

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra**

**Geomicrobiología del manantial hidrotermal de Puertecitos,
Baja California**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Yorfrank Arellano Ramírez

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Yorfrank Arellano Ramírez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Thomas Günter Kretzschmar
Co-director de tesis

Dra. Rufina Hernández Martínez
Co-director de tesis

Dr. Jesús Arturo Martín Barajas

Dra. Ernestina Castro Longoria



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dr. Rufina Hernández Martínez
Directora de estudios de Posgrado

Yorfrank Arellano Ramírez © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Yorfrank Arellano Ramírez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

Geomicrobiología del manantial hidrotermal de Puertecitos, Baja California

Resumen aprobado por:

Dr. Thomas Günter Kretzschmar
Co-director de tesis

Dra. Rufina Hernández Martínez
Co-director de tesis

El sistema hidrotermal de Puertecitos de Baja California, se encuentra en tobas vítreas de composición dacítica (ignimbritas) de edad Plioceno (Tpr) y se localiza en una zona intermareal, con cambios de temperatura que fluctúan con la marea. La interacción de microorganismos con minerales es un proceso poco estudiado, por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar la presencia de microorganismos en rocas del manantial hidrotermal y distinguir su efecto en procesos geológicos y geoquímicos. En el día con la marea más baja (19 de febrero 2015), se realizó un muestreo y un análisis fisicoquímico de campo. Se registraron temperaturas variables de entre 73.5 °C, en la zona de fractura, hasta 32 °C en las zonas más cercanas al mar. Utilizando SEM se observaron estructuras biomórficas con tamaños mayores a 10 µm de longitud, de forma bacilar de hasta 2 µm, diatomeas de tamaños aproximados a 20 µm y biopelículas. En altas temperaturas, con pH de 10.4, se encontraron evidencias de silicificación de microorganismos y en las temperaturas más bajas, con un pH de 7.3, se observó la presencia de biopelículas. Los análisis fisicoquímicos del agua en los puntos de mayor y menor temperatura, mostraron disminución de SiO₂ y SO₄²⁻, respectivamente, los cuales son asociados precipitación de minerales y actividad microbiana. La precipitación/disolución de minerales se vio fuertemente influenciada por los cambios de temperatura. En temperaturas mayores de 55 °C, se observó precipitación de yeso y sílice amorfo y en temperaturas menores, disolución de yeso La precipitación de sílice en altas temperaturas no está controlada por la actividad microbiana, sino por la condición intermareal que baja la temperatura del agua y la solubilidad de la sílice. Este es el primer trabajo en donde se identifica la presencia de microorganismos asociados a rocas en el manantial hidrotermal.

Palabras clave: estructuras biomórficas, silicificación, hidrotermal

Abstract of the thesis presented by **Yorfrank Arellano Ramirez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Master in Sciences in Earth Sciences with orientation in Geology

Geomocobiology of Puertecitos hydrothermal spring, Baja California

Abstract approved by:

Dr. Thomas Günter Kretzschmar
Thesis co-director

Dr. Rufina Hernández Martínez
Thesis co-director

The hydrothermal system of Puertecitos Baja California, is in Pliocene vitreous dacitic tuffs (ignimbrites) and it is located in an intertidal zone with fluctuating temperature from $>72^{\circ}\text{C}$ in the hot spring to 32° where sea water interact in the spring pool in high tide. The interaction of microorganisms with minerals is a poorly studied process, so the aim of this study is to evaluate the presence of microorganisms in rocks of the hydrothermal spring and to distinguish its effect on geological and geochemical processes. On the day with the lowest tide (February 19, 2015), sampling and field physicochemical analysis were done. Variable temperatures from 73.5°C in the fracture zone, and to 32°C in the areas closest to the ocean were recorded. Scanning Electron Microscopy allowed the observation of biomorphic structures with sizes greater than $10\ \mu\text{m}$ in length, bacillary forms of up to $2\ \mu\text{m}$, diatomaceous cells with an approximate size $20\ \mu\text{m}$ and biofilms. At high temperatures and pH of 10.4, silicification evidence of microorganisms was found and at lower temperatures, with a pH of 7.3, the presence of biofilms was predominant. Physico-chemical analyzes conducted at points of highest and lowest temperature, showed decreased amounts of SiO_2 and SO_4^{2-} . The precipitation/dissolution of minerals was strongly influenced by temperature changes. At temperatures above 55°C , precipitation of gypsum and amorphous silica and at lower temperatures, mineral dissolution was observed. Silica precipitation at high temperatures is not controlled by microbial activity, but by the intertidal condition. This is the first work done in the hydrothermal spring where the presence of microorganisms associated with rocks identified.

Keywords: biomorphic structures, silicification, hydrothermal, thermophilus

Dedicatoria

*A la persona que siempre me miro con los mismos ojos,
y siempre entregó todo por mí.*

*A ti, porque cuando todos los caminos se cerraban,
tu puerta siempre estaba abierta.*

*Sin ti no sería la persona que hoy soy,
todo te lo debo todo a ti.*

Te amo y te amare por siempre, Mamá.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para mis estudios. Al CeMIEGeo, por permitirme ser parte del proyecto y contribuir a la ciencia a través de esta investigación.

Un especial agradecimiento a mis codirectores de tesis Dra. Rufina Hernández y Dr. Thomas Kretzschmar, por la ayuda profesional brindada y tiempo dedicado, tienen todo mi respeto y admiración, sin ustedes esto no sería posible. En cuanto a los miembros del comité de tesis, Dr. Arturo Martín y Dra. Ernestina Castro, gracias por ser parte de esto, sus comentarios y sugerencias fueron importantes para mejorar y desarrollar este trabajo.

A los técnicos Luis Gradilla, Gabriel Rondón, Israel Gradilla, Margarita Martínez y Karina Espinoza, por brindarme la ayuda necesaria para los análisis de muestras.

Al personal de CeMIEGeo que estuvieron conmigo en la etapa de campo: Juan Sánchez, Disraely González, Luis Molina, Yosvany Batista y Saúl Encarnación. Y por último a Enrique Iñiguez, aunque no estuvo desde el principio de este proyecto, aportó sus conocimientos para la obtención de algunos resultados.

A mis amigos José David, Marianggy, María Daniela, que a pesar del tiempo y algunos en la distancia, siguen presentes allí motivándome cuando quería desistir. A mis amigos conocidos en esta aventura (CICESE), gracias por el apoyo en clases y ayuda incondicional en momentos de estrés, ustedes también son parte de esto.

A México por su caluroso recibimiento, desde el primer día lo sentí como mi segunda tierra, además por su afabilidad y gastronomía, la cual ahora es parte de mi vida.

A la persona que me brindó siempre su amor incondicional y me hizo amar la gastronomía mexicana, además por mostrarme cada rincón de este hermoso país y sentirme especial, por dejarme ser parte de tu familia cuando anhelaba una, a ti gafo.

Tabla de contenido

	<i>Página</i>
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.1.1 Actividad hidrotermal en el norte del golfo de Baja California	2
1.1.2 Actividad biológica en ambiente hidrotermal.....	4
1.2 Marco geológico.....	5
1.3 Justificación.....	6
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.6 Descripción del área de estudio.....	7
Capítulo 2. Metodología	9
2.1 Muestreos.....	9
2.1.1 Muestreos de aguas.....	9
2.1.2 Muestreos de rocas.....	10
2.2 Métodos de laboratorio.....	11
2.2.1 Análisis de aniones y cationes.....	11
2.2.2 Análisis Petrográficos.....	13
2.2.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	14
2.2.3.1 Análisis de minerales en superficie.....	14

2.2.3.2	Análisis de microorganismos.....	15
2.2.3.3	Análisis en microsonda (EDS).....	15
2.2.4	Fijación de microorganismos.....	16
2.3	Abundancia relativa de microorganismos	17
2.4	Índices de saturación mineral.....	17
Capítulo 3.	Resultados.....	19
3.1	Mediciones de campo.....	19
3.2	Petrografía.....	20
3.3	Ambientes de formación.....	20
3.3.1	Paragénesis de la alteración hidrotermal.....	20
3.3.2	Microorganismos.....	25
3.4	Abundancia relativa de microorganismos	27
3.5	Composición química de estructuras biogenicas.....	28
3.6	Alteración hidrotermal.....	31
3.6.1	Diagramas hidrogeoquímicos.....	31
3.6.2	Condiciones geoquímicas.....	34
3.6.3	Mineralizaciones.....	36
Capítulo 4.	Discusión.....	38
4.1	Microorganismos, temperatura y pH.....	38
4.2	El fluido hidrotermal y las fases minerales.....	40
4.3	Interacción fluido-microorganismos.....	43
Capítulo 5.	Conclusiones.....	45
	Recomendaciones.....	46
	Lista de referencias bibliográficas.....	47
	Apéndices.....	52

Lista de Figuras

Figura		Página
1	A. Mapa del noroeste de México y zonas hidrotermales en la costa del Golfo de California y la depresión de Saltón. B. Detalle de la zona de Puertecitos y la ubicación del manantial hidrotermal costero objeto de este estudio (ver figura 2).....	8
2	Ubicación de la zona de estudio y sitios de muestreo de rocas y agua en el manantial hidrotermal de Puertecitos, Baja California. Los sitios YAPU01 y YAPU16 incluyen muestras de agua y roca.....	10
3	Faces hidrogeoquímicas basadas en porcentajes del total equivalente de cada ión (Back, 1966).	12
4	Procedimiento visual de los pasos realizados para la elaboración de las secciones delgadas de roca, de izquierda a derecha en 1) se puede ver la roca en su estado original y en 6) lámina delgada obtenida.....	14
5	Tubos de polipropileno con soluciones fijadoras (alcohol etílico al 96% y FAA), en los cuales fueron sumergidas las muestras antes de ser transportadas al laboratorio	16
6	Micrografía de la muestra YAPUP-3 en el manantial hidrotermal de Puertecitos. Mostrando pirita en una fractura y diseminada en el lado izquierdo. Esto sugiere condiciones anoxias	20
7	Ubicación espacial de los sitios de muestreo para las secciones delgadas en el manantial de Puertecitos.....	22
8	Distribución de temperatura en la fosa hidrotermal de Puertecitos. Las muestras YAPU01 se ubica en la zona de emanación del agua caliente en dos fracturas del Plioceno.....	23
9	Petrografía de la muestra YAPUP-4 en el manantial hidrotermal de Puertecitos. RQ) Recristalización de cuarzo a partir de un cristal de plagioclasa dentro de un fragmento lítico o pómez, P) pirita, V) vidrio volcánico que contiene agregados de mica muy birrefringentes.....	24
10	Micrografías en SEM de muestras YAPU03, YAPU09 y YAPU16 del manantial hidrotermal de Puertecitos, a) formación de yeso acicular en agregado radial de hasta 20 μm (Y) y b) silicificación de restos de microorganismo, principalmente diatomeas (D).....	26
11	Micrografías en SEM de microorganismos adheridos a la roca de muestras YAPU05, YAPU06, YAPU07 y YAPU16 del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. a) Estructuras biomórficas alargadas de origen desconocido (E), b) cocos sobre diatomeas (C), c) colonias de bacilo sobre la cara lisa de minerales (B) y d) biopelículas conformado por varios microorganismos en forma irregular.....	26

12	Abundancias relativas de microorganismos respecto a la temperatura por cada sitio de muestreo. La mayor abundancia de bacterias y bacilos se presenta de 59.9 a 61°C. Las biopelículas aparecen en temperaturas menores a 45°C.....	27
13	Presencia de microorganismos diferenciados a partir de elementos de carbón y nitrógeno en el manantial de Puertecitos, B.C. A) Estructura biomórfica con recristalización de sílice, muestra YAPU04 B) Microorganismos en forma de barra (bacilos), mezclados con material silíceo, muestra YAPU06. El punto amarillo indica el lugar donde se realizó el análisis químico mostrado a la derecha.....	29
14	Evidencias de alteración por microorganismos en rocas colectadas del manantial de Puertecitos, B.C. (Muestra YAPU08). Los puntos amarillos indican el lugar donde se realizó el análisis químico mostrado a la derecha. Los análisis de la composición elemental, realizados en ambos lados de la marca encontrada, no indicaron diferencia elemental entre los puntos señalados.....	30
15	Análisis EDS realizado al mineral yeso en muestras de manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. Se obtuvo a partir de recubrimiento de carbón para eliminar el problema causado cuando se recubrió con oro. El punto amarillo indica el lugar donde fue realizado el análisis químico que se muestra a la derecha de la figura.....	30
16	Diagrama de Piper que muestra las clasificación de aguas a partir de los aniones y cationes presentes del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., encontrándose agua cloruradas sódicas.....	32
17	Diagrama de Stiff para la muestra YAPU01 que representa los aniones y cationes mayores en las muestras analizadas del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., indicando alto contenido de cloruro y sodio.....	32
18	Diagrama de Stiff para la muestra YAPU16 que representa los aniones y cationes mayores en las muestras analizadas del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., indicando alto contenido de cloruro y sodio.....	33
19	Diagrama de Schoeller representando la mayor concentración de elementos medidos en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., evidencia un bajo contenido de bicarbonatos y alto contenido en cloruro y sodio en las muestras de aguas analizadas.....	33
20	Formación de minerales de yeso en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. (Muestra YAPU03). A) Minerales de yeso formados principalmente en zonas de menor relieve sobre la superficie de la roca en contacto con el agua (600 µm) B y C detalle de los cristales de yeso en agregados radiales.....	35

- 21 Imagen en SEM de la muestra YAPU16. El análisis puntual (en amarillo) indica la presencia de Si, Mg, Na y Ca en esta muestra tomada en la zona de menor temperatura 35
- 22 Relación del Índice de Saturación (IS) y la temperatura para minerales de SiO_2 , obtenidos a partir de datos fisicoquímicos de la muestra de agua YAPU-01 (73°C) en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. Se muestra IS en equilibrio para cuarzo, tridimita, calcedonia y cristobalita. El silice amorfo (línea azul) muestra valores cercanos al equilibrio en temperaturas menores a 10°C. Las líneas punteadas en negro indican las temperaturas máxima y mínimas registradas en la fosa..... 37
- 23 Relación del Índice de Saturación (IS) y la temperatura para minerales de CaSO_4 , obtenidos a partir de datos fisicoquímicos de la muestra de agua YAPU-01 (73°C) en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. El equilibrio de anhidrita se observa en mayores temperaturas y el IS del yeso es moderadamente constante. Las líneas punteadas en negro indican las temperaturas máxima y mínimas registradas en la fosa..... 37

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Valores obtenidos <i>in situ</i> para muestras del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C.....	19
2	Mineralogía de la roca en contacto con el fluido hidrotermal del manantial hidrotermal de Puertecitos.....	21
3	Análisis fisicoquímicos obtenidos para las muestras de agua YAPU01, en el sitio de mayor temperatura en el manantial de Puertecitos, y YAPU16 en mar (VND: Valor no detectado).....	31
4	Alteración de rocas del manantial hidrotermal de Puertecitos observadas a partir de análisis petrográficos y microscopia electrónica de barrido.....	36

Capítulo 1. Introducción

Los estudios de interacciones mineral-microbio se encuentran en el campo emergente de la Geomicrobiología, en donde los minerales y las rocas son materiales de la tierra con las que los microbios interactúan en todas las escalas, incluyendo condiciones extremas de temperatura, salinidad, acides, entre otros. Un tipo particular son los organismos termófilos, cuyo proceso metabólico incluye enzimas que toleran alta temperatura y se adaptan a los ambientes extremos con temperaturas elevadas de entre 55 hasta 121 °C (Ramírez et al., 2006).

La importancia de conocer la alteración de rocas en ambientes hidrotermales se debe a que son el medio conductor del fluido de altas temperaturas y constituyen el soporte para el crecimiento de comunidades termófilas. Los microorganismos se pueden encontrar en las superficies, en las grietas y en algunos casos, incluso en el espacio de los poros de las rocas.

La alteración hidrotermal incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas en contacto con fluidos de alta temperatura, principalmente agua y vapor. Por lo tanto, conocer la composición y distribución química y mineralógica de las rocas, permite tener evidencias directas de circulación de fluidos en sistemas hidrotermales inactivos o fósiles. Además, la paragénesis mineral en las zonas de alteración hidrotermal, pueden proporcionar información útil de las condiciones de temperatura en la exploración de yacimientos minerales y geotérmicos (Shanks, 2012).

La fosilización de microorganismos en la superficie de la Tierra en ambientes geotérmicos ocurre principalmente por una sustitución de la materia orgánica con minerales de sílice, hidróxidos, calcita y minerales arcillosos (Jones et al., 1998; Konhauser y Ferris, 1996; Kurt et al., 2001; Renaut et al., 1996; Zavarzin et al., 1989). La silicificación de microorganismos ocurre rápidamente en la superficie de las células, y la precipitación del sílice amorfo conserva las estructuras de la actividad microbiana mediante la biomineralización, crecimiento celular y deposición de nuevas capas bacterianas (Konhauser et al., 2001). La precipitación de sílice es producida por la disminución de la temperatura y el pH en ambientes hidrotermales, el flujo hidrotermal

presente y la liberación de gases (Walter et al., 1972).

La meteorización moviliza cationes y aniones que son necesarios para todas las formas de vida, pero el deterioro o meteorización de las superficies de roca en ambientes hidrotermales se ve fuertemente influenciado por la temperatura del agua, en la cual existe actividad microbiana que lo utiliza como sustrato y se alimenta de los minerales presentes (Ehrlich, 2009), por lo tanto es importante entender los procesos fisicoquímicos de alteración del sustrato rocoso en ambientes hidrotermales.

En esta investigación se realizó un estudio sobre la presencia de microorganismos y las condiciones fisicoquímicas del agua y las rocas en el manantial hidrotermal costero de Puertecitos, en el noroeste de Baja California. Este manantial presenta una temperatura superior a 70 °C (Arango-Galvan et al., 2015) y se ubica en la zona intermareal, y presenta cambios de temperatura al mezclarse con el agua de mar durante los cambios de marea, causando reacciones fisicoquímicas que modifican los índices de saturación de los minerales. Para obtener el rango de temperaturas y de composición química del agua del manantial se realizó el muestreo durante la marea más baja.

1.1. Antecedentes

1.1.1 Actividad hidrotermal en el norte de Baja California

A lo largo de la costa norte del Golfo en la Península de Baja California, se han reportado varios sitios de actividad hidrotermal de baja temperatura entre San Felipe y Puertecitos (Peart, 1978). Estos sistemas de manantiales costeros están asociados a la actividad magmática y/o a las fallas activas relacionada con la extensión oblicua que caracteriza al sistema de rift del Golfo de California (Martín-Barajas et al., 1995). Esta actividad magmática produce zonas de alto flujo de calor en las cuencas profundas de Cerro Prieto y la depresión de Saltón en el sur de California, en donde existen yacimientos geotérmicos en explotación para generación de energía (Arango-Galván et al., 2015).

Trabajos previos en el área de estudio se han enfocado en determinar la composición de los fluidos (Peart, 1978) y la paragénesis de los minerales de origen hidrotermal (Aparicio-Ceja, 1999). Así como la composición química y mineralógica de las rocas (Martín-Barajas et al., 1995). Arango-Galván et al. (2015) y Vidal et al. (1978) registraron temperaturas en el agua del manantial de Puertecitos que oscilan entre 40 y 74°C, con pH de 6.3 a 8.4.

Peart (1978) encontró que el agua del manantial de Puertecitos es el producto de la mezcla entre el agua caliente ascendente y el agua de mar cerca de la superficie. Además, encontró valores de $\delta^{34}\text{S}$ disuelto en SO_4^{2-} de origen marino. El $\delta^{34}\text{S}$ disuelto en H_2S fue variable y los valores encontrados los asoció a la reducción cinética de SO_4^{2-} o a la lixiviación de sulfuros en la pared de la roca a profundidad.

En la zona de manifestación hidrotermal de Puertecitos Aparicio-Ceja (1999) identificó alteración potásica, barita, anhidrita, sulfuros y silicificación de la roca encajonante con abundantes óxidos y sulfuros de hierro. Por arriba del nivel del mar (hasta 60 msnm) la zona de estudio presenta fallas y fracturas con relleno de calcita y menor contenido de óxidos de manganeso. La asociación de calcita y óxidos de manganeso en fracturas y fallas en las partes más altas no afecta la composición de la roca encajonante y se interpreta que corresponde a circulación de baja temperatura (Aparicio-Ceja, 1999).

Las rocas volcánicas en la zona hidrotermal de Puertecitos son principalmente de depósitos de flujos piroclásticos de composición riolita a dacita y con edades de 3.2 a 2.7 Ma (Martín-Barajas et al., 1995). Se ha propuesto que este evento explosivo del Mioceno-Plioceno, está relacionado con la extensión oblicua en el segmento Tiburón-Delfín del rift del Golfo de California (Stock, 2000).

La zona hidrotermal de Puertecitos se considera de interés como prospecto geotérmico, con un potencial estimado de 400 MWe (Arango-Galván et al., 2015).

1.1.2 Actividad biológica en ambiente hidrotermal

Los primeros intentos y experimentos para explicar el potencial de ataque físico-mecánico de las rocas por microorganismos, fueron hechos por Krumbein (1968) y Dornieden et al. (1997, 2000). En estos estudios se encontraron biodeterioros producto de microorganismos (incluyendo bacterias y hongos) sobre y en fracturas y poros dentro de la roca. Estos organismos utilizan los mismo compuestos orgánicos contenidos en la atmósfera y agua superficial.

En zonas de alteración hidrotermal en ambientes costeros y en algunas zonas de aguas termales naturales de Islandia (Geptner et al., 2005), se estudió la colonización de la biota (conjunto de especies de plantas, animales y otros organismos) y la alteración de rocas en sistemas hidrotermales de baja y alta temperatura. El estudio permitió dilucidar algunas de las características ambientales de fosilización reciente y la sustitución de la materia orgánica con minerales arcillosos, oxihidróxidos de hierro y sílice (Geptner et al., 2005). Las bacterias quimiolitotróficas utilizan estas especies químicas reducidas como fuentes de energía para la reducción y asimilación de dióxido de carbono. Estas bacterias forman la base de la cadena alimentaria, que permite a ciertos invertebrados crecer en las inmediaciones de los orificios de ventilación.

Con el análisis de secciones pulidas finas Seiffert et al. (2014) también establecieron que existe meteorización y lixiviación de la superficie de minerales por efecto biótico. Iwai et al. (2010), encontraron la formación de depósitos silíceos, a partir de células termófilas en condiciones de fluido sobresaturado de SiO_2 (600 ppm) en ensayos en laboratorio. Estas condiciones promueven la interacción entre las células y el desarrollo de agregados celulares o biofilms.

El interés de estudiar el sistema hidrotermal de Puertecitos radica en la importancia de conocer la fuente del fluido hidrotermal, los cambios mineralógicos de las rocas y sedimentos y las condiciones en las que se encuentran los microorganismos adaptados a temperaturas elevadas.

1.2. Marco Geológico

La provincia volcánica de Puertecitos contiene una sucesión de flujos piroclásticos y domos riolíticos agrupados en dos periodos de vulcanismo de tipo calderico asociado a la extensión y apertura del Golfo de California (Martín-Barajas et al., 1995; Martín-Barajas y Stock, 1993). El periodo de actividad volcánica más reciente ha sido fechada entre los 3.2 y 2.7 Ma y acumuló una secuencia de ignimbritas de más de 200 m de espesor (Martín-Barajas et al., 1995; Martín-Barajas y Stock, 1993). Este paquete de tobas sobreyace a una secuencia sedimentaria marina que se acuña hacia el oeste y está compuesta de lodolita y limolita de ambiente intermareal-submareal. Por debajo de los depósitos marinos (Fm. Puertecitos), se presenta una secuencia de domos riolíticos y tobas del Mioceno tardío (Tmr) cuyo periodo eruptivo se centra en ~6 Ma (Martín-Barajas y Stock, 1993).

El manantial hidrotermal costero emana de una fractura de orientación NNE que corta a las tobas del Plioceno (Tpr) (Martín Barajas et al., 1997). Son principalmente depósitos de flujos de ceniza vítrea que forman mesas en la cima de los bloques basculados por un patrón de fallas normales de orientación dominante nor-noroeste. Las tobas del Plioceno tienen características petrológicas distintivas; son principalmente vítreas (>65% de vidrio) con <25 % de cristales de plagioclasa, clinopiroxeno minerales opacos y trazas de olivino. La hornblenda, la biotita y el cuarzo están ausentes o en muy baja proporción y se consideran minerales accidentales. Éstos incluyen fragmentos líticos accidentales principalmente de lava riolítica y tobas de erupciones caldéricas previas. Son minoritarios los fragmentos de andesita porfídica, andesita basáltica y clastos de rocas graníticas que forman el basamento local. Esta secuencia sobreyace discordantemente a la secuencia sedimentaria acuñada y a depósitos de flujos de lava, brechas y depósitos epiclásticos de composición dacítica-andesítica (Tma, Terciario Mioceno andesitas) y con riolitas del Mioceno Tardío (Tmr, Terciario Mioceno riolitas) (Martín-Barajas y Stock, 1993). Las lavas riolíticas de Tmr son afaníticas, con menos de 5% de fenocristales, principalmente plagioclasas sódicas (oligoclasa-andesina), clinopiroxeno y minerales opacos, con una matriz vítrea a parcialmente recristalizada. La desvitrificación es radial, esferulítica con desarrollo de textura axiolítica fibrocristalina

de feldespatos alcalinos (Or_{40-50}) y cristobalita. No obstante, es común observar calcita microcristalina diseminada en la matriz y asociada a microfracturas (Martín-Barajas y Stock, 1993). El contenido de sílice de las ignimbritas y lavas riolíticas varía de 69 a más de 75% (Martín-Barajas et al., 1995). La roca alterada del sitio de emanación hidrotermal corresponde a una de las tobas en la base de la secuencia de ignimbritas del Plioceno Tardío.

1.3. Justificación

La nutrición de los microorganismos se ve fuertemente influenciada por los elementos químicos que provienen del medio ambiente, lo cual interviene en sus funciones fisiológicas y estructurales. En los últimos años se han implementado una serie de técnicas para conocer la degradación biológica de rocas y minerales a pequeña escala. Las biopelículas y marcas de disolución (biopitting) son los principales rasgos de degradación en rocas volcánicas (Stephan et al., 2007), y es evidente que los microorganismos obtienen de los minerales los nutrientes necesarios para vivir en estas condiciones. Este estudio se enfoca en documentar la presencia de microorganismos y el efecto de estos en las rocas del manantial hidrotermal de Puertecitos, ubicado en la zona intermareal y afectado por los cambios de temperatura ocasionados por la marea.

1.4. Hipótesis

El manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., alberga microorganismos termófilos, cuya actividad se ve fuertemente influenciada por los cambios de temperatura y pH ocasionados por la marea.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la presencia de los microorganismos en rocas del manantial hidrotermal de Puertecitos, Baja California y distinguir su efecto en procesos geoquímicos inorgánicos.

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar la interacción fluido-roca causante de la alteración por altas temperaturas.
- Determinar la relación que tiene la temperatura y composición del fluido hidrotermal con la abundancia de microorganismos.
- Contrastar las condiciones de precipitación/disolución de minerales entre el fluido caliente y cambios de marea.

1.6. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la costa noreste de Baja California, en la población de Puertecitos (Figura 1), perteneciente al municipio de Ensenada. Se encuentra a 280 km al sur de Mexicali. El acceso es a través de la carretera federal número 5 en su trayecto San Felipe-Chapala y por un camino de terracería.

Esta zona es turísticamente reconocida por sus pozas de aguas sulfurosas. En marea baja, se puede llegar a temperaturas de ebullición. El manantial de Puertecitos es de particular interés porque se presenta en afloramientos rocosos. Otros manantiales situados al norte de Puertecitos ocurren en la zona intermareal en sedimento arenoso-limoso no consolidado. En Puertecitos, durante la marea alta las pozas de aguas termales permanecen sumergidas. A medida que la marea baja, se exponen las pozas y la temperatura del agua se incrementa progresivamente hasta un máximo previo a la marea que las vuelve a cubrir.

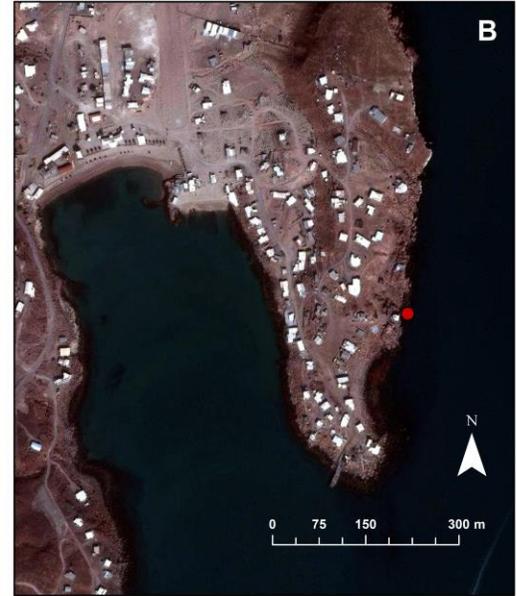


Figura A. Ubicación de manantiales hidrotermales del este de Baja California.

Figura B. Ubicación de la fosa hidrotermal de Puertecitos (Imágenes tomadas de Google Earth).

- Actividad hidrotermal
- Manantial hidrotermal de Puertecitos

Figura 1. A. Mapa del noroeste de México y zonas hidrotermales en la costa del Golfo de California y la depresión de Saltón. B. Detalle de la zona de Puertecitos y la ubicación del manantial hidrotermal costero objeto de este estudio (ver figura 2).

Capítulo 2. Metodología

2.1 Muestreos

Los muestreos se realizaron en condiciones de baja marea para coleccionar muestras de roca y agua a la mayor temperatura. Para ello, se consultó el calendario mensual de mareas (Mar V1.0-CICESE), lo que permitió identificar el día en que la marea estaría lo más baja posible y así, obtener la menor influencia en la composición química por parte de la mezcla de agua de mar y del manantial hidrotermal. Los pronósticos de marea usados fueron los de la localidad de San Felipe, debido a la cercanía con el área de estudio. Con este calendario se obtuvo como día ideal, para realizar la toma de muestras, el 19 de febrero del año 2015. Las muestras se recolectaron del 18 al 20 de febrero, fechas en las cuales se encontraban niveles óptimos para la realización del muestreo.

2.1.1 Muestreo de aguas

Para la toma de muestras de agua fue necesario preparar el equipo para las mediciones *in situ* de parámetros hidrogequímicos. Se realizaron mediciones de pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), alcalinidad y temperatura en cada punto de muestreo. Estos parámetros fueron medidos con el equipo *MP-6p Portable Meter*, el cual fue calibrado en el laboratorio con soluciones estándar antes de la fecha de salida a campo.

Se recolectaron cuatro muestras en dos sitios, uno dentro del manantial hidrotermal en el lugar de emanación del agua de mayor temperatura y otro a nivel del mar, en el punto más alejado del lugar de emanación dentro de la pileta natural que se forma en la zona intermareal (Figura 2). En cada sitio se tomaron dos muestras, una para la determinación de aniones, la cual se recolectó en un recipiente de polietileno de 500 ml y la segunda de 100 ml, que se utilizó para análisis de cationes. Ésta última se filtró *in situ* a través de una membrana de acetato de celulosa con poros de 0.45 μm con una bomba peristáltica y se fijó su pH mediante la adición de ácido nítrico gota por gota como conservador hasta alcanzar un $\text{pH} \leq 2$, con el objetivo de conservar la dureza del

agua y la concentración de otros componentes disueltos (Rosenzweig y Solecki, 2010).

Todas las muestras fueron almacenadas en refrigeración hasta su análisis en el laboratorio para minimizar la actividad bacteriana.

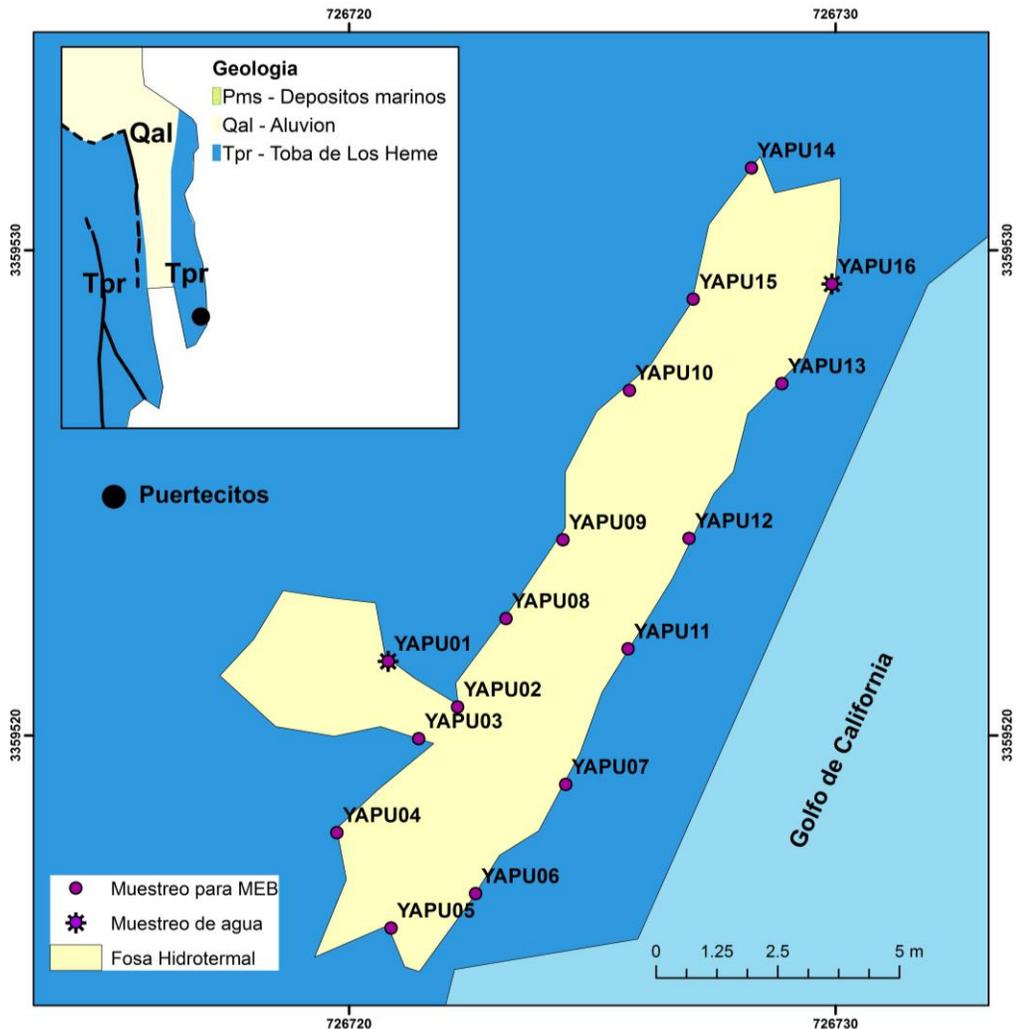


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio y sitios de muestreo de rocas y agua en el manantial hidrotermal de Puertecitos, Baja California. Los sitios YAPU01 y YAPU16 incluyen muestras de agua y roca.

2.1.2 Muestreo de rocas

Las muestras para análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS por sus siglas en inglés) se tomaron en 16 puntos (Figura 2). Las rocas tuvieron tamaños menores a

1.5x1.5 cm y se utilizaron para la observación de microorganismos y realización de análisis químicos en superficie. Por cada sitio de muestreo se tomaron cuatro muestras, de las cuales dos de ellas se fijaron en una solución de formaldehído (FAA) y dos con alcohol etílico al 96%.

Las muestras para análisis petrográficos fueron tomadas en 6 puntos diferentes del manantial hidrotermal (Figura 7). El tamaño de la roca fue mayor a 4x2x1 cm, debido a que es el requerido para la realización de láminas delgadas según Rendón (Rendón, 1995).

2.2 Métodos de laboratorio

Para el desarrollo de este proyecto se empleó SEM para estudiar la estructura de los minerales y de los microorganismos presentes, se observaron las marcas de disolución ocasionados por los microorganismos y se evaluó la composición química presente con ayuda de EDS; adicionalmente se hizo petrografía en secciones delgadas para identificar contactos entre minerales, matriz y la proporción de cada uno de ellos en la roca; por último se realizó un análisis fisicoquímico del agua, con dos equipos: el MP-AES 4200 para el estudio de cationes y el Sistema de Cromatografía Iónica (ICS-2000) para los aniones, lo cual permitió conocer la composición del agua en el medio.

2.2.1 Análisis de aniones y cationes

Los aniones y los cationes principales se determinaron en el laboratorio de hidrogeoquímica del CICESE. Se utilizó el sistema de cromatografía de iones (ICS-2000), para obtener la concentración de aniones (Cl^- , NO_3^- , Br^- y SO_4^{2-}). Para medir la concentración de cationes (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Sr^{2+} , Fe^{2+} y Al^{3+}) se usó espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (MP-AES). El MP-AES 4200, trabaja con una fuente de plasma por microondas excitada magnéticamente. La emisión

de luz del plasma se dirige a un detector de amplio intervalo y bajos niveles de ruido que permite medir los espectros y corregir el ruido de fondo simultáneamente, proporcionando a la vez unos límites de detección y una precisión óptimos, inferiores a las partes por billón (ppm). El ICS-2000, tiene un sistema de detección por conductividad, además permite reducir la conductividad de fondo y proporciona alta relación señal-ruido.

A partir de la información de aniones y cationes de cada sitio de muestreo y para facilitar la clasificación del agua subterránea, con la cual se puede conocer su naturaleza química de acuerdo a Piper (1944) y Back (1966) (Figura 3), se construyó un diagrama Piper utilizando el software "The Geochemist's Workbench" (GWB).

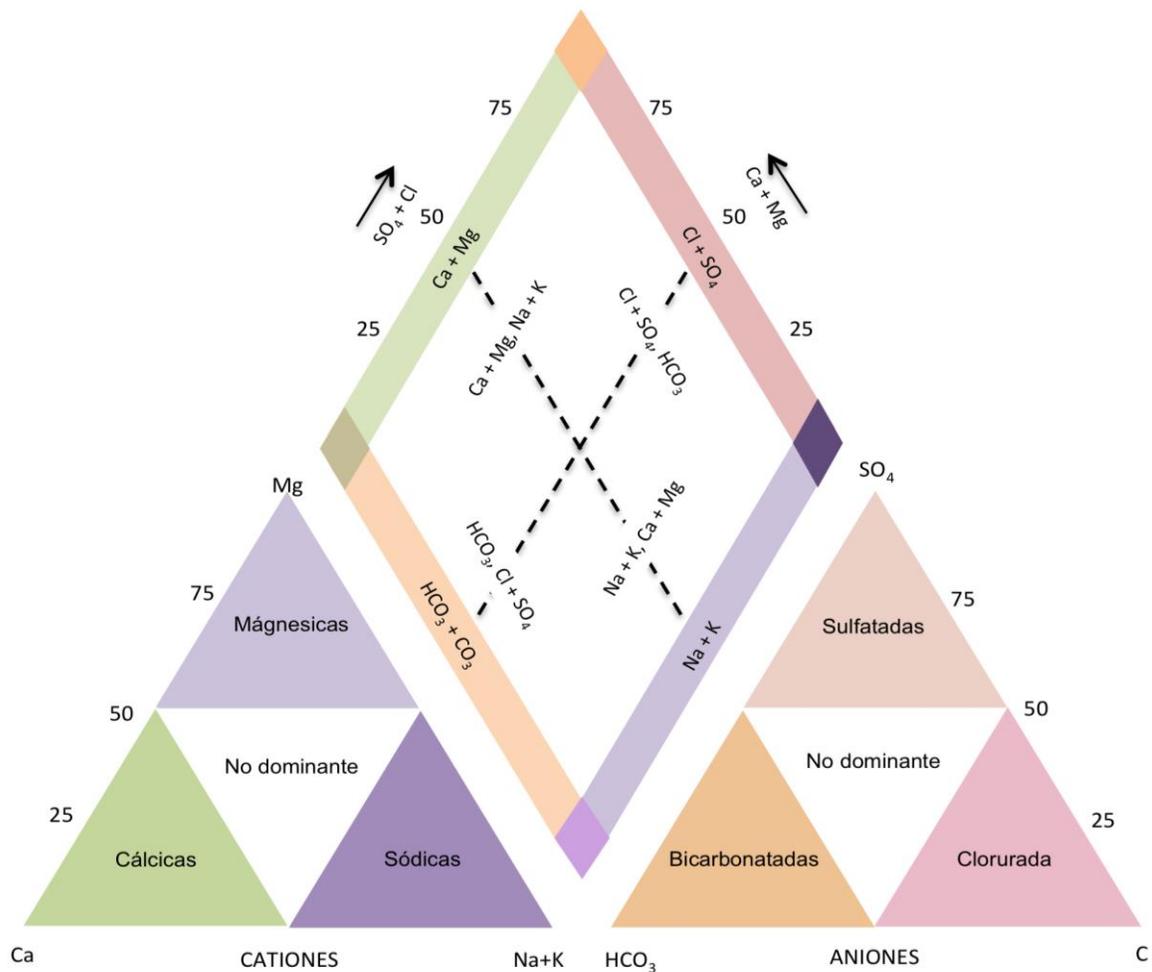


Figura 3. Facies hidrogeoquímicas basadas en porcentajes del total equivalente de cada ion (Back, 1966).

2.2.2 Análisis Petrográficos

La composición mineralógica de la roca se realizó con el análisis petrográfico, en láminas delgadas. Estas se realizaron en el laboratorio de preparación de rocas y minerales del CICESE, siguiendo el procedimiento previamente descrito por Rendón (1995), como se detalla a continuación:

1. Las muestras de rocas se cortaron con una sierra con disco de borde diamantado para obtener prismas rectangulares de 4 x 2 x 1 cm, aproximadamente. El prisma se lavó con agua corriente y posteriormente con agua destilada.
2. Un lado del prisma se pulió sobre un plato de hierro usando polvo de carburo de silicio de grado 600 y agua como lubricante. Con el fin de remover el abrasivo y el material fino generado durante el corte, el prisma se colocó en ultrasonido por tres minutos en agua y finalmente se enjuagó con agua destilada y se dejó 24 horas en un horno a 60°C para eliminar completamente la humedad.
3. Utilizando Epoxy-patch, sobre la cara pulida del prisma se pegó un portaobjeto petrográfico haciendo presión y cuidando que no quedaran burbujas de aire. La muestra se dejó secar en una plancha caliente durante dos horas. Una vez secos los portaobjetos fueron marcados con un lápiz de diamante para la identificación de la muestra.
4. En una cortadora-rectificadora INGRAM se realizó un segundo corte para lograr una lámina de dos a tres milímetros de espesor. Posteriormente, con la rectificadora, la lámina se desbastó para reducirla a un espesor de 150 a 200 μm .
5. Finalmente la lámina se trató en una desbastadora para obtener un grosor de 30 μm . Se limpió y se cubrió con un cubreobjetos utilizando bálsamo de Canadá.
6. La lámina delgada se analizó en el laboratorio de petrografía del CICESE utilizando un microscopio petrográfico Olympus BX60.



Figura 4. Procedimiento visual de los pasos realizados para la elaboración de las secciones delgadas de roca, de izquierda a derecha en 1) se puede ver la roca en su estado original y en 6) lámina delgada obtenida.

2.2.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se usó un microscopio electrónico de barrido *JEOL JSM-35c* del Departamento de Geología del CICESE. El microscopio *JEOL JSM-35c*, permite obtener de forma simultánea micrografías electrónicas y espectroscopia de energía dispersiva (EDS) de rayos X, que permite la identificación de minerales y aporta información química por punto o también un promedio por un área seleccionada. Por lo tanto, el análisis de microsonda EDS se utilizó para conocer la composición elemental de los minerales, y además la presencia de microorganismos presentes.

2.2.3.1 Análisis de minerales en superficie

Los análisis de minerales en superficie requirieron de un recubrimiento de carbón,

debido a que el recubrimiento con oro causaba el solape de los orbitales de oro-azufre. La observación se enfocó en identificar la morfología de minerales de roca y en estructuras asociadas a minerales secundarios formados por el flujo hidrotermal.

2.2.3.2 Análisis de microorganismos

Las muestras secas con los microorganismos fijados se recubrieron con oro, para una mejor observación de la morfología microbiana. El recubrimiento con oro se realizó en la Unidad de Nanocaracterización de la UNAM. El estudio se enfocó en obtener micrografías a diferentes escalas, encontrándose imágenes de hasta 1 μm y en la observación de estructuras diferentes a minerales de roca y diferenciarlos por las formas alargadas y de bacilos, así como por el desarrollo en colonias.

2.2.3.3 Análisis en microsonda EDS

La técnica por espectroscopia de energía dispersiva de rayos X es no destructiva y aporta información cualitativa y cuantitativa de la composición elemental en la superficie de la muestra, con límites de detección del orden de ppm. El detector del equipo genera un pulso de carga proporcional a la energía del rayo X y posteriormente este pulso se convierte en voltaje. La señal digitalizada se almacena en un canal asignado a esa energía en el analizador multicanal, y los separa (dispersa) en un espectro según su energía.

Para este análisis se utilizó una carga electrónica de 15 kV, la cual era la máxima soportada por los microorganismos después del recubrimiento metálico. Para este análisis fue necesario para descartar estructuras biológicas de los minerales presentes en la roca, debido a que se presentaban mezclados, impidiendo un fácil reconocimiento de los mismos.

2.2.4 Fijación de microorganismos

Para la fijación de microorganismos en la roca se usaron dos procedimientos, uno con alcohol etílico al 96% y otro con una solución FAA que consiste en 50% de etanol, 5% de ácido acético glacial, 10% de formol y 35 % de agua destilada (Watson et al., 1980). Los fijadores permitieron conservar de manera definitiva la estructura microbiana al momento de tomar la muestra, e impidieron el desprendimiento de los microorganismos de la roca. Antes de poner la muestra en contacto con el fijador, se disminuyó la temperatura a la que se encontraba ($\sim 70^{\circ}\text{C}$), para lo cual se colocó la roca con agua del manantial en un recipiente previamente esterilizado. Cuando la muestra alcanzó la temperatura ambiente, el agua se reemplazó con el fijador. Las rocas se guardaron en envases con la solución fijadora para su transporte al laboratorio, en donde se transfirieron con pinzas estériles a placas Petri de polipropileno estériles. Para eliminar cualquier humedad existente, las placas se mantuvieron en un desecador más de una semana antes de su análisis.



Figura 5. Tubos de polipropileno con soluciones fijadoras (alcohol etílico al 96% y solución FAA), para las muestras de roca y agua de manantial antes de ser transportadas al laboratorio.

2.3 Abundancia relativa de microorganismos

En el SEM se realizaron mediciones de áreas de los microorganismos individuales observados en las micrografías, además como también en los encontrados en ecosistemas organizados como las biopelículas. Para esto se seleccionaron 4 sitios diferentes para cada muestra; se obtuvieron las distintas micrografías a la misma escala. Posteriormente, por cada punto analizado se midieron sus áreas a través del programa ArcGis. Una vez obtenido el área de los distintos microorganismos por cada micrografía se procedió a obtener un promedio porcentual. Este procedimiento fue debido a que la presencia de microorganismos no es constante a lo largo de toda la muestra analizada. Los datos obtenidos se presentan de forma gráfica junto con los valores de temperatura de los sitios en donde se tomaron las muestras (Figura 12).

2.4 Índices de saturación mineral

Con los resultados hidrogeoquímicos obtenidos de las muestras de agua, se construyeron dos modelos geoquímicos, los cuales se basan en la ecuación de balance de masas para calcular los índices de saturación mineral (IS). Esto permite predecir qué minerales son más probables que precipiten o se disuelvan. Los análisis se realizaron con el software “The Geochemist’s Workbench” (GWB); este programa es utilizado globalmente para el cálculo de reacciones químicas, balances e índices de saturación de minerales en cuerpos de aguas.

El estado de equilibrio de una fase sólida en una solución se determina con el IS, que indica si una muestra de agua tenderá a disolver o a precipitar un mineral determinado. El IS puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$IS = \log (PAI/Kps) \quad (1)$$

Donde PAI es el producto de las actividades de los iones implicados en el proceso de precipitación/disolución y Kps, el producto de solubilidad de la fase solida o valor del

producto de las mismas actividades en condiciones de equilibrio termodinámico. Si el valor del IS es negativo, la solución está subsaturada con respecto a la fase sólida definida por K_{ps} , por lo que ésta tiende a disolverse. Si el valor de IS es positivo, la solución está sobresaturada con respecto a la fase sólida definida por K_{ps} , esta tiende a precipitar la fase sólida.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Mediciones de campo

Por cada punto de muestreo se realizó la medición de los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), salinidad y sólidos disueltos totales (TDS). Los valores de conductividad eléctrica y salinidad tienen una relación inversa con la temperatura. El agua caliente estuvo por debajo del valor promedio del agua de mar (52 mS/cm), y la conductividad aumentó cuando la temperatura de las muestras disminuyó. De igual forma los valores de salinidad mostraron un aumento a medida que la temperatura del fluido hidrotermal disminuía, acercándose al valor promedio de agua de mar (35 g/L (Tabla 1).

Para apreciar gráficamente la distribución espacial de las condiciones de campo se realizaron mapas de distribución para cada parámetro medido (apéndices XXVIII al XXXI). En los gráficos obtenidos se observa un gradiente en la temperatura, con las mayores temperaturas en el lado oeste de la fosa hidrotermal, donde se ubica la zona de fractura principal. Los valores de pH cambiaron en la fosa hidrotermal, registrándose el más alto (10.4) en la muestra YAPU01 que también presentó la mayor temperatura. El menor pH (6.65) se obtuvo en la muestra YAPU08.

Tabla 1. Valores obtenidos *in situ* para muestras del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C.

MUESTRA	TEMP. (°C)	pH	CE (mS/cm)	SALINIDAD (g/L)	TDS (g/L)
YAPU01	73.7	10.4	43.99	27.01	44.50
YAPU02	69.1	7.6	43.66	27.39	45.34
YAPU03	62.7	7.3	44.10	27.45	45.42
YAPU04	61.0	6.8	44.34	27.88	44.70
YAPU05	60.1	6.8	44.45	27.98	43.22
YAPU06	60.0	6.7	44.64	28.01	43.60
YAPU07	59.9	6.7	45.10	28.55	45.02
YAPU08	57.4	6.7	45.86	29.45	48.64
YAPU09	54.2	6.7	46.74	30.28	50.70
YAPU10	51.1	7.8	49.99	31.66	52.70
YAPU11	49.9	6.9	50.10	31.72	48.74
YAPU12	46.4	6.8	49.60	31.72	50.64
YAPU13	41.4	6.9	48.76	31.74	51.50
YAPU14	39.2	6.8	48.86	31.76	51.12
YAPU15	37.2	7.1	48.85	31.80	51.48
YAPU16	32.7	7.1	50.10	31.87	53.20

3.2 Petrografía

La ubicación de la toma de muestras para la elaboración de secciones delgadas se pueden ver en la Figura 7. Las muestras del afloramiento rocoso masivo presentan un color gris claro en fractura, con variaciones a tonos marrones y rojizos más oscuros en la cara expuesta al intemperismo. La roca analizada se encuentra principalmente alterada por acción del fluido hidrotermal. La parte de mayor oxidación se encuentra silícificadas. Las láminas delgadas mostraron principalmente material vítreo, reemplazamiento de minerales relictos por cuarzo, alejados de la zona de emanación y fractura. Los reemplazamientos de minerales relictos por cuarzo se notaron en mayor proporción en las muestras lejanas al punto de emanación del fluido hidrotermal. La piritita se pudo notar en las láminas delgadas lejanas al punto de mayor temperatura YAPUP-3, YAPUP-4, YAPUP-5 y YAPUP-6. La mineralogía a detalle por cada sitio de muestreo se puede ver en la Tabla 2.

3.3 Ambientes de formación

3.3.1 Paragénesis de la alteración hidrotermal

El uso de la petrografía permitió identificar pirita en la roca consolidada. Esta se observó en mayor proporción en las láminas delgadas de los sitios de muestreo lejanos a la fractura donde emana el fluido hidrotermal (Figura 6).

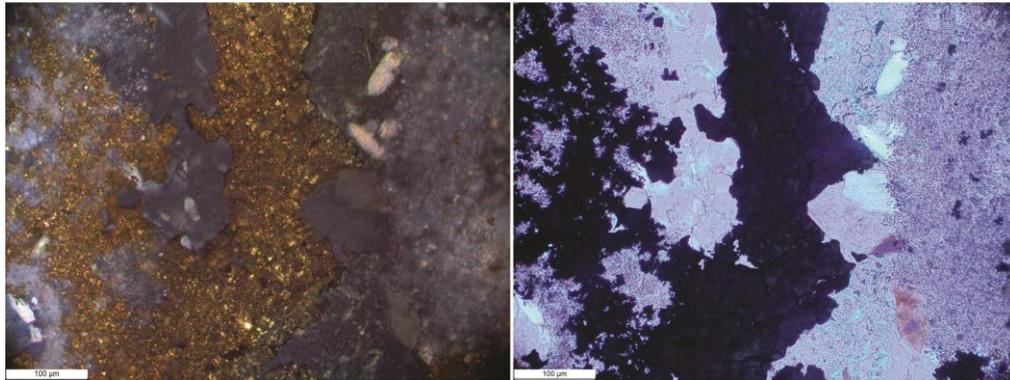


Figura 6. Micrografía de la muestra YAPUP-3 en el manantial hidrotermal de Puertecitos. Mostrando pirita en una fractura y diseminada en el lado izquierdo. Esto sugiere condiciones anóxicas.

Sobre la superficie de la roca en contacto con el fluido caliente se observó principalmente sílice amorfo (SiO_2) y en menor proporción yeso. Este último se encontró principalmente en las cavidades, en cristales alargados con un espesor promedio de 2.5 μm y una longitud de 15 μm (Figura 10-a).

Tabla 2. Mineralogía de la roca en contacto con el fluido hidrotermal del manantial hidrotermal de Puertecitos.

MUESTRA	MINERALOGIA	CARACTERISTICAS
YAPUP-1	Mayor abundancia de material vítreo, seguido de reemplazamiento de minerales relictos por cuarzo	Matriz fina abundante. Morfología de minerales primarios de la roca (minerales euhedrales), previos al reemplazamiento
YAPUP-2	Material vítreo con minerales relictos reemplazados por cuarzo	Se comenzó a observar ondulaciones en minerales reemplazados de plagioclasas por cuarzo
YAPUP-3	Mayor reemplazamiento de minerales primarios. Se observó vidrio volcánico y sulfuros de hierro	Reemplazamiento de plagioclasas por cuarzo cercanos a la superficie en contacto con el fluido hidrotermal

YAPUP-4	Contenido de sulfuros de hierro (pirita) abundantes. Continua observándose reemplazamiento de plagioclasas por cuarzo pero en mayor proporción	El contenido de sulfuros de hierro es fácilmente observado y las secciones delgadas mostraron un color moderadamente marrón. Textura vesicular.
YAPUP-5	Reemplazamiento de cuarzo minerales relictos. Sulfuro de hierro (pirita). Pequeños minerales opacos, posiblemente magnetita.	Reemplazamiento de plagioclasas por cuarzo. Pseudomorfismo mineral con recristalizaciones de cuarzo. Mayor abundancia de pirita observada en todas las muestras

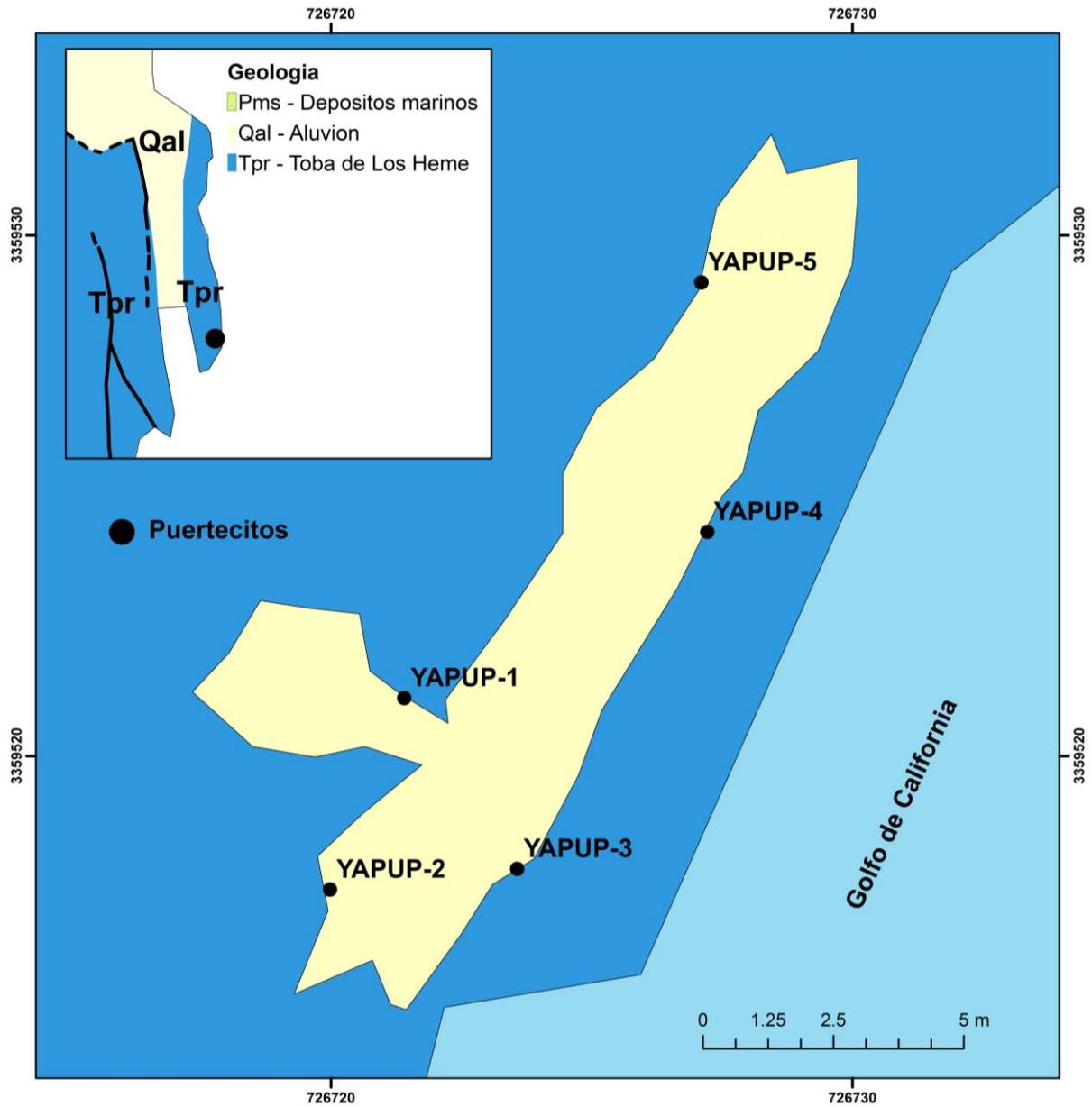


Figura 7. Ubicación espacial de los sitios de muestreo para las secciones delgadas en el manantial de Puertecitos.

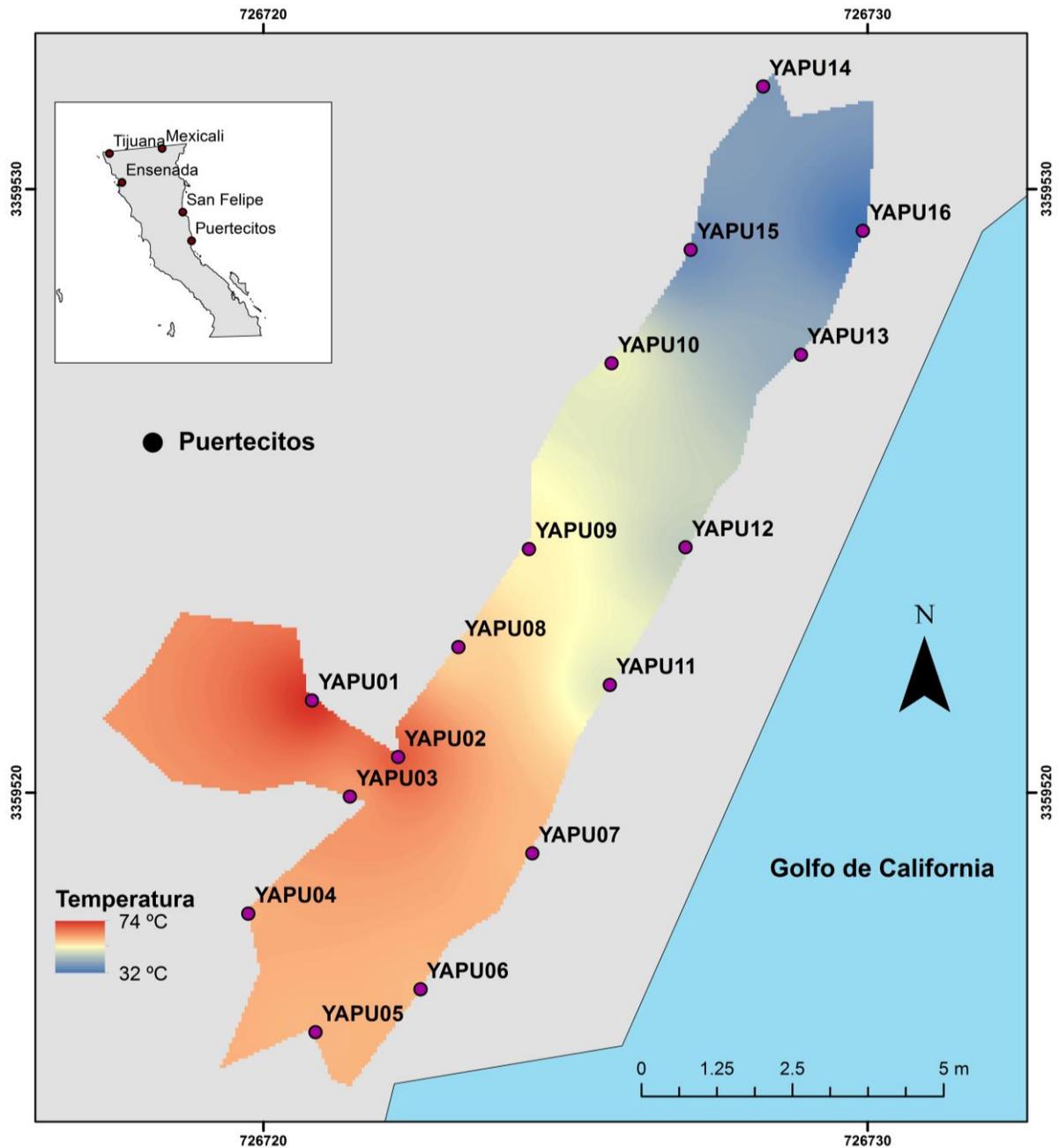


Figura 8. Distribución de temperatura en la fosa hidrotermal de Puertecitos. La muestra YAPU01 se ubica en la zona de emanación del agua caliente en la fractura del Plioceno.

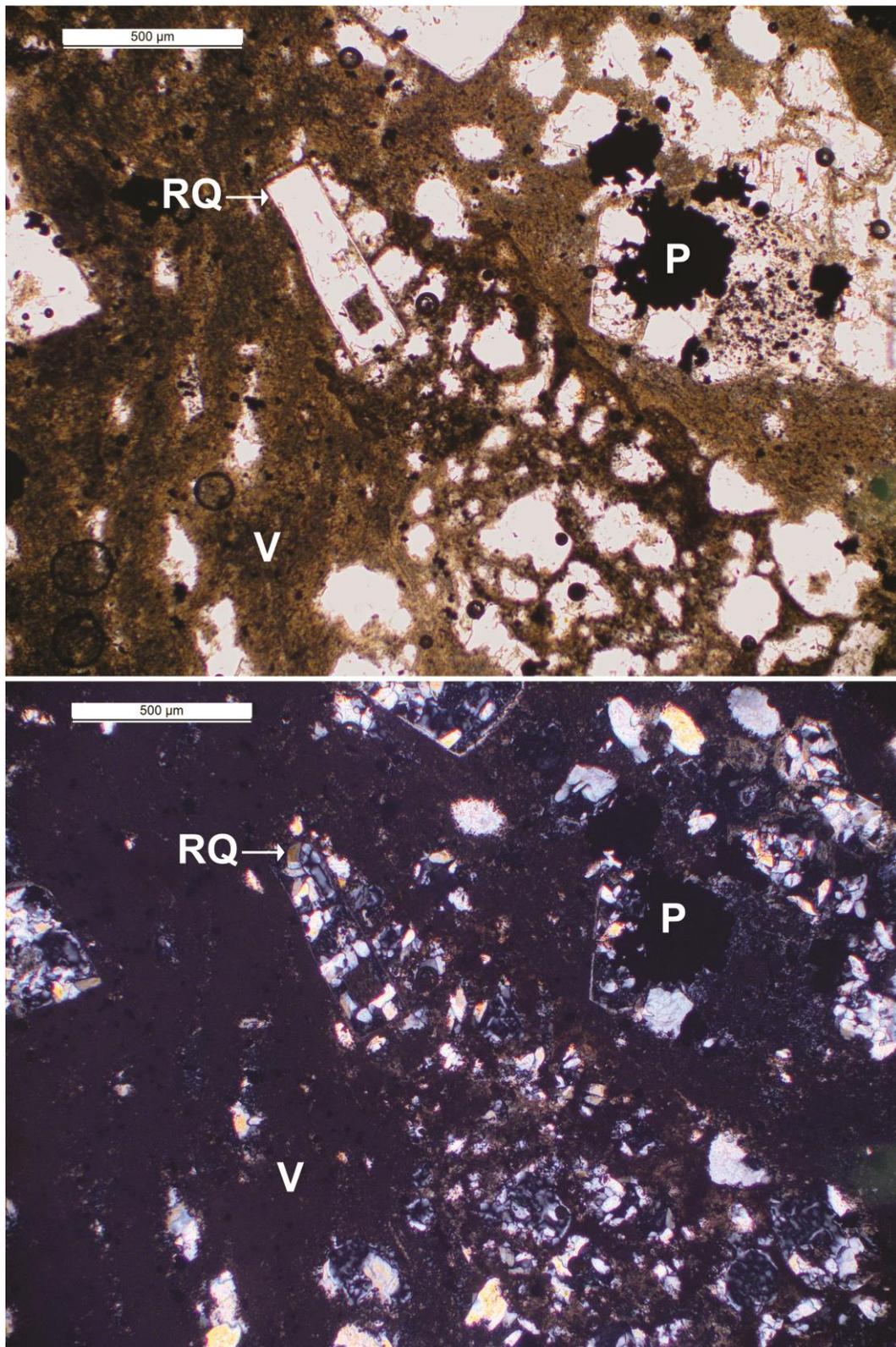


Figura 9. Petrografía de la muestra YAPUP-4 en el manantial hidrotermal de Puertecitos. RQ) recristalización de cuarzo a partir de un cristal de plagioclasa dentro de un fragmento lítico o pómez, P) pirita, V) vidrio volcánico que contiene agregados de mica muy birrefringentes.

3.3.2 Microorganismos

La zona con mayor temperatura mostró silicificación de restos de microorganismos plantónicos la cual pudo observarse hasta temperaturas de 45 °C. Aunque la roca es homogénea se pudo observar la inclusión de fragmentos biogénicos junto a sílice amorfa (Figura 10-b). Esta zona concentró la mayor actividad orgánica y en algunos lugares, se encontraron bacterias fosilizadas, restos de diatomeas y cianobacterias.

Se encontraron microorganismos individuales como bacilos, cocos, estructuras biomórficas y biopelícula. Las estructuras biomórficas mostraron principalmente formas alargadas (Figura 11-a), con tamaños variables entre 8 y hasta 14 μm de longitud y espesores no mayores de 0.5 μm . Estos presentaron variación en el contenido de sílice en su estructura en relación con carbono, aumentando el primero a medida que el otro disminuía al ser atrapados por la precipitación de mineral de la roca (véase composición química, página 27).

Los microorganismos en forma de cocos se observaron en menor proporción. Estos aparecen principalmente sobre restos de diatomeas y sobre precipitados de minerales, compuestos mayormente de sílice (Figura 11-b). La identificación de estos microorganismos se realizó a partir de morfología circular que los caracteriza, debido a que su tamaño $<5 \mu\text{m}$ impedía la realización de análisis de EDS. Los microorganismos con forma de bacilo aparecen en colonias y ubicados sobre la cara lisa de los minerales de sílice y su composición presenta sílice en su estructura, permitiendo reconocerlos rápidamente. Los bacilos encontrados tuvieron tamaños variables de 0.5 a 3 μm (Figura 11-c). Algunos fueron encontrados de manera individual sobre recristalizaciones de sílice sobre la roca.

Las biopelícula encontradas en sitios de temperaturas menores a 45°C, mostraron un patrón morfológico diferente entre las muestras analizadas. Pudiendo notarse mayor heterogeneidad en los sitios con menor temperatura (Figura 11-d).

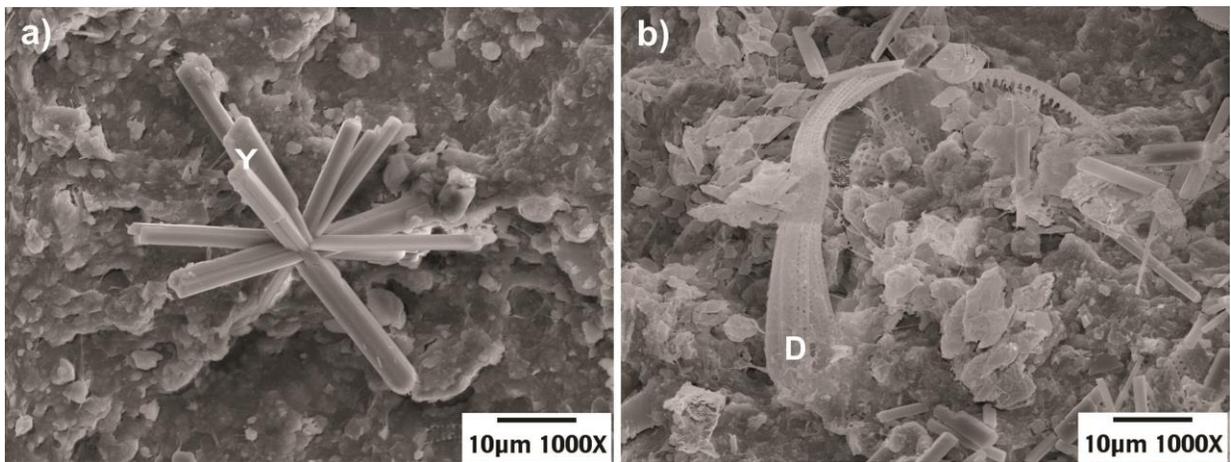


Figura 10. Micrografías en SEM de muestras YAPU03, YAPU09 y YAPU16 del manantial hidrotermal de Puertecitos, a) formación de yeso acicular en agregado radial de hasta 20 µm (Y), b) silicificación de restos de microorganismo, principalmente diatomeas (D).

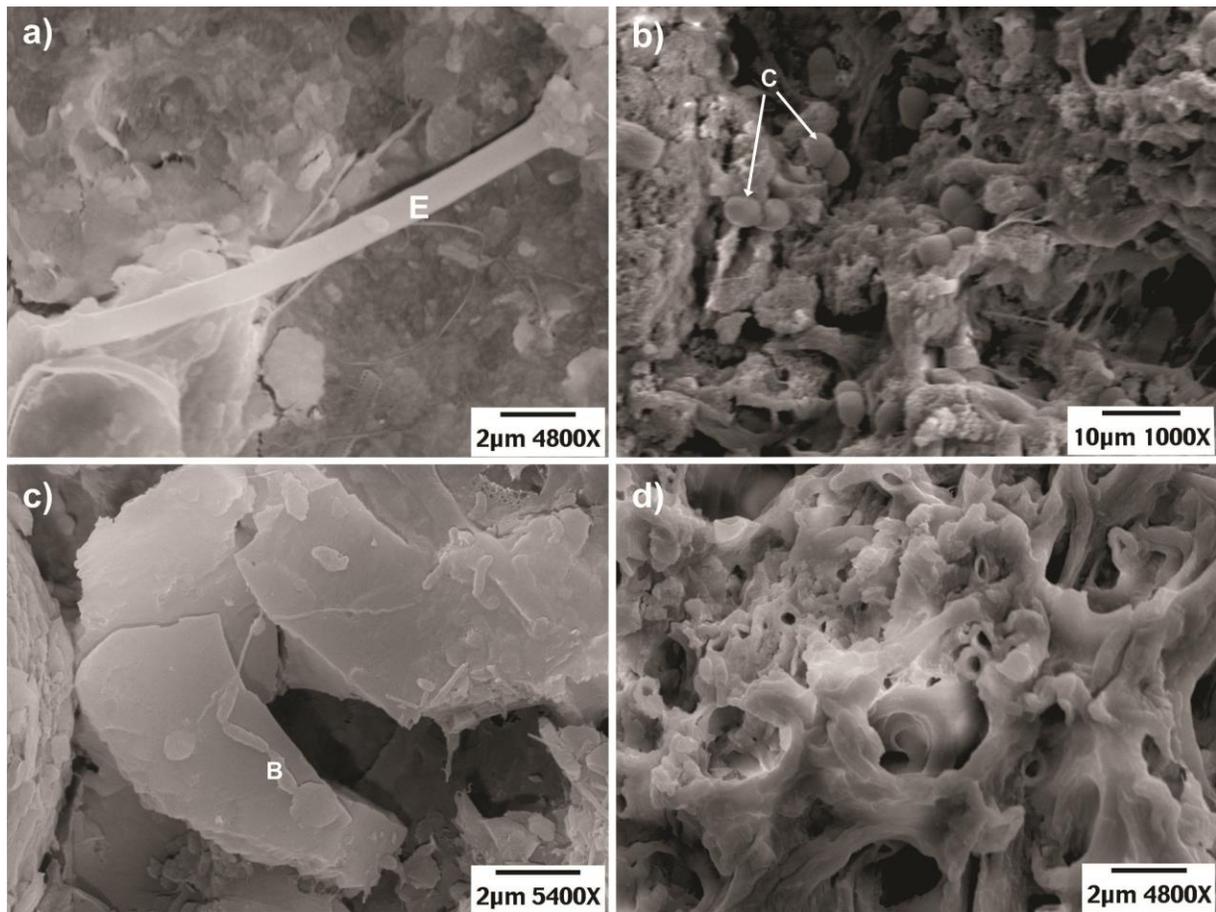


Figura 11. Micrografías en SEM de microorganismos adheridos a la roca de muestras YAPU05, YAPU06, YAPU07 y YAPU16 del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. a) Estructuras biomórficas alargadas de origen desconocido (E), b) coccos sobre diatomeas (C), c) colonias de bacilo sobre la cara lisa de minerales (B) y d) biopelículas conformado por varios microorganismos en forma irregular.

3.4. Abundancia relativa de microorganismos

Para representar los resultados de áreas obtenidos de cada punto de muestreo, se construyó un gráfico de temperaturas y áreas porcentuales (Figura 12). Se representaron microorganismos individuales como las estructuras biomorficas alargadas mayores a 6 μm de longitud, debido a que por su tamaño no se pudieron agrupar como bacterias o arqueas, su forma irregular no permitió diferenciarlos de alguna clase de microorganismos. Los microorganismos con forma de bacilo, se agruparon en otro grupo permitiendo diferenciar abundancias relativas entre ellos por cada punto de muestreo.

Adicionalmente, se representaron en el mismo grafico los microorganismos formadores de biopelícula. Estos comenzaron aparecer a partir de la muestra YAPU12, aumentando su abundancia por unidad de área en los sitios con menor temperatura.

En el rango de temperatura de 49.9 a 46.4°C no se notó la presencia de ningún microorganismo, sólo se observó materia mineral de la roca. En cambio para microorganismos biopelícula, hicieron aparición desde el sitio de muestreo YAPU-12 (46.4°C) hasta el de menor temperatura registrado YAPU-16 (32.7°C).

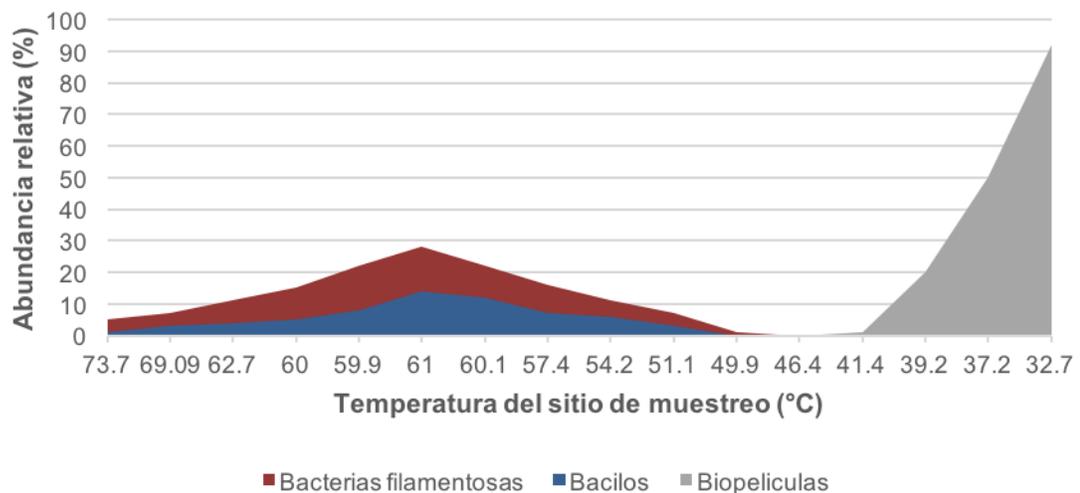


Figura 12. Abundancias relativas de microorganismos respecto a la temperatura por cada sitio de muestreo. La mayor abundancia de bacterias y bacilos se presenta de 59.9°C a 61°C. Las biopelículas aparecen en temperaturas menores de 45°C.

3.5 Composición química de estructuras biogénicas

La composición de las estructuras biogénicas está influenciada principalmente por el sílice. Los análisis de microsonda EDS realizados indicaron la presencia de sílice en todos los microorganismos observados, similar a la composición mineral de la roca.

Las micrografías obtenidas para microorganismos fueron recubiertas metálicamente con oro. Esto permitió el reconocimiento cualitativo de carbón en sus estructuras, el cual fue característico de actividad biológica y estuvo presente sólo en las bacterias filamentosas y en los microorganismos en forma de bacilo, permitiendo diferenciarlos del sustrato mineral (Figura 13). No obstante, se encontraron evidencias de microorganismos sobre minerales de aluminosilicatos, probablemente esquistos de vidrio volcánico primario. Se observaron rasgos de disolución mineral y se interpretaron como asociados a microorganismos debido a que dentro y fuera de los huecos, la composición química no vario (Figura 14).

En los análisis con EDS la respuesta de oro (Au) del cubrimiento se solapa con la respuesta de azufre (S). Para evitar esta interferencia se realizaron recubrimientos de carbón a muestras tomadas del mismo sitio, para analizar las formas que presentan el traslape de estos elementos en la curva de energía dispersa. Con ello, en la mayoría de las muestras se pudo encontrar yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y notar con claridad la diferencia en las curvas de S y Au, lo cual puede observarse en la Figura 15.

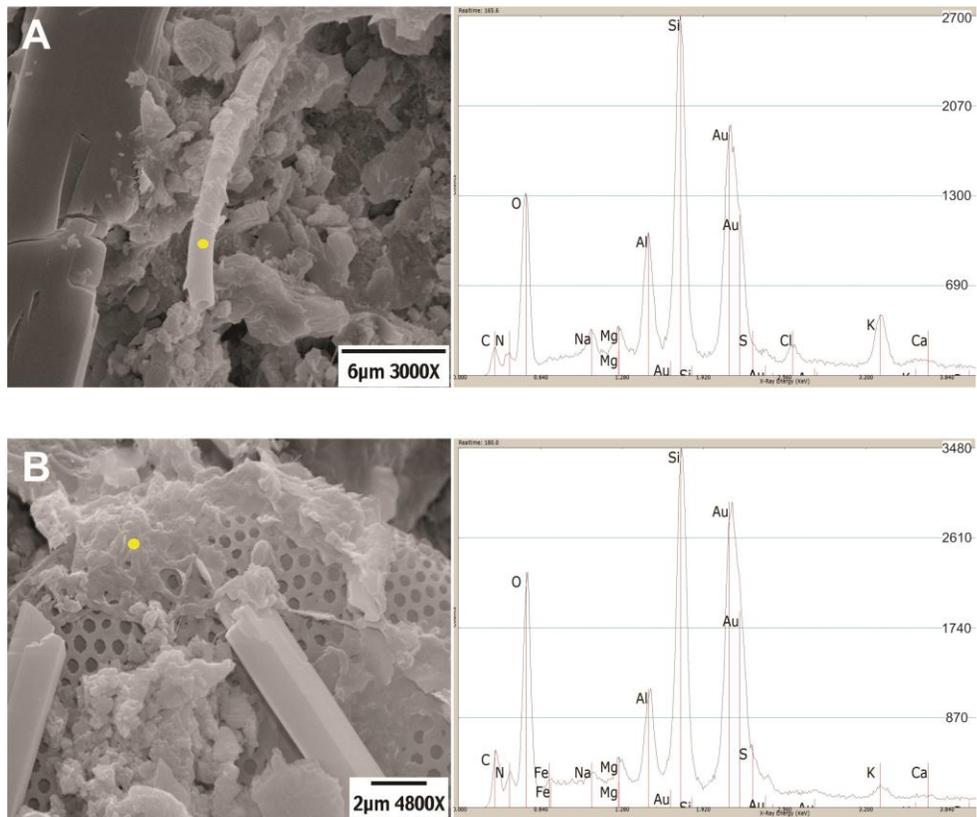


Figura 13. Presencia de microorganismos diferenciados a partir de elementos de carbón y nitrógeno en el manantial de Puertecitos, B.C. A) Estructura biomorfa con recristalización de sílice, muestra YAPU04. B) Microorganismos en forma de barra (bacilo), mezclados con material silíceo, muestra YAPU06. El punto amarillo indica el lugar donde se realizó el análisis químico mostrado a la derecha.

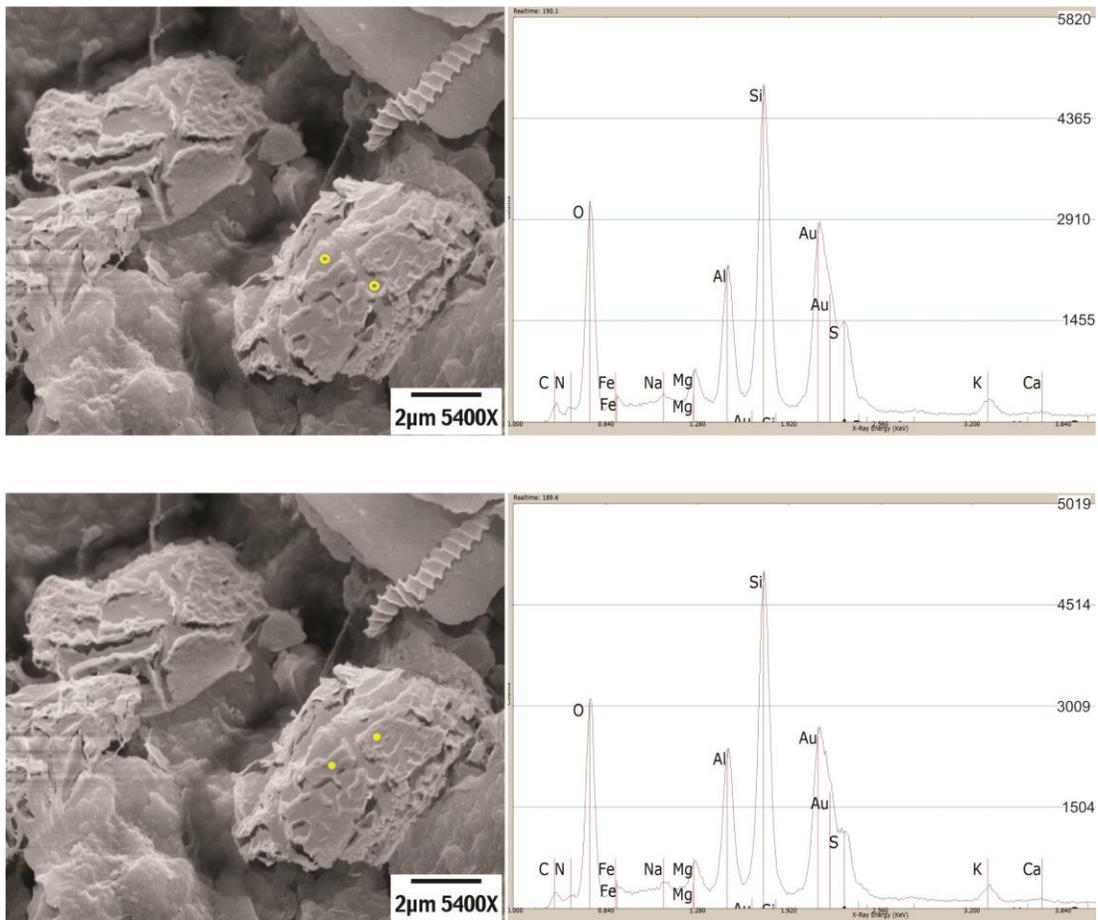


Figura 14. Evidencias de alteración por microorganismos en rocas colectadas del manantial de Puertecitos, B.C (Muestra YAPU08). Los puntos amarillos indican el análisis químico por EDS mostrado a la derecha. Los análisis de la composición elemental realizados en ambos lados de la marca encontrada, no indicaron diferencia elemental entre los puntos señalados.

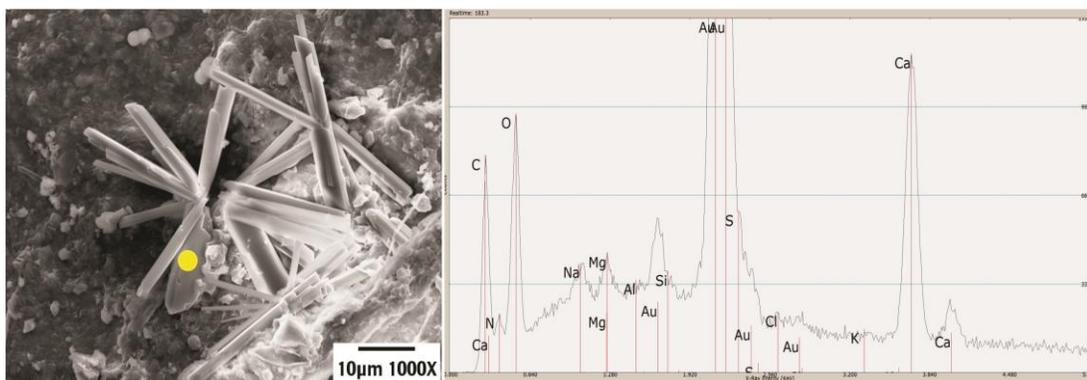


Figura 15. Análisis EDS realizado al mineral yeso en muestras de manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. Se obtuvo a partir de recubrimiento de carbón para eliminar el problema causado cuando se recubrió con oro. El punto amarillo indica el lugar donde fue realizado el análisis químico que se muestra a la derecha de la figura.

3.6 Alteración hidrotermal

Entre los factores más importantes que afectan el área de estudio se encontraron la temperatura y la composición del fluido hidrotermal, importantes para la mineralogía hidrotermal resultante de un proceso de alteración.

El fluido hidrotermal analizado se recolectó en la salida de agua de una fractura en la roca (YAPU-1). Además, se tomó otra muestra de agua en la menor temperatura (YAPU-2), los análisis fisicoquímicos de cada muestra pueden verse en la Tabla 3. Estos análisis variaron en sus concentraciones, la muestra de agua de mayor temperatura indico mayor concentración para SiO_2 , SO_4^{2-} y Ca^{2+} en comparación con la muestra de agua de menor temperatura.

Tabla 3. Análisis fisicoquímicos obtenidos para las muestras de agua YAPU01, en el sitio de mayor temperatura en el manantial de Puertecitos, y YAPU16 en la salida de la fosa al mar (VND: Valor no detectado).

	YAPU01 (ppm)	YAPU16 (ppm)
Ca^{2+}	770	341
Mg^{2+}	711	684
Na^+	2240	2020
K^+	341	333
HCO_3^-	0.112	0.108
SO_4^{2-}	1990	394
Sr^{2+}	64.8	64.8
Cl^-	13900	10100
SiO_2	49.1	1.6
Fe^{2+}	0.43	0.56
Al^{3+}	VND	VND
Br^-	VND	VND
NO_3^-	VND	VND
pH	10.4	7.1
Temp ($^{\circ}\text{C}$)	73.7	32.7

3.6.1 Diagramas hidrogeoquímicos

La formación de minerales secundarios y la alteración de minerales primarios se ve influenciada por la química y la temperatura del agua. Para clasificar el fluido presente

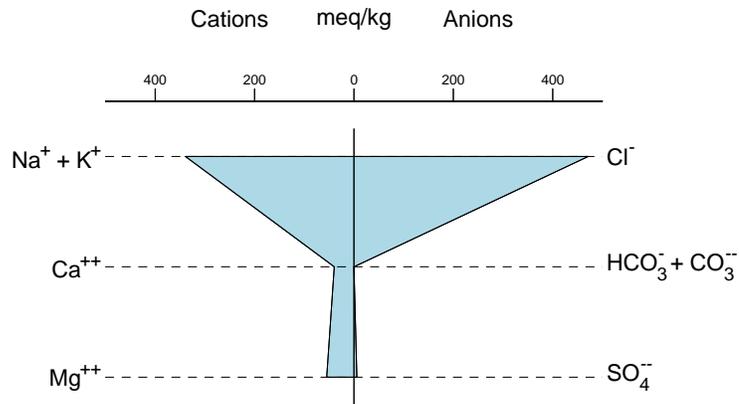


Figura 18. Diagrama de Stiff para la muestra YAPU16 que representa los aniones y cationes mayores en las muestras analizadas del manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., indicando alto contenido de cloruro y sodio.

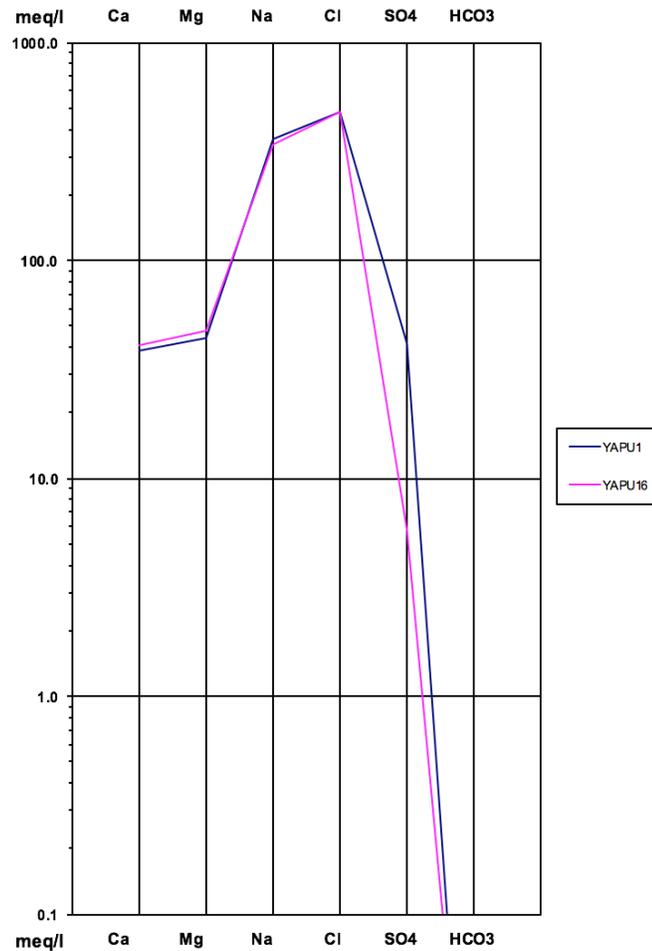


Figura 19. Diagrama de Schoeller representando la mayor concentración de elementos medidos en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C., evidencia un bajo contenido de bicarbonatos y alto contenido en cloruro y sodio en las muestras de aguas analizadas.

3.6.2 Condiciones geoquímicas

A pesar de que el yeso es soluble en agua de baja temperatura, las condiciones de temperatura permitieron una excelente conservación de los cristales observados en el SEM (Figura 20). Debido a que el yeso fue el mineral más abundante encontrado en las micrografías, se calculó el Índice de Saturación (IS) para yeso a diferentes temperaturas a partir de los resultados fisicoquímicos de las muestras de aguas analizadas. El cálculo se realizó a través del programa "The Geochemistry's Workbench" (GWB). Estos resultados permitieron conocer si el mineral está en presuntamente en disolución y/o precipitación. El perfil para yeso de IS respecto a la temperatura se puede ver en la Figura 23. El cual muestra un aumento en los valores negativos a medida que la temperatura disminuye, lo cual es asociado a disolución del mineral.

La condición intermareal no permite crecimiento constante de minerales en las zonas más frías, cercanas al mar. Sin embargo, estas condiciones no impidieron la formación de minerales de yeso en donde se tenían mayores temperaturas; ubicándose específicamente en zonas de menor relieve en la superficie de la roca (Figura 20a).

Por otro lado, en las zonas de la fosa hidrotermal donde las temperaturas son mucho menores (35 °C aproximadamente), no se encontró yeso, debido a que las condiciones no son las adecuadas para su formación (TDS y temperatura), sin embargo, se encontraron capas de biopelícula, siendo condiciones idóneas para la acumulación de materia orgánica y microorganismos. Además, en las condiciones de baja temperatura se encontró una disminución en iones de Ca^{+2} , SO_4^{-2} y SiO_2 (Tabla 2).

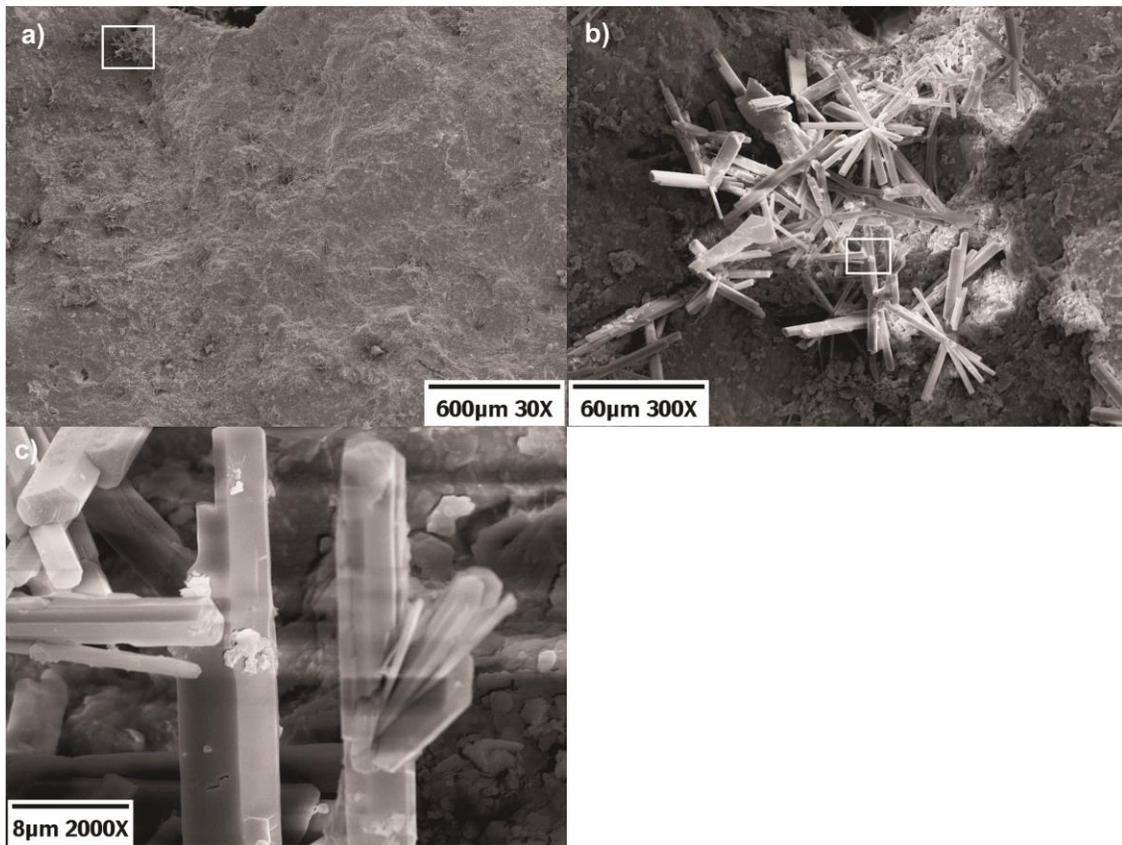


Figura 20. Formación de minerales de yeso en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. (Muestra YAPU03). A) Minerales de yeso formados principalmente en zonas de menor relieve sobre la superficie de la roca en contacto con el agua (600 μm) B y C detalle de los cristales de yeso en agregados radiales.

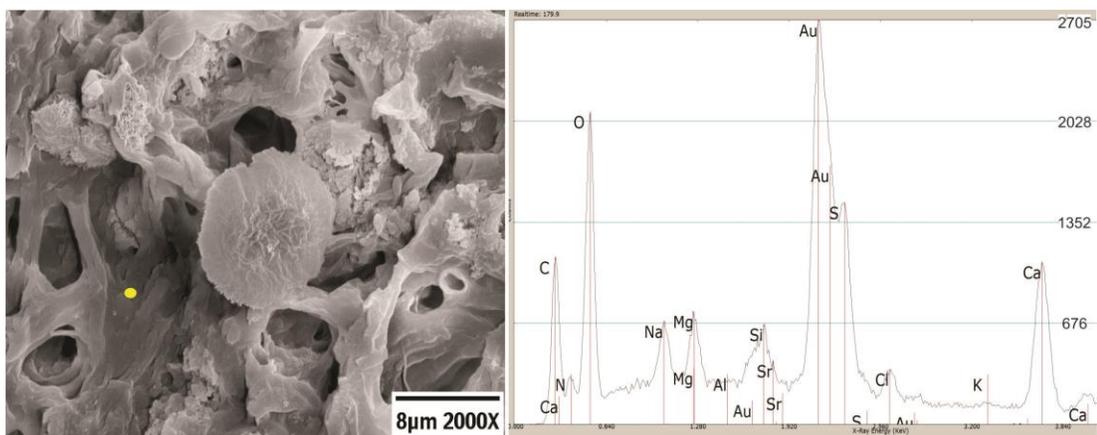


Figura 21. Imagen en SEM de la muestra YAPU16. El análisis puntual (en amarillo) indica la presencia de Si, Mg, Na y Ca en esta muestra tomada en la zona de menor temperatura.

3.6.3 Mineralizaciones

Los análisis petrográficos permitieron identificar alteraciones de la roca anteriores a las recientes. Se pudo observar disolución de minerales primarios posiblemente plagioclasas, encontrándose evidencias en la forma de cristales que fueron ocupados por el cuarzo.

En eventos recientes de mineralización se encontraron principalmente sílice amorfo y yeso. Estos fueron apreciados en superficie a través de los análisis de SEM. La integración de resultados de análisis petrográficos y microscopía electrónica de barrido permitieron conocer las mineralizaciones de la roca como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Alteración de rocas del manantial hidrotermal de Puertecitos observadas a partir de análisis petrográficos y microscopía electrónica de barrido.

Minerales primarios (Aparicio-Ceja, 1999)	Mineralizaciones secundarias (Análisis de petrografía y SEM)
65% material vítreo, como esquirlas de vidrio y lapilli pumicítico.	Disolución de minerales como plagioclasas y vidrio volcánico
20-25% cristales (plagioclasas > piroxenos > minerales opacos)	Reemplazamiento de plagioclasas por cuarzo microcristalino.
Fragmentos líticos 5-10%	Formación de pirita en zonas alejadas de la fractura
	Precipitación de yeso y ópalo en superficie de la roca

Obtenidas las micrografías de las 16 muestras, se observó una variación en la proporción mineralógica de algunos minerales específicos, la cual puede verse en los EDS para cada muestra (Apéndices I al XXVII). Para esto se calculó el índice de saturación (IS) del fluido hidrotermal y el equilibrio o desequilibrio con algunos minerales identificados. Las posible mineralizaciones obtenidas para minerales de SiO_2 y CaSO_4 pueden verse en un gráfico de IS y temperatura (figuras 22 y 23). Estos gráficos muestran equilibrio de cuarzo, tridimita, calcedonia y critobalita en las temperaturas

registradas dentro de la fosa.

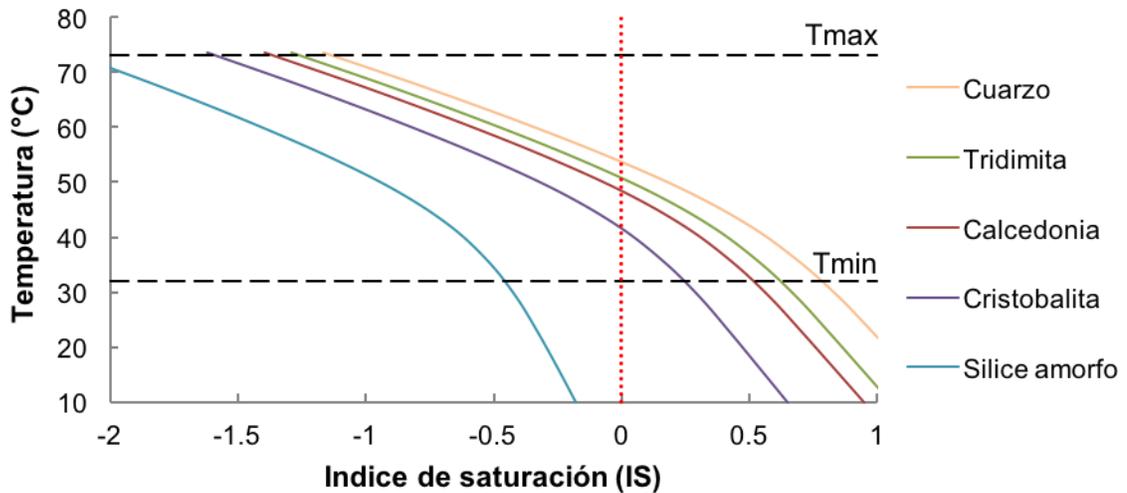


Figura 22. Relación del Índice de Saturación (IS) y la temperatura para minerales de SiO_2 , obtenidos a partir de datos fisicoquímicos de la muestra de agua YAPU-01 (73°C) en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. Se muestra IS en equilibrio para cuarzo, tridimita, calcedonia y cristobalita. El sílice amorfo (línea azul) muestra valores cercanos al equilibrio en temperaturas menores a 10°C . Las líneas punteadas en negro indican las temperaturas máxima y mínimas registradas en la fosa.

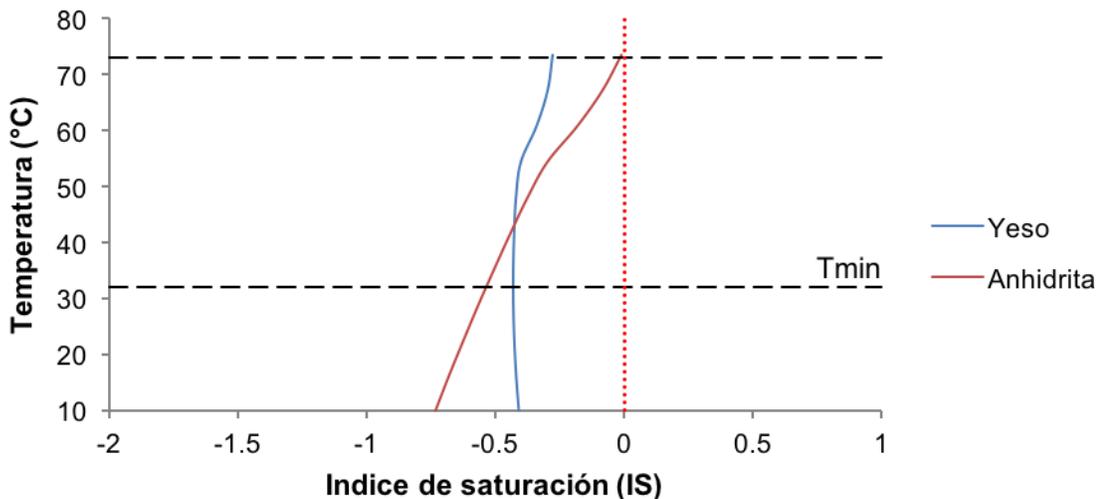


Figura 23. Relación del Índice de Saturación (IS) y temperatura para minerales de CaSO_4 , obtenidos a partir de datos fisicoquímicos de la muestra de agua YAPU-01 (73°C) en el manantial hidrotermal de Puertecitos, B.C. El equilibrio de anhidrita se observa en mayores temperaturas y el IS del yeso es moderadamente constante. Las líneas punteadas en negro indican las temperaturas máxima y mínima registradas en la fosa.

Capítulo 4. Discusión

4.1 Microorganismos, temperatura y pH.

La temperatura del fluido y el pH son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal (Reed, 1997) y son un factor importante en la actividad biológica (Ramírez et al., 2006). De acuerdo a la condiciones de temperatura, pH y abundancia de microorganismos, los sitios de muestreo se dividieron en cuatro zonas. En la primera zona, se registró la mayor temperatura en el fluido, variando entre 63°C y 74°C, y el pH más alcalino de 10.4. Las estructuras biomórficas encontradas en esta zona, mostraron silicificación en su estructura y aparecieron en mezcla con precipitado mineral, producto de la disminución de temperatura y pH. Lo cual permite inferir que los microorganismos encontrados en estas condiciones son los más resistentes a la temperatura y pH alcalino de la fosa hidrotermal. Se ha encontrado que los microorganismos proveen sitios favorables de nucleación para la silicificación en este rango de temperaturas. Investigaciones de campo han demostrado que en ambientes termales recientes se forman activamente sintetizados de sílice espacialmente en los microorganismos (Geptner et al., 2005), no obstante, el papel de los microorganismos se considera pasivo en la precipitación geotérmica (Walter et al., 1972).

Cuando la temperatura es adecuada para la fotosíntesis, menor a 75°C, se ha encontrado la presencia de bacterias moderadamente termófilas y mesófilas, tales como cianobacterias, bacterias y *Chloroflexi Proteobacteria* (Cox et al., 2011; Lau et al., 2009; Otaky et al., 2012). Además de miembros del phylum *Bacteria*, se han encontrado *Arqueas* de los phylum *Crenarchaeota*, *Euryarchaeota*, y *Thaumarchaeota*, en los sistemas geotérmicos (Ochsenreiter et al., 2003; Zhang et al., 2008). Entonces es posible que los bacilos y formas globulares correspondan a este tipo de microorganismos.

La segunda zona corresponde a un rango de temperaturas de 58 a 63°C. Se registró el pH más bajo 6.7 en los sitios de muestreo YAPU06 al YAPU09. En estos sitios, se encontraron restos de diatomeas fijados a la roca con materia mineral y sobre ellas

colonias de cocos y estructuras biomorficas filamentosas. Estas condiciones de temperatura y pH, permitieron el mayor asentamiento de microorganismos individuales (sitios YAPU-4 y YAPU-5), lo cual hace suponer que estos microorganismos son más resistentes al cambio de temperatura y pH por variaciones en la marea. Aunque no se hizo un análisis de ácido desoxirribonucleico para identificar a los microorganismos presentes en la zona de mayor abundancia, estos pudieran ser similares a *Deferribacter desulfuricans*, cuya temperatura óptima de crecimiento es de 60° a 65°C y que ha sido reportado en condiciones de temperatura similares en sistemas hidrotermales marinos profundos (Takai et al., 2003). En esta zona se observaron rasgos de disolución de minerales por microorganismos, lo cual se pudo confirmar con los análisis EDS. Los microorganismos con forma de bacilo podrían corresponder a bacterias del género *Bacillus*, capaces de tolerar altas temperaturas, que han sido encontrados en condiciones similares de pH y temperatura (Ramírez et al., 2006). Otra posibilidad es que se trate de arqueas, aunque éstas se hallan en temperaturas más altas, debido a que las temperaturas registradas y las condiciones intermareales no permite su desarrollo adecuado (Ehrlich, 2009). La mayor cantidad de microorganismos individuales se encontraron junto a restos de diatomeas, donde además se observaron condiciones de silicificación. Las diatomeas tienen un esqueleto formado de sílice amorfa y además presentan silicificación asociado al fluido hidrotermal (Ehrlich, 2009), lo cual se comprobó con análisis químicos. La presencia de bacterias en su superficie oxida la materia orgánica que sirve como fuente de sustento para estos microorganismos.

La tercera zona se delimitó en un rango de temperatura de 40° a 58°C y en ésta los microorganismos individuales disminuyeron su abundancia relativa. El pH permaneció en el rango de 6.7 y 7.6, lo cual no varió entre puntos cercanos, permitiendo el desarrollo de comunidades microbianas. Dentro de este rango se pudo notar un ligero aumento de pH en el sitio YAPU-10 (pH 7.8), en el cual se registró una temperatura menor. Este tenue cambio de pH pudiera estar asociado a una fractura en el fondo de la fosa hidrotermal, asociado a emanación de fluido. Los sitios de muestreo con temperaturas menores a 45°C, no mostraron microorganismos individuales, pero si la presencia de biopelículas. El pH fue de aproximadamente 6.8, similar a las condiciones de mayor abundancia, lo cual permite inferir que los microorganismos individuales

presentes en la fosa hidrotermal dependen de la temperatura y del contenido de sílice disuelto del fluido para subsistir. Los microorganismos presentes aquí pudieran ser cianobacterias por su forma filamentosa observada en SEM.

Por último, los sitios de muestreo con temperaturas menores a los 40 °C presentan un pH casi neutro (6.95 – 7.6), estas condiciones permitieron la formación de un ecosistema diferente a los demás sitios de muestreo, conocidas como biopelículas. La abundancia de biopelículas aumentó al disminuir la temperatura y al estar más cerca de la salida del agua de manantial hacia el mar, permitiendo que las células plantónicas, posiblemente algas, arqueas y cianobacterias, se adhirieran a la roca.

Las aguas hidrotermales de Baja California presentan pH alcalinos (Arango-Galván et al., 2015). En el manantial hidrotermal de Puertecitos se registró un pH de 10.4 en la zona donde emana el fluido a superficie, además una salinidad de 27.01 g/L, lo cual se asocia al aporte de SiO₂ disuelto y la reducción de CO₂ en profundidad, lo cual hace que el pH disminuya estando en contacto con la atmosfera.

4.2 El fluido hidrotermal y las fases minerales

Las muestras de agua son “cloruradas sódicas” similar al agua de mar según el diagrama de Piper (Figura 14). Entre los dos puntos de análisis fisicoquímicos se pudo notar una disminución de SO₄²⁻ y SiO₂. Las mayores concentraciones se obtuvieron en el agua emanante en la fractura, esta concentración disminuyó hasta el sitio donde se registró la menor temperatura (49.07 ppm a 1.58 ppm para SiO₂ y de 1990 ppm a 393 ppm para SO₄²⁻). En el sitio de la fractura se registró la mayor temperatura (73.5°C) y TDS de 44.50 g/L, estas condiciones se encuentran por debajo de la estabilidad del yeso (Deer et al., 1992; Li y Sadakata, 1999; Murray, 1964) y posiblemente estas condiciones y los microorganismos del lugar, permitieron la precipitación de minerales de yeso (Figura 23), mostrando mayor estabilidad frente a anhidrita en el campo de temperatura analizado.

Los análisis fisicoquímicos del fluido hidrotermal, la petrografía y los análisis de SEM en superficie, permitieron comprender la transformación de fases minerales. De tal manera, la implementación de la petrografía mostró evidencias de alteraciones primarias, las cuales se compararon con estudios de roca poco alterada realizados por Aparicio-Ceja (Aparicio-Ceja, 1999). Estos análisis permitieron observar un reemplazamiento de minerales relictos (posibles plagioclasas) por cuarzo, lo que indica que la roca original tiene una alteración primaria, producto de fluidos hidrotermales. Aparicio-Ceja (1999), a partir de análisis de rayos X, propone que estos minerales relictos son plagioclasas de tipo sódicas y los análisis petrográficos de las muestras alteradas mostraron minerales relictos de plagioclasa junto con cuarzo secundario.

El fluido hidrotermal puede disolver minerales al momento de entrar en contacto con la roca, de tal modo que la roca es alterada. En este estudio, se tiene un fluido hidrotermal altamente alcalino y caliente (pH de 10.4 y temperatura de 73°C) subsaturado en cuarzo y otras formas de sílice criptocristalina, esto permite la alteración de silicatos primarios y de vidrio volcánico. Al disminuir la temperatura y el pH, esos minerales (excepto sílice amorfo) entran en el rango de saturación y pueden precipitar reemplazando con recristalización de minerales secundarios (principalmente cuarzo microcristalino). La sílice amorfa solo puede precipitar cuando la temperatura disminuye aún más.

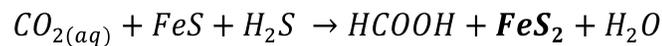
Los análisis de fluorescencia de rayos X (Aparicio-Ceja, 1999) mostraron que la roca poco alterada está enriquecida en SiO_2 , así mismo, los minerales encontrados en superficie a través de SEM y EDS confirmaron la presencia de cuarzo microcristalino. La alteración del vidrio volcánico es posiblemente la causante de la mayor concentración de SiO_2 en el agua caliente. Musić et al. (2011) establecieron condiciones de formación para sílice amorfo dependientes de pH, temperatura y tiempo de precipitación, lo cual influyen en el tamaño de los cristales de cuarzo y el área de superficie. Alekseyev et al. (2003) demostraron que la precipitación de sílice ocurre más lentamente que lo que se disuelve. Los valores de IS indicaron una subsaturación de sílice amorfo pero no de cristobalita y tridimita en los rangos de temperatura presentes en la fosa. Esta precipitación permite la preservación de comunidades bacterianas, debido a que éstas son encerradas en una matriz de sílice amorfa (Douglas y

Beveridge, 1998). Algunas investigaciones indican que la superficie microbiana sirve como lugares de nucleación para la precipitación de sílice (Konhauser y Ferris, 1996; Schultze-Lam et al., 1995).

Los IS mostraron que es posible la precipitación de variedades de SiO_2 como tridimita, calcedonia y cristobalita. Dollase (1967) y Jones (1972) indican estabilidad de tridimita en rangos de temperatura mayores a 107°C ; Deer et al. (2013), indica estabilidades por arriba de 117°C y menciona que es el polimorfo más estable en rangos de 870 a 1470°C . Hirota (1977), menciona estabilidades de formación a partir de 1100°C . Rimstidt (1997) y Fournier (1970), establecen estabilidad de cuarzo a temperaturas mayores de 25°C ; Deer et al., (2013), establece un rango de formación y estabilidad de 573 a 870°C , a su vez indica un campo de estabilidad para cristobalita de 200 a 275°C ; Fournier (1970), indica estabilidad de cristobalita en temperaturas mayores a 160°C aproximadamente. Estos rangos de estabilidad establecidos para los polimorfos de cuarzo varía a los minerales encontrados en superficie de la roca dentro de la fosa hidrotermal, debido que no se observó una morfología representativa para cada uno de ellos (análisis en SEM), esto está asociado a los cambios constantes en la marea, lo que no permite la precipitación de tridimita, cristobalita, calcedonia y cuarzo, permitiendo sólo formación de sílice amorfo.

El mineral yeso presentó valores de IS moderadamente constantes (cerca de -0.45), lo cual difiere de anhidrita que mostró estabilidad en mayores temperaturas. Los minerales observados se pudieron identificar con análisis de EDS y distinguirlos de zeolitas, los cuales podrían ser originadas por reemplazo hidrotermal en vidrio volcánico (Deer et al., 2013; Pal et al., 2006). Los análisis de IS dentro del manantial hidrotermal indican subsaturación para yeso, por lo que éste tiende a disolverse. Sin embargo, los minerales de yeso observados en cavidades sugieren que las condiciones intermareales de cambios de temperatura y pH fluctúan drásticamente, obteniéndose minerales con un radio no mayor a $80\ \mu\text{m}$. La presencia de yeso sólo en superficie y el contacto con el fluido hidrotermal indica una precipitación mineral reciente. La formación de yeso en superficie y en condiciones cercana a la estabilidad, indica su formación a partir de actividad microbiana, lo cual también fue encontrado por Douglas et al. (1998).

La presencia de pirita (FeS_2) se observó en los análisis petrográficos pero no en la superficie con análisis de SEM. Las condiciones actuales del manantial hidrotermal no son óptimas para su formación, debido a que no se cuenta con un ambiente reductor, por lo que se asume se formó en el pasado geológico bajo condiciones reductoras, posiblemente causadas por biomoléculas que reducen sulfatos y precipitan sulfuro en la profundidad (FeS), en cavidades y fracturas aisladas del flujo de agua, los cuales fueron propuestos por Smith (1978), representándose en la siguiente reacción:



4.3 Interacción fluido-microorganismos

El grado de silicificación en microorganismos fue más apreciable donde se encontró la mayor abundancia. Este se pudo apreciar en las estructuras biomórficas, las cuales aumentaron su contenido de sílice a medida que son fijadas y/o adheridas en la roca. La presencia de diatomeas permitió la proliferación de bacilos, estructuras biomórficas y cocos, debido a que se observó el mayor asentamiento y silicificación en los microorganismos presentes. Otro rasgo de importancia, es la evidente degradación mineral observadas por la actividad microbiana, afectando principalmente aluminosilicatos. Se descartó que son estructuras de alteración hidrotermal a partir de los resultados obtenidos con análisis de EDS y el clivaje del mineral alterado, dado que presentaron la misma forma y composición química en ambos lados de la estructura. Estos resultados indican condiciones estables para la actividad biológica y supervivencia de los microorganismos. Aunque se desconoce la velocidad de silicificación de los microorganismos presentes, esta podría ocurrir de manera rápida por cambios de temperatura, lo cual puede notarse en la variedad de microestructuras formadas sobre diatomeas, donde se observó la mayor concentración de microorganismos, esto fue observado en condiciones similares anteriormente en manantiales hidrotermales en Islandia (Geptner et al., 2005).

En zonas de menor temperatura los análisis químicos realizados a las biopelículas, en un área mayor demostraron la presencia de sodio, magnesio, aluminio y potasio (Figura 21), los cuales son aportados por el agua de mar, producto de la mezcla entre ésta y el fluido hidrotermal (Konhauser, 2007).

El cemento silíceo que contienen todos los microorganismos observados se formó por precipitación en la zona intermareal, donde los cambios de temperatura limitan la formación y preservación de los microorganismos. Las evidencias de silicificación y la limitación de variedad de microorganismos son un claro indicador de la interacción con el fluido hidrotermal.

Los valores de conductividad eléctrica bajos y salinidad aumentaron a medida que el fluido hidrotermal disminuía su temperatura y se encontraba más cercana al mar. Lo cual está asociado a la mayor salinidad del agua de mar al momento que esta recubre la fosa en marea alta.

En resumen, se logró conocer la relación de los cambios de temperatura en el desarrollo microbiano del manantial hidrotermal. La temperatura del agua influye en la abundancia y silicificación del medio biológico adherido a la roca. No obstante, pudieron notarse cambios en la formación de yeso, a medida que el fluido hidrotermal disminuía su temperatura, mostrando precipitado sólo en los huecos de la superficie donde la temperatura y pH de la marea no afectaba directamente.

Capítulo 5. Conclusiones

El manantial hidrotermal de Puertecitos en el noreste de Baja California, se ve afectado por cambios de temperatura entre 73 y 32°C que fluctúan con la marea y altera a las tobas vítreas de composición dacítica (ignimbritas), lo cual permite el asentamiento de comunidades microbianas.

La abundancia relativa de los microorganismos encontrados (bacilos, cocos y estructuras biomórficas) varía con la temperatura. En menores temperaturas (>45°C) se encontraron biopelículas; mientras que en temperaturas mayores a 45°C hubo mayor abundancia de estructuras biomórficas (cocos y bacilos) no identificadas

Con la disminución de la T y el pH debido a la mezcla de agua fría de mar y el agua caliente del manantial, ocurre una rápida saturación y precipitación de sílice disuelto, lo que propicia el reemplazamiento del vidrio, minerales primarios y la aparición de estructuras amorfas (sílice amorfa) y silicificación de los microorganismos.

Los análisis de índices de saturación indican saturación de cuarzo microcristalino (cristobalita) y cuarzo y está ligeramente subsaturado en sílice amorfo (ópalo) a temperatura de 70° C. Sin embargo los análisis petrográficos y de microscopia electrónica de barrido, permitieron reconocer la formación de sílice amorfo, lo que indica que el índice de saturación se vuelve positivo con la mezcla de agua de mar durante la fluctuaciones de la marea.

Aunque no se tiene evidencias actuales de condiciones anóxicas, la formación de minerales de sulfuros (pirita) permiten deducir que existieron estas condiciones, que pudieran estar asociados a microorganismos reductores de SO_4^{2-} a profundidad.

Recomendaciones

Efectuar estudios para la identificación de microorganismos a través de métodos bioquímicos y moleculares, que permitan conocer las especies presentes en las condiciones intermareales para poder darles una aplicación.

Realizar un análisis bioquímico del fluido más detallado de la zona, dado que las muestras tomadas en este estudio no fueron representativas de cada sitio.

Lista de referencias bibliográficas

- Alekseyev, V. A., Medvedeva, L. S., y Tatsij, Y. G. (2003). Difference in the mechanisms and rates of quartz dissolution and precipitation at 150°C. *Geokhimiya*, 5, 513 – 521.
- Aparicio-Ceja, M. (1999). *Caracterización mineralógica y química de la alteración de baja temperatura de rocas volcánicas del neogeno en la provincia volcánica de Puertecitos, noreste de Baja California*. Tesis de Maestría. CICESE. pp. 126.
- Arango-Galván, C., Prol-Ledesma, R. M., y Torres-Vera, M. A. (2015). Geothermal prospects in the Baja California Peninsula. *Geothermics*, 55, 39–57.
- Back, W. (1966). Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of atlantic coastal plain. (No. 498-A). Government Printing Office. *U.S. Geological Survey Professional*.
- Cox, A., Shock, E. L., y Havig, J. R. (2011). The transition to microbial photosynthesis in hot spring ecosystems. *Chemical Geology*, 280(3-4), 344–351.
- Deer, Howie, y Zussman. (2013). Framework silicates: silica minerals. In Pearson (Ed.), *An introduction to the Rock-Forming Minerals*. pp. 311 – 323. England: Pearson.
- Dollase, W. A. (1967). The crystal structure at 220°C of orthorhombic high tridymite from the steinbach meteorite. *International Union of Crystallography*, 23, 617 – 623.
- Dornieden, T., Gorbushina, A. A., y Krumbein, W. E. (1997). Änderungen der physikalischen Eigenschaften von Marmor durch Pilzbewuchs. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, 3(5), 441–456.
- Dornieden, T., Gorbushina, A. A., y Krumbein, W. E. (2000). Biodecay of cultural heritage as a space/time-related ecological situation — an evaluation of a series of studies. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 46(4), 261–270.
- Douglas, S., y Beveridge, T. J. (1998). Mineral formation by bacteria in natural microbial communities. *FEMS Microbiology Ecology*, 26(2), 79–88.
- Ehrlich, H. (2009). *Geomicrobiology*. Intergovernmental panel on climate change, Ed. (5th ed.). London: CRC Press.
- Fournier, R. O. (1970). Silica in thermal waters: Laboratory and field investigations. *Proceedings of the International Symposium on Hydrochemistry and Biochemistry*, 122 – 139.

- Geptner, a. R., Ivanovskaya, T. a., y Pokrovskaya, E. V. (2005). Hydrothermal fossilization of microorganisms at the Earth's Surface in Iceland. *Lithology and Mineral Resources*, 40(6), 505–520.
- Hirota, K., y Ono, A. (1977). On the stability of tridymite. *Naturwissenschaften*, 64(1) 39-40..
- Iwai, S., Doi, K., Fujino, Y., Nakazono, T., y Fukuda, K. (2010). Silica deposition and phenotypic changes to *Thermus thermophilus* cultivated in the presence of supersaturated silica. *The ISME Journal*, 4(6), 809–816.
- Jones, B., Renaut, R. W., y Rosen, M. R. (1998). Microbial biofacies in hot-spring sinters: a model based on Ohaaki Pool, North Island, New Zealand. *Journal of Sedimentary Research*, 68(3), 413–434.
- Jones, J. B., y Segnit, E. R. (1972). Genesis of cristobalite and tridymite at low temperatures. *Journal of the Geological Society of Australia*, 18(4), 419 – 422.
- Konhauser, K. (2007). *Introduction to geomicrobiology*. Blackwell publishing.
- Konhauser, K. O., y Ferris, F. G. (1996). Diversity of iron and silica precipitation by microbial mats in hydrothermal waters, Iceland: Implications for Precambrian iron formations. *Geology*, 24(4), 323–326.
- Konhauser, K. O., Phoenix, V. R., Bottrell, S. H., Adams, D. G., y Head, I. M. (2001). Microbial-silica interactions in Icelandic hot spring sinter: possible analogues for some Precambrian siliceous stromatolites. *Sedimentology*, 48(2), 415–433.
- Krumbein, V. (1968). Über den Einfluß der mikroflora auf die exogene dynamik. *Geologische Rundschau*, 58(2), 363–365.
- Lau, M. C. Y., Aitchison, J. C., y Pointing, S. B. (2009). Bacterial community composition in thermophilic microbial mats from five hot springs in central Tibet. *Extremophiles*, 13(1), 139–149.
- Li, Y., y Sadakata, M. (1999). Study of gypsum formation for appropriate dry desulfurization process of flue gas. *Fuel*, 78(9), 1089–1095.
- Martín Barajas, A., Téllez Duarte, M., y Stock, J. M. (1997). Pliocene volcanogenic sedimentation along an accommodation zone in northeastern Baja California: The Puertecitos Formation. In *Special Paper 318: Pliocene carbonates and related facies flanking the Gulf of California, Baja California, Mexico*. Geological Society of America. 318. 1–24.

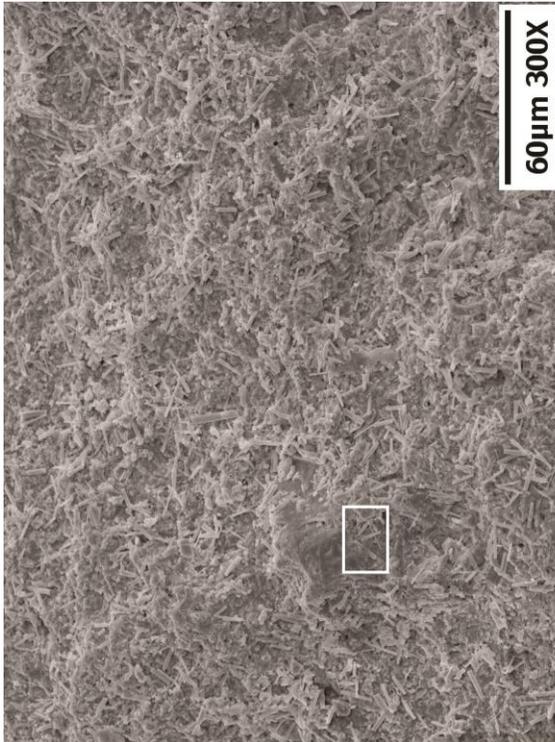
- Martin-Barajas, A., M. Stock, J., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., y Lopez-Martinez, M. (1995). Arc-rift transition volcanism in the Puertocitos volcanic province, northeastern Baja California, México. *Geological Society of America Bulletin*, 107(4), 407–424.
- Martín-Barajas, A., y Stock, J. M. (1993). Estratigrafía y petrología de la secuencia volcanica de Puertecitos, Noreste de Baja California. Transición de un arco volcánico a rift. *Contribuciones a La Tectónica Del Occidente de México. Monografía No. 1 Union Geofísica Mexicana*, 1(1), 66–89.
- Martín-Barajas, A., Stock, J. M., Layer, P., Hausback, B., Renne, P., y López-Martínez, M. (1995). Arc-rift transition volcanism in the Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, México. *Geological Society of America Bulletin*, 107(4), 407–0424.
- Murray, R. C. (1964). Origin and diagenesis of gypsum and anhydrite. *Journal of Sedimentary Research*, 34(3), 512–523.
- Musić, S., Filipović-Vinceković, N., y Sekovanić, L. (2011). Precipitation of amorphous SiO₂ Particles and their properties. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(01), 89–94.
- Ochsenreiter, T., Selezi, D., Quaiser, A., Bonch-Osmolovskaya, L., y Schleper, C. (2003). Diversity and abundance of Crenarchaeota in terrestrial habitats studied by 16S RNA surveys and real time PCR. *Environmental Microbiology*, 5(9), 787–797.
- Otaki, H., Everroad, R. C., Matsuura, K., y Haruta, S. (2012). Production and consumption of hydrogen in hot spring microbial mats dominated by a filamentous anoxygenic photosynthetic bacterium. *Microbes and Environments / JSME*, 27(3), 293–9.
- Pal, D. K., Bhattacharyya, T., Ray, S. K., Chandran, P., Srivastava, P., Durge, S. L., y Bhuse, S. R. (2006). Significance of soil modifiers (Ca-zeolites and gypsum) in naturally degraded Vertisols of the Peninsular India in redefining the sodic soils. *Geoderma*, 136(1-2), 210–228.
- Peart, J. E. (1978). *Deposits of sulphur hot springs along the northeast coast of Baja California*. Master Thesis. San Diego State University.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914.
- Ramírez, N., Serrano, J., y Sandoval, H. (2006). Microorganismos extremófilos. Actinomicetos halófilos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(3), 56–71.

- Reed, M. H. (1997). Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition. In *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (3rd ed.) pp. 303–366.
- Renaut, R. W., Jones, B., y Rosen, M. R. (1996). Primary silica oncoids from Orakeikorako hot springs, north Island, New Zealand. *Society for Sedimentary Geology*, 11, 446–458.
- Rendón, G. (1995). *Técnicas petrográficas para el estudio de rocas y sedimentos en el laboratorio de petrología del CICESE*. Reporte técnico. Ensenada, B.C.
- Rimstidt, J. D. (1997). Quartz solubility at low temperatures. *Geochimica et Cosmochimica*, 61(13), 2553–2558.
- Rosenzweig, C., y Solecki, W. (2010). Introduction to climate to change adaptation in New York City: building a risk management response. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1196(1), 13–18.
- Schultze-Lam, S., Ferris, F. G., Konhauser, K. O., y Wiese, R. G. (1995). In situ silicification of an Icelandic hot spring microbial mat: implications for microfossil formation. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(12), 2021–2026.
- Seiffert, F., Bandow, N., Bouchez, J., Blanckenburg, F. Von, y Gorbushina, A. A. (2014). Microbial colonization of bare rocks: laboratory biofilm enhances mineral weathering. *Procedia Earth and Planetary Science*, 10, 123–129.
- Shanks III, W. C. P. (2012). Hydrothermal alteration. *Volcanic Massive Sulphide Occurrence Model*. 169-180.
- Smith, M. L. (1978). *Coastal warm spring systems along Northeastern Baja California*. Master thesis. San Diego State University.
- Stephan, I., Askew, P., Gorbushina, A., Grinda, M., Hertel, H., Krumbein, W., ... Schwibbert, K. (2007). Biogenic impact on materials. *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*, 711–787.
- Stock, J. M. (2000). Relation of the Puertecitos volcanic province, Baja California, Mexico, to development of the plate boundary in the Gulf of California. In *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*. 143 – 156.
- Takai, K., Kobayashi, H., Nealson, K. H., y Horikoshi, K. (2003). *Deferribacter desulfuricans* sp. nov., a novel sulfur-, nitrate- and arsenate-reducing thermophile isolated from a deep-sea hydrothermal vent. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53(3), 839–846.

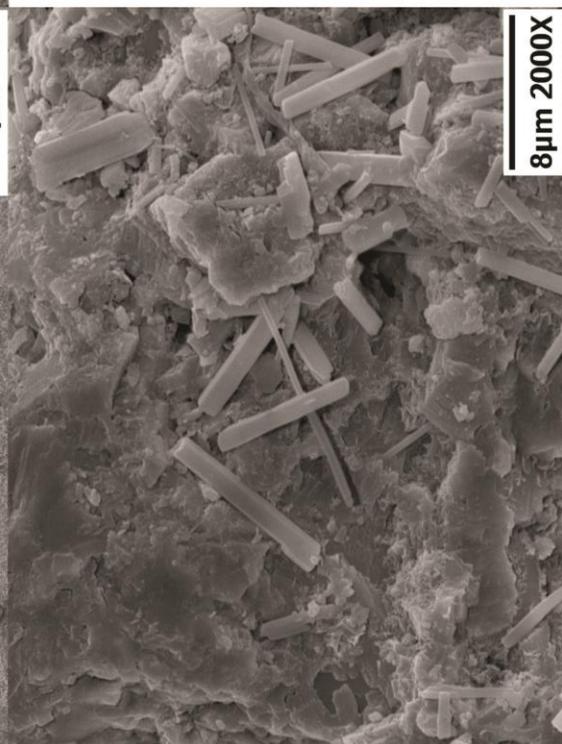
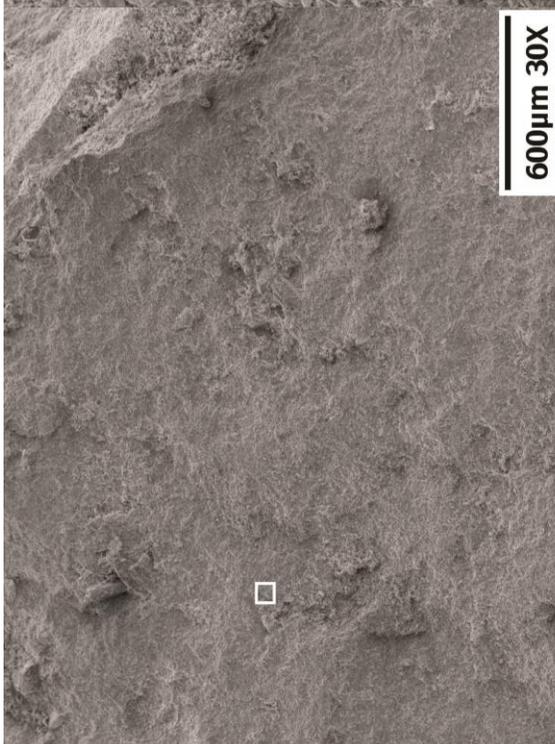
- Vidal, V. M. V., Vidal, F. V., Isaacs, J. D., y Young, D. R. (1978). Coastal submarine hydrothermal activity of northern Baja California. *Journal of Geophysical Research*, 83, 1757–1774.
- Walter, M. R., Bauld, J., y Brock, T. D. (1972). Siliceous algal and bacterial stromatolites in hot spring and geyser effluents of yellowstone national park. *Science*, 178(4059), 402–405.
- Watson, L. P., McKee, A. E., y Merrell, B. R. (1980). Preparation of microbiological specimens for scanning electron microscopy. *Scanning Electron Microscopy*, (Pt 2), 45–56.
- Zavarzin, G. A., Karpov, G. A., Gorlenko, V. M., Golovacheva, R.S., Gerasimenko, L. M., Bonch-Osmolovskaya, E. A., y Orleanskii, V. K. (1989). Kaldernye mikroorganizmy. *Caldera microorganisms*.
- Zhang, C. L., Ye, Q., Huang, Z., Li, W., Chen, J., Song, Z., ... Hedlund, B. P. (2008). Global occurrence of archaeal amoA genes in terrestrial hot springs. *Applied and environmental microbiology*, 74(20), 6417–6426.

Apéndices

Apéndice I. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU01 vista desde el SEM.

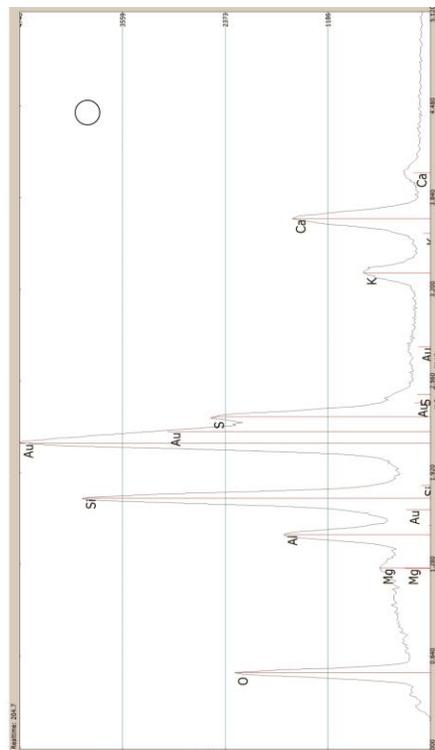
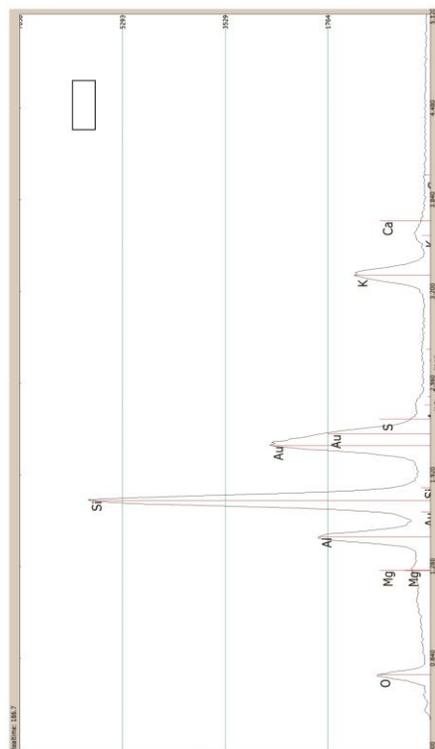
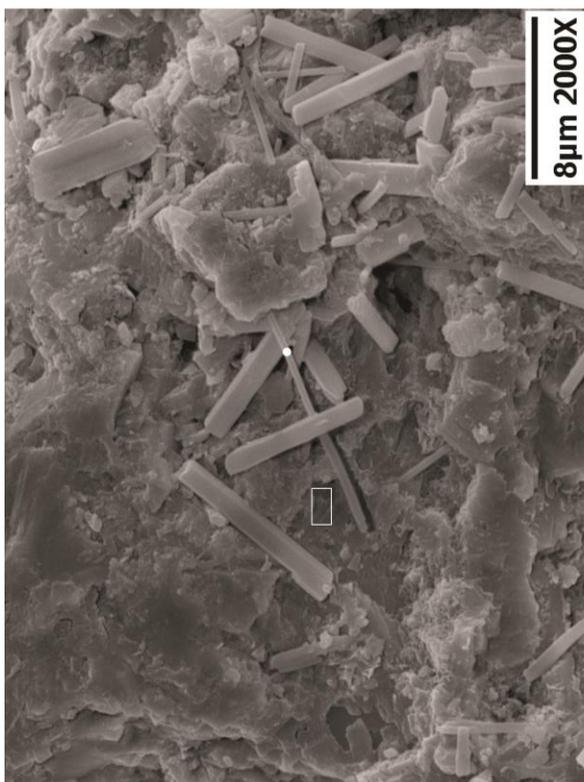


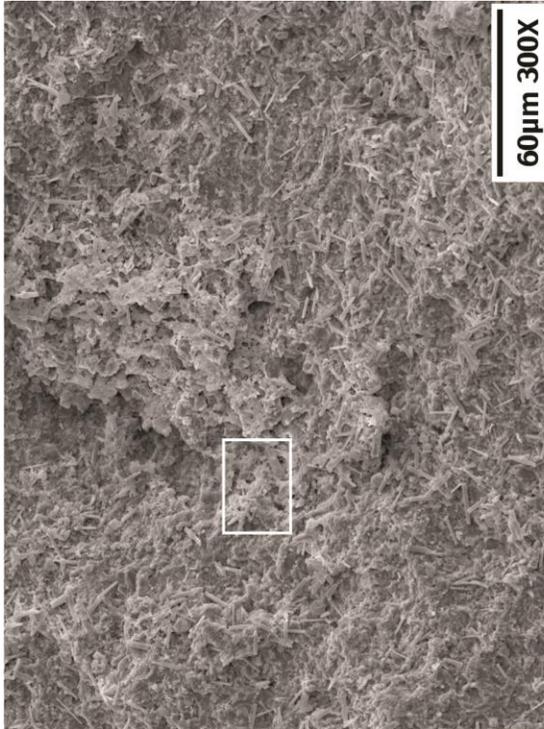
Muestra	YAPU01
Temperatura	73.70 °C
pH	10.4



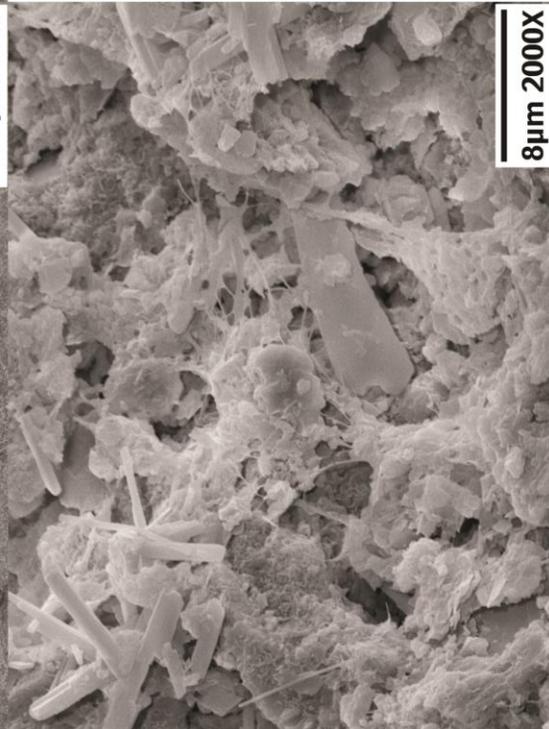
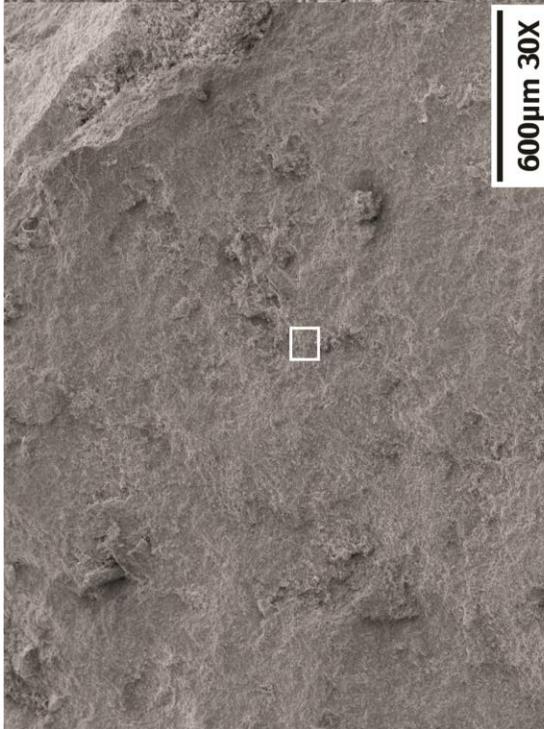
Apéndice II. EDS de muestra en el sitio YAPU01 obtenida en SEM.

Muestra	YAPU01
Temperatura	73.70 °C
pH	10.4



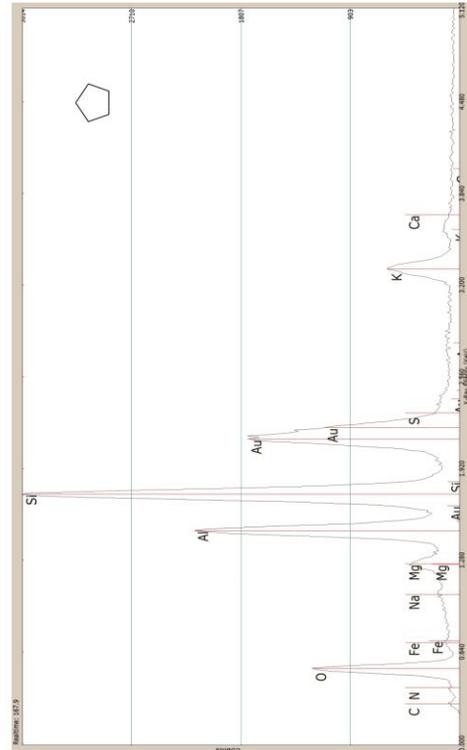
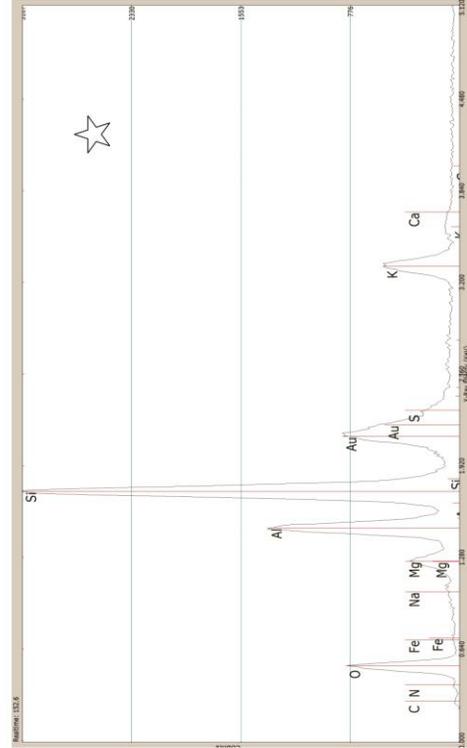
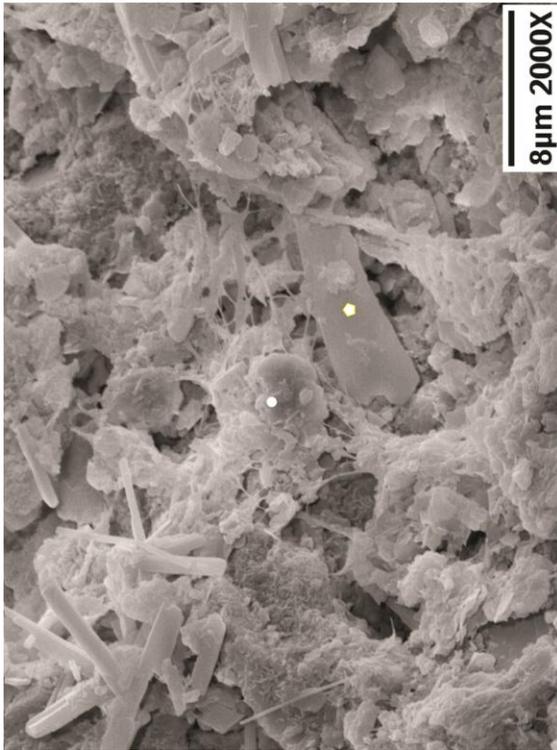
Apéndice III. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU02 vista desde el SEM

Muestra	YAPU02
Temperatura	69.10 °C
pH	7.6



Apéndice IV. EDS de muestra en el sitio YAPU02 obtenida en SEM.

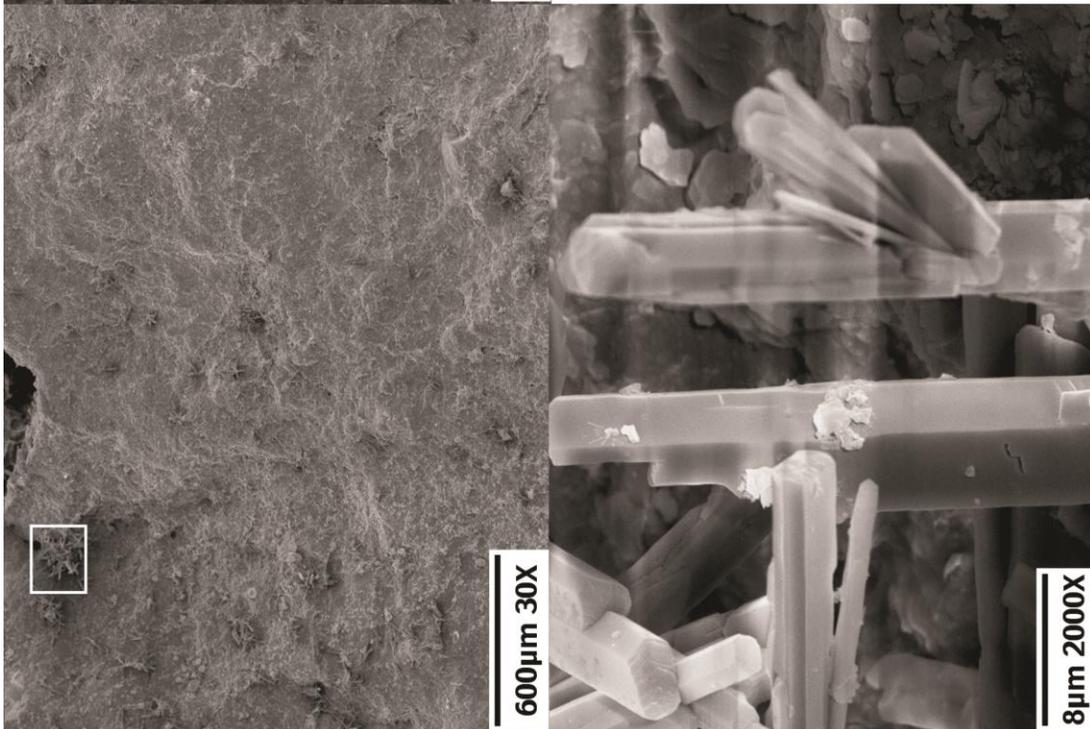
Muestra	YAPU02
Temperatura	69.10 °C
pH	7.6



Apéndice V. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU03 vista desde el SEM.

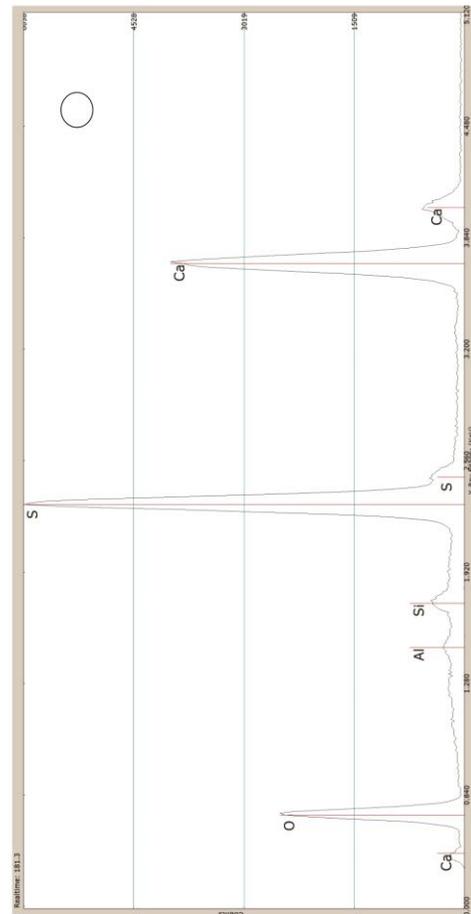
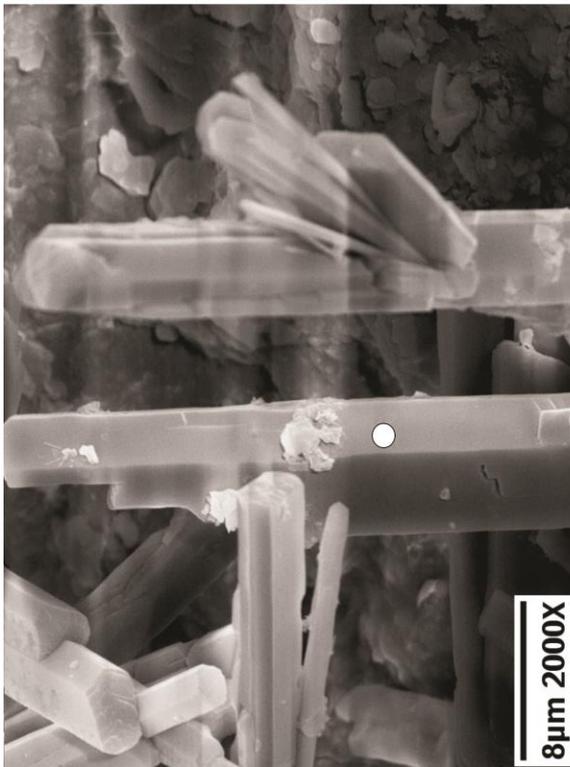


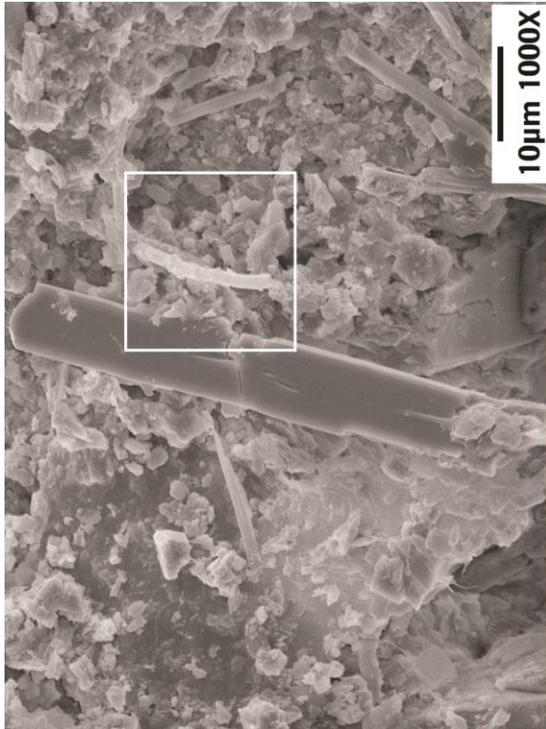
Muestra	YAPU03
Temperatura	62.70 °C
pH	7.30



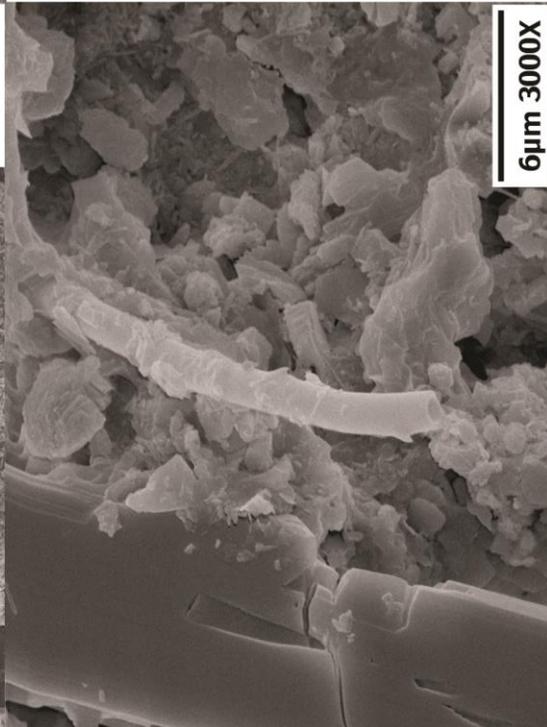
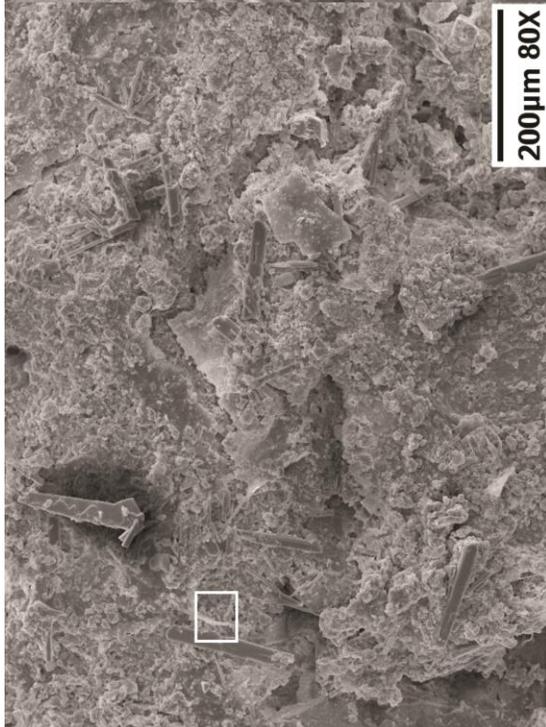
Apéndice VI. EDS de muestra en el sitio YAPU03 obtenida en SEM.

Muestra	YAPU03
Temperatura	62.70 °C
pH	7.30



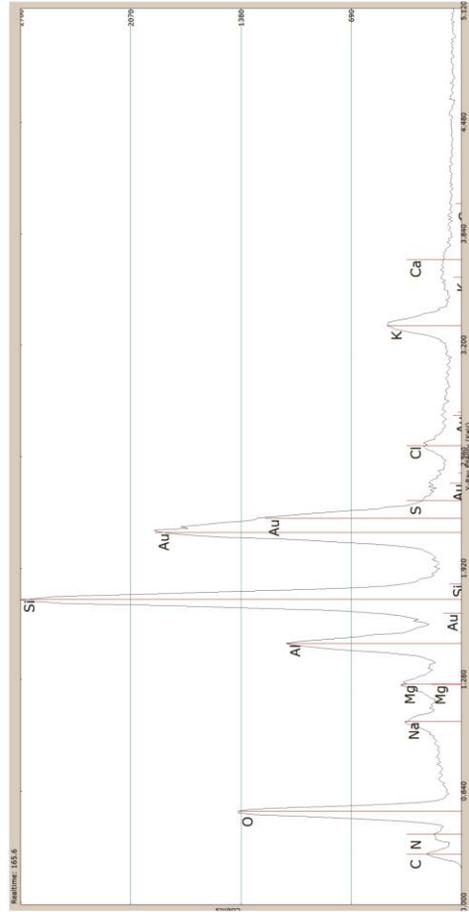
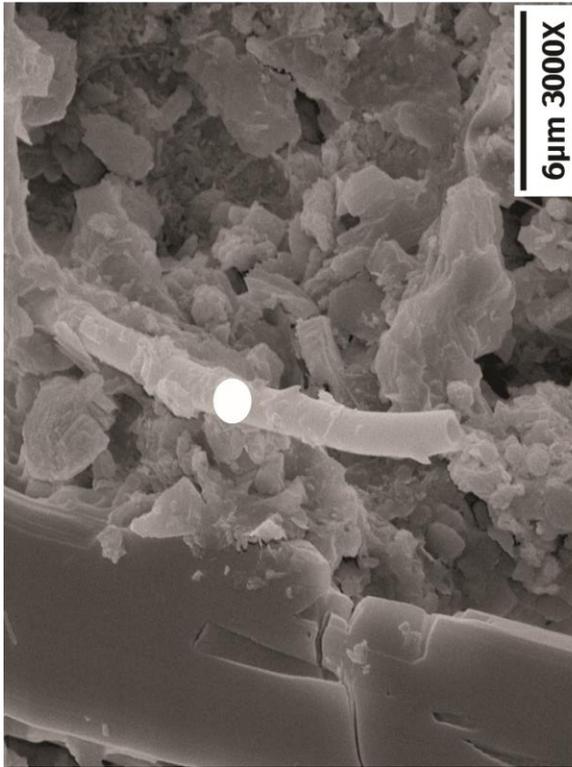
Apéndice VII. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU04 vista desde el SEM.

Muestra	YAPU04
Temperatura	61.00 °C
pH	6.8

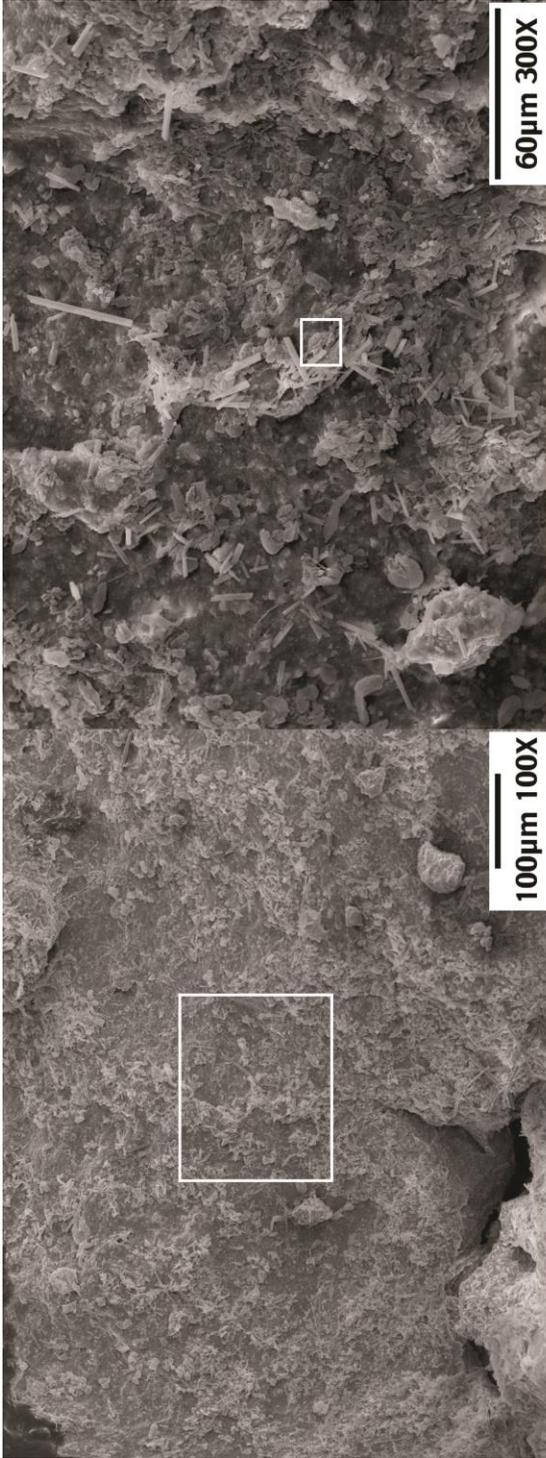


Apéndice VIII. EDS de muestra en el sitio YAPU04 obtenida en SEM.

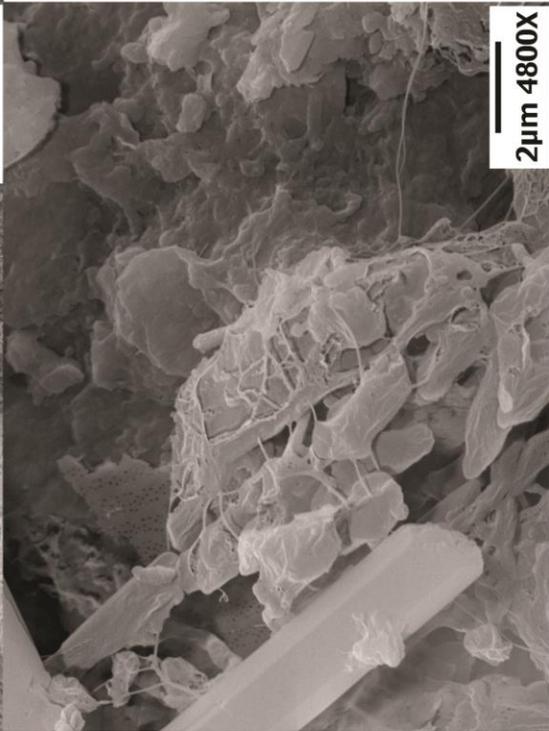
Muestra	YAPU04
Temperatura	61.00 °C
pH	6.8



Apéndice IX. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU05 vista desde el SEM.

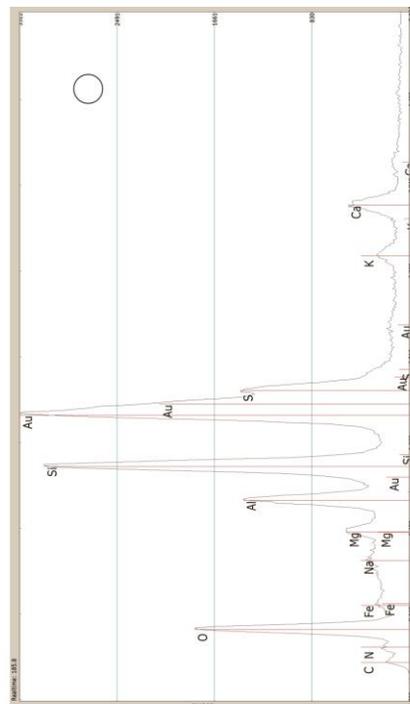
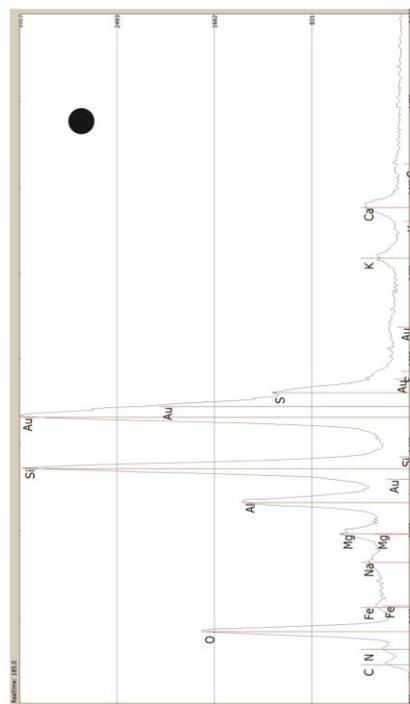
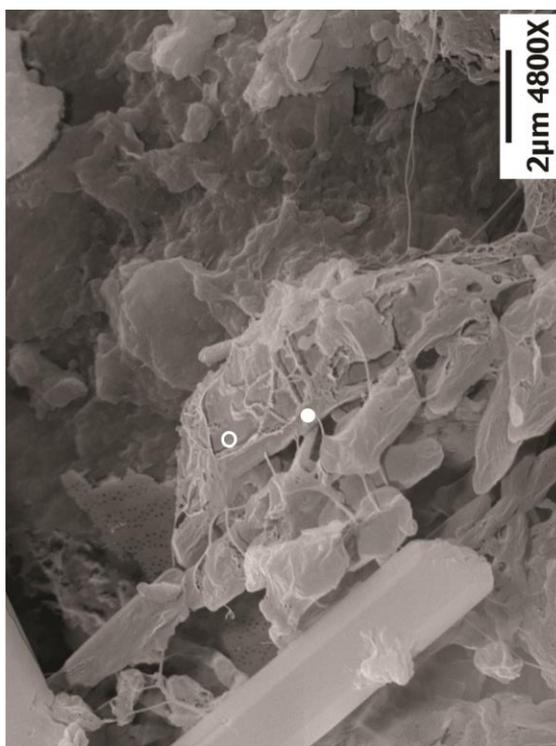


Muestra	YAPU05
Temperatura	60.10 °C
pH	6.8

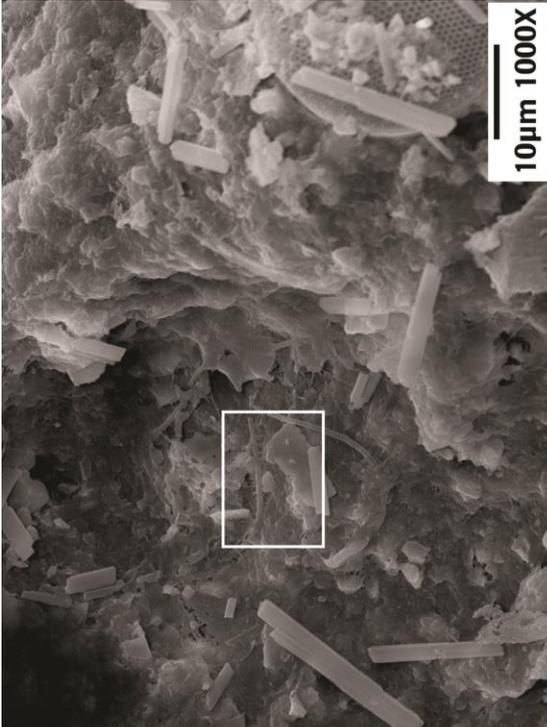


Apéndice X. EDS de muestra en el sitio YAPU05 obtenida en SEM.

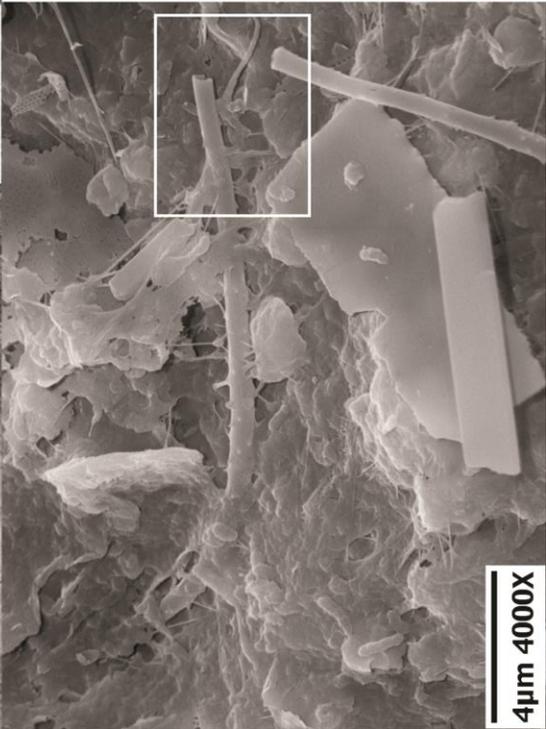
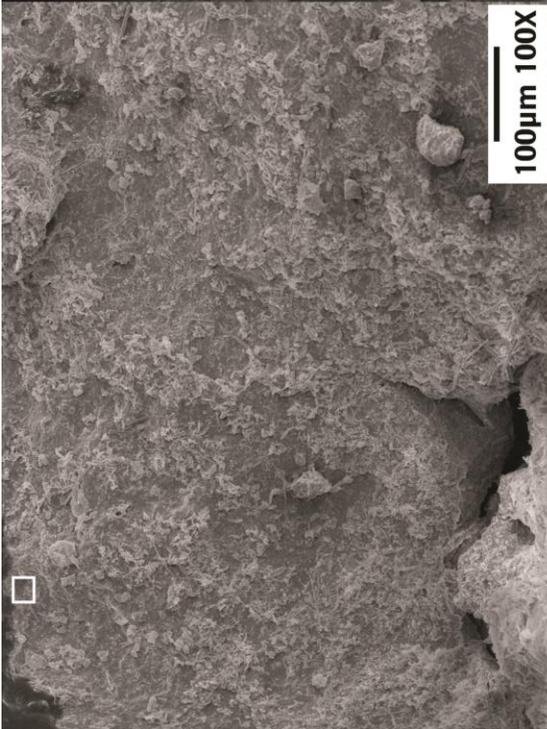
Muestra	YAPU05
Temperatura	60.10 °C
pH	6.8



Apéndice XI. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU06 vista desde el SEM.

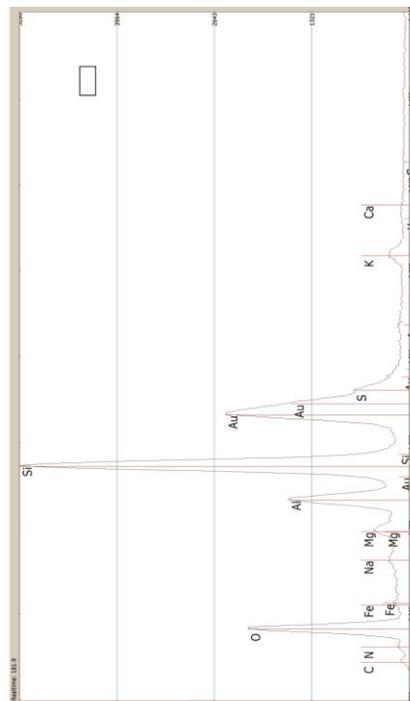
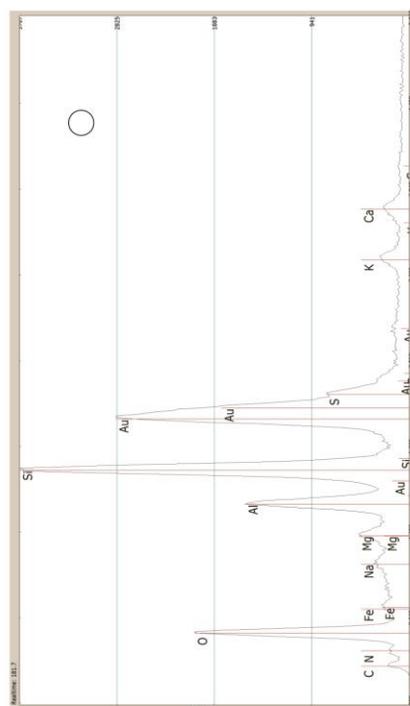
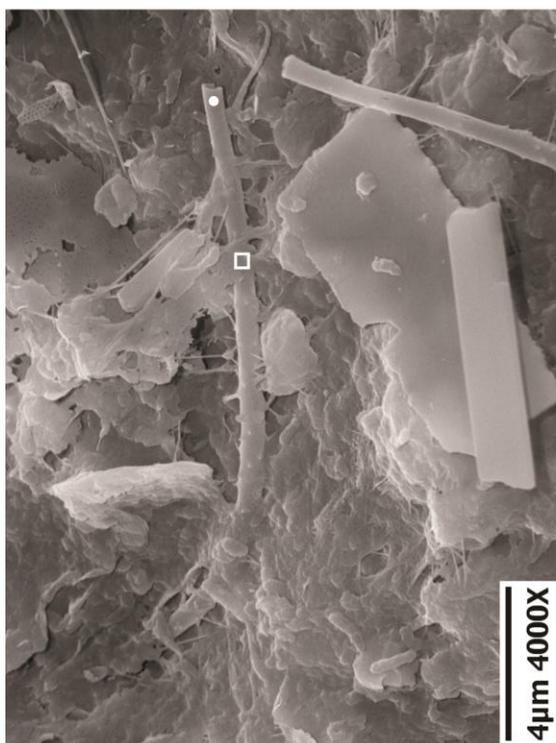


Muestra	YAPU06
Temperatura	60.00 °C
pH	6.7

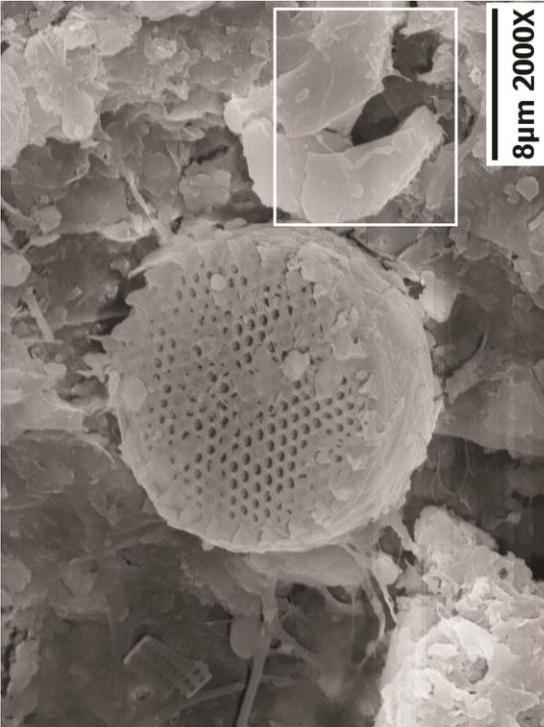


Apéndice XII. EDS de muestra en el sitio YAPU06 obtenida en SEM.

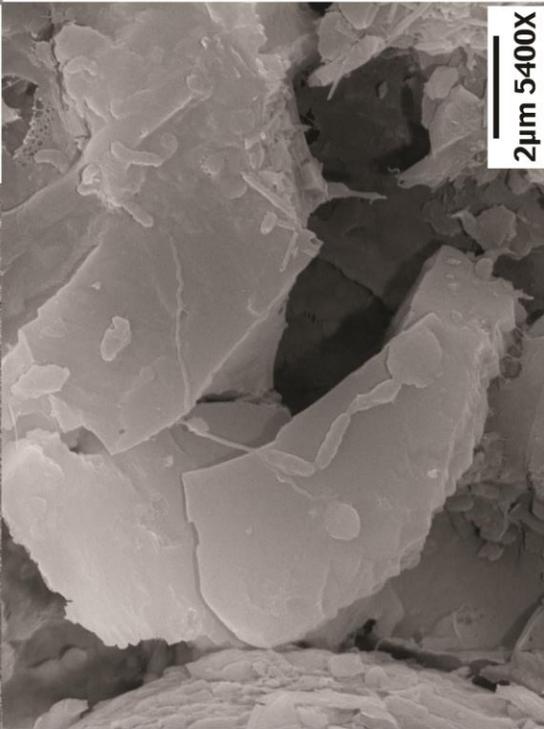
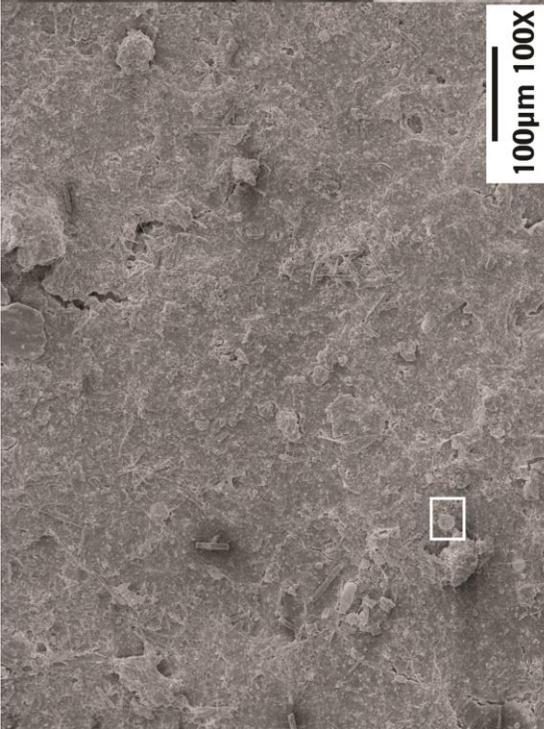
Muestra	YAPU06
Temperatura	61.0 °C
pH	6.61



Apéndice XIII. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU07 vista desde el SEM.

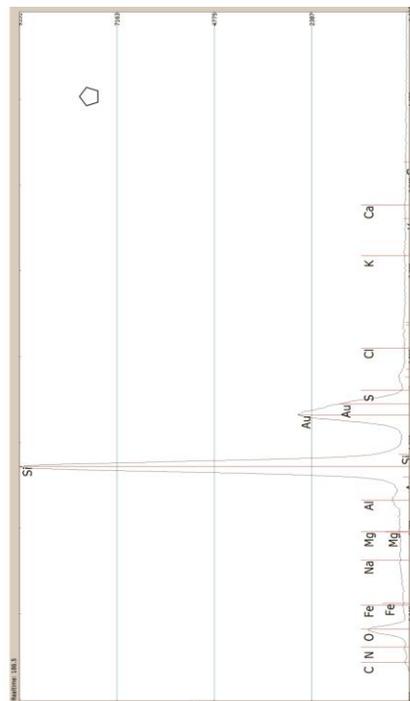
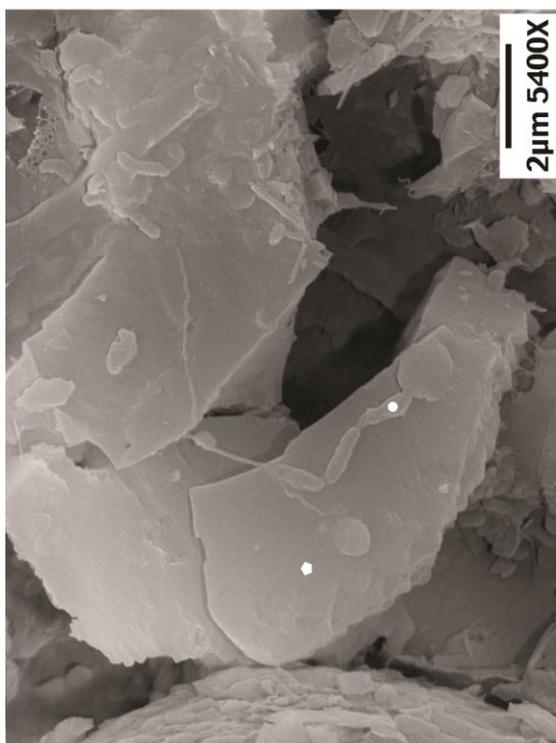


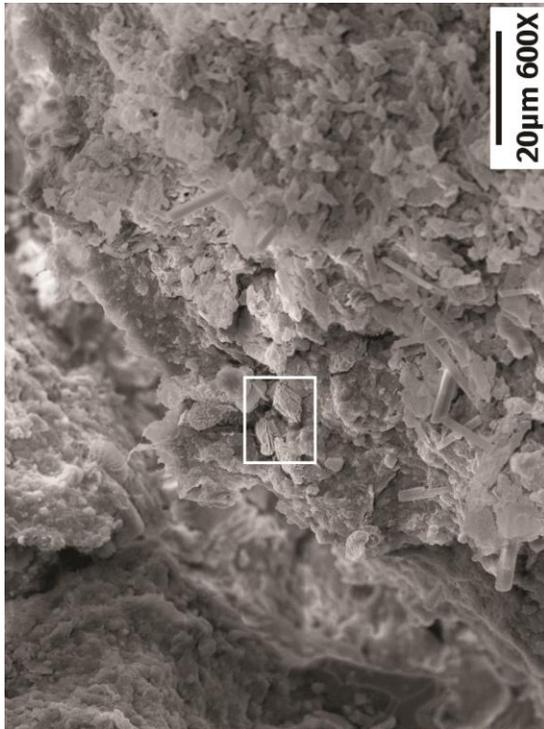
Muestra	YAPU07
Temperatura	59.90 °C
pH	6.7



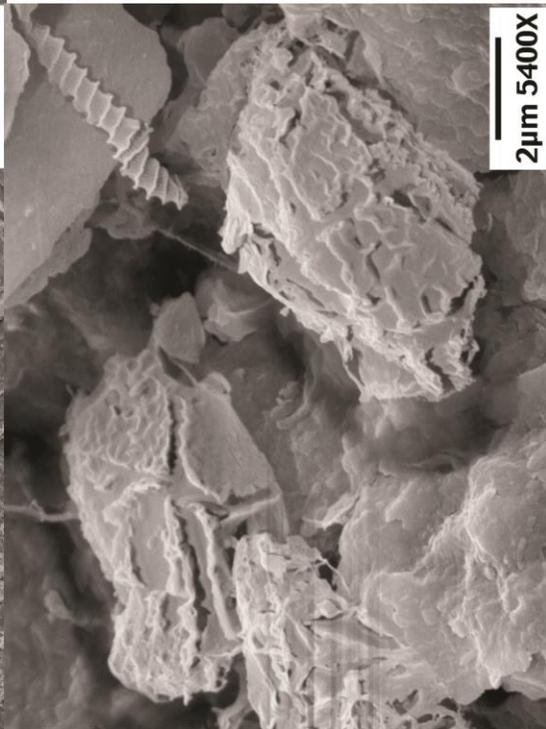
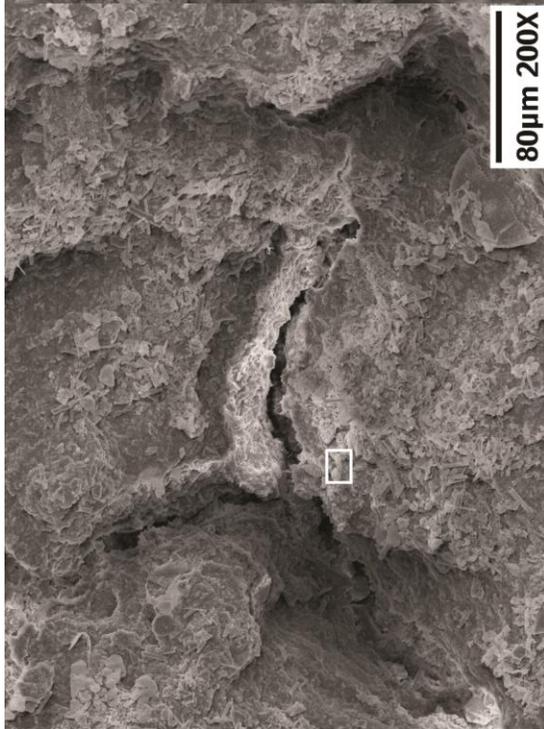
Apéndice XIV. EDS de muestra en el sitio YAPU07 obtenida en SEM.

Muestra	YAPU07
Temperatura	59.90 °C
pH	6.7



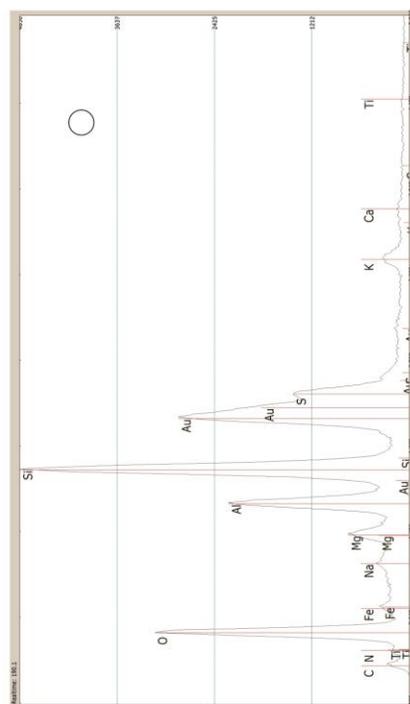
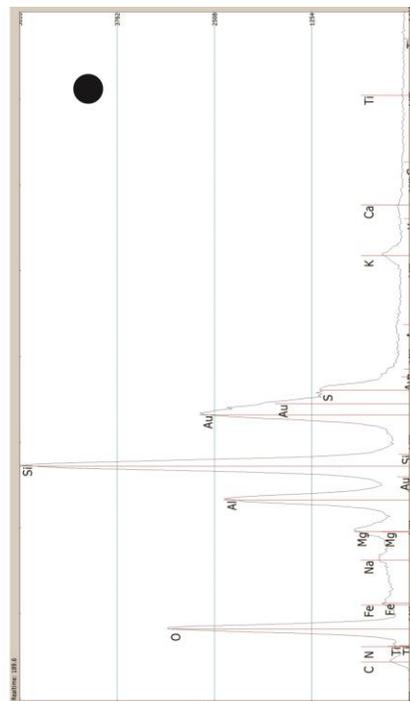
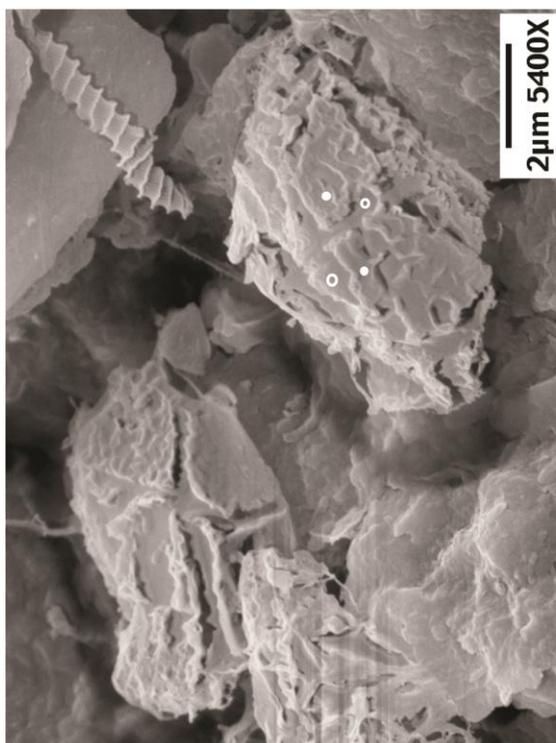
Apéndice XV. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU08 vista desde el SEM.

Muestra	YAPU08
Temperatura	57.40 °C
pH	6.7

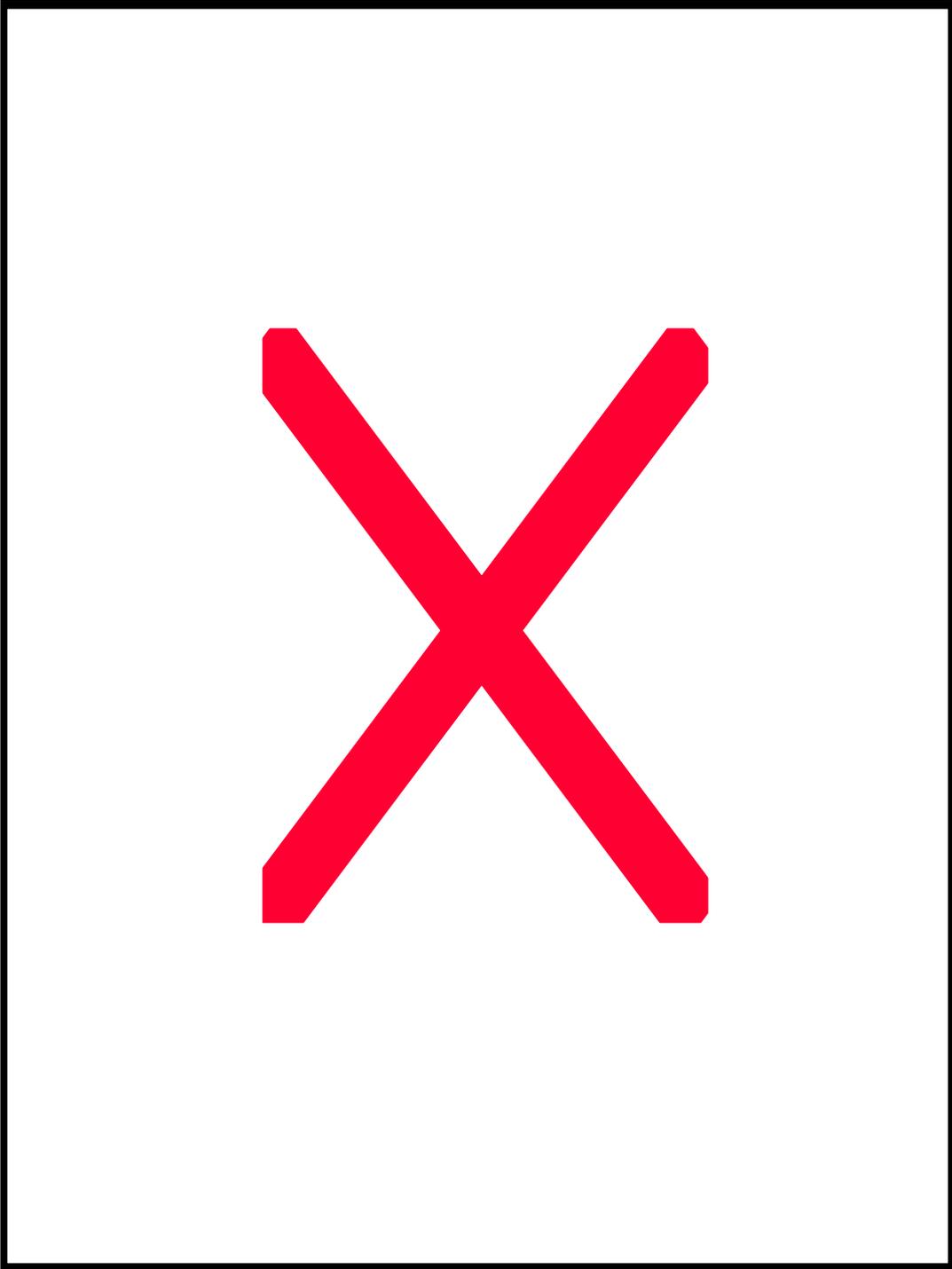


Apéndice XVI. EDS de muestra en el sitio YAPU08 obtenida en SEM.

Muestra	YAPU08
Temperatura	57.40 °C
pH	6.7

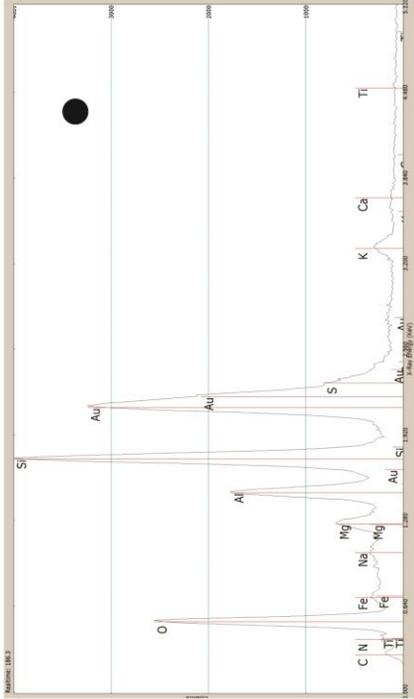
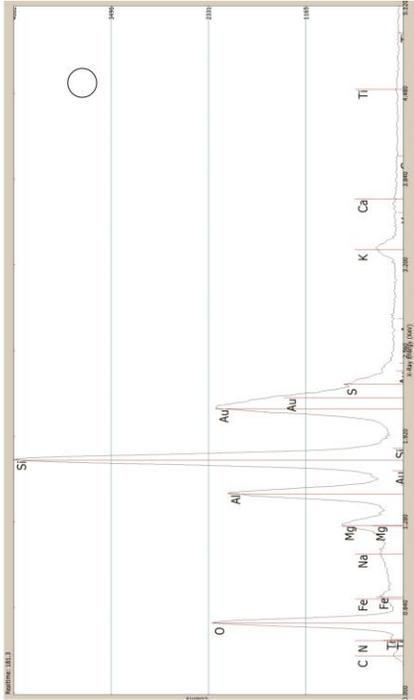
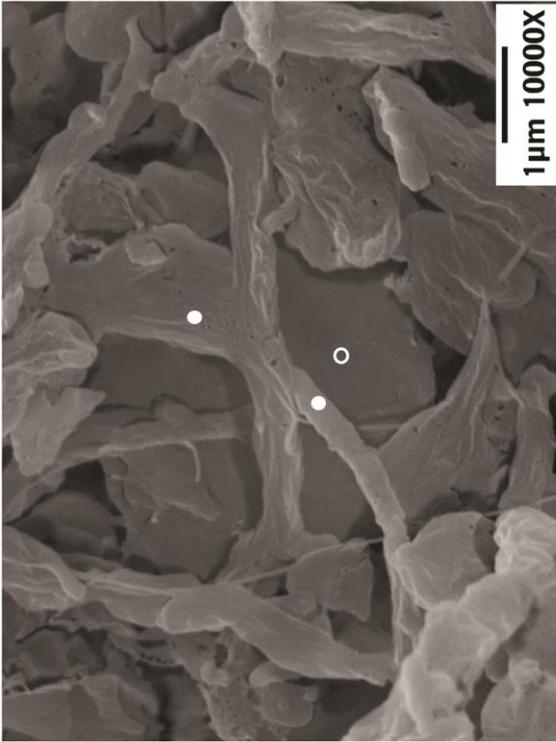


Apéndice XVII. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU09 vista desde el SEM.

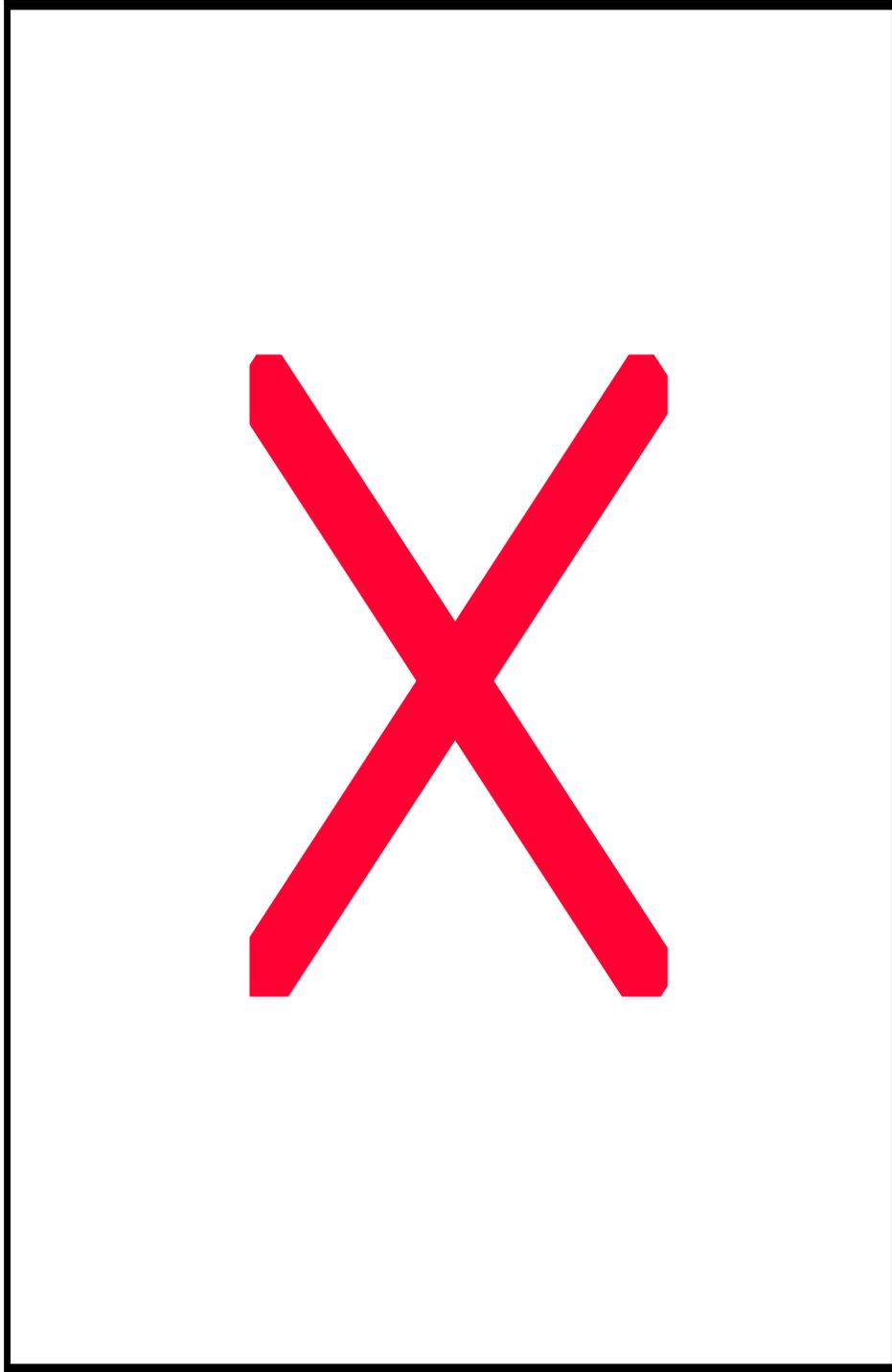


Apéndice XVIII. EDS de muestra en el sitio YAPU09 obtenida en SEM.

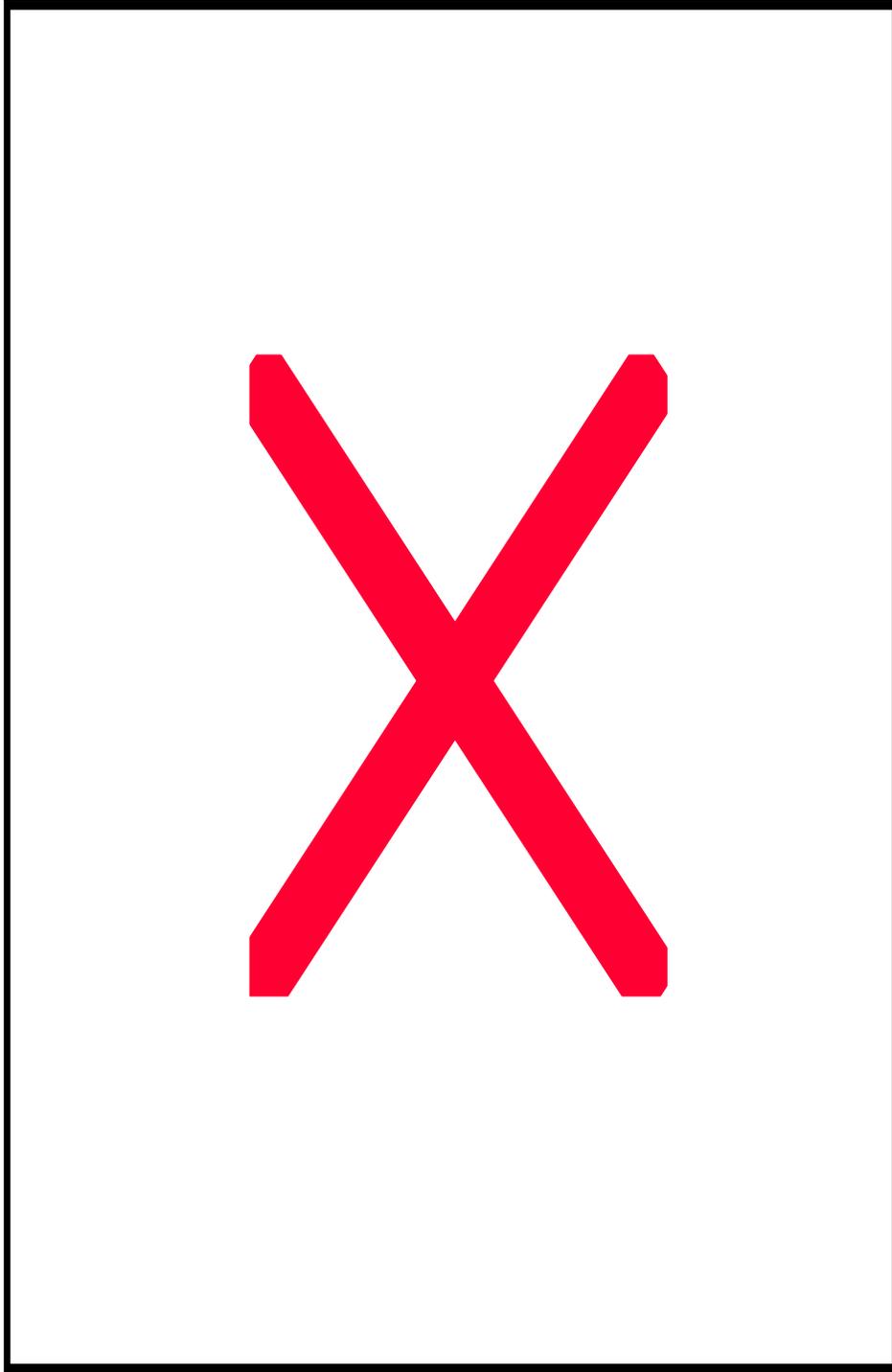
Muestra	YAPU09
Temperatura	54.2 °C
pH	6.73



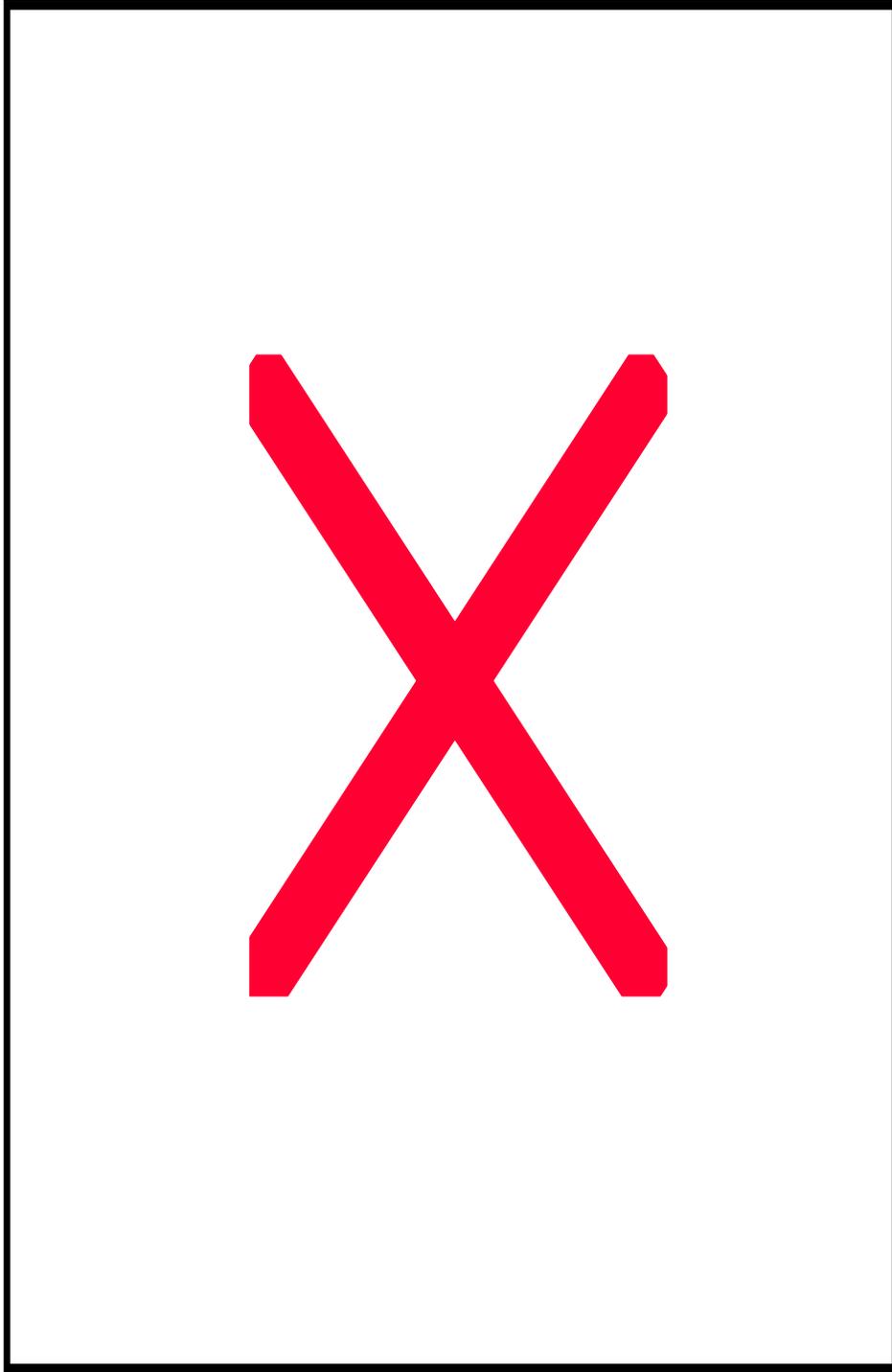
Apéndice XIX. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU10 vista desde el SEM.



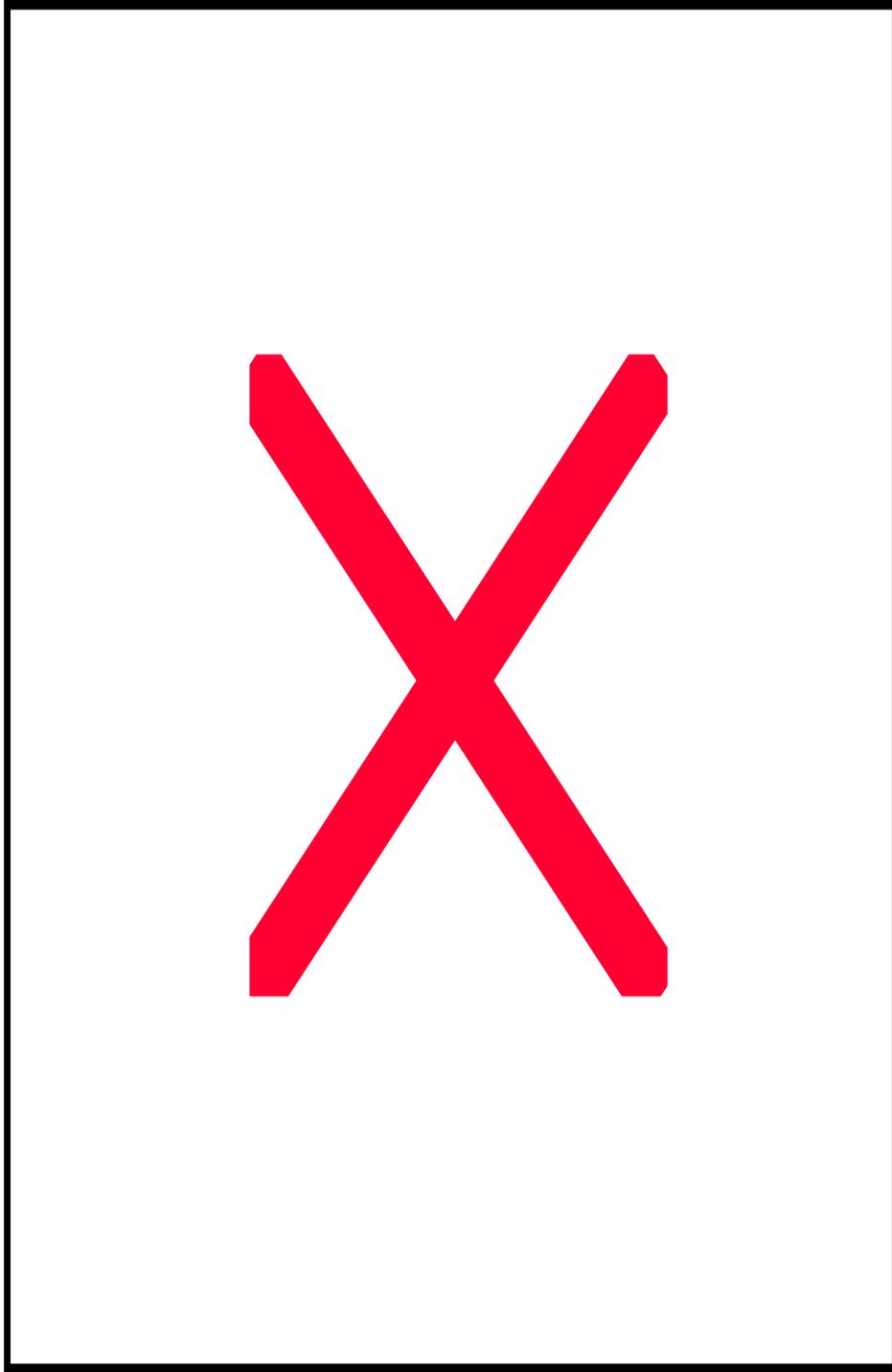
Apéndice XX. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU11 vista desde el SEM.



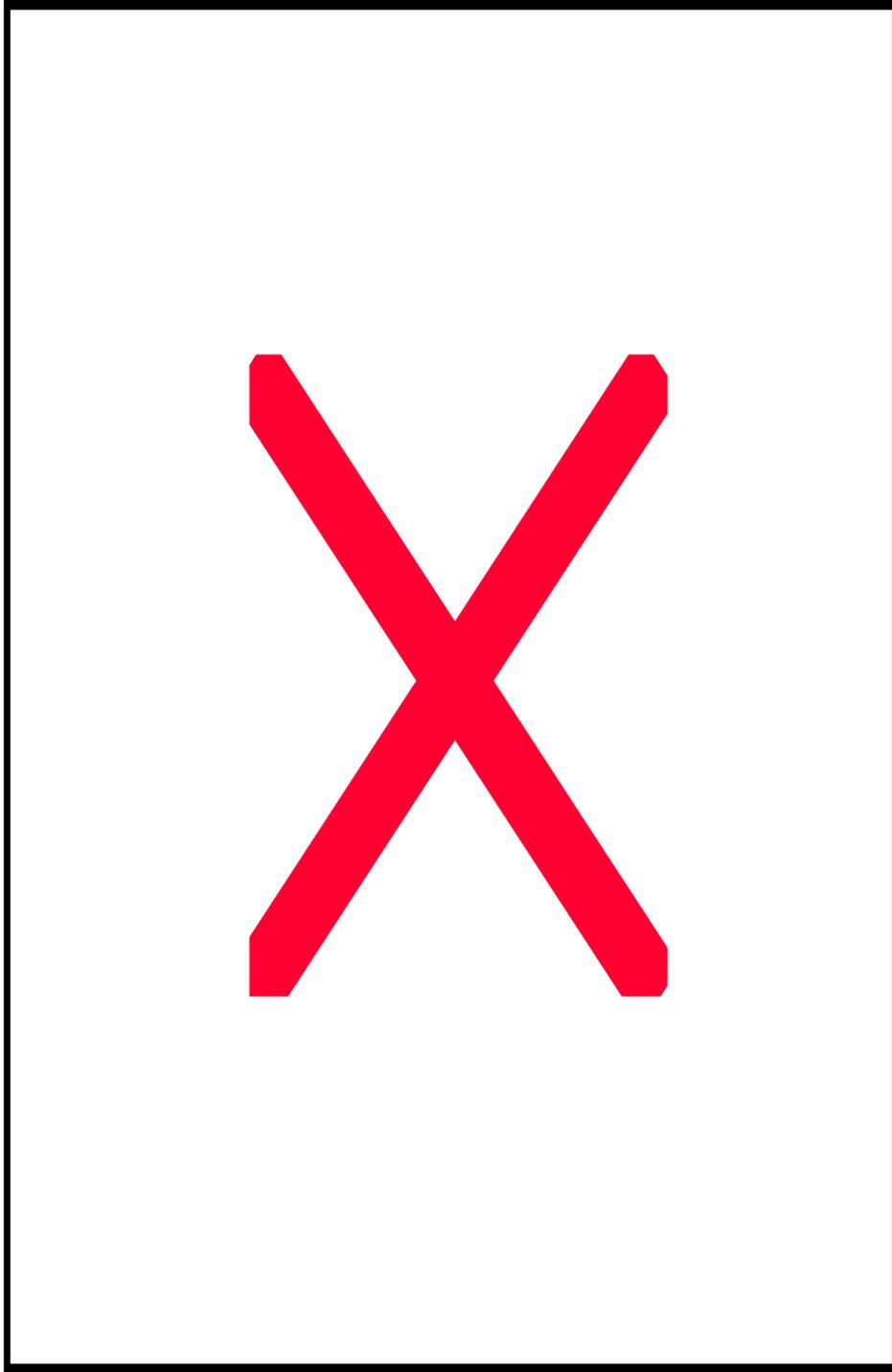
Apéndice XXI. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU12 vista desde el SEM.



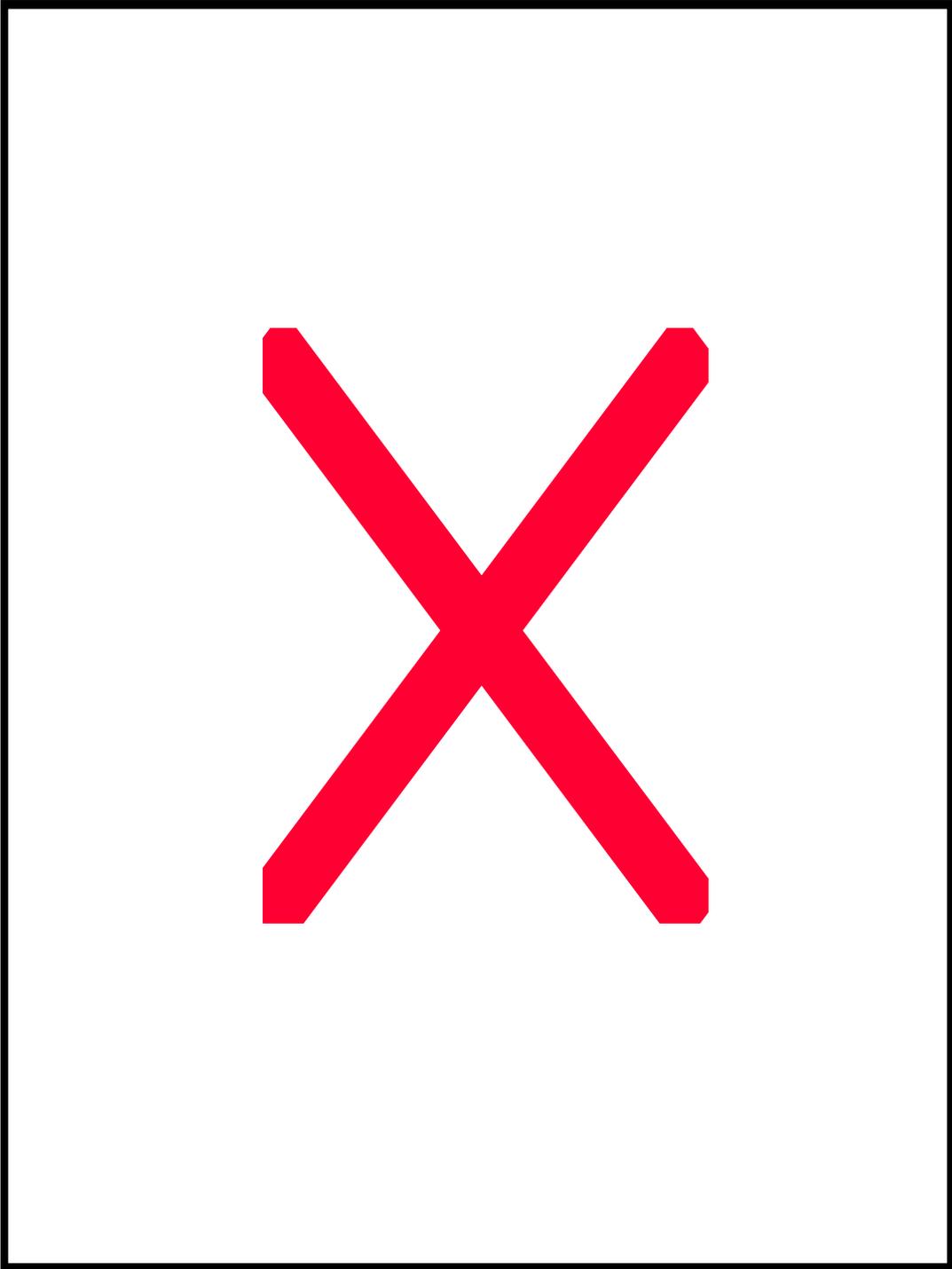
Apéndice XXII. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU13 vista desde el SEM.



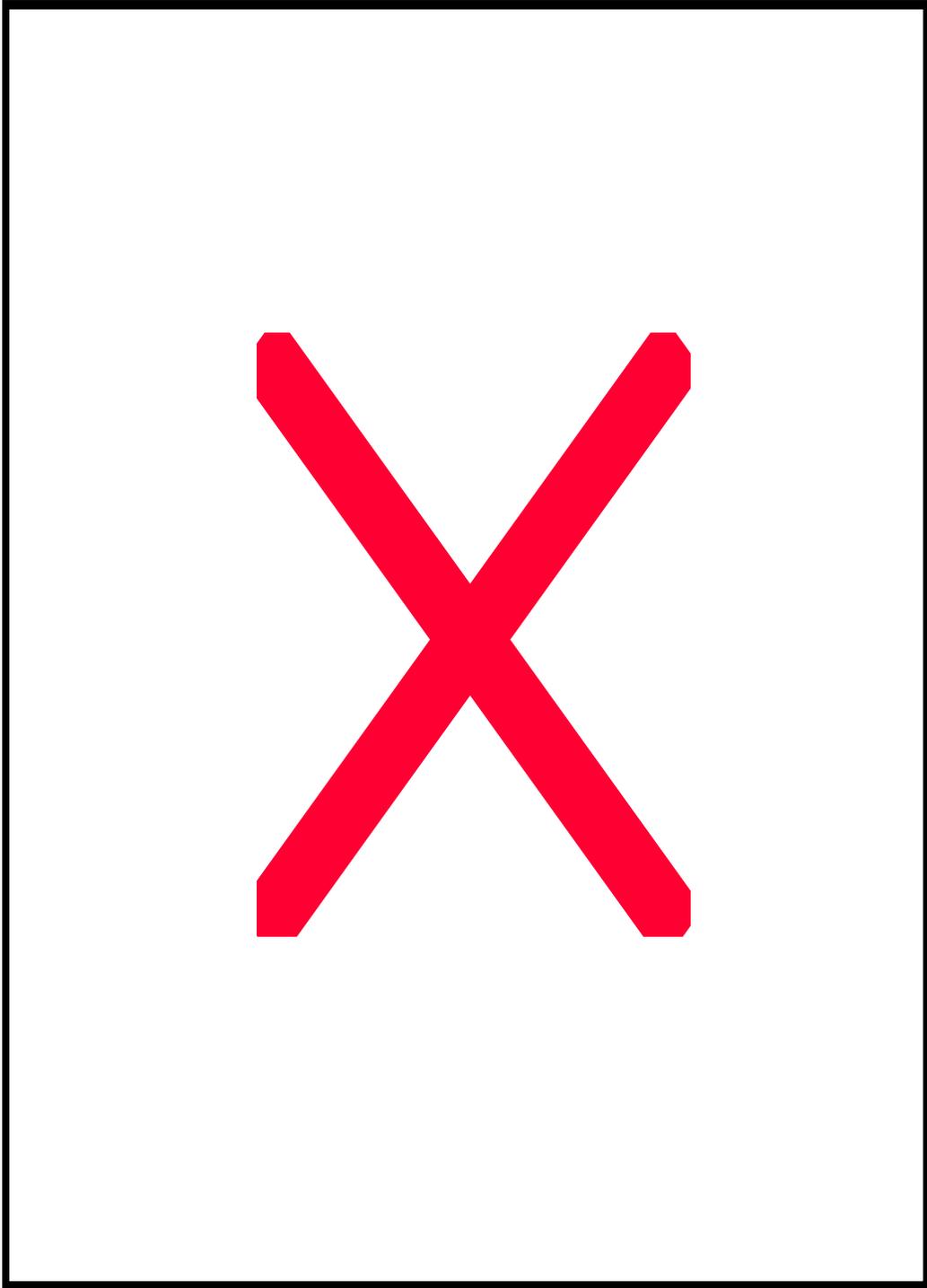
Apéndice XXIII. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU14 vista desde el SEM.



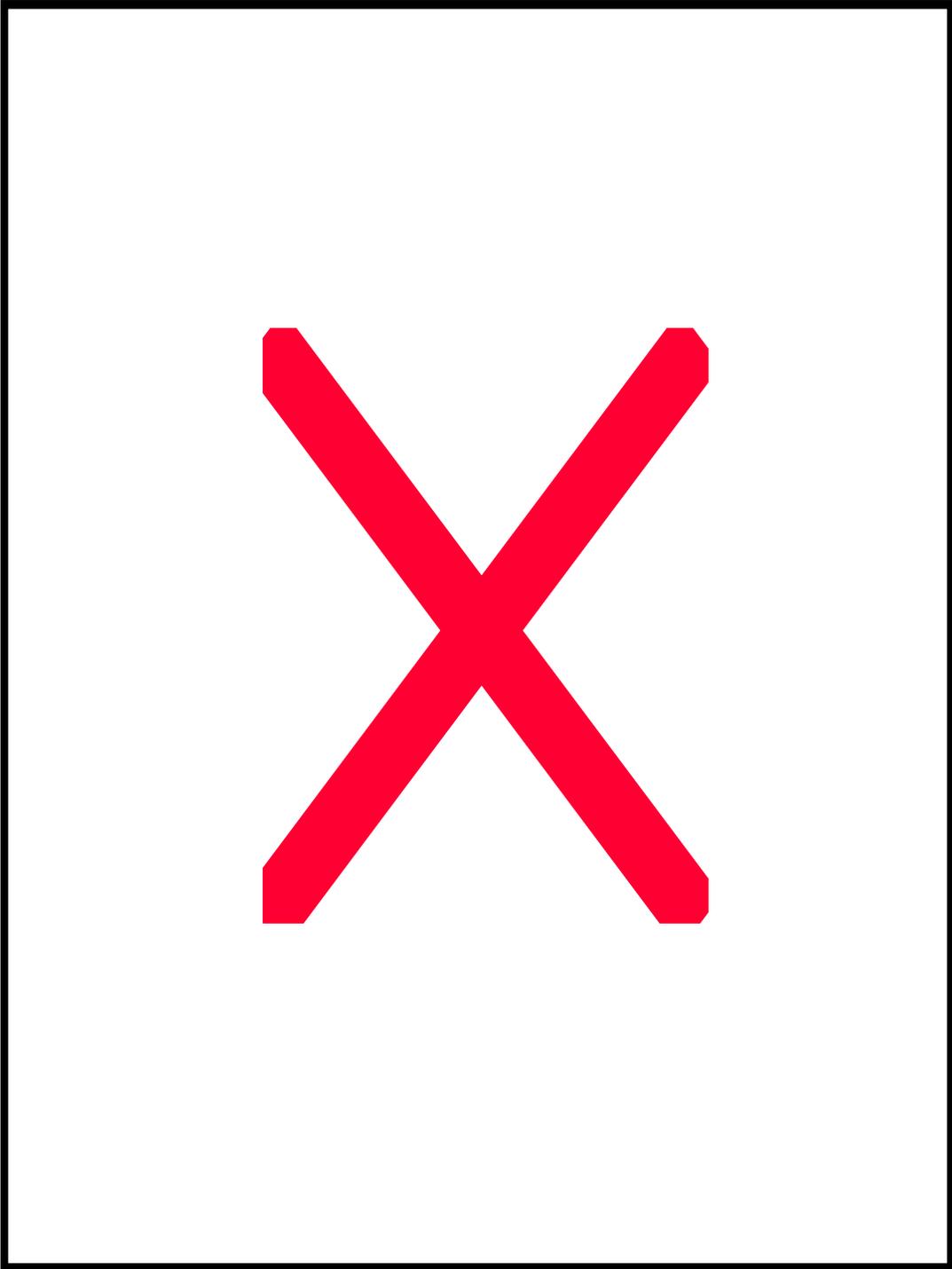
Apéndice XXIV . Muestra de roca tomada en el sitio YAPU15 vista desde el SEM.



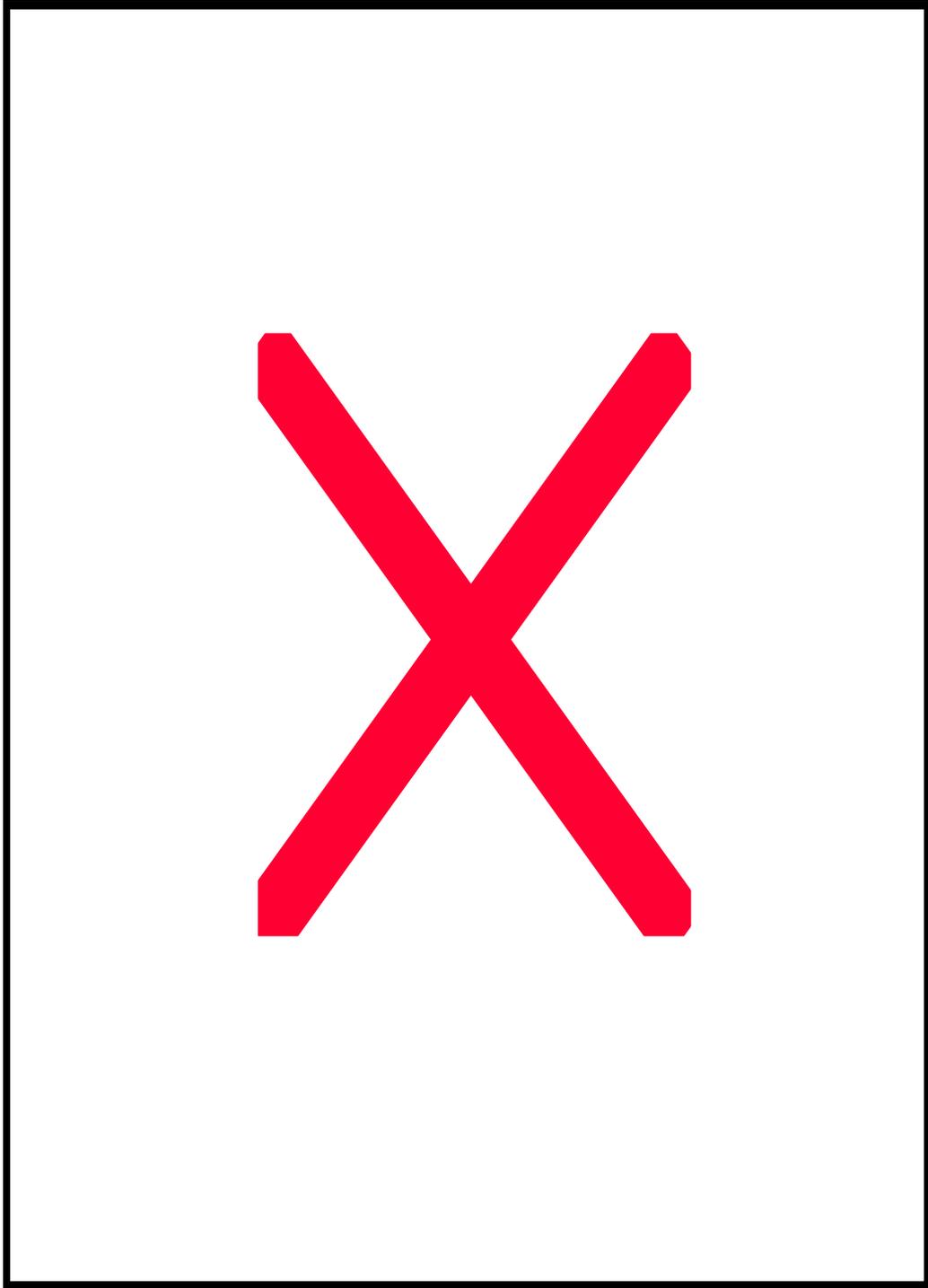
Apéndice XXV. EDS de muestra en el sitio YAPU15 obtenida en SEM.



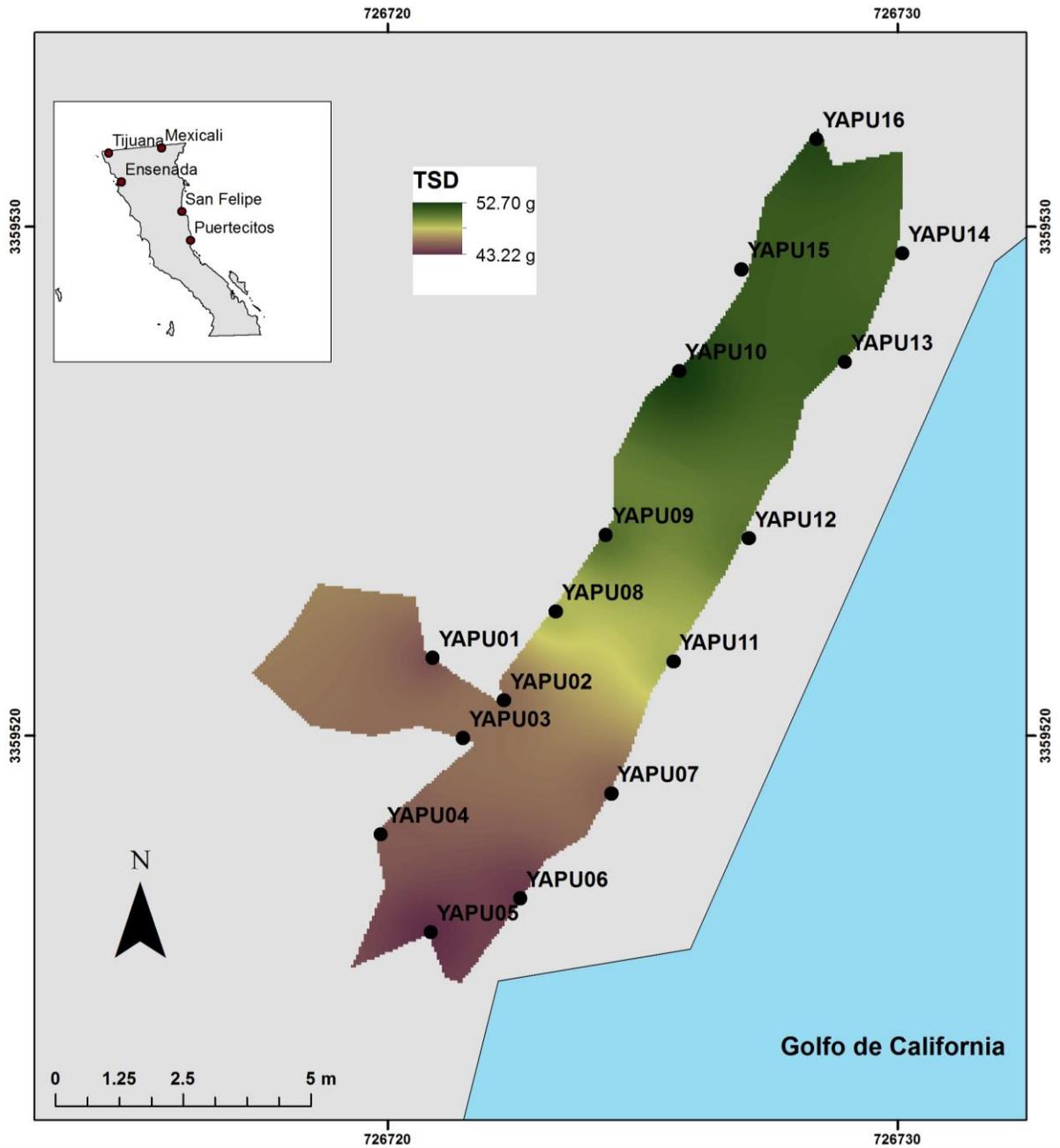
Apéndice XXVI. Muestra de roca tomada en el sitio YAPU16 vista desde el SEM.



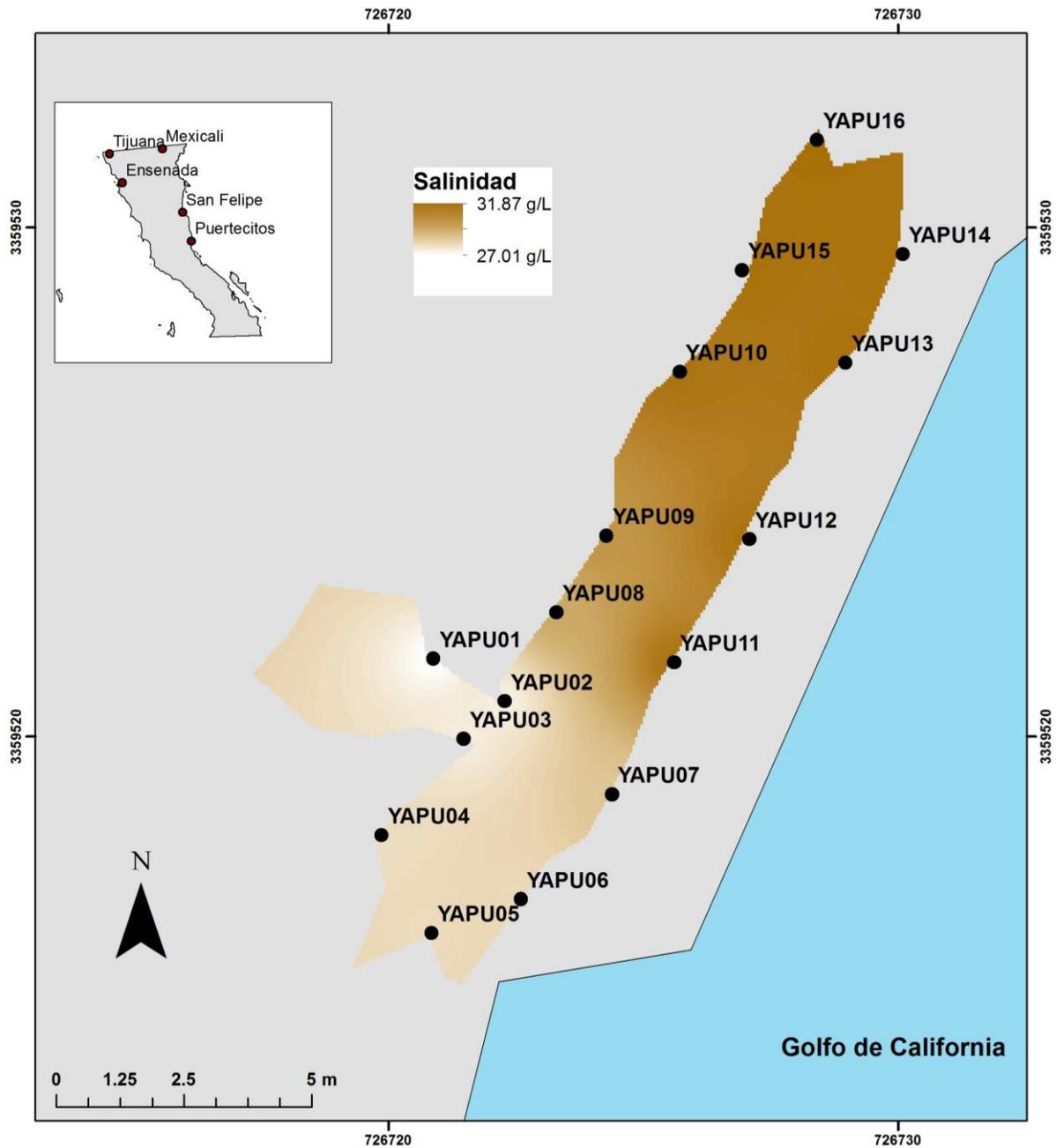
Apéndice XXVII. EDS de muestra en el sitio YAPU16 obtenida en SEM.



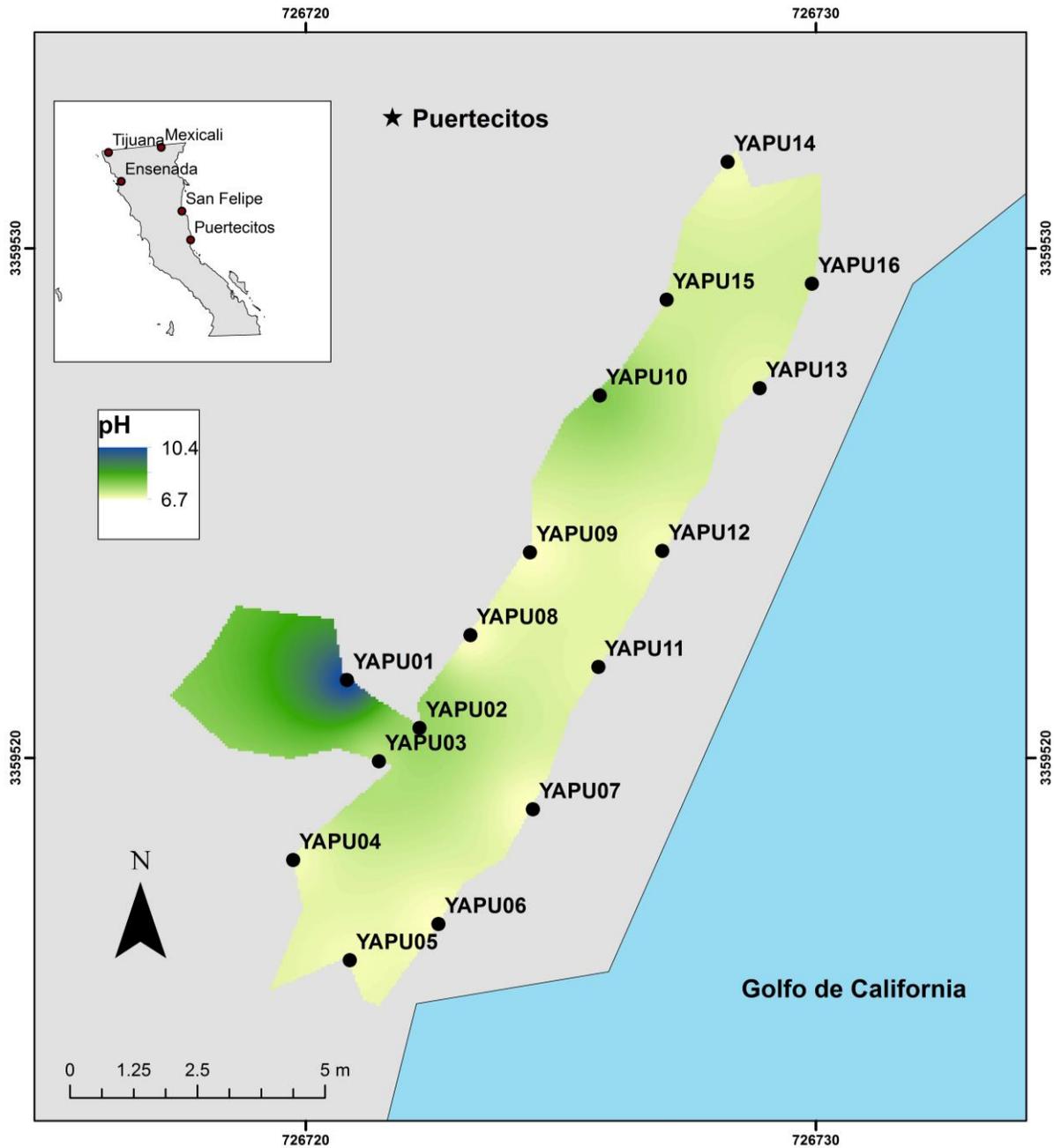
Apéndice XXVIII. Distribución de solidos disueltos totales en la fosa hidrotermal de Puertecitos, Baja California.



Apéndice XXIVX. Distribución de salinidad en la fosa hidrotermal de Puertecitos, Baja California.



Apéndice XXX. Distribución de pH en la fosa hidrotermal de Puertecitos, Baja California.



Apéndice XXXI. Distribución de conductividad eléctrica en la fosa hidrotermal de Puertecitos, Baja California.

