m , puntualizando que en todas aquellas inclusiones que contenían microorganismos o materia orgánica fue imposible obtener los datos necesarios para el cálculo de las composiciones asociadas a los fluidos que permitieron sus existencias

Diferente es el caso del área de control, ya que a pesar de que en ese lugar se logran identificar insectos alados, no se logra encontrar microorganismos dentro de las inclusiones, más bien pareciesen haber sido cementados accidentalmente en el depósito salino. La nula presencia de vida o componentes orgánicos dentro de inclusiones puede deberse a que los minerales presentes en ese lugar no poseen las mismas propiedades protectoras que el yeso.

La escasa información obtenida a partir de las FIAs analizadas muestran que los fluidos primarios y secundarios son muy salinos y altamente complejos, en donde se destaca que la presencia de cristales hijos de halita dentro de inclusiones fluidas primarias implicarían un posible evento de alteración.

Las concentraciones iónicas en Marte y en el salar no se asemejarían, y por lo tanto no serían buenos análogos composicionales. A pesar de esto, según el modelo de FREZCHEM, el yeso lograría precipitar bajo ambos escenarios (Marte y salar terrestre), por lo que no se puede concluir tajantemente al respecto, ya que aunque las condiciones composicionales no se asemejen a las del salar, de todas formas la posible existencia de este sulfato hidratado en Marte podría brindarles condiciones mínimas para su existencia.

Por último, es importante destacar que los microorganismos que se encuentran en salares ricos en sulfato, tales como el salar Gorbea e Ignorado, también se pueden encontrar en salares ricos en Ca.

Bibliografía

- Adamsky, J. C., Roberts, J. A., & Goldstein, R. H. (2006). Entrapment of Bacteria in fluid inclusions in laboratory-grown halite. *Astrobiology*, 552-561.
- Banfield, J. L., Hamilton, V. E., & Christensen, P. R. (3 de Marzo de 2000). A global view of Martian surface compositions from MGS-TES. *Reports*, 1626-1630.
- Banin, A., Han, F. X., Kan, I., & Cicelsky, A. (25 de Junio de 1997). Acid volatiles and the Mars Soil. *Journal of geophysical research*, 102, 13341-13356.
- Benison, K. C., & Goldstein, R. H. (1999). Permian paleoclimate data from fluid inclusions in halite. *Chemical Geology*(154), 113-132.
- Benison, K. C., & Karmanocky, F. (2014). Could microorganism be preserved in Mars gypsum? Insights from terrestrial examples. *Geology*, 615-618.
- Bodnar, R. J. (2001). PTX phase equilibria in the H₂O-CO₂ salt system at Mars near-surface conditions. *Lunar and Planetary Science XXXII*.
- Bodnar, R. J. (2003). *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. (I. I. Samson, A. Anderson, & D. Marshall, Edits.) Mineralogical Association of Canada.
- Brass, G. W. (1980). Stability of brines on Mars. *Icarus*, 20-28.
- Bullock, M. A., & Moore, J. M. (2004). Aqueous alteration of Mars-analog rocks under an acidic atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 1-4.
- Cabrol, N. A., & Grin, E. A. (2000). The evolution of lacustrine environments on Mars: Is Mars only hydrologically dormant? *Icarus*, 291-328.
- Catling, D. C. (1999). A chemical model for evaporites on early Mars: Possible sedimentary tracers of the early climate and implications for explorations. *Journal of geophysical research*, 16453-16469.
- Catling, D. C., Wood, S. E., Leovy, C., Montgomery, D. R., Greenberg, H. M., Glein, C. R., & Moore, J. M. (2006). Light-toned layered deposits in Juventae Chasma, Mars. *Icarus*, 26-51.
- Charrier, R., Farías, M., & Makshev, V. (2009). Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 5-35.
- Clark, B. C., & Baird, A. K. (1979). Is the martian lithosphere sulfur rich? *Journal of geophysical Research*, 8395-8403.
- Clark, B. C., & Van Hart, D. C. (1981). The salts of Mars. *Icarus*, 370-378.

- Cnossen, I., Sanz-Forcada, J., Favata, F., Witasse, O., & Zegers, T. (2007). Habitat of early life: Solar X-Ray and UV Radiation at Earth's surface 4-3.5 billion years ago. *Journal of Geophysical Research*, 1-10.
- Cornejo, P. (1987). hydrothermal alteration zones and sulphur deposits in upper cenozoic volcanoes of salar Gorbea, andes of northern Chile. *Pacific Rim Congress*, 877-885.
- Frutos, J., & Tobar, A. (1973). Evolution of the southwestern continental margin of South America. III Intern. Gondwana Symp. Canberra, Australia.
- Gendrin, A., Mangold, N., Bibring, J.-P., Langevin, Y., Gondet, B., Poulet, F., Bonello, G., Quantin, C., Mustard, J., Arvidson, R., LeMouélic, S. (2005). Sulfates in Martian layered terrains: The Omega/Mars Express View. *Science*, 1587-1591.
- Goldstein, R. H. (2001). Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos*, 159-193.
- Goldstein, R. H., & Reynolds, T. J. (1994). *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Oklahoma: Society for Sedimentary Geology.
- Hecht, M. H. (2002). Metastability of liquid water on Mars. *Icarus*, 373-386.
- Karmanocky III, F. J., & Benison, K. C. (2016). A fluid inclusion record of magmatic/hydrothermal pulses in acid Salar Ignorado gypsum, northern Chile. *Geofluids*.
- Karmanocky, F., & Benison, K. (2016). A fluid inclusion record of magmatic/hydrothermal pulses in acid Salar Ignorado gypsum, northern Chile. *ResearchGate*, 1-17.
- Knauth, L. P., & Burt, D. M. (28 de Febrero de 2002). Eutectic Brines on Mars: Origin and possible relation to young seepage features. *Note*, 267-271. Arizona: Icarus.
- Lahsen, A. (1982). Upper Cenozoic Volcanism and Tectonism in the Andes of Northern Chile. *Earth-Science Reviews*, 285-302.
- Lapen, T. J., Richter, M., Andreasen, R., Irving, A. J., Satkoski, A. M., Beard, B. L., Kunihiro, N., Jull, T., Caffee, M. W. (2017). Two billion years of magmatism recorded from a single Mars meteorite ejection site. *Science Advances*, 1-6.
- Lowenstein, T. K., Li, J., & Brown, C. B. (1998). Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verifications and a 100,000year paleotemperature record, Death Valley, CA. *Chemical Geology*(150), 223-245.
- Malin, M. C., & Edgett, K. S. (30 de Junio de 2000). Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on mars. 2330-2335. *Science*.
- Mangas, J., & Sierra, J. (1991). *Las inclusiones fluidas: método de análisis e interpretación*.
- Marion, G. M., Catling, D. C., Zahnle, K. J., & Claire, M. W. (2010). Modeling aqueous perchlorate chemistries with applications to Mars. *Icarus*, 675-685.
- Marion, G. M., Millero, F. J., & Feistel, R. (2009). Precipitation of solid phase calcium carbonates and their effect on application of seawater Sa-T-P models. *Ocean Science*, 285-291.

- Marion, G., & S. Kargel, J. (2008). *Cold Aqueous Planetary Geochemistry with FREZCHEM*. Springer Science & Business Media.
- McKay, C. P., Imre Friedmann, E., Gómez-Silva, B., Cáceres-Villanueva, L., Andersen, D. T., & Landheim, R. (2003). Temperature and moisture conditions for life in the extreme arid region of the Atacama desert: Four years of observations including the El Niño of 1997-1998. *Astrobiology*, 393-406.
- Melgarejo Draper, J.-C. (1997). *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada*. Barcelona: Ediciones Universitat de Barcelona.
- Moroz, V. I. (1998). Chemical composition of the atmosphere of Mars. *Pergamon*, 449-457.
- Naranjo S., J. A., Villa, C. V., & Venegas B., C. (2013). *Geología de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño, regiones de Antofagasta y Atacama*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Navarro-González, R., Rainey, F. A., Molina, P., Bagaley, D. R., Hollen, B. J., de la Rosa, J., Small, J., Quinn, A., Grunthaner, R., Cáceres, F., Gómez-Silva, L., McKay, C. P. (2003). Mars-like soils in the Atacama desert, Chile, and the dry limit of microbial life. *Science*, 1018-1021.
- Navarro-González, Rafael; Rainey, Fred A.; Molina, Paola; Bagaley, Danielle R.; Hollen, Becky J.; de la Rosa, José; Small, Alanna M.; Quinn, Richard C.; Grunthaner, Frank J.; Cáceres, Luis; Gómez-Silva, Benito; McKay, Christopher P.
- Nisbet, E. G., & Sleep, N. H. (2001). The habitat and nature of early life. *Macmillan Magazines Ltd*, 1083-1091.
- Parro, V., de Diego-Castilla, G., Moreno-Paz, M., Blanco, Y., Cruz-Gil, P., Rodríguez-Manfredi, J. A., Fernández-Remolar, D., Gómez, F., Gómez, M., Rivas, L., Demergasso, C., Echeverría, A., Urtuvia, V., Ruíz-Bermejo, M., García-Villadangos, M., Postigo, M., Sánchez-Román, M., Chong-Díaz, G., Gómez-Elvira, J. (2011). A microbial oasis in the hypersaline Atacama subsurface discovered by a life detector chip: Implications for the search for life on Mars. *Astrobiology*, 1-18.
- Paskoff, R. (1979). Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile. 6. (Instituto Geogr., & Univ. Católica de Chile, Edits.)
- Pichler, H., Zeil, H., & . (1967). The Cenozoic rhyolite-andesite association of the Chilean Andes. *Bulletin Volcanologique*, 424-452.
- Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, M. R., Contreras, M., Novoa, F., Poire, D., & Farias, M. E. (2014). Microbial characterization of microbial ecosystems associated to evaporites domes of gypsum in Salar de LLamara in Atacama Desert. *Microbial Ecology*, 483-494.
- Reznik, I., Gavrieli, I., & Ganor, J. (2009). Kinetics of gypsum nucleation and crystal growth from Dead Sea brine. *ScienceDirect*, 6218-6230.
- Rimstidt, D. (2013). *Geochemical Rate Models*. Cambridge.

- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones - Chile* (Vol. I). Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Risacher, F., & Fritz, B. (2009). Origin of salts and brine evolution of Bolivian and Chilean Salars. *Aquat Geochem*, 123-157.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2002). Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile. *Chemical Geology*, 39-57.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science*(63), 249-293.
- Romanek, C. S., Grady, M. M., Wright, I. P., Mittlefehldt, D. W., Sockl, R. A., Pillinger, C. T., & Gibson, E. K. (1994). Record of fluid-rocks interactions on Mars from the meteorite ALH84001. *Nature*, 655-656.
- Rothschild, L. (1990). Earth analogs for martian life. Microbes in evaporites, a new model system for life on Mars. *Icarus*, 246-260.
- Rousseau, R. M. (2001). Detection limit and estimate of uncertainty of analytical XRF results. *The Rigaku Journal*, 33-47.
- Scheuber, E., & Reutter, K.-J. (1992). Magmatic arc tectonics in the Central Andes between 21° y 25°S. *Tectonophysics*, 127-140.
- Schopf, J. W., Farmer, J. D., Foster, I. S., Kudryavtsev, A. B., Gallardo, V. A., & Espinoza, C. (2012). Gypsum-permineralized microfossils and their relevance to the search for life on Mars. *Astrobiology*, 1-15.
- Sillitoe, R. H. (1977). Metallic mineralization affiliated to subaerial volcanism: a review. *Geological Society*, 99-116.
- Steele-MacInnis, M., Bodnar, R. J., & Naden, J. (2011). Numerical model to determine the composition of H₂O-NaCl-CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. *ScienceDirect*, 21-40.
- Steele-MacInnis, M., Ridley, J., Lecumberry-Sanchez, P., Schlegel, T. U., & Heinrich, C. A. (2016). Application of low-temperature microthermometric data for interpreting multicomponent fluid inclusion compositions. *Earth-Science Reviews*, 14-35.
- Teng, F., Zeng, H., & Liu, Q. (2011). Understanding the deposition and surface interactions of Gypsum. *The journal of physical chemistry*, 17485-17494.
- Vila G., T. (1975). Geología de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 41-55.
- Vila G., T. (2010). Geología de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta, Chile. *Andean Geology*, 41-55.
- Vítek, P., Edwards, H., Jehlička, J., Ascaso, C., de los Ríos, A., Valea, S., Jorge-Villar, S., Davila, A., Wierzchos, J. (2010). Microbial colonization of halite from the hyper-arid

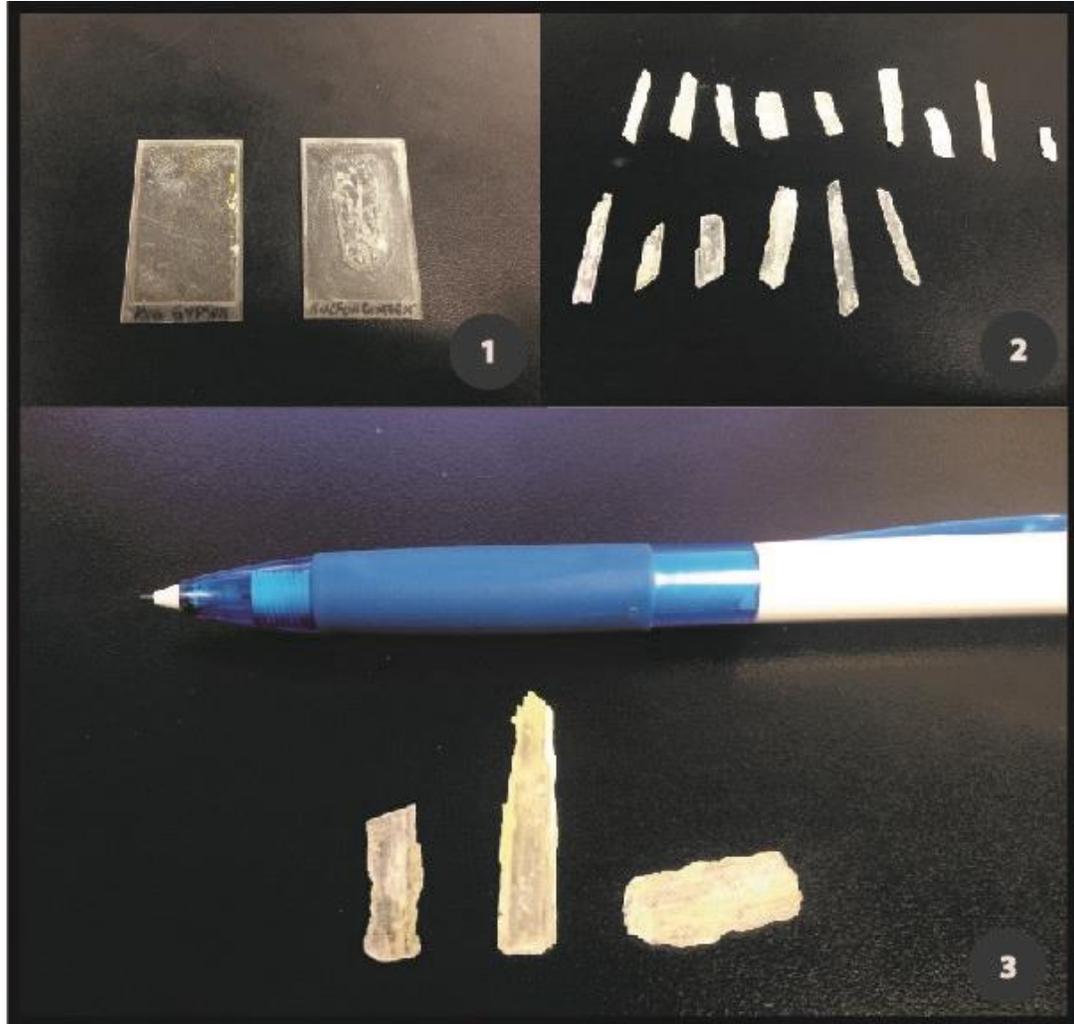
Atacama Desert studied by Raman spectroscopy. *Philosophical Transactions Of The Royal Society*, 3205-3221.

Wierzchos, J., Camara, B., De los Ríos, A., Davila, A. F., Sánchez Almazo, I. M., Artieda, O., Wierzchos, K., Gómez-Silva, B., McKay, C., Ascaso, C. (2010). Microbial colonization of Ca-sulfate crusts in the hyperarid core of the Atacama Desert: implications for the search for life on Mars. *Geobiology*, 15.

Wilson, S. A., & Bish, D. L. (2011). Formation of gypsum and bassanite by cation exchange reactions in the absence of free-liquid H₂O: Implications for Mars. *Journal of Geophysical Research*, 1-16.

Zeil, W., & Pichler, H. (1967). Die känozoische Rhyolith-Formation im mittleren Abschnitt der Anden. *Geologische Rundschau*, 48-81.

Anexos
Anexo A



Anexo 1: 1. Secciones delgadas del sistema hidrotermal (izq) y del sistema evaporítico (der). 2. Muestras analizadas del sistema evaporítico. 3. Muestras seleccionadas para realizar la microtermometría.

Durante el periodo que duró el proceso de pulido se fueron seleccionando cada vez más muestras debido a que las analizadas no cumplían con todas las condiciones necesaria (contener más de 3 FIAS consistentes con microorganismos en su interior). Tan sólo tres de las dieciocho muestras cumplen con esta condición.

Anexo B.2

<u>Familia 2</u> (std = 0.4 °C)	
1) Contiene mat orgánica Te = -84.7 °C tiene 3 sólidos circulares omniellos, no cambio de fases	2) Te = -79.9? Se le mantiene un sólido circular pequeño
3) Te = -80 °C Tm = -47.3 °C le salió una burbuja dentro de la burbuja	4) No presenta cambio de fase
<u>Familia 3</u> (std 0.3)	
1) Te = -69 °C	2) Te = -80.5 °C Tm = -40.3
3) Te = -70.2 °C Tm = -33 °C	Presentan una fase sólida (halita?)
<u>Familia 4</u>	
No se pudo medir porque no hubo cambio de fase	⇒ lo mismo pasó con la familia 5

Ilustración 46: Muestra 1. Datos microtermométricos de las s2 (ex FIA 2), s1 (ex FIA 3) y 4 (ex FIA 4)

Anexo B.3

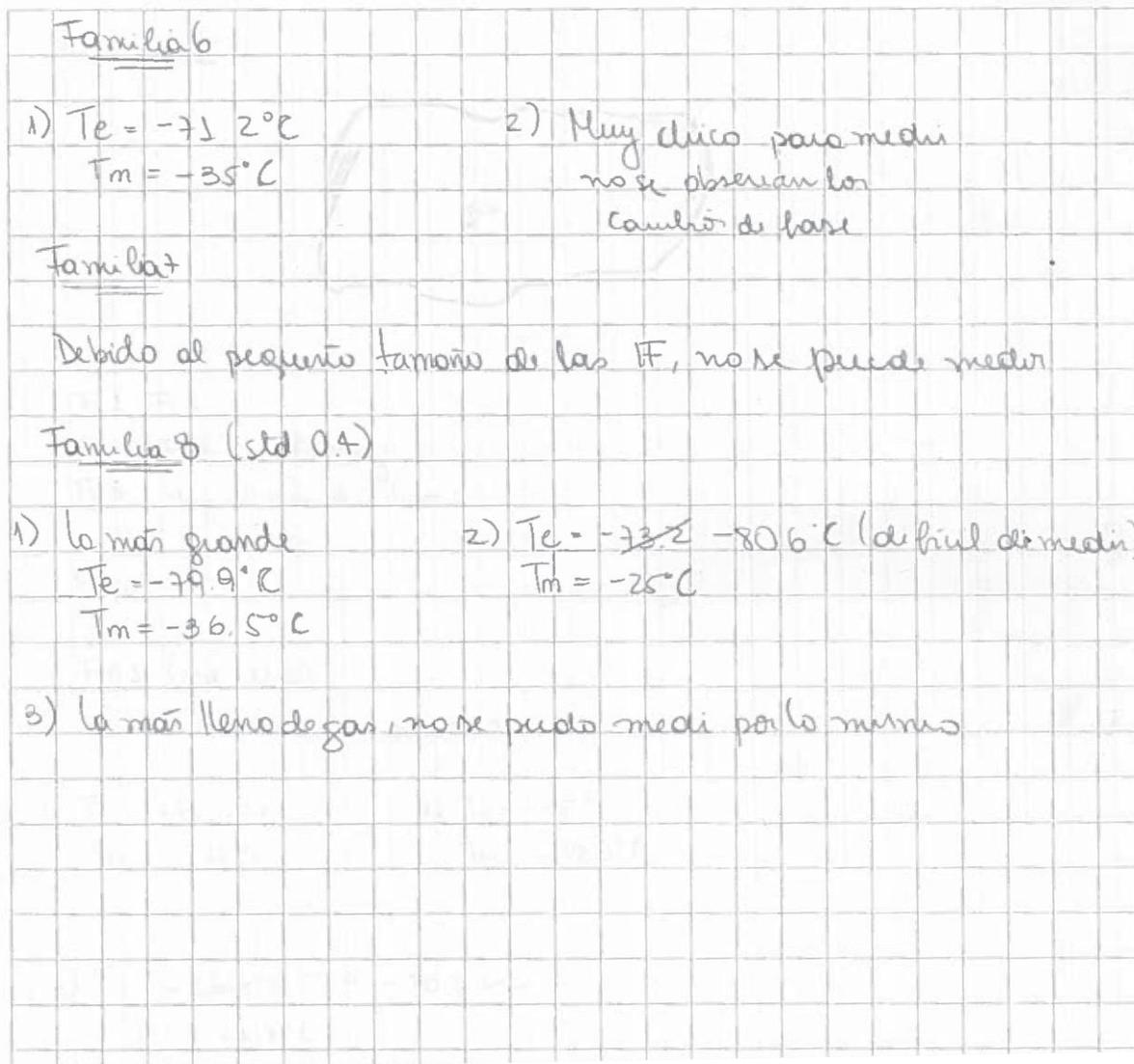


Ilustración 47: Muestra 1. Datos microtermométricos de las FIAS 5 (ex FIA 5), 1 (ex FIA 6) y 3 (ex FIA 7).

Anexo B.4

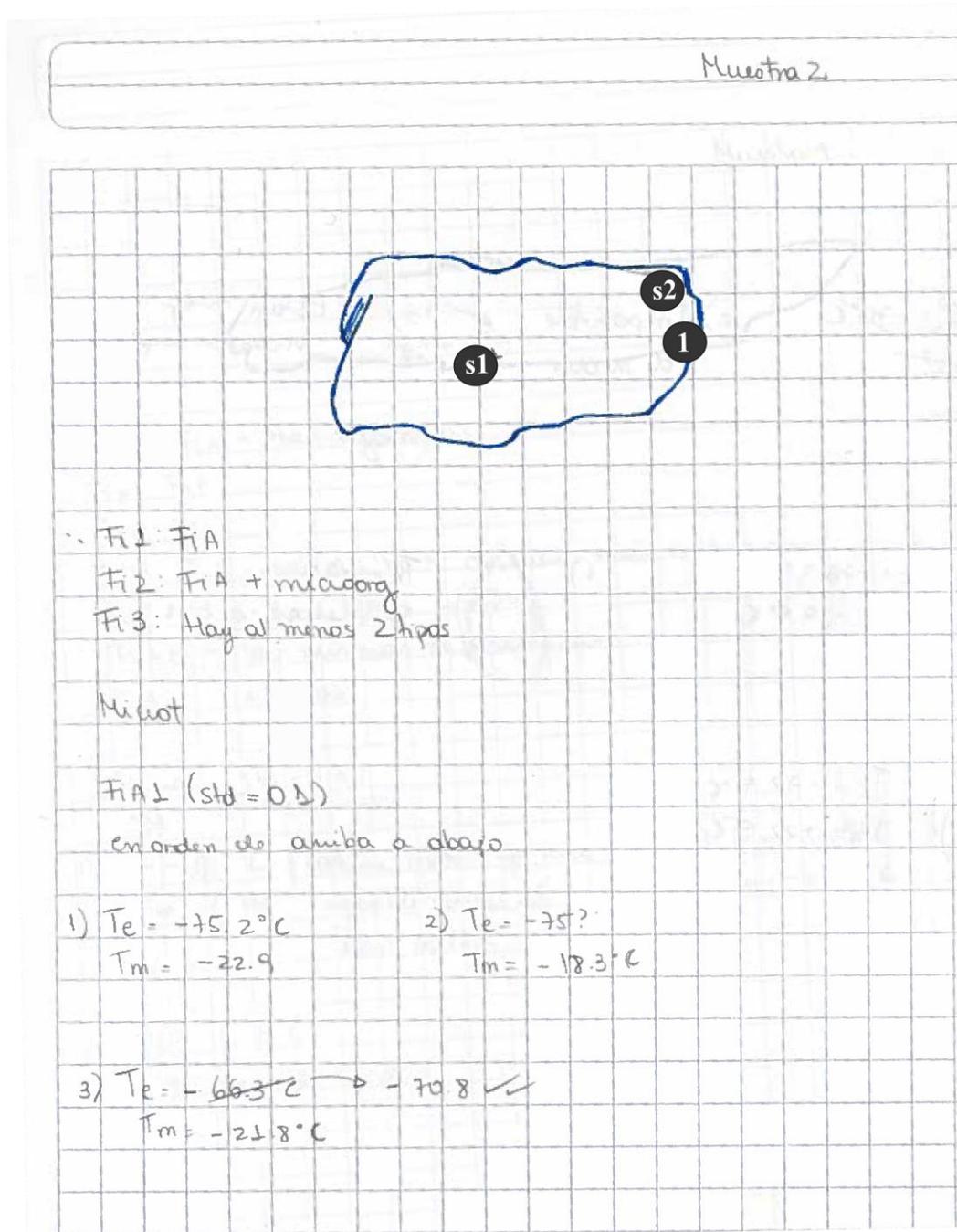


Ilustración 48: Representación esquemática de la muestra 2, con las FIAs asociadas y los datos obtenidos de la microtermometría de la FIA s1 (ex FIA1).

La notación de las FIAs en un principio se realizó según el orden en que se iban encontrando, luego fueron reordenadas para así seguir una distribución según la dirección de crecimiento.

Anexo B.5

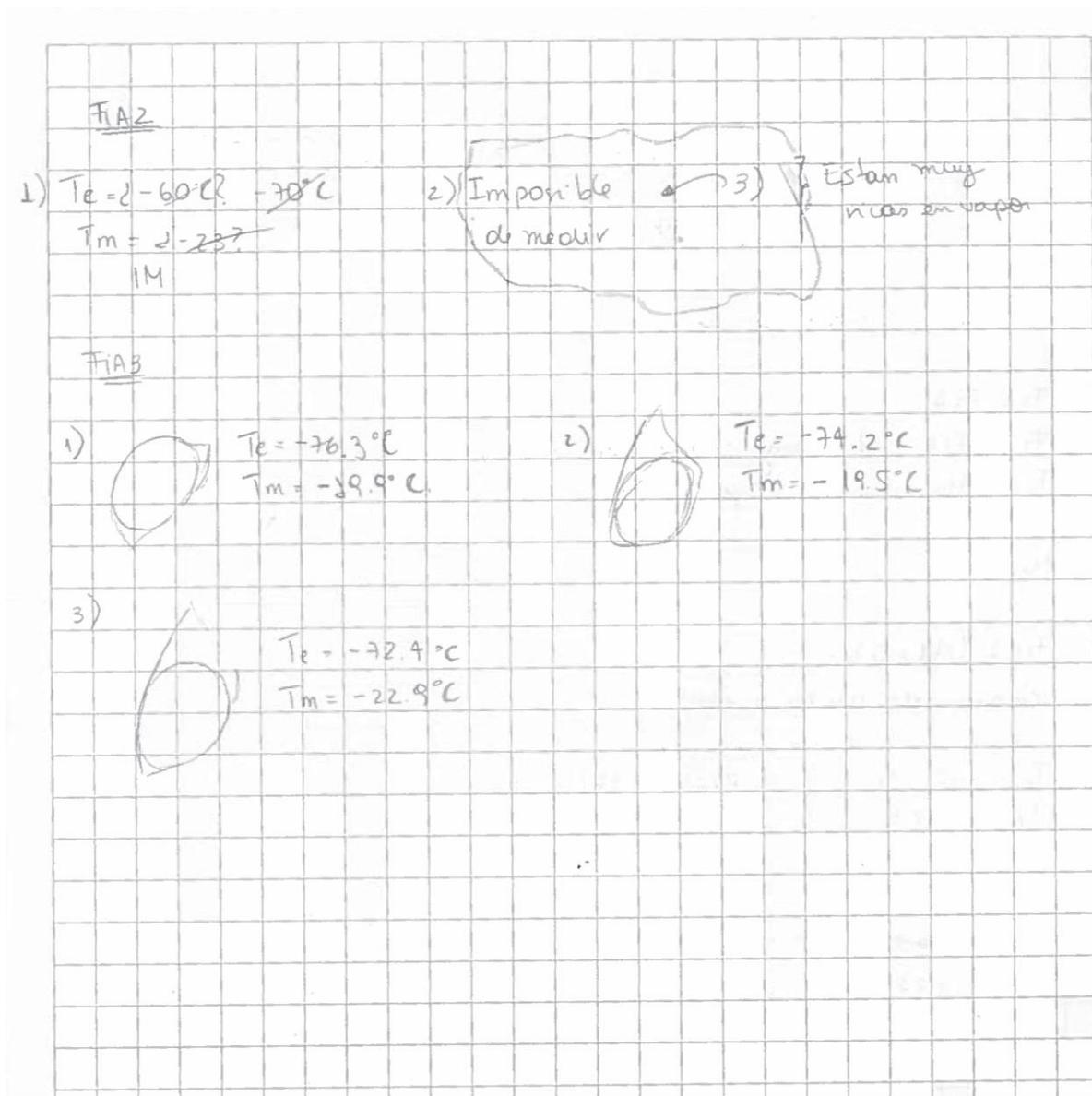


Ilustración 49: Muestra 2. Datos microtermométricos de las FIAS 1 (ex FIA2) y 2 (ex FIA 3).

Anexo B.6

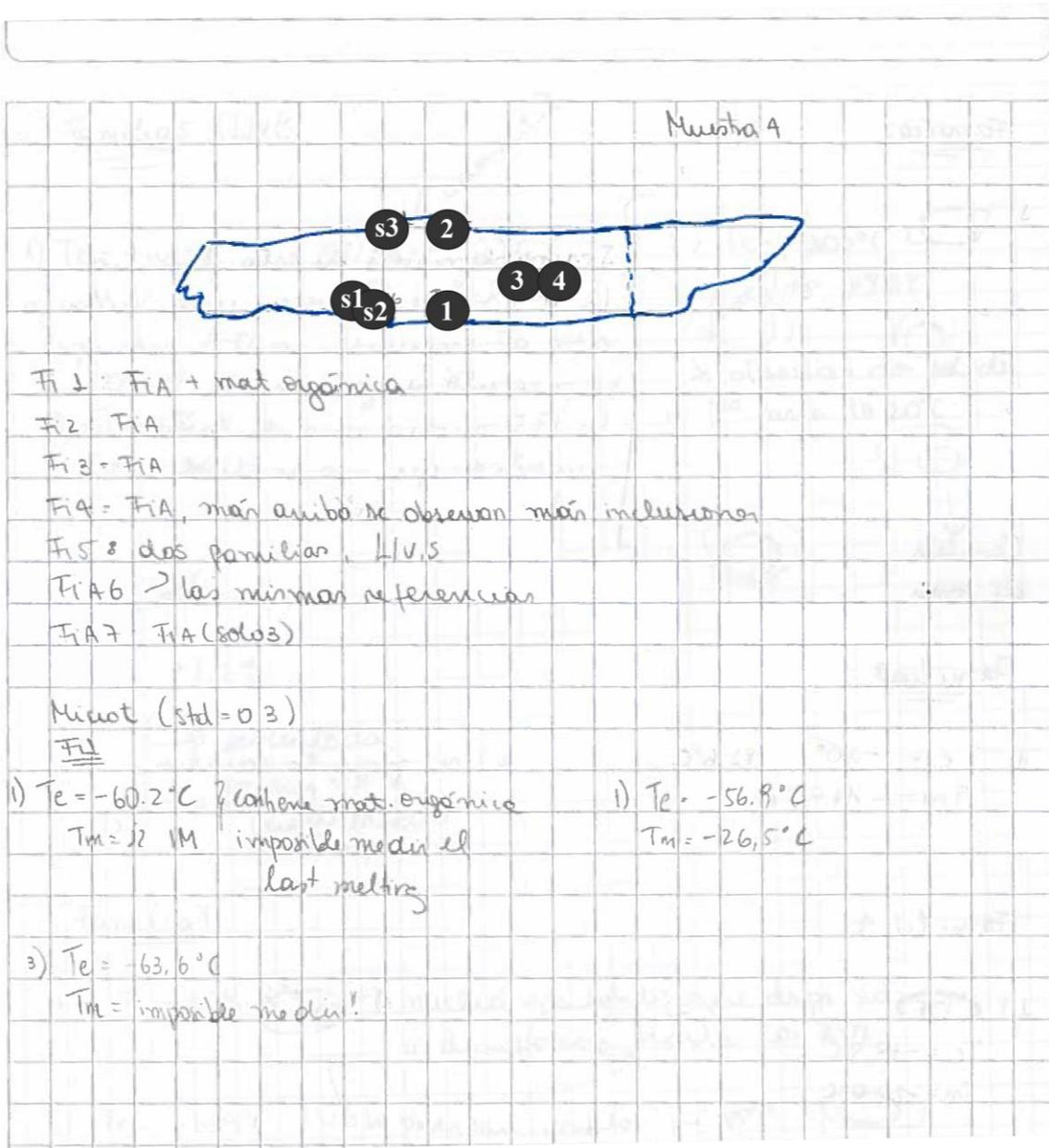


Ilustración 50: Representación de la muestra 4, con las FIAs asociadas y los datos obtenidos de la microtermometría del FIA s3 (ex FIA1).

Anexo B.7

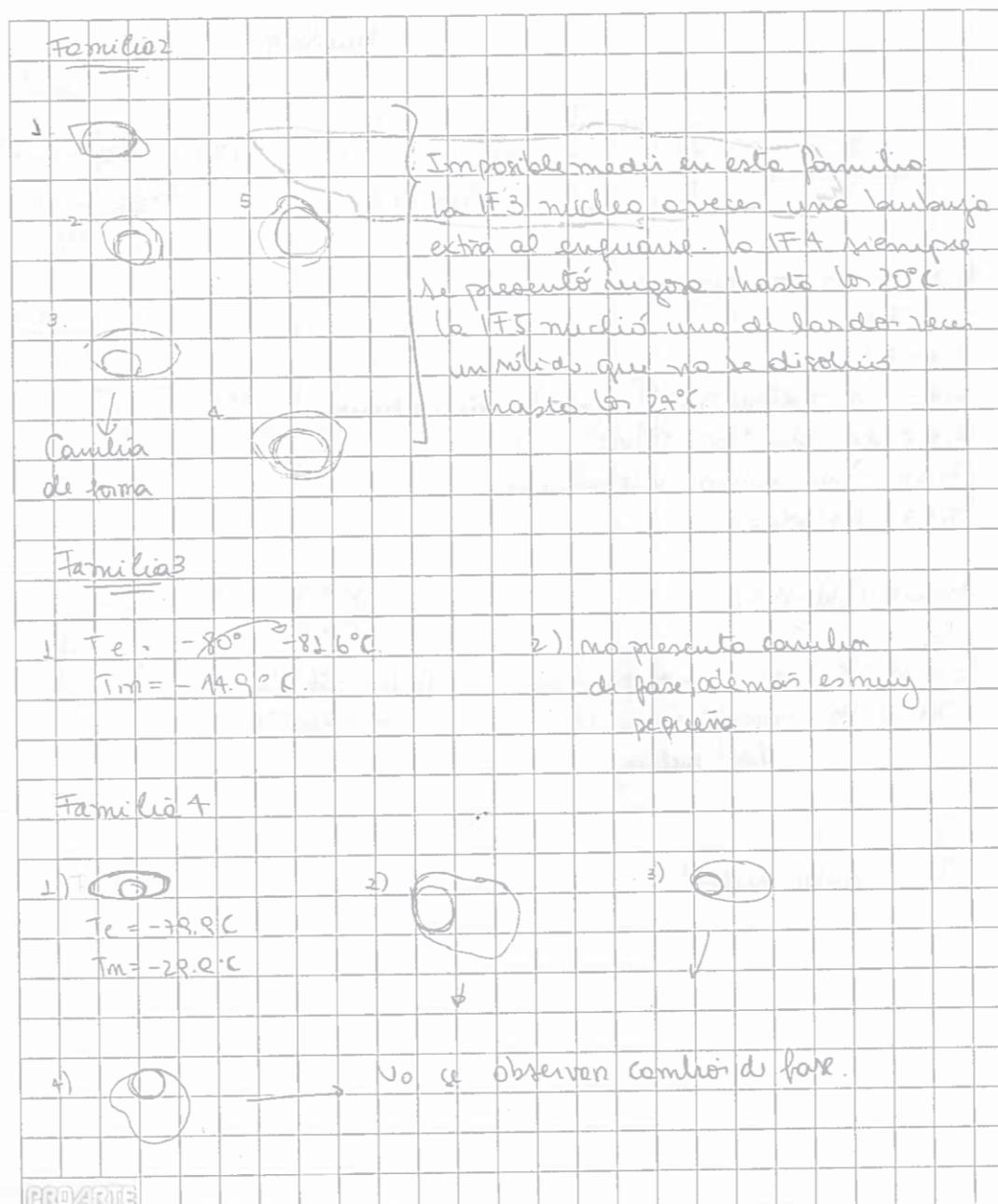


Ilustración 51: Muestra 4. Datos microtermométricos de las FIAs 3 (ex FIA2), 4 (ex FIA3) y FIA 1 (ex FIA4).

Al igual que en la muestra 1, la muestra 4 posee un gran porcentaje de FIAs que no cambian de fases o que nuclean un sólido que después no se disuelve durante los procesos de congelamiento-calentamiento de la microtermometría.

La notación de las FIAs en un principio se realizó según el orden en que se iban encontrando, luego fueron reordenadas para así seguir una distribución según la dirección de crecimiento.

<u>Familias</u> (V)			
1) $T_e = -70.3^\circ\text{C}$ IM!!	2) $T_e = -90.1^\circ\text{C}$ $T_m = -32.5^\circ\text{C}$	3) $T_e = -100^\circ\text{C}$ $T_m = -68.4^\circ\text{C}$	
			Se observan dos notidos a T_m hasta los 20°C
4) $T_e = -85.4$ $T_m = -60$			
<u>Familias</u>			
1) $T_e = -71.2^\circ\text{C}$	↳ Descartada porque no se puede medir!!		
<u>Familia 7.</u>			
1) $T_e = -78.9^\circ\text{C}$	→ nucleó un sólido que después no volvió a desaparecer hasta los 20°C		
2) $T_e = -63.4^\circ\text{C}$	No se observan cambios de fase 		
3) IM!!	no se observan cambios de fase. tiene notidos 100 pro!!		
4)  IM!!			PROARTE

Ilustración 52: Muestra 4. Datos microtermométricos de las FIAS s1 (ex FIA5), s2 (ex FIA6) y 2 (ex FIA7).

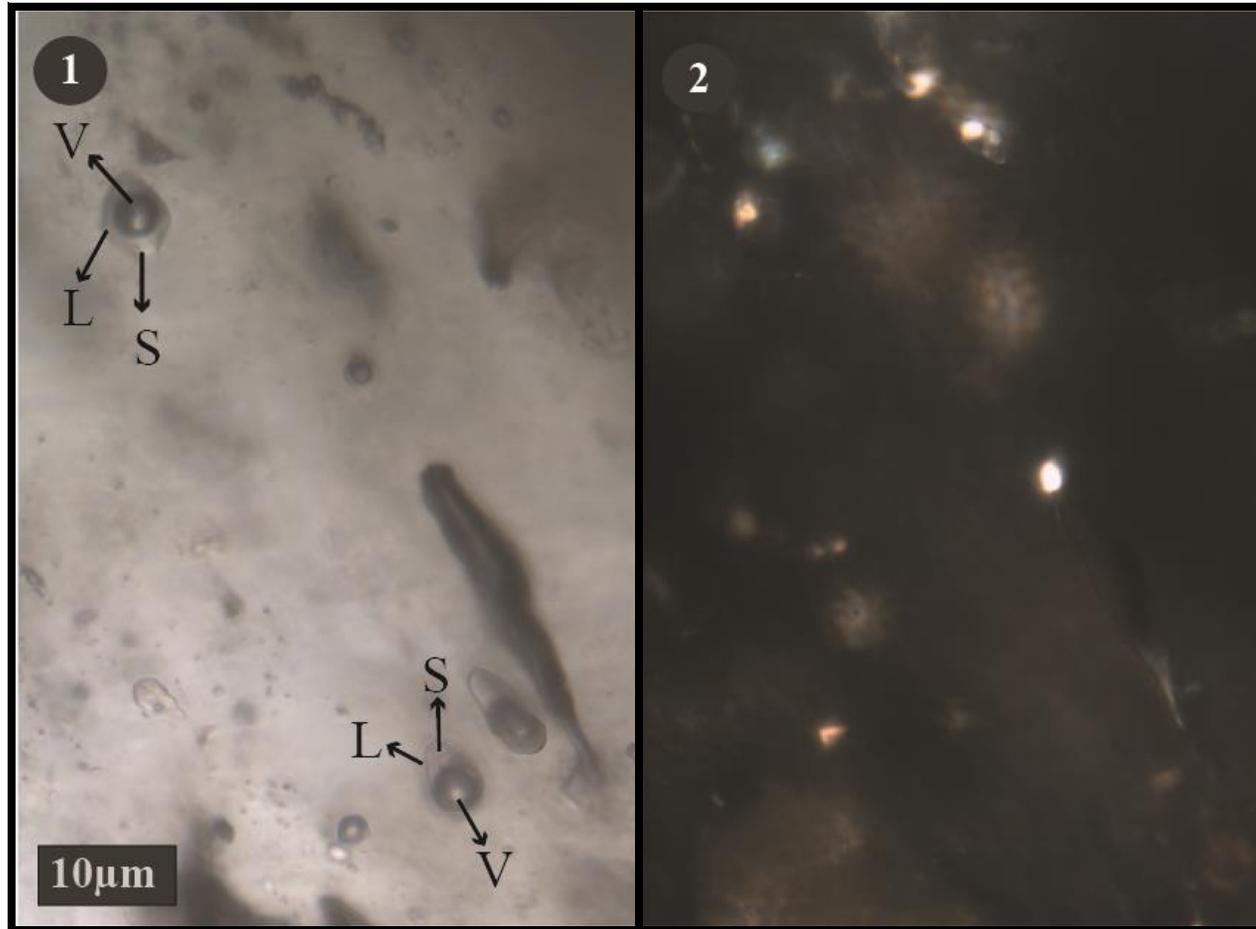
Anexos C
Anexo C.1



Ilustración 53: FIA 5 perteneciente a la muestra 1 bajo luz transmitida. Se observan diferentes fases en su interior.

La FIA 5 se caracteriza por presentar cristales cúbicos-pseudo cúbicos a temperatura ambiente en cada una de sus inclusiones. Probablemente uno de los minerales atrapados se trate de halita, la cual no se disuelve ni cambie de forma durante todo el proceso de congelamiento-calentamiento de la microtermometría.

Anexo C.2



*Ilustración 54: FIA s1 perteneciente a la muestra 1. Microfotografía 1, muestra las fases líquido, vapor y sólido presentes en las inclusiones bajo luz transmitida
Microfotografía 2, muestra un posible cocci que fluoresce bajo la luz UV.*

Anexo C.3

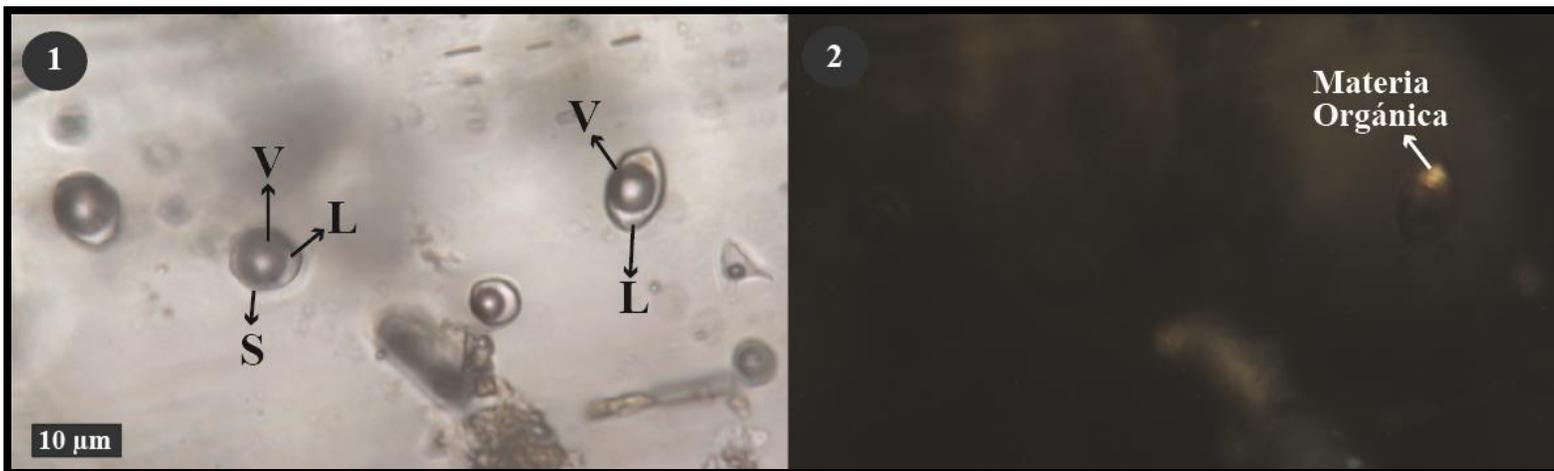


Ilustración 55: FIA s2 perteneciente a la muestra 1. Microfotografía 1, se muestran las fases líquido, vapor y sólido presentes en las inclusiones, bajo luz transmitida. Microfotografía 2, muestra la fluorescencia que presenta la materia orgánica atrapada dentro de una de las IF, bajo luz UV

Las fases sólidas presentes en una de estas inclusiones presentan hábito circular y son de un tamaño muy inferior en comparación con la inclusión que las contiene. Estos sólidos, no permiten la medición de la temperatura del último derretimiento ya que no se disuelven ni al alcanzar la temperatura ambiente.

Anexo C.4

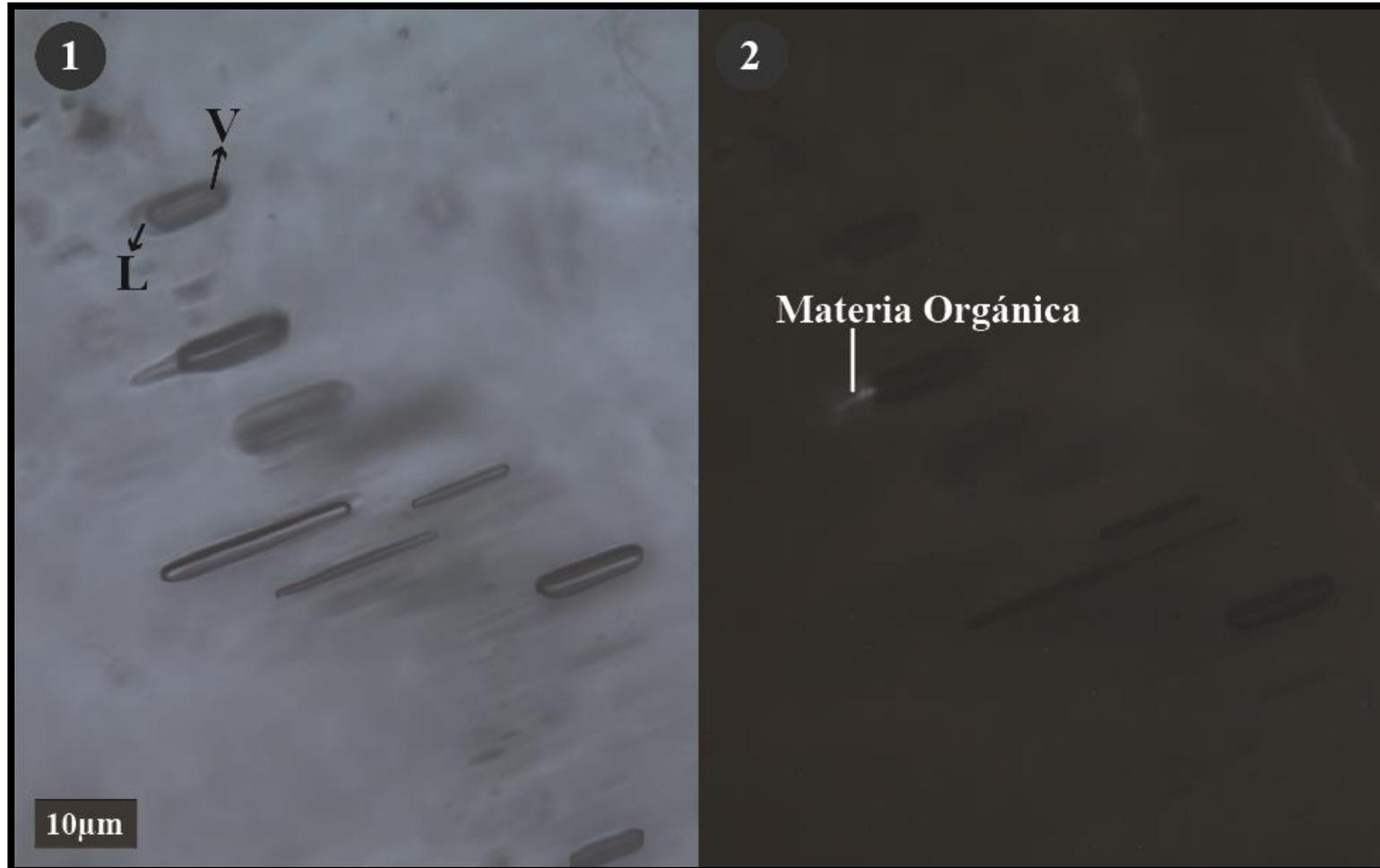


Ilustración 56: FIAI perteneciente a la muestra 2. Microfotografía 1, Muestra las inclusiones ricas en vapor de esta familia, bajo luz transmitida. Microfotografía 2, muestra fluorescencia debido a la materia orgánica en el interior de una de las inclusiones, bajo luz UV.

Anexo C.5

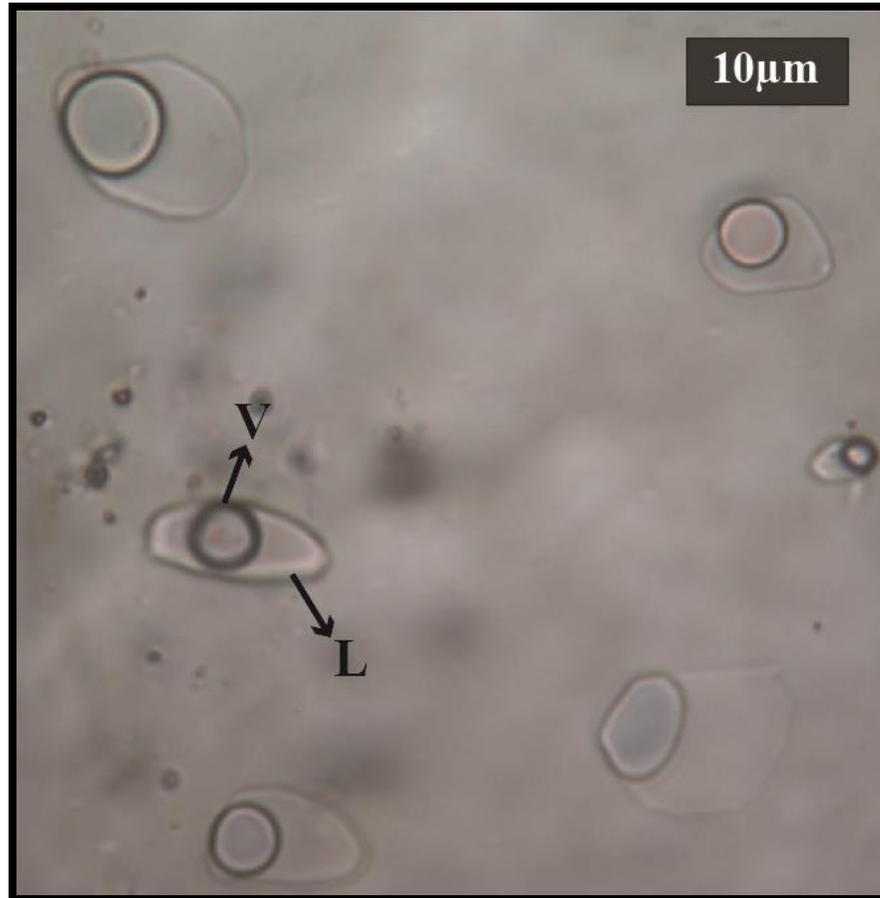


Ilustración 57: FIA 1 perteneciente a muestra 4. Se muestran las fases líquido y vapor presentes en las inclusiones de esta familia, bajo luz transmitida.

Anexo C.6

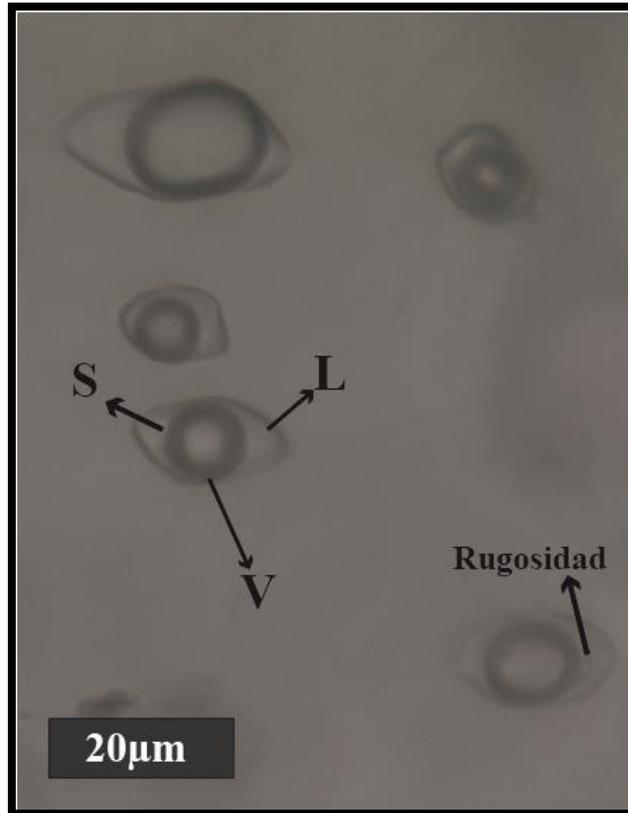


Ilustración 58: FIA 3 perteneciente a la muestra 4. Se muestran las fases líquido, vapor y sólido, bajo luz transmitida. Además se observa una superficie rugosa dentro de una de las inclusiones, la cual se mantuvo estable durante todo el proceso de microtermometría.

Anexo C.7

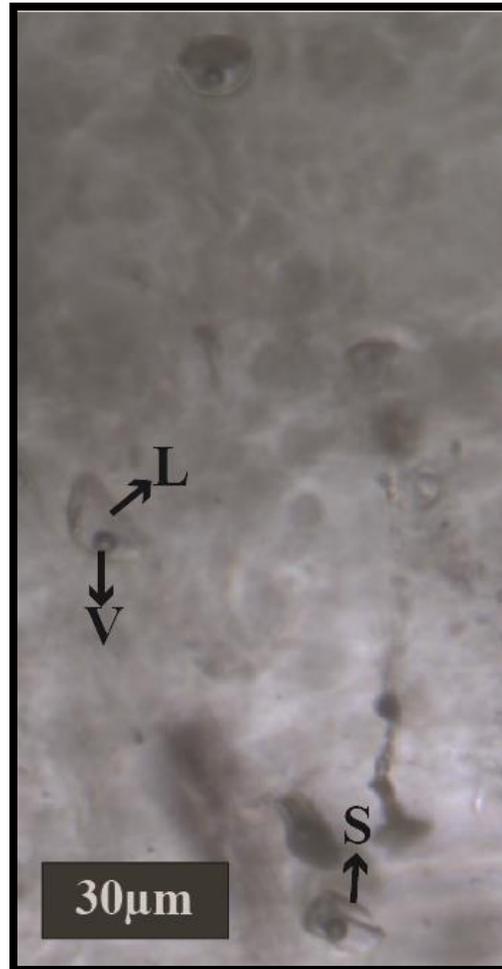


Ilustración 59: FIA s1 perteneciente a muestra 4. Se observan las fases líquido, vapor y sólido en su interior, bajo luz transmitida.

Anexos D
Anexo D.1

Tabla 19: Concentraciones iónicas de las diferentes muestras bajo condiciones marcianas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento pH 7.7						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	IF1	IF2	IF1	IF2	IF1	IF2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Na	$8.25 \cdot 10^{-05}$	$7.21 \cdot 10^{-05}$	$8.25 \cdot 10^{-05}$	$7.61 \cdot 10^{-05}$	$8.21 \cdot 10^{-05}$	$8.15 \cdot 10^{-05}$
K	$2.24 \cdot 10^{-04}$	$1.96 \cdot 10^{-04}$	$2.24 \cdot 10^{-04}$	$2.07 \cdot 10^{-04}$	$2.23 \cdot 10^{-04}$	$2.21 \cdot 10^{-04}$
Ca	$3.20 \cdot 10^{-03}$	$2.80 \cdot 10^{-03}$	$3.20 \cdot 10^{-03}$	$2.95 \cdot 10^{-03}$	$3.18 \cdot 10^{-03}$	$3.16 \cdot 10^{-03}$
Mg	$1.82 \cdot 10^{-03}$	$1.59 \cdot 10^{-03}$	$1.82 \cdot 10^{-03}$	$1.68 \cdot 10^{-03}$	$1.81 \cdot 10^{-03}$	$1.80 \cdot 10^{-03}$
H	$2.32 \cdot 10^{-08}$	$2.30 \cdot 10^{-08}$	$2.32 \cdot 10^{-08}$	$2.30 \cdot 10^{-08}$	$2.31 \cdot 10^{-08}$	$2.31 \cdot 10^{-08}$
NH ₄	$5.89 \cdot 10^{-03}$	$5.15 \cdot 10^{-03}$	$5.89 \cdot 10^{-03}$	$5.44 \cdot 10^{-03}$	$5.86 \cdot 10^{-03}$	$5.82 \cdot 10^{-03}$
Cl	$7.83 \cdot 10^{-03}$	$6.85 \cdot 10^{-03}$	$7.83 \cdot 10^{-03}$	$7.22 \cdot 10^{-03}$	$7.79 \cdot 10^{-03}$	$7.74 \cdot 10^{-03}$
SO ₄	$2.47 \cdot 10^{-03}$	$2.16 \cdot 10^{-03}$	$2.47 \cdot 10^{-03}$	$2.27 \cdot 10^{-03}$	$2.45 \cdot 10^{-03}$	$2.44 \cdot 10^{-03}$
OH	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$2.79 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$	$1.96 \cdot 10^{-10}$	$1.10 \cdot 10^{-10}$	$1.16 \cdot 10^{-10}$
HSO ₄	$1.72 \cdot 10^{-08}$	$1.37 \cdot 10^{-08}$	$1.72 \cdot 10^{-08}$	$1.51 \cdot 10^{-08}$	$1.70 \cdot 10^{-08}$	$1.69 \cdot 10^{-08}$
ClO ₄	$3.48 \cdot 10^{-03}$	$3.04 \cdot 10^{-03}$	$3.48 \cdot 10^{-03}$	$3.21 \cdot 10^{-03}$	$3.46 \cdot 10^{-03}$	$3.44 \cdot 10^{-03}$
CO ₂	$1.52 \cdot 10^{-03}$	$9.63 \cdot 10^{-04}$	$1.52 \cdot 10^{-03}$	$1.13 \cdot 10^{-03}$	$1.49 \cdot 10^{-03}$	$1.45 \cdot 10^{-03}$

Anexo D.2

Tabla 20: Fases a precipitar bajo condiciones marcianas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento pH 7.7						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	IF1	IF2	IF1	IF2	IF1	IF2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Fases a precipitar	hielo yeso -	hielo yeso -	hielo yeso Na ₃ H(SO ₄) ₂	hielo yeso -	hielo yeso -	hielo yeso -

Anexo D.3

Tabla 21: Concentraciones iónicas bajo condiciones marcianas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento y pH 3.0						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	IF1	IF2	IF1	IF2	IF1	IF2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Na	$7.04 \cdot 10^{-05}$	$6.00 \cdot 10^{-05}$	$7.04 \cdot 10^{-05}$	$6.40 \cdot 10^{-05}$	$6.99 \cdot 10^{-05}$	$6.93 \cdot 10^{-05}$
K	$1.91 \cdot 10^{-04}$	$1.63 \cdot 10^{-04}$	$1.91 \cdot 10^{-04}$	$1.74 \cdot 10^{-04}$	$1.90 \cdot 10^{-04}$	$1.88 \cdot 10^{-04}$
Ca	$3.08 \cdot 10^{-03}$	$2.68 \cdot 10^{-03}$	$3.08 \cdot 10^{-03}$	$2.83 \cdot 10^{-03}$	$3.06 \cdot 10^{-03}$	$3.04 \cdot 10^{-03}$
Mg	$1.75 \cdot 10^{-03}$	$1.52 \cdot 10^{-03}$	$1.75 \cdot 10^{-03}$	$1.61 \cdot 10^{-03}$	$1.74 \cdot 10^{-03}$	$1.73 \cdot 10^{-03}$
H	$1.15 \cdot 10^{-03}$					
NH ₄	$5.03 \cdot 10^{-03}$	$4.29 \cdot 10^{-03}$	$5.03 \cdot 10^{-03}$	$4.57 \cdot 10^{-03}$	$4.99 \cdot 10^{-03}$	$4.95 \cdot 10^{-03}$
Cl	$7.83 \cdot 10^{-03}$	$6.85 \cdot 10^{-03}$	$7.83 \cdot 10^{-03}$	$7.23 \cdot 10^{-03}$	$7.79 \cdot 10^{-03}$	$7.74 \cdot 10^{-03}$
SO ₄	$1.71 \cdot 10^{-03}$	$1.57 \cdot 10^{-03}$	$1.71 \cdot 10^{-03}$	$1.62 \cdot 10^{-03}$	$1.70 \cdot 10^{-03}$	$1.70 \cdot 10^{-03}$
OH	$2.10 \cdot 10^{-15}$	$5.58 \cdot 10^{-15}$	$2.10 \cdot 10^{-15}$	$3.92 \cdot 10^{-15}$	$2.19 \cdot 10^{-15}$	$2.33 \cdot 10^{-15}$
HSO ₄	$7.57 \cdot 10^{-04}$	$5.89 \cdot 10^{-04}$	$7.57 \cdot 10^{-04}$	$6.52 \cdot 10^{-04}$	$7.49 \cdot 10^{-04}$	$7.40 \cdot 10^{-04}$
ClO ₄	$3.48 \cdot 10^{-03}$	$3.04 \cdot 10^{-03}$	$3.48 \cdot 10^{-03}$	$3.21 \cdot 10^{-03}$	$3.46 \cdot 10^{-03}$	$3.44 \cdot 10^{-03}$
CO ₂	$1.52 \cdot 10^{-03}$	$9.64 \cdot 10^{-04}$	$1.52 \cdot 10^{-03}$	$1.13 \cdot 10^{-03}$	$1.49 \cdot 10^{-03}$	$1.45 \cdot 10^{-03}$

Anexo D.4

Tabla 22: Fases a precipitar bajo condiciones marcianas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento y pH 3.0						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	IF1	IF2	IF1	IF2	IF1	IF2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Fases a precipitar	hielo yeso -	hielo yeso Na ₃ H(SO ₄) ₂	hielo yeso -	hielo yeso -	hielo yeso -	hielo yeso -

Anexo D.5

Tabla 23: Concentraciones iónicas bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento pH 7.7						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	IF1	IF2	IF1	IF2	IF1	IF2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Na	1.17	2.19	1.17	1.74	1.20	1.24
K	$2.99 \cdot 10^{-01}$	$1.93 \cdot 10^{-01}$	$2.99 \cdot 10^{-01}$	$2.32 \cdot 10^{-01}$	$2.95 \cdot 10^{-01}$	$2.89 \cdot 10^{-01}$
Ca	1.38	$8.87 \cdot 10^{-01}$	1.38	1.07	1.36	1.33
Mg	1.02	$6.54 \cdot 10^{-01}$	1.02	$7.86 \cdot 10^{-01}$	1.00	$9.83 \cdot 10^{-01}$
H	$2.64 \cdot 10^{-09}$	$3.51 \cdot 10^{-09}$	$2.64 \cdot 10^{-09}$	$3.14 \cdot 10^{-09}$	$2.67 \cdot 10^{-09}$	$2.71 \cdot 10^{-09}$
NH ₄	$5.32 \cdot 10^{-01}$	$5.69 \cdot 10^{-01}$	$5.32 \cdot 10^{-01}$	$6.82 \cdot 10^{-01}$	$5.47 \cdot 10^{-01}$	$5.70 \cdot 10^{-01}$
CL	6.70	5.97	6.70	6.27	6.67	6.63
SO ₄	$1.27 \cdot 10^{-03}$	$1.75 \cdot 10^{-03}$	$1.27 \cdot 10^{-03}$	$1.50 \cdot 10^{-03}$	$1.28 \cdot 10^{-03}$	$1.29 \cdot 10^{-03}$
OH	$5.73 \cdot 10^{-09}$	$1.29 \cdot 10^{-08}$	$5.73 \cdot 10^{-09}$	$9.63 \cdot 10^{-09}$	$5.95 \cdot 10^{-09}$	$6.25 \cdot 10^{-09}$
HSO ₄	$3.84 \cdot 10^{-11}$	$8.85 \cdot 10^{-11}$	$3.84 \cdot 10^{-11}$	$6.38 \cdot 10^{-11}$	$3.96 \cdot 10^{-11}$	$4.13 \cdot 10^{-11}$
Br	$1.02 \cdot 10^{-01}$	$6.57 \cdot 10^{-02}$	$1.02 \cdot 10^{-01}$	$7.88 \cdot 10^{-02}$	$1.01 \cdot 10^{-01}$	$9.84 \cdot 10^{-02}$
CO ₂	8.92E-06	$1.50 \cdot 10^{-05}$	$8.92 \cdot 10^{-06}$	$1.38 \cdot 10^{-05}$	$9.31 \cdot 10^{-06}$	$9.83 \cdot 10^{-06}$

Anexo D.6

Tabla 24: Tabla 22: Fases a precipitar bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 7.7, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento pH 7.7						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	IF1	IF2	IF1	IF2	IF1	IF2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Fases a precipitar	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl Na ₃ H(SO ₄) ₂	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -

Anexo D.7

Tabla 25: Concentraciones iónicas bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento pH 3.0						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	1	2	1	2	1	2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Na	1.17	2.19	1.17	1.74	1.20	1.24
K	$2.99 \cdot 10^{-01}$	$1.93 \cdot 10^{-01}$	$2.99 \cdot 10^{-01}$	$2.32 \cdot 10^{-01}$	$2.95 \cdot 10^{-01}$	$2.89 \cdot 10^{-01}$
Ca	1.38	$8.87 \cdot 10^{-01}$	1.38	1.07	1.36	1.33
Mg	1.02	$6.53 \cdot 10^{-01}$	1.02	$7.86 \cdot 10^{-01}$	1.00	$9.83 \cdot 10^{-01}$
H	$1.32 \cdot 10^{-04}$	$1.76 \cdot 10^{-04}$	$1.32 \cdot 10^{-04}$	$1.57 \cdot 10^{-04}$	$1.34 \cdot 10^{-04}$	$1.36 \cdot 10^{-04}$
NH ₄	$5.32 \cdot 10^{-01}$	$5.69 \cdot 10^{-01}$	$5.32 \cdot 10^{-01}$	$6.82 \cdot 10^{-01}$	$5.48 \cdot 10^{-01}$	$5.70 \cdot 10^{-01}$
CL	6.70	5.97	6.70	6.27E	6.67	6.63
SO ₄	$1.27 \cdot 10^{-03}$	$1.75 \cdot 10^{-03}$	$1.27 \cdot 10^{-03}$	$1.50 \cdot 10^{-03}$	$1.28 \cdot 10^{-03}$	$1.29 \cdot 10^{-03}$
OH	$1.14 \cdot 10^{-13}$	$2.58 \cdot 10^{-13}$	$1.14 \cdot 10^{-13}$	$1.92 \cdot 10^{-13}$	$1.19 \cdot 10^{-13}$	$1.25 \cdot 10^{-13}$
HSO ₄	$1.92 \cdot 10^{-06}$	$4.44 \cdot 10^{-06}$	$1.92 \cdot 10^{-06}$	$3.20 \cdot 10^{-06}$	$1.98 \cdot 10^{-06}$	$2.07 \cdot 10^{-06}$
Br	$1.02 \cdot 10^{-01}$	$6.57 \cdot 10^{-02}$	$1.02 \cdot 10^{-01}$	$7.88 \cdot 10^{-02}$	1.01	$9.84 \cdot 10^{-02}$
CO ₂	$8.93 \cdot 10^{-06}$	$1.50 \cdot 10^{-05}$	$8.93 \cdot 10^{-06}$	$1.38 \cdot 10^{-05}$	$9.32 \cdot 10^{-06}$	$9.84 \cdot 10^{-06}$

Anexo D.8

Tabla 26: Fases a precipitar bajo condiciones terrestres y composiciones evaporíticas con pH 3.0, durante el proceso de congelamiento.

Congelamiento pH 3.0						
	FIA1		FIA2		FIA2*	
	1	2	1	2	1	2
Te (°C)	-71.2	-72.4	-85.6	-75.4	-72.4	-72.4
Tm (°C)	-35.0	-28.2	-35.0	-30.7	-34.7	-34.3
Fases a precipitar	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl Na ₃ H(SO ₄) ₂	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -	ICE NaCl·2H ₂ O CaSO ₄ ·2H ₂ O NaBr NH ₄ Cl KCl MgCl ₂ ·12H ₂ O MgBr ₂ CaCl ₂ ·6H ₂ O NaCl -