

4



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

GEOQUIMICA DE LOS FLUIDOS DE LAS  
VENTILAS DE HIDROTERMALES DE PUNTA MITA,  
NAYARIT.

297137

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO GEOLOGO**

P R E S E N T A :

**ANTONIO CERVANTES VELAZQUEZ**



MEXICO, D.F.

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-803

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

SR. ANTONIO CERVANTES VELAZQUEZ  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Rosa María Prol Ledesma y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**GEOQUIMICA DE LOS FLUIDOS DE LAS VENTILAS DE HIDROTERMALES DE PUNTA  
MITA, NAYARIT**

	RESUMEN
I	INTRODUCCION
II	GEOQUIMICA DE VENTILAS HIDROTERMALES
III	GENERALIDADES
IV	GEOLOGIA
V	ANTECEDENTES
VI	DATOS GEOQUIMICOS
VII	RESULTADOS
VIII	CONCLUSIONES
	REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 21 de junio de 2001

EL DIRECTOR

ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg

## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, les agradezco la confianza, cariño y el apoyo que siempre me han brindado

A mi hermano al que espero que este trabajo le sirva como estímulo para no rendirse y conseguir las metas que se ha propuesto.

## Poema

Quiero cazar al dorado ciervo.

Sí, amigos, sonrían pero no dejaré de perseguir la visión que siempre me huye.

Corro a través de de colinas y valles, me aventuro por tierras desconocidas, en busca del ciervo dorado.

Vengan al mercado y multipliquen sus compras. A mí me a cautivado la llamada de los vientos errantes. ¿Donde y cuando? No lo sé.

No hay inquietud alguna en mi corazón: todo lo que tenía lo deje tras mis pasos.

Voy corriendo entre valles y colinas, voy por extrañas tierras, busco al dorado ciervo.

Rabindranath Tagore. tomado de el libro "El Jardinero"

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de manera especial a la Dra. Rosa María Prol Ledesma por el respaldo incondicional que siempre me brindó para la realización de este trabajo, ya que sin su sabia dirección no lo hubiera logrado

Agradezco a las personas que revisaron este trabajo por sus comentarios, correcciones y sugerencias:

M. en C. Gabriela Solís Pichardo  
Ing. Héctor Luis Macías González  
Ing. Jorge Nieto Obregón  
Ing. Emiliano Campos Madrigal

A mis tíos Rosalba Sulvarán Velázquez y Joél Gómez Fregoso por todas las facilidades y respaldo que me proporcionaron durante la realización de mi carrera.

A mis amigos geólogos y no geólogos lo mismo del D.F. que de cualquier parte del país Hidalgo, Chiapas o de donde sean. Afortunadamente son tantos que temo nombrarlos uno por uno y olvidar a alguien. Gracias y mi aprecio para TODOS.

<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>II</b>	<b>GEOQUÍMICA DE VENTILAS HIDROTERMALES</b>	<b>7</b>
II.1	VENTILAS HIDROTERMALES	7
II.2	SEEPS	9
II.3	ZONAS DE CIRCULACIÓN	9
II.4	REACCIONES FLUIDO – ROCA Y EQUILIBRIO	10
II.5	SEPARACIÓN DE FASE	10
II.6	DIAGRAMAS POLIGONALES Y RADIANTES , DIAGRAMAS DE STIFF MODIFICADO	11
II.7	GEOTERMÓMETROS QUÍMICOS	12
<b>III</b>	<b>GENERALIDADES</b>	<b>14</b>
	LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN TERRITORIAL	14
III.1	VÍAS DE COMUNICACIÓN	14
III.2	CLIMA Y VEGETACIÓN	15
III.3	HIDROLOGÍA	15
III.3.1	<i>Aguas Superficiales</i>	16
III.3.2	<i>Aguas subterráneas</i>	17
<b>IV</b>	<b>GEOLOGÍA</b>	<b>18</b>
<b>V</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>20</b>
<b>VI</b>	<b>DATOS GEOQUÍMICOS</b>	<b>23</b>
<b>VII</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>27</b>
VII.1	MÉTODO DE MUESTREO Y ANÁLISIS	27
VII.2	GEOQUÍMICA DE LOS FLUIDOS POR LAS VENTILAS SUBMARINAS DE PUNTA MITA	28
<b>VIII</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>35</b>
	REFERENCIAS	37

## Resumen

Se hicieron un muestreo de los fluidos de Punta Mita Nayarit. La temperatura promedio de los fluidos observada fue de 85° C. Estos fluidos tienen bajas concentraciones de  $\text{HCO}_3$  y un enriquecimiento en  $\text{SiO}_2$ , Ca, Cs, F, Mn, I, Ba, aunque estos 3 últimos iones se ajustan a las curvas de dispersión con una gran variación. Los gases también se analizaron y muestran una preponderancia de N y  $\text{CH}_4$  con cantidades menores de Ar,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , He y  $\text{H}_2$ .

Se realizó la comparación de la composición de los fluidos con los sistemas de ventilas hidrotermales submarinos y de las manifestaciones de aguas termales en el continente. Esta comparación junto a la composición de los fluidos y los gases, nos permiten confirmar que el sistema no pertenece a un sistema geotérmico de alta temperatura con aportaciones de fluidos magmáticos, si no que al parecer el sistema pertenecería a un sistema de los denominados seeps en el cual hay una producción de hidrocarburos de origen orgánico.

## Objetivo

El objetivo de esta tesis es realizar el análisis hidrogeoquímico del agua de las ventilas hidrotermales submarinas localizadas en Punta Mita, Nayarit y en ello interpretar sus posibles orígenes y sus relaciones químicas y de temperatura con otros sistemas geotérmicos cercanos en el continente así mismo con otros sistemas submarinos que se encuentran en la cuenca del golfo de Baja California.

## I Introducción

De la química del agua descargada por las fuentes de emisión geotérmica se obtiene información específica acerca de los fluidos a profundidad en un sistema geotérmico y cómo se relaciona con las descargas naturales en la superficie.

Los sistemas geotérmicos surgen donde existe una fuente de calor a profundidades de algunos kilómetros (usualmente magmática), lo cual provoca un movimiento del agua subterránea. Esta agua es por lo general agua meteórica (Henley et al., 1984), pero pueden ser aguas connatas (aguas que quedan atrapadas en los intersticios de las rocas al momento de su consolidación) u otro tipo de agua. Los sistemas que se encuentran cerca de la costa podrían ser alimentados por agua de mar o por una combinación de agua subterránea y agua marina. Cabría la posibilidad de que la fuente de calor magmático añadiera algo de agua y volátiles como HCl, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> a temperaturas superiores a los 500° C, pero debido a la dilución y posible reacción durante el movimiento convectivo ascendente, esta posibilidad es muy difícil de probar, excepto por los datos de isótopos estables de hidrógeno, oxígeno, carbono, azufre, y helio y por analogía con sistemas fósiles profundamente disectados tales como los que ahora se aprovechan para la extracción de cobre o molibdeno en pórfidos (Henley et al., 1984). En estos depósitos la información isotópica indica la temprana introducción de una fase acuosa involucrada con el cuerpo magmático.

Las aguas geotérmicas ascienden convectivamente y reaccionan con la roca encajonante, disolviendo algunos constituyentes tales como sílice. De esta forma la alteración de minerales primarios desarrolla un nuevo arreglo mineral. Los constituyentes de estos arreglos minerales reflejan la química y la temperatura de reacción. Las aguas cloruradas que están relacionadas con los sistemas profundos comúnmente tienen contenidos de Cl por arriba de las 1000 ppm (mg/kg.) Pero en algunos sistemas, como el Salton Sea, puede llegar a ser de hasta 155,000 mg/kg (Henley et al., 1984).

En general las temperaturas de la parte superior (entre ½ y 2 km) de un sistema hidrotermal se relacionan al punto de ebullición a profundidad (Henley et al., 1984). La ebullición que se da en esta región resulta en la transferencia de gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, etc.) dentro de una fase de vapor. Esta fase entonces migra independientemente a la superficie formando fumarolas. Estas fumarolas pueden encontrar agua subterránea fría durante su ascenso donde se condensan para formar aguas calentadas por vapor. La oxidación del H<sub>2</sub>S en este medio produce aguas ácido sulfatadas (con bajos contenidos de cloro y pH en el rango de 0-3) las cuales reaccionan rápidamente con la roca encajonante y producen una alteración argílica avanzada (caolinita, alunita, etc.). Las aguas cloruradas profundas pueden llegar hasta la superficie dando origen a

manantiales termales sódico-clorurados con un pH de neutral a alcalino (Henley et al., 1984). Dependiendo de la hidrogeología de las capas más superficiales, los sistemas hidrotermales pueden interactuar con otros tipos de aguas, lo que da como resultado aguas híbridas. Las aguas ricas en bicarbonato ocurren donde el agua subterránea disuelve  $\text{CO}_2$  proveniente de la exsolución del gas a profundidad. En este caso la acidez debida a la disociación del  $\text{CO}_2$  disuelto (ácido carbónico) conduce a la alteración de la roca y la generación de sodio y bicarbonato como iones dominantes, ver tabla I.1 (Henley et al., 1984).

	Rango de pH aproximado	Aniones Principales
Aguas Subterráneas	6 - 7.5	trazas de $\text{HCO}_3$
Aguas Cloradas	4 - 9	$\text{Cl}$ , poco $\text{HCO}_3$
Cloro - Bicarbonatadas	7 - 8.5	$\text{Cl}$ , $\text{HCO}_3$
Aguas calentadas por Vapor	4.5 - 7	$\text{SO}_4$ , $\text{HCO}_3$ , trazas de $\text{Cl}$
Agua - Acido Sulfatada	1 - 3	$\text{SO}_4$ , trazas de $\text{Cl}$
Acido - Sulfatada Clorada	1 - 5	$\text{Cl}$ , $\text{SO}_4$
Bicarbonato	5 - 7	$\text{HCO}_3$
Cloro Diluido	6.5 - 7.5	$\text{Cl}$ , menos $\text{HCO}_3$

Tabla I.1 Rangos de pH y principales aniones de diferentes aguas geotérmicas tomado de Henley et al., 1984

La figura I.1 muestra la estructura de un típico sistema geotérmico en un terreno volcánico silíceo como los que ocurren la zona volcánica de Taupo en Nueva Zelanda (Henley et al., 1984), nótese las características dinámicas del sistema: recarga por aguas meteóricas, fuente

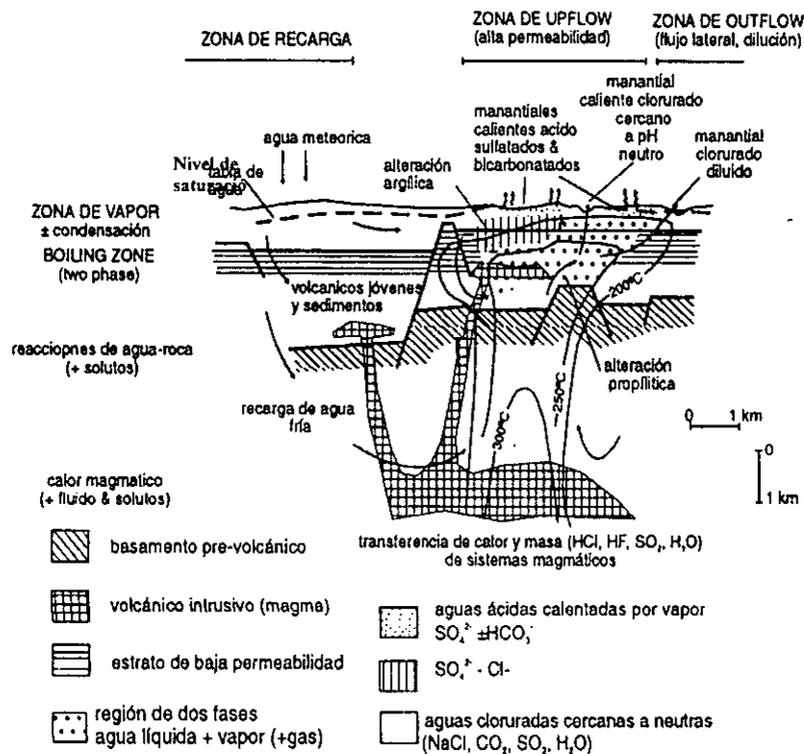


Fig. I.1 Esquema de las características principales de un sistema geotérmico típico de un terreno volcánico silíceo. El sistema está provisto por agua subterránea de origen meteórico. El calor, junto algunos gases, cloro agua y algunos otros solutos, se asumen procedentes de un sistema magmático a profundidad. (Tomado de Henley et al., 1984).

de calor a profundidad, ascenso convectivo de los fluidos, mezcla con aguas meteóricas, transferencia de vapor a la superficie y su interacción con el agua subterránea y el flujo del fluido profundo directo a la superficie o su dilución y salida a algún cuerpo superficial de agua como un río o un lago.

La estructura geológica de sistemas de estrato volcanes de andesita se muestra en la figura I.2. En estos sistemas, el mismo proceso básico ocurre, pero nótese que los manantiales de aguas cloruradas ocurren a muchos kilómetros desde la parte superior de la fuente de calor del sistema que se relaciona a flujos de vapor a la superficie debido a la situación topográfica de la descarga.

Los sistemas hidrotermales también se observan en cuencas tectónicas en respuesta a calentamiento magmático; ejemplos son Cerro Prieto, Baja California; Salton Sea, California; y el Great Basin, Nevada (Henley et al., 1984).

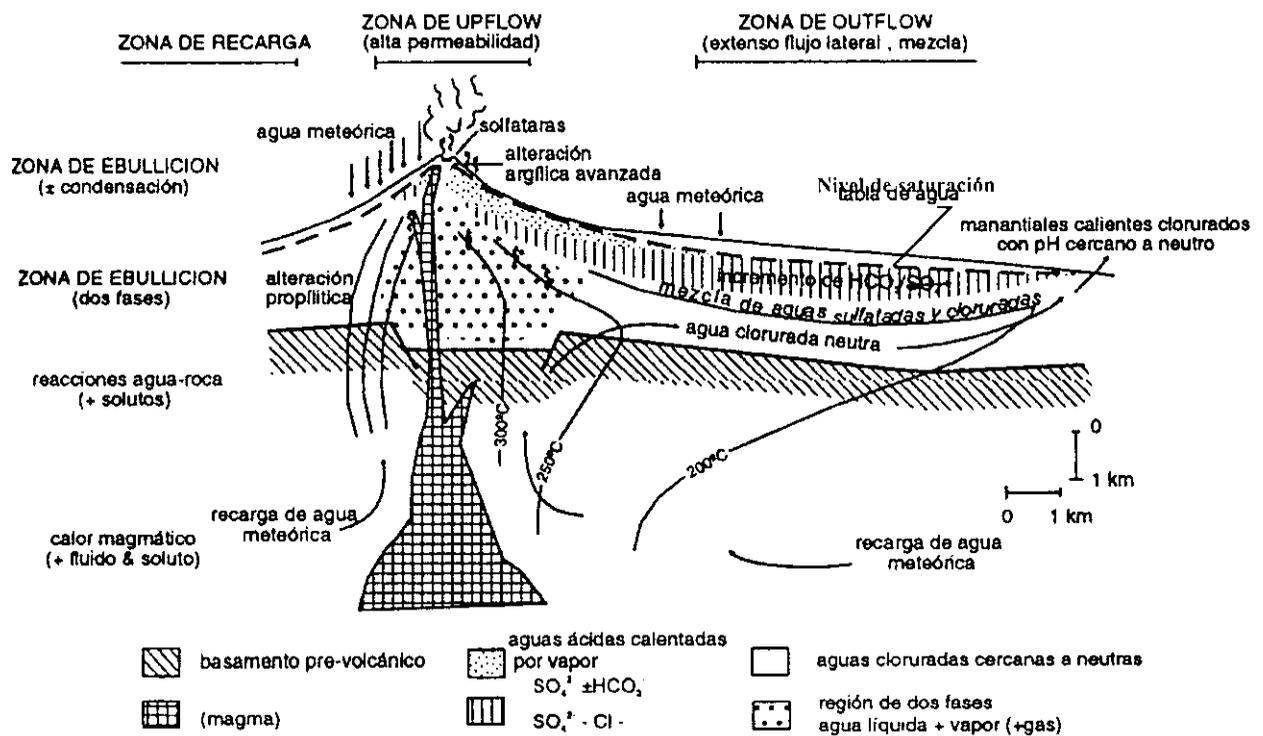


Fig. I.2.- Esquema de un sistema geotérmico típico de un volcán andesítico de un arco de islas. El nivel freático permanece bajo en regiones tropicales y el alto relieve de las estructuras volcánicas resulta en una escasez de descargas de aguas cloradas excepto a distancia del centro de surgencia. (Tomado de Henley et al, 1984).

En algunos casos el vapor es la fase móvil dominante en un sistema activo y se forma una capa de vapor de dimensiones grandes en comparación con los sistemas dominados por agua líquida. Los sistemas geotérmicos dominados por vapor son aquellos donde el vapor constituye la fase fluida y determina el cambio en presión con la profundidad. El papel del

vapor móvil y el líquido relativamente inmóvil da como resultado un vapor supercalentado sin que se produzca agua líquida. Aunque los sistemas dominados por vapor son económicamente importantes, y por lo general científicamente interesantes, estos aportan poca información desde el punto de vista geoquímico en relación con los sistemas con fase líquida. Debido a que no hay una fase líquida en la descarga que aporte información de la interacción con la roca y los componentes están restringidos a los que participan a la fase de vapor, por lo tanto no se puede tener una visión integral de estos sistemas (Henley et al., 1984).

## II Geoquímica de Ventilas Hidrotermales

Cuando las descargas de los fluidos hidrotermales se realizan en el fondo marino se tiene el desarrollo de sistemas con características especiales, determinadas por la presencia de agua marina en el líquido descargado y una variedad de gases que dependen del origen de la fuente de calor y de la interacción con los sedimentos. Estos sistemas se pueden dividir en dos tipos: las ventilas hidrotermales y los "seeps".

### II.1 Ventilas Hidrotermales

Las características de tipo químico y físico que presentan las ventilas hidrotermales submarinas en general nos permiten diferenciar al fenómeno de las ventilas hidrotermales de alta temperatura de otros con características parecidas como podrían ser los "seeps". El análisis químico de los fluidos geotérmicos aunado a una serie de herramientas de cálculo nos aportan otros datos como la temperatura de fondo, la profundidad donde estos fluidos circulan y el tipo de roca con que interactúan.

Las fisuras y fallas asociados con el proceso de expansión de piso oceánico exponen rápidamente rocas formadas a elevadas temperaturas y actúan como conductos para la circulación del agua marina. Los espacios entre las rocas son llenados por agua (percolados). Cuando el material fundido del manto intrusión a la corteza, la temperatura del agua asciende y esta se mueve hacia el piso oceánico. El agua marina es calentada antes de reaccionar químicamente con el basalto circundante.

Los ridges oceánicos donde generalmente se encuentran estos sistemas hidrotermales submarinos están a profundidades de aproximadamente 1000 hasta 4000 m bajo el nivel del mar y a presiones hasta 400 veces mayores que la presión atmosférica. El agua marina puede alcanzar temperaturas por encima de 350 – 400° C sin entrar en ebullición, sin embargo los fluidos se vuelven extremadamente volátiles a esas temperaturas y fluyen hacia arriba rápidamente. Las soluciones existentes en las ventilas son ácidas (pH aproximado 3.5) y con un contenido de más de 300 ppm de H<sub>2</sub>S (<http://maritime.haifa.ac.il/departm/lessons/ocean/lect08.htm> 17/04/01).

Durante la circulación hidrotermal, el agua marina pierde Mg y SO<sub>4</sub> y gana cantidades significativas de calcio y algunas veces K y Na así como sílice, bario, rubidio, hierro y manganeso. El sulfato precipita como sulfato de calcio y sulfato de bario en grietas y fisuras.

Las ventilas hidrotermales de acuerdo en la forma en que descargan los fluidos y debido a la composición predominante de los mismos presentan fumarolas (smokers) ya sea negras o blancas.

**Fumarola negra** (Black smoker) está compuesta por precipitados de sulfuros de los elementos formados durante la mezcla turbulenta con el agua marina fría y alcalina (pero en los orificios de las ventilas donde las temperaturas son de 350°C, los fluidos son claros y homogéneos). (<http://maritime.haifa.ac.il/departm/lessons/ocean/lect08.htm> 17/04/01)

**Fumarola blanca** (White Smoker) se compone de sílice amorfa mezclado con sulfuros de zinc y hierro y sulfatos de bario, tienen temperaturas de salida con rangos desde 30 a 350 °C y tienen un mayor porcentaje de mezcla con el agua de mar que los humeros negros (tomado de <http://maritime.haifa.ac.il/departm/lessons/ocean/lect08.htm> 17/04/01).

El tiempo de vida de las ventilas está relacionado con la tasa de expansión del piso oceánico: en los campos de ventilas del Pacífico las chimeneas tienen un tiempo de vida superior a los 100 años; En ciertos sitios del Atlántico, las ventilas pueden tener una edad desde 1000 hasta 10000 años (<http://maritime.haifa.ac.il/departm/lessons/ocean/lect08.htm> 17/04/01).

La precipitación de minerales reduce la permeabilidad de la roca circundante y aísla las zonas de flujo ascendente, así el agua caliente que asciende y llega a una zona en la que ha ocurrido autosellamiento no se puede mezclar con el agua fría cerca de la superficie. Los minerales forman un sello alrededor del conducto que eventualmente se extiende en el piso oceánico y construye la chimenea que caracteriza a los black smokers. Así sucede que el flujo ascendente no se puede mezclar con el agua marina durante su ascenso y emerge a muy altas temperaturas (<http://maritime.haifa.ac.il/departm/lessons/ocean/lect08.htm> 17/04/01).

Las ventilas hidrotermales forman parte de los grandes sistemas de circulación que se forman en los basaltos jóvenes y fracturados de los valles axiales. El agua fría del océano se precipita dentro de las fracturas y fallas hasta alcanzar la roca caliente profunda en la corteza basáltica. Esta agua es calentada a temperaturas muy altas debido a la alta presión presente a esas profundidades y sube de regreso a través de otras fracturas en los basaltos.

Los fluidos son ricos en  $3\text{He}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{H}_2\text{S}$ . Sin embargo, el contenido de estos compuestos puede variar de ventila a ventila dependiendo de múltiples circunstancias como la capa de sedimentos que tiene que atravesar, así como su espesor y el contenido de materia orgánica. A continuación se presentan los valores para diversas ventilas de todo el mundo (tabla II.1) y se muestra la variación de algunos parámetros como profundidad, pH, temperatura, alcalinidad y composición química.

Parámetro	Unidades	Lucky Strike ridge mid Atlantic 37°	Broken Spur ridge mid Atlantic 29°	TAG & MARK	Axial Volcano Ridge Juan de Fuca	Ventilas en el mundo	Agua marina
Temperatura	°C	197-328	356-364	273-369	283-323	>2-403	~ 1-5 (Btm wtr)
profundidad	M	1618-1726	3100	3500-3700	1542		
pH	Medido a 25°C 1 atm	3.8-4.9		<3-3.8	~ 3.5 e	2.5-7.8	7.8
Alcalinidad total	meq/kg	-0.6-0.3	-0.35-0.56	-2.7-10.6	2.3		
Cl	mmol/kg	436-546	469	559-659	482-520	33-1245	545
SO <sub>4</sub>	mmol/kg	-2.0-1.9				0	28
H <sub>2</sub> S	mmol/kg	1.4-4.6		0.5-3.5	~ 9.2 e	0-110	0
Si	mmol/kg	12.8-17.5		18-22	~ 15.2 e	2.7-24.0	0.032-0.180
Li	mmol/kg	0.29-0.42	1.01-1.04	0.35-0.84	0.49-0.54	<0.012-2.35	0.026
Na	mmol/kg	339-483	419-422	510-584	391-417	<15-924	465
K	mmol/kg	20.4-28.8	18.1-19.6	17.1-23.6	20.6-22.5	<1-58.7	10
Ca	mmol/kg	29.8-42.1	11.8-12.8	9.9-30.8	34.5-39.4	<0.2-109	10
Mg	mmol/kg	0	0	0	0	0	53
Sr	mmol/kg	72-118	42.9-48	50-103	145	<1-348	87
Fe	mmol/kg	0.06-0.77	1.68-2.16	1.64-5.59	0.87-1	.05 0-18.7	<0.00001
Mn	mmol/kg	0.07-0.39	0.25-0.26	0.49-1.00	0.87-1.10	0-4.48	<0.00001

Tabla II.1.- Comparación de fluidos de ventilas submarinas (Tomado de Von Damm et al., 1998)

Los sistemas hidrotermales del piso oceánico tienen un gran impacto local en la química del océano, el cual puede ser medido con base en el volumen de la descarga y las características geoquímicas de las plumas hidrotermales. Algunos trazadores hidrotermales, especialmente el helio, se pueden mapear por miles de kilómetros desde su fuente y pueden ser usados para comprender la circulación en la parte profunda del océano. Debido a que la circulación hidrotermal remueve algunos compuestos del agua marina (por ejemplo Mg y SO<sub>4</sub>) y añade muchos otros (He, Mn, Fe, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), es un proceso importante que tiene gran influencia en la composición del agua marina (<http://www.pmel.noaa.gov/vents/chemocean.html>, 2001-02-23).

## II.2 Seeps

Los seeps son emisiones de gases y/o fluidos, que se presentan tanto en continente como en el océano. Los tipos de seeps incluyen manantiales terrestres, volcanes de lodo y ciertos tipos de chapopoterías, seeps de gas en continente, seeps marinos en plataformas carbonatadas y seeps marinos gaseosos y de hidrocarburos (Moore, 1999).

Los seeps se distinguen de las ventilas hidrotermales de rifts oceánicos en que su temperatura es más baja y el flujo también. Los seeps se asocian a cuencas sedimentarias especialmente en márgenes continentales, donde las ventilas yacen sobre el fondo marino. Los fluidos de los seeps son químicamente diversos, consisten de líquidos, gases e hidrocarburos y de varias mezclas de éstos. Los seeps alteran la química del agua y los sedimentos así como sus propiedades físicas. Los gases más comunes en los seeps son CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>S (Moore, 1999).

## II.3 Zonas de Circulación

La estructura de permeabilidad de la corteza oceánica y la localización de fuentes de calor determinan como circulan los fluidos hidrotermales. En la recarga de agua, el agua fría del océano penetra en la corteza oceánica y es gradualmente calentada a lo largo de su patrón de flujo. Hay una fuerte tendencia a remover el Mg del fluido e incorporarlo a la roca y durante este proceso se produce ácido, lo cual lleva a la remoción de otros elementos mayores y trazas de las rocas y a su incorporación en el fluido hidrotermal. El sulfato del agua marina es removido de la solución por precipitación en forma de anhidrita y por reducción a sulfuro de hidrógeno. Los fluidos alcanzan su máxima temperatura en la zona de reacción cerca de la fuente de calor. Los parámetros de importancia que determinan la composición de los fluidos hidrotermales son presión, temperatura, relación agua/roca, composición de la roca, composición de los fluidos de recarga y la cinética de las reacciones. Las reacciones son más rápidas en altas temperaturas y los fluidos podrían alcanzar más fácilmente el equilibrio con un arreglo de minerales de alteración de alta temperatura que con uno de baja temperatura (<http://www.pmel.noaa.gov/vents/chemocean.html>, 2001-02-23).

Los fluidos calientes suben hasta el piso oceánico en la zona de surgencia. El tiempo de residencia en esta zona es probablemente muy corto, pero los fluidos pueden continuar

reaccionando con la roca a través de la que fluyen. El fluido se enfría levemente a través de la descompresión (enfriamiento adiabático) y se podría enfriar también perdiendo calor al contacto con la roca circundante (enfriamiento conductivo) o por mezclarse con agua marina fría que penetra por debajo del piso oceánico. El enfriamiento podría hacer que el fluido quede sobresaturado en algunos compuestos y empiece a precipitar minerales secundarios (sulfuros metálicos, cuarzo, etc.), así que la química del fluido puede variar levemente entre la zona de reacción y el arribo a piso oceánico.

Las ventilas hidrotermales son la interfase entre la zona de surgencia caliente y anóxica y el agua de mar fría y oxidante. Cuando los fluidos calientes se mezclan con el agua de mar, se precipitan en segundos muchos minerales hidrotermales, formando las densas plumas de partículas características de los humeros negros. Las partículas son una mezcla de sulfuros (por ejemplo: pirrotita (FeS), esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) y sulfatos (anhidrita (CaSO<sub>4</sub>), barita (BaSO<sub>4</sub>) (<http://www.pmel.noaa.gov/vents/chemocean.html>, 2001-02-23). Algunos de estos minerales forman parte de las estructuras de las chimeneas en el piso oceánico, mientras que otros se forman en la pluma y se dispersan a través del agua.

Otra forma de ventila hidrotermal es la ventila difusa, que se presenta en el suelo marino como una pequeña descarga a través de las grietas circundantes de los humeros de alta temperaturas en áreas aisladas. Los fluidos de más baja temperatura generalmente no contienen suficientes metales disueltos y sulfuros para formar nubes oscuras. Hay evidencia de que las ventilas difusas más frías están en la mayoría de los casos formadas por una mezcla de fluidos geotérmicos con fluidos fríos marinos por debajo del piso marino, y en muchos casos precipitan minerales por debajo del piso oceánico.

## **II.4 Reacciones Fluido – Roca y Equilibrio**

Las tasas de reacción se incrementan con la temperatura, y se ha supuesto que el equilibrio se alcanza en las zonas de reacción caliente en mitad de los ridges oceánicos (<http://www.pmel.noaa.gov/vents/chemocean.html>, 2001-02-23). Si los sistemas hidrotermales fueran simples y la información termodinámica fuera completa y exacta, entonces uno podría predecir con precisión la composición en equilibrio del fluido resultante a partir del fluido inicial y la composición de la roca y patrones de reacción bien definidos. Este es un problema complejo. Hasta la fecha el modelado termodinámico y las aproximaciones experimentales agua/roca han producido interpretaciones importantes acerca de las condiciones de depositación de los minerales y predicciones de la química hidrotermal bajo diferentes parámetros hidrogeológicos de los sistemas hidrotermales.

## **II.5 Separación de Fase**

El proceso de separación de fases, el cual toma lugar como ebullición normal o como condensación salina a presiones supercríticas, juega un papel crucial en determinar la composición de los fluidos de las ventilas. Los elementos se fraccionan con especies iónicas particionadas en la fase líquida y especies volátiles en la fase de vapor. La separación de fases puede ocurrir bajo una gran variedad de circunstancias. En una solución acuosa salina, en una ebullición normal, (por ejemplo producción de vapor de baja salinidad) ocurre cuando el

fluido cruza la curva de ebullición. Sin embargo, si el fluido cruza la curva de dos fases con una presión y temperatura por encima del punto crítico, se condensa un fluido de alta salinidad. Estos dos tipos de separación de fases producen condiciones químicas muy diferentes.

## II.6 Diagramas poligonales y radiantes . Diagramas de Stiff modificado.

Fundamento. Consisten en tomar sobre semirrectas convergentes o paralelas segmentos proporcionales a cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua. Se presta bien a comparaciones y a ser utilizados en mapas hidrogeoquímicos (Custodio y Llamas, 1983).

Tipos.-

- A) *Radiantes*: sobre 4, 6 o 12 semirrectas concurrentes uniformemente espaciadas se colocan valores proporcionalmente a los meq/l o a los % de los meq/l de cada ion y se unen en los extremos formando un polígono estelar (Custodio y Llamas, 1983).
- B) *Polígonos paralelos*: El más conocido es el *diagrama de Stiff*. En este diagrama tienen 4 rectas paralelas igualmente espaciadas cortadas por una normal dando así cuatro semirrectas izquierdas (campo de cationes) y cuatro semirrectas derechas (campo de aniones). Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/l de ion correspondiente y se unen los extremos dando un polígono representativo. De arriba abajo se disponen Na+K, Ca, Mg, Fe; Cl, CO<sub>3</sub>H, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>; esta es la disposición de Stiff, para aguas de yacimientos de petróleo. Para aguas subterráneas es mejor utilizar la siguiente disposición utilizando tres o cuatro rectas base (Custodio y Llamas, 1983).

$Na+K, Mg, Ca$  ;  $Cl+NO_3, SO_4, CO_3H+CO_3$

o bien

$K, Na, Mg, Ca$  ;  $NO_3, Cl, SO_4, CO_3H+CO_3$

Esta última disposición indicada parece ser la mejor para aguas subterráneas normales y además permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes o entre aniones; además se adapta muy bien a ser utilizado en mapas geohidroquímicos y las comparaciones se pueden hacer con rapidez.

Para aguas muy concentrada o muy diluidas el diagrama es muy alargado y entonces es conveniente reducir o ampliar la escala, indicándolo con un rayado especial del diagrama. El empleo de valores en % de meq/l evita diferencias de tamaño entre figuras, pero no permite apreciar concentraciones absolutas. La adopción de escalas logarítmicas permite representar aguas muy diferentes en contenido salino manteniendo tamaños aceptables pero su uso no es habitual y además se pierde parte de la semejanza (Custodio y Llamas, 1983).

## II.7 Geotermómetros Químicos

Los principales geotermómetros son los que dependen de: 1) la disolución de minerales de sílice, 2) del intercambio catiónico entre feldespatos, micas y posiblemente arcillas, 3) del equilibrio de los gases con los minerales de las rocas y 4) del fraccionamiento isotópico entre las especies presentes en los fluidos constituyentes (Truesdell, 1984).

Los elementos alcalinos (Na, K, Ca, Mg) y el pH se relacionan a través del equilibrio mineral entre feldespatos, micas, arcillas, calco silicatos y calcita. Asignar la información empírica a un arreglo de minerales específicos es un problema debido a la incertidumbre en la información termodinámica y en la alternativa de los polimorfos (ejemplo: Constantes termodinámicas de las arcillas o bien albíta de baja temperatura y albíta de alta temperatura).

En muchas áreas, el geotermómetro simple Na/K da estimaciones poco razonables, estimando resultados de temperaturas muy altas debido a las reacciones de intercambio de iones con minerales arcillosos particularmente en donde las temperaturas profundas son menores de 200°C. El termómetro empírico de Na - K- Ca se basa en el equilibrio que involucra estas fases minerales, aunque su uso requiere de algunas consideraciones acerca del equilibrio agua - roca (Giggenbach, 1988).

A bajas temperaturas, donde la solubilidad de la calcita es relativamente alta, la presión  $P_{CO_2}$  de la solución podría afectar marcadamente los resultados. Por otra parte, aunque las solubilidades de los silicatos de magnesio son muy bajas a altas temperaturas los contenidos altos de magnesio a bajas temperaturas afectan al geotermómetro de Na-K-Ca y se debe aplicar una corrección empírica. Sin embargo se debe tener cuidado en caso de que el incremento del magnesio se dé cerca de la superficie debido a la mezcla o reacciones rápidas. Nótese que aunque el geotermómetro de Na-K- Ca con su corrección de magnesio está probablemente basado en una sucesión de diferentes equilibrios minerales las relaciones Mg - Na - K - Ca del agua de mar muestran que las reacciones de baja temperaturas podrían ser importantes ver tabla II.2 (Henley et al. , 1984).

El geotermómetro de sílice, el cual depende de la solubilidad del cuarzo y otros polimorfos de sílice, puede ser usado directamente como un geotermómetro conductivo, si no hay cambio en las concentraciones de sílice, es decir, que no hay depositación mineral, ni calentamiento posterior ver tabla II.2 (Truesdell, 1984).

Geotermómetro	Ecuación	Restricciones
Cuarzo sin pérdida de vapor	$t = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$t = 0 - 250^\circ \text{C}$
Cuarzo con máxima pérdida de vapor	$t = \frac{1522}{5.75 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$t = 0 - 250^\circ \text{C}$
Calcedonia	$t = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$t = 0 - 250^\circ \text{C}$
Cristobalita - $\alpha$	$t = \frac{1000}{4.78 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$t = 0 - 250^\circ \text{C}$
Cristobalita - $\beta$	$t = \frac{781}{4.51 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$t = 0 - 250^\circ \text{C}$
Na/K (Fournier)	$t = \frac{1217}{\log (\text{Na/K}) + 1438} - 273.15$	$t > 150^\circ \text{C}$
Na/K (Truesdell)	$t = \frac{855.6}{\log (\text{Na/K}) + 0.8573} - 273.15$	$t > 150^\circ \text{C}$
Na-K-Ca (Fournier y Truesdell)	$t = \frac{1647}{\log (\text{Na/K}) + \beta [\log ((\text{Ca/Na})^{1/2}) + 2.06]} + 2.47} - 273.15$	$t < 100^\circ \text{C}, \beta = 4/3$ $t > 100^\circ \text{C}, \beta = 1/3$
Na/Li*	$t = \frac{1000}{\log (\text{Na/Li}) + 0.14} - 273.15$	$t > 150^\circ \text{C}$ Salinidad < 7000 mg/kg Cl
K/Mg (Giggenbach)*	$t = \frac{4410}{\log (\text{Mg/K}^2) + 13.95} - 273.15$	$t > 100^\circ \text{C}$

Tabla II.2 Geotermómetros más utilizados (tomados de Henley et al., 1984)

### III Generalidades

#### Localización y extensión territorial

El estado de Nayarit se encuentra en la porción centro occidental de la República Mexicana. Limita al norte con los estados de Durango y Sinaloa, al este con los estados de Zacatecas y Jalisco, y al oeste con el Océano Pacífico. Está constituido por 20 municipios y abarca una superficie de 27 951.54 km<sup>2</sup> (2 795 154 ha) que representan el 1.4% de la extensión territorial del país, correspondiendo 1 757 km<sup>2</sup> al archipiélago de las Islas Mariás, las Islas Marietas y la Isla Isabel. La capital del estado es Tepic y sus principales poblaciones son Acaponeta, San Blas, Compostela e Ixtlán del Río (Consejo de Recursos Minerales, 1994).

#### III.1 Vías de Comunicación

El estado de Nayarit cuenta con 1411 km de carreteras pavimentadas, 1982 km de caminos revestidos, 520 km de terracería, 384 km de vía de ferrocarril, un aeropuerto con vuelos nacionales, 22 aeropistas y 5 puertos marinos que operan como puertos de cabotaje para la pesca y el turismo ver figura III.1 (CRM, 1994).

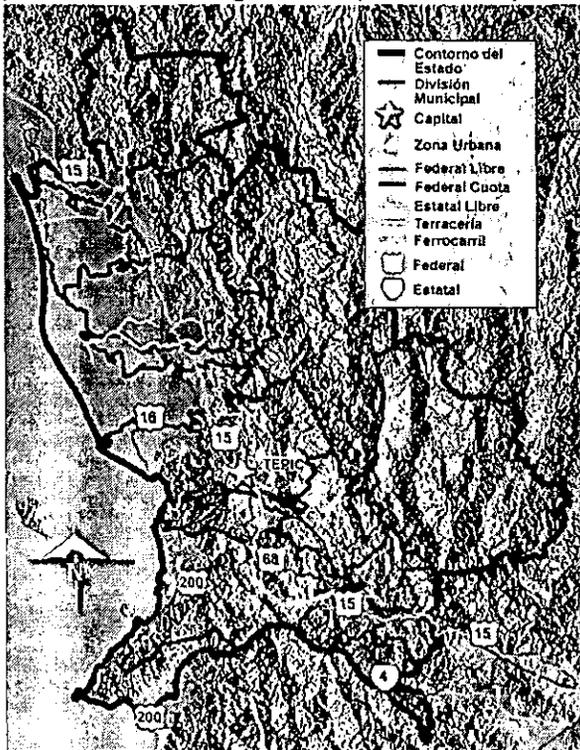


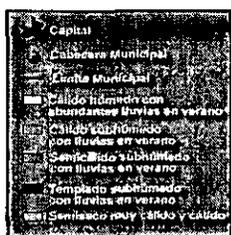
Fig. III.1 Mapa de Vías de Comunicación para el estado de Nayarit (tomado de <http://www.inegi.gob.mx/entidades/espanol/fnay.html>, 2001)

### III.2 Clima y vegetación

Los climas que prevalecen en la entidad son el cálido, templado, semicálido y seco, encontrándose bien definidos de acuerdo con su posición fisiográfica ver figura III.2 (CRM, 1994). El régimen que domina la mayor parte del estado es el cálido, que se caracteriza por tener una precipitación pluvial media anual de 1200 a 1500 mm y una temperatura media de más de 22° C. Este tipo de clima se encuentra asociado a comunidades vegetativas del tipo de selva baja, selva mediana subcaducifolia, manglar y pastizales, ocupando el 65% de la superficie del estado (CRM, 1994).



Fig. III.2 Mapa de Climas para el estado de Nayarit (tomado de <http://www.inegi.gob.mx/entidades/espanol/fnay.html>, 2001)



### III.3 Hidrología

El sistema hidrológico de Nayarit que vierte sus aguas en el Océano Pacífico está constituido por cuatro grandes regiones hidrológicas que son Presidio – San Pedro, Lerma – Chapala – Santiago, Huicicila – Ameca y Zona Pacífico Centro (CRM, 1994).

### III.3.1 Aguas Superficiales

El desarrollo actual de los recursos hidráulicos del estado se sustenta en el aprovechamiento de sus abundantes escurrimientos superficiales que se distribuyen en las siguientes cuencas hidrológicas: Región Hidrológica “Presidio – San Pedro” RH-1: destacan los ríos Acaponeta y San Pedro la cuenca del río Acaponeta tiene 5092 km<sup>2</sup> con un escurrimiento de 1200 millones m<sup>3</sup>, y tres vasos de almacenamiento, El Cucharas, El Huajicori y El Recodo. El río San Pedro, con una cuenca de 26 021 km<sup>2</sup>, tiene un escurrimiento de 2406 millones de m<sup>3</sup>, con tres vasos de almacenamiento, El Mezquital, Blasito y San Lorenzo ver figura III.3 (CRM, 1994).

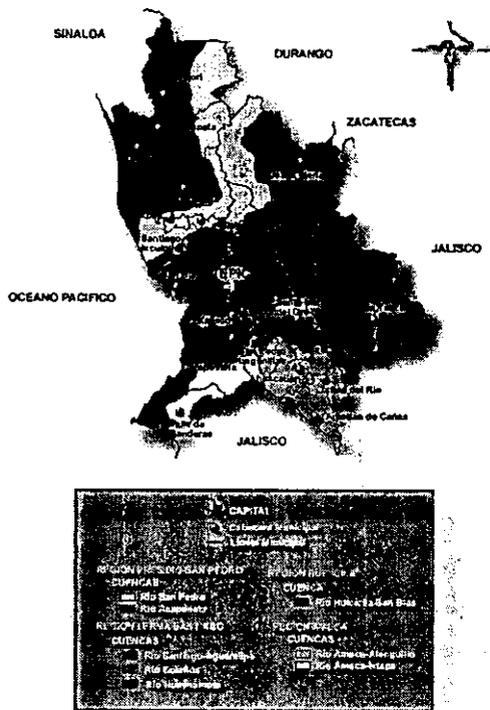


Fig. III.3 Mapa de Cuencas Hidrológicas para el estado de Nayarit (tomado de <http://www.inegi.gob.mx/entidades/espanol/fnay.html>, 2001)

En la región hidrológica “Lerma-Chapala Santiago” RH-12, destaca el río Santiago-Agua Milpa. La cuenca de 128 943 km<sup>2</sup>, tiene un escurrimiento de 6 831 millones de m<sup>3</sup>, con dos vasos de almacenamiento El Trigomil y Aguamilpa. Este último el más importante de la entidad, ya que es parte del sistema de la presa del mismo nombre cuyo embalse es de una capacidad aproximada de 1 200 000 000 m<sup>3</sup> (CRM, 1994).

En la región hidrológica “Huicicila” RH-13, destacan los ríos Huicicila, Ixtapa y San Blas. La cuenca tiene 6 765 km<sup>2</sup>, con un escurrimiento de 3 554 millones de m<sup>3</sup>, existiendo el proyecto de la presa El Refilón sobre el río Huicicila (CRM, 1994).

En la región hidrológica Ameca RH-14, destaca el río Ameca. La cuenca es de 9 184 km<sup>2</sup>, su escurrimiento es de 2 976 millones de m<sup>3</sup>, con dos vasos de almacenamiento, La Loma y Camotlán (CRM 1994).

### III.3.2 Aguas subterráneas

Los acuíferos más importantes se localizan en las regiones hidrológicas de Santiago, San Pedro y Pacífico Centro. Se explotan principalmente en la zona costera de El Valle de Banderas, y también en los valles de Compostela, Matatipac e Ixtlán del Río, y en las zonas de Chilapa, Rosa Morada y Tierra Generosa, dedicados a usos domésticos y en menor proporción a usos agrícolas. En general, el estado cuenta con buenas condiciones geohidrológicas debido a su extensa planicie costera y a la diversidad de rocas almacenadoras que posee. No se tienen datos actualizados de la recarga anual en el estado de Nayarit, pero se sabe que la extracción anual es de 491 millones de m<sup>3</sup> (CRM, 1994).



## IV Geología

La Geología Regional en la zona en que se encuentran las ventilas hidrotermales de Punta Mita está regida por dos provincias geológicas principales; la que corresponde a la Faja Volcánica Transmexicana y la que corresponde a la Sierra Madre Occidental.

A lo largo de la costa sur del estado de Nayarit, entre Punta Raza y Punta Mita en el margen de rift del bloque Jalisco se encuentran flujos de lava basálticos y algunos diques de la misma composición con dirección NNE de edad Mioceno tardío. En Punta Mita la mayoría de los flujos de lava tienen una textura hialoclastítica transicional a pillow lava (Gastil et al. 1979). Intercaladas con flujos de lava se encuentran areniscas con clastos de origen ígneo. Esto testifica la transgresión marina relacionada con la formación del protogolfo al tiempo del emplazamiento. Las edades de K/Ar van desde 10.2 +/- 0.8 hasta 8.3 +/- 0.6 Ma para las lavas máficas expuestas entre Punta Mita y Punta Raza (Gastil et al. 1979). Las rocas de Punta Mita y Punta Raza están compuestas de lavas subafiricas con olivino euedral como fenocristales inmersos en una masa de plagioclasa, clinopiroxenos, olivino, óxidos y vidrio. Algunas veces se presentan como minerales secundarios calcita y minerales del grupo de la clorita (Ferrari, 2000). Las lavas varían en composición de basaltos a andesitas basálticas, se encontró una muestra de benmoreita en Punta Mita. La firma química de los basaltos de Punta Mita se relaciona con un ambiente de zonas de subducción (Ferrari, 2000).

Las rocas sedimentarias de Punta Mita del Mioceno se agrupan dentro de los sedimentos relacionados a la apertura del golfo de California con el nombre de Los Cabos – Punta Mita (LC – PM)(Helenes y Carreño 1999).

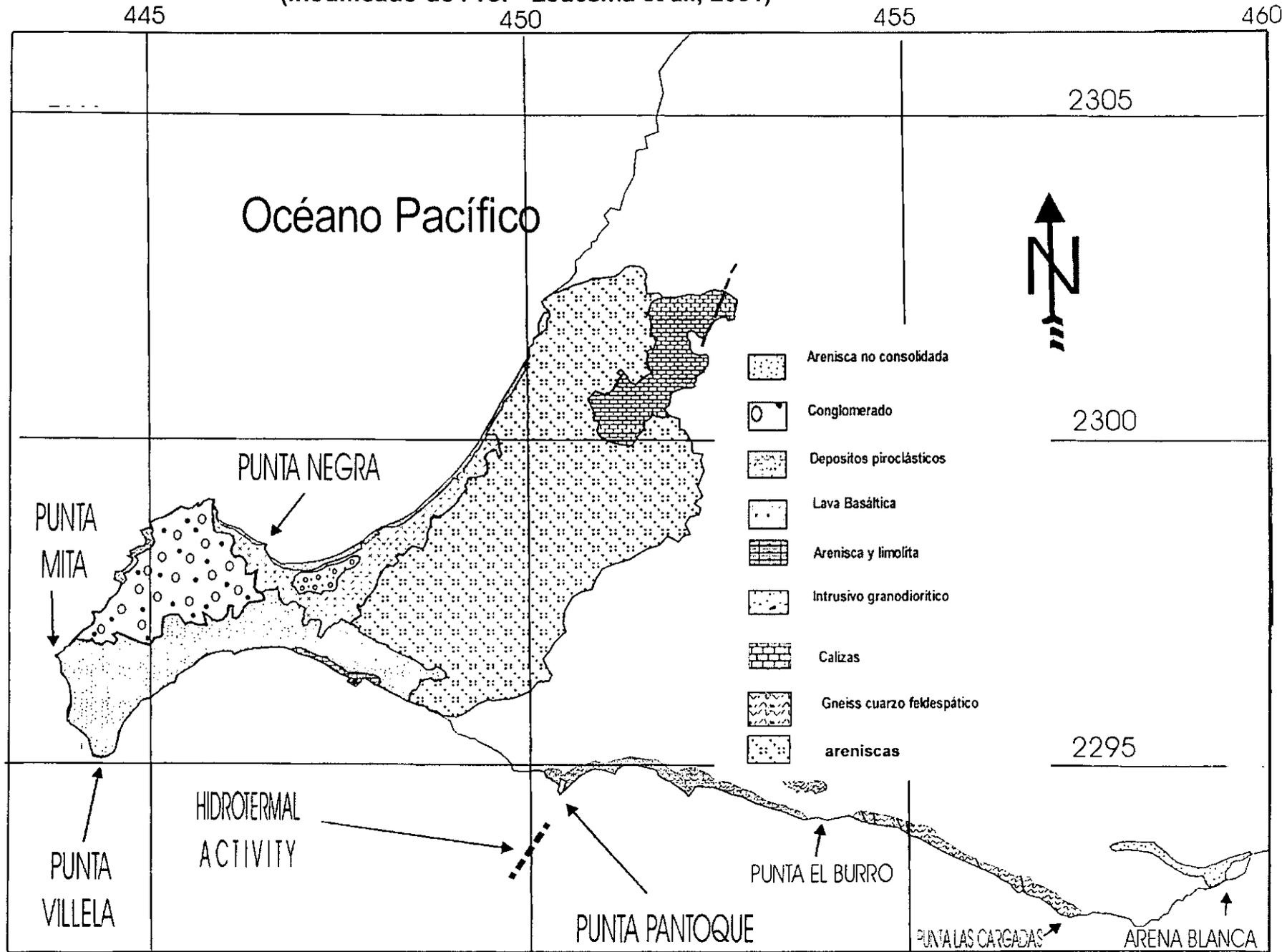
El área Los Cabos – Punta Mita incluye la parte más al sur de la Península de Baja California, las islas de las Tres Marías, y Punta Mita al Noroeste de Puerto Vallarta. En los tiempos del Mioceno tardío, se dió una continuación de fallamiento y volcanismo en el área del Golfo, y la apertura inició en la parte sur del Baja California, donde la parte norte del East Pacific Rise se localizó cerca del bloque de Los Cabos (Helenes y Carreño 1999).

En el área Los Cabos – Punta Mita contiene secuencias sedimentarias que representan ciclos transgresivos – regresivos los cuales iniciaron en el Mioceno tardío y finalizaron en el Plioceno. Esta área presenta una evolución similar pero más joven que la de la parte norte del golfo. Aparentemente esta área permaneció adherida a México hasta la última parte del Mioceno (5 Ma) (Helenes y Carreño 1999), y separada cuando la boca del golfo se abrió. El área Los Cabos – Punta Mita, presenta una sedimentación marina casi continua hasta la parte superior del plioceno, cuando el área fue levantada sobre el nivel del mar.

Las rocas en las que se encuentran las ventilas se clasifican como basaltos con un color al intemperismo gris verdoso con calcita en la superficie depositada por algunos organismos, al fresco presenta un color gris oscuro con vesículas de 3 a 5 mm de diámetro algunas de las cuales rellenas con calcita. Al microscopio se observan cristales de plagioclasa anhedrales que han sido parcialmente sustituidos por calcita la matriz ha sido sustituida por goetita, calcita y sericita (Santillán, 2001).

# Fig. IV.1 Mapa Geológico de Punta Mita Nay.

(modificado de Prol - Ledesma et al., 2001)



445

450

455

460

2305

2300

2295

PUNTA  
MITA

PUNTA NEGRA

PUNTA  
VILLELA

HIDROTHERMAL  
ACTIVITY

PUNTA PANTOQUE

PUNTA EL BURRO

PUNTA LAS CARGADAS

ARENA BLANCA

-  Arenisca no consolidada
-  Conglomerado
-  Depositos piroclásticos
-  Lava Basáltica
-  Arenisca y limolita
-  Intrusivo granodiorítico
-  Calizas
-  Gneiss cuarzo feldespático
-  areniscas



## V Antecedentes.

Hace unos pocos años pescadores locales reportaron actividad hidrotermal cercana a Punta Mita, en la Bahía de Banderas. Exploraciones preliminares identificaron un área de 400 m de longitud de intensa actividad hidrotermal a una profundidad de 11 m. Los fluidos hidrotermales en los centros de descarga alcanzan temperaturas de hasta 87°C y producen deposición de algunos minerales (Núñez-Cornú et al., 2000).

Se pueden citar como antecedentes de trabajos de fluidos de ventilas hidrotermales submarinos realizados cerca de la zona de estudio los de Von Damm et al. 1985 a, b en las ventilas de 21° N del East Pacific Rise y los de la Cuenca de Guaymas los cuales presentan diferentes características en el entorno geológico y geoquímico.

En la Cuenca de Guaymas el régimen de expansión cambia desde sedimentos comunes y escasos de mar abierto hasta sedimentos de apertura incipiente, un medio de rift continental. Asociado con esta transición la tasa de sedimentación se incrementa alrededor de dos órdenes de magnitud (un valor promedio de 1 –2 m cada mil años) (Von Damm et al., 1985b) y es suficiente para mantener una capa delgada de material encima del mismo eje de expansión. Así la expresión volcánica de la acreción cortical es como diques y sills que intrusionan dentro de la capa de sedimentos no consolidados más que como pillow lavas o lagos de lava. Los fluidos tienen temperaturas entre 270° y 315° C (Von Damm et al., 1985b).

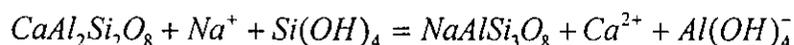
En la zona EPR 21° N, las rocas dominantes son basaltos en forma de almohadillas y flujos laminares de la misma composición, no se encuentra una capa de sedimentos como la que se observa en Guaymas. La solución química en EPR 21°N está controlada por la reacción del agua marina con el basalto a alta temperatura. En Guaymas ocurren reacciones adicionales entre las soluciones hidrotermales derivadas del basalto y el sedimento a temperaturas elevadas. Esto se basa en los siguientes puntos: (1) El alto contenido de He<sup>3</sup> en las soluciones; (2) la presión (profundidad) de reacción inferida del contenido de sílice de las soluciones; (3) la alta temperatura de las soluciones; el alto contenido de azufre reducido; la completa ausencia de Mg y SO<sub>4</sub> (Von Damm et al., 1985b).

En la cuenca de Guaymas tanto el Cl como el Na están enriquecidos en el fluido, el K es el más alto que se tiene registrado para manantiales termales lo cual se atribuye a la reacción del fluido con el sedimento. Las concentraciones Mg y SO<sub>4</sub> se consideran cero en el fluido primordial y su presencia se atribuye a la mezcla con el agua de mar. En cuanto al Ca, este se encuentra enriquecido en el fluido descargado por todas las ventilas y se atribuye su presencia a dos fuentes potenciales: de la conversión de la anortita (plagioclasa Ca) a albita (plagioclasa Na) y a la circulación del fluido a través de las capas de sedimentos que son ricos en Ca. El Ba se incrementa en todas las ventilas, el contenido de Si es variable, la alcalinidad es alta en todas las ventilas probablemente debido a la presencia de los sedimentos, tanto el Cl como el Na se enriquecen en toda el área de ventilas. (Von Damm et al., 1985b).

	Área de Guaymas	21° N EPR	Agua Marina
pH	5.9	3.3-3.8	7.8
Na milimoles/kg	475-513	432-510	26
SO <sub>4</sub> milimoles/kg	0-0.06	0	27.9
K milimoles/Kg	49.2-32.5	23.2-25.8	9.79
Mg milimoles/kg	0	0	52.6
Ca milimoles/kg	26.6-41.5	11.7-20.8	10.2
Cl milimoles/kg	589-637	489-579	540
SiO <sub>2</sub> milimoles/kg	9.3-13.8	15.6-19.5	0.18
Mn micromoles/kg	148-222	699-1002	<0.001

Tabla V.1 Composiciones finales calculadas para las ventilas de las regiones de EPR 21°N y Guaymas tomado de Von Damm, et al., 1985 a, b.

Para el EPR 21°N estos son los comportamientos de los elementos dentro de la solución: el Na se enriquece en algunas ventilas y en otras disminuye. Esto se explica debido a la alta cantidad inicial de sodio en la solución, el Na no es conservativo con respecto al Cl y una pequeña cantidad podría ser añadida de la roca y la pérdida de Na se debe a la formación de albita a partir de la anortita (albitización). Esta es una reacción típica de la facie de metamorfismo de esquistos verde (Von Damm et al., 1985a).



El K no exhibe un patrón claro de variabilidad, el Mg tiende a cero en el fluido primordial, el Ca y el Cl se ve enriquecido y el SO<sub>4</sub> tiene una tendencia parecida a la del Mg (Von Damm et al., 1985a).

En los trabajos mencionados de Von Damm et al 1985a y 1985b, se han determinado las concentraciones para treinta especies de las soluciones hidrotermales de 21°N. Los fluidos son extremadamente ácidos, con una presencia importante de ácido sulfúrico y ricos en metales. La solución se puede considerar formadora de yacimientos y los contenidos de metales son en buena medida parecidos a los que generaron depósitos de sulfuros masivos en ofiolitas así como en sedimentos metalíferos. El resultado sugiere que la fuente de sedimentos metalíferos es en el resultado de actividad hidrotermal de alta temperatura. (Von Damm et al., 1985a).

La química de las soluciones en Guaymas es el resultado de las reacciones que ocurren entre el agua de mar y el basalto y subsecuentemente con sedimentos. La mayor diferencia entre las soluciones de Guaymas y las de 21°N es el pH que en Guaymas es más alcalino y tiene una concentración mucho más alta de amonio. Esto da como resultado un decremento en la solubilidad de muchos sulfuros metálicos y una concentración más baja de elementos formadores de sulfuros Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Co y Cd en las soluciones. La geobarometría del cuarzo sólo puede ser aplicada en ciertas áreas pero indica una profundidad de 0.5 km de profundidad de reacción con el basalto (debajo del sedimento) en concordancia con la ventila HG del área 21°N. Las chimeneas son ricas en sulfatos y carbonatos y más bajas en Cu que las de 21°N y estas diferencias son consistentes con la química de la solución. El sistema de

Guaymas parece ser análogo a un depósito mineral tipo Besshi o alojado en sedimentos en proceso de formación. (Von Damm et al., 1985a).

Se han reportado otras ventilas hidrotermales en Baja California que pueden tener un origen similar con Punta Mita. Las ventilas hidrotermales ubicadas en la costa hacia el norte de Baja California en Punta Banda (Vidal et al., 1979). Estas ventilas se caracterizan por tener temperaturas de hasta 102 °C. En la fase líquida de los fluidos se presenta un enriquecimiento en  $\text{HCO}_3$ , Ca, K, Li, B, Ba, Rb, Fe, Mn, As y Zn y un empobrecimiento de Cl, Na,  $\text{SO}_4$  y Mg en relación con el agua marina. En cuanto a la fase gaseosa se encuentra compuesta mayormente por  $\text{CH}_4$  (51.4%) y  $\text{N}_2$  (44.3%), el  $\text{H}_2\text{S}$  no se analizó en los gases pero se le detecta en la fase líquida del fluido.

La zona de Nayarit que se estudia en este trabajo se caracteriza por presentar numerosas manifestaciones termales, la mayoría en forma de manantiales termales. El estudio realizado por la Comisión Federal de Electricidad por Tello en 1985 sobre las manifestaciones termales de Nayarit presenta la información geoquímica de los manantiales termales de todo el estado. La determinación de patrones en las características químicas de las aguas de los manantiales es importante para determinar la posible relación de las ventilas submarinas de Punta Mita y los sistemas de aguas termales en el continente.

## VI Datos Geoquímicos

Los datos hidrogeoquímicos y geotérmicos de los manantiales en el estado de Nayarit (Tello, 1985) fueron obtenidos por la CFE con el objetivo de evaluar las posibilidades geotérmicas del Estado de Nayarit (ver Anexo I). Este reporte incluye 56 manifestaciones termales, de las cuales 52 tienen temperaturas mayores a los 30° C. La totalidad de las manifestaciones termales se agrupan en 15 zonas de interés geotérmico ( ver anexo II, plano 1), mismas que se describen a continuación:

Tabla VI.1 Zonas de Interés Geotérmico y su Localización

Zona No	Nombre	Municipio	No de Muestra
I	Huajicori – Cucharas	Acaponeta	1, 2, 3, y 6
II	San Diego – San Miguel	Rosa Morada	4, 5, 7, y 8
III	Pescadero – Rosa Morada	Rosa Morada	9, 10, y 11
IV	Coyutla – San Diego Naranjo	Acaponeta Ruíz	12, 13, y 14
V	Río San Pedro	Nayar – Tepic	19, 21, 22 y 23
VI	Río Santiago	Aticama	27, 28, 42, 45 y 46
VII	Los Tepetates - La Palma	Tepic	24 y 25
VIII	Tepic	Aticama	16, 17, 18, 20, 26, 38, 44 y 49
IX	Huajimic	Tepic – Santa María del Oro – San Blas	47 y 48
X	El Molote	Compostela	29, 30, 31, 36 y 37
XI	Tepetiltic	Compostela Santa María del Oro	32 y 41
XII	Guásimas – Valle Verde	Compostela – San Pedro L. – Aguacatlán	33, 34, 35, 43, 53 y 54
XIII	Ceboruco		
XIV	Río Ameca	Compostela	39 y 50
XV	Amatlan de Cañas	Amatlán de Cañas	51 y 52

Con el fin de tener un fondo con que relacionar este trabajo a la actividad geotérmica regional se realizó un mapa de isotermas para las temperaturas superficiales reportadas por la CFE, de los manantiales termales y otro más en base a las temperaturas de fondo que la CFE calculó a través del geotermómetro de Na/Mg referido en el capítulo correspondiente a los geotermómetros químicos (Tello, 1985). Aparte de esto, con base en el mismo informe se realizó la clasificación de las aguas y su agrupación en familias con características geoquímicas similares en base de diagramas de Stiff (referidos en el capítulo II.6) de iones mayores (ver Anexo I).

Es de destacar que las temperaturas más altas se dieron en las inmediaciones del volcán del Ceboruco y en la zona de aguas termales conocida como el Molote

El resultado de este ejercicio fue la identificación de 3 tipos geoquímicos de aguas diferentes los cuales se enumeran e interpretan a continuación:

- 1 - Aguas Sódico – Sulfatadas
- 2 - Aguas Sódico – Bicarbonatadas
- 3- Aguas Sódico – Cloruradas

Aguas Sódico – Sulfatadas.- Estas aguas se consideran de un origen netamente meteórico las cuales se calientan al circular a cierta profundidad donde el gradiente térmico es anómalamente alto y suben a la superficie, dando origen a manantiales termales pero no a un sistema geotérmico propiamente dicho, el carácter sulfatado de estas aguas se puede explicar en el caso de que estas aguas circulen por horizontes que podrían ser de anhidrita o yeso, los cuales podrían darles la alta concentración de sulfatos, posteriormente al ascender hacia la superficie pueden entrar en contacto con rocas de origen volcánico. Ocurre entonces, un proceso de reequilibrio por medio de un intercambio iónico fijando el calcio en la roca y liberando el sodio. Otra posibilidad es cuando primeramente el agua circula en roca volcánica y el enriquecimiento en sulfatos es adquirido al circular en un paquete delgado de aluvión rico en residuos de anhidrita o yeso. El carácter sulfatado también se puede adquirir por la oxidación que sufre el H<sub>2</sub>S de origen geotérmico al estar en contacto con agua meteórica somera. Ver figura VI.1.

Este grupo se encuentra restringido a una pequeña porción del estado de Nayarit hacia el Norte.

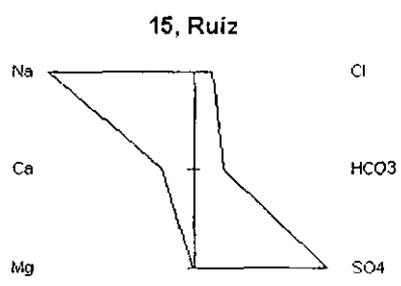


Fig. VI.1  
Configuración típica para aguas Sódico – Sulfatadas, localidad de Ruíz Nay. (Tello, 1985)

Aguas Sódico – Bicarbonatadas.- Corresponde a aguas de baja salinidad y con un contenido de cloruro bajo. Estas aguas son de origen meteórico y su composición química es el resultado de la interacción de rocas volcánicas a bajas temperaturas. Por tanto, el termalismo de estas aguas, representado con las concentraciones altas de elementos como el boro y el litio apoya esta interpretación. La presencia de altas concentraciones de calcio y magnesio reflejan que la interacción agua-roca se efectuó a bajas temperaturas. (Esto se debe a que la solubilidad de la calcita es mayor a bajas temperaturas) Ver Fig. VI.2.

**49 Las Huertitas**

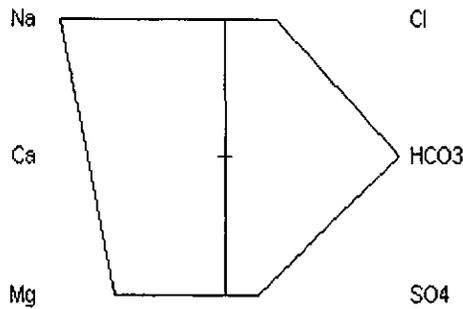


Fig. VI.2 Configuración típica en diagrama de Stiff para aguas de tipo Sódico – Bicarbonatadas. Localidad de Las Huertitas Nay. (Tello, 1985)

Aguas Sódicas – Cloruradas El carácter clorurado-sódico del tercer grupo tiene varios orígenes. El más importante en este caso es cuando el agua de manantial esta relacionada con un reservorio hipertermal a profundidad. También, el carácter sódico - clorurado puede adquirirse por la concentración de sales por efecto de la evaporación. Aunque también es común en las zonas costeras encontrar este tipo de agua debido a la influencia de aguas marinas. A este tipo de aguas pertenecen las de la zona del Molote, el cual se encuentra alejado de la costa y se reconoce como un sistema geotérmico de alta temperatura por las siguientes características. Además del carácter sódico clorurado del agua las temperaturas superficiales son altas entre 86° y 90° C, cercanas a la temperatura de ebullición, la concentración de calcio y magnesio es baja, el geotermómetro de Na/K indica temperaturas del orden de 166° C. También de este tipo es el agua de El Salado – Sanganguey en donde el termómetro Na/K indica temperaturas del orden de 256°C. La Palma también presenta estas características geoquímicas y temperaturas del geotermómetro del orden de 230° C.

**31 Los Hervideros**

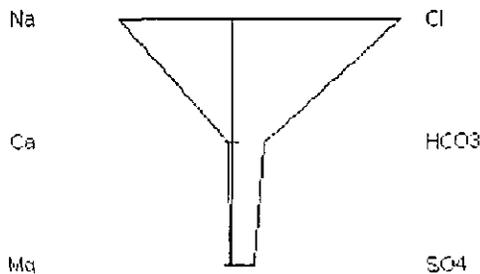


Fig.VI.3 Configuración típica de un diagrama de Stiff para aguas Sódico-Cloruradas Localidad de los Hervideros Nay. (Tello, 1985)

Como ya se mencionó el objetivo de realizar estas actividades es relacionar el lugar de estudio con la actividad geotérmica regional, además de buscar una tendencia en la actividad hidrotermal en esta zona hacia la zona de estudio.

## VII Resultados

### VII.1 Método de muestreo y análisis

Para obtener muestras de los fluidos descargados por las ventilas submarinas de Punta Mita se realizaron una serie de inmersiones de buceo. Se efectuó un muestreo directo del agua y de los gases descargados, por medio de un dispositivo diseñado para tal fin. Este dispositivo consta de una botella con dos salidas, cada una con una válvula. La botella es de vidrio de tipo pyrex con un espesor de 5 mm y tiene una capacidad aproximada de un litro, ver fig. VII.1. Una de sus salidas se conecta con un embudo de vidrio pyrex con una manguera marca Nalgene (esta marca es debido a sus características de resistencia a la corrosión y flexibilidad).

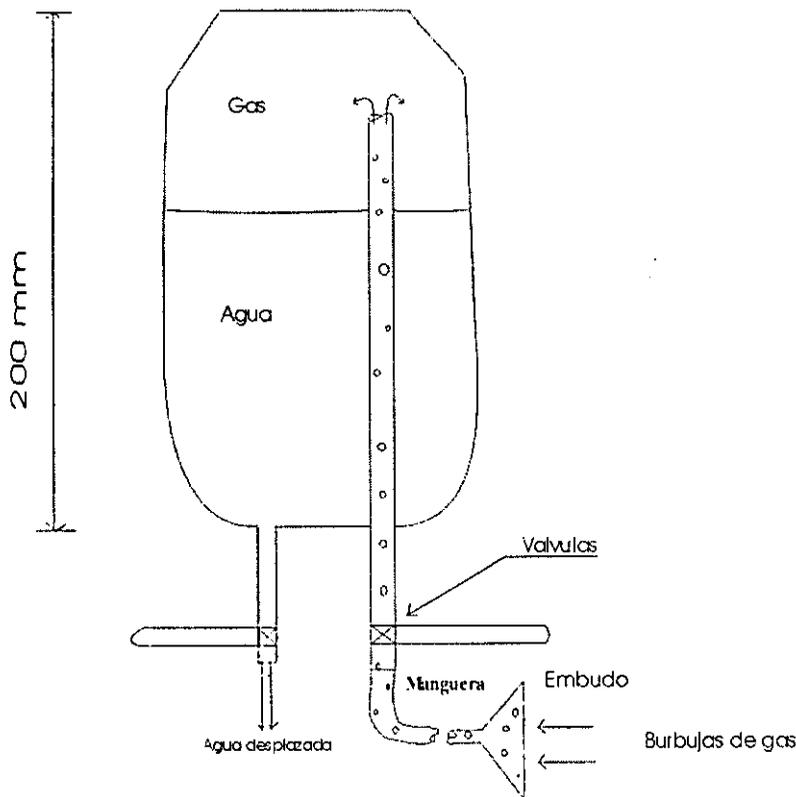


Fig. VII.1 Diagrama esquemático de la botella utilizada para tomar muestras de los fluidos de las ventilas (Diseño por Cornel de Ronde, IGNS).

El método a seguir es el siguiente: a) El embudo conectado a la manguera, pero sin conectarse todavía a la botella, se coloca directamente sobre la descarga principal de cada ventila a fin de que la manguera se llene del fluido geotérmico, se puede ver directamente cuando se llena de agua caliente, entonces se conecta la manguera a la botella. b) Al conectar la botella que inicialmente se encuentra llena de agua de mar y abrir la válvula que indica "Agua desplazada", ésta se desplaza por los gases y el agua termal hacia afuera. c) Cuando el objetivo es muestrear agua se espera a que el agua de mar haya sido completamente desplazada. d) Cuando el objetivo es muestrear gases, se espera hasta que el gas haya desplazado toda el agua marina y hasta donde sea posible el fluido geotérmico en fase líquida.

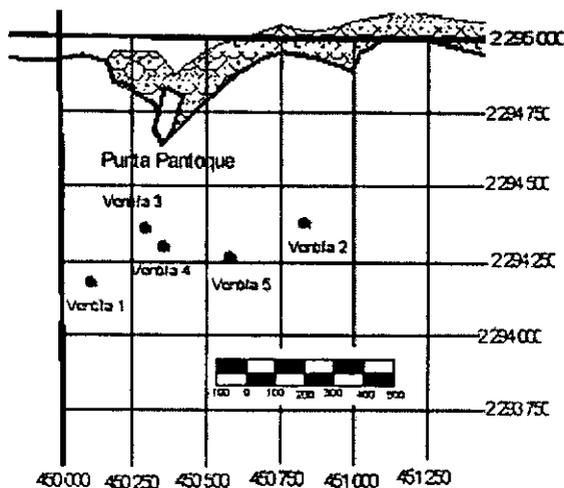


Fig. VII.2 Ubicación de las ventilas muestreadas coordenadas en UTM

De esta forma se recolectaron 5 muestras con las claves PM0001 hasta PM0005. Estas muestras incluyen tanto muestras de agua como muestras de gas para cada ventila, ver figura VII.2.

También se tomaron otras dos muestras con las claves PMSW001 y PMSW002 que corresponden a muestras de agua de mar; la primera se tomó alejada de las ventilas y la otra justo encima de las ventilas. Las muestras de agua fueron analizadas con el método de Inducción de Plasma Acoplado en los laboratorios del Institute of Geological and Nuclear Sciences IGNS (Nueva Zelanda). Las muestras de gas se analizaron en el laboratorio analítico de Wairakei (IGNS) en Nueva Zelanda.

## VII.2 Geoquímica de los fluidos por las ventilas submarinas de Punta Mita.

Los resultados de los análisis de las aguas recolectadas en las ventilas submarinas se presentan en la tabla VII.1 y VII.2.

Lab No	Cliente ID	Fecha de muestreo	Descripción
4915/1	PMSW001	2/12/2000	Agua marina lejos de las ventilas
4915/2	PMSW002	3/12/2000	Agua marina superficial en el lugar de las ventilas
4915/3	PM0001	28/11/2000	Agua de ventila en 84-86 grados
4915/4	PM0002	29/11/2000	Agua de ventila en 84-86 grados
4915/5	PM0003	3/12/2000	Agua de ventila en 84-86 grados
4915/6	PM0004	4/12/2000	Agua de ventila en 84-86 grados
4915/7	PM0005	5/12/2000	Agua de ventila en 86 grados

Tabla VII.1 Claves de laboratorio y descripción de las muestras recolectadas y analizadas en el IGNS.

Lab No	Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Yodo
4915/1	3.3E+05	1.1E+06	4.1E+05	1.2E+07	<100
4915/2	3.9E+05	1.1E+06	3.9E+05	1.2E+07	<100
4915/3	1.3E+06	5.4E+05	2.3E+05	5.3E+06	1100
4915/4	1.7E+06	2.6E+05	2.1E+05	4.7E+06	1400
4915/5	1.2E+06	5.9E+05	2.8E+05	6.4E+06	1100
4915/6	1.4E+06	4.5E+05	2.4E+05	6.5E+06	1900
4915/7	1.8E+06	1.0E+05	1.4E+05	4.8E+06	1900

Bario	Manganeso	Molibdeno
<20	<1	15
<20	3.5	15
440	100	4.7
650	78	2.1
400	61	7.0
490	56	6.0
680	76	5.5

Lab No	Fluoruro	Cloruro	Bromuro	Sulfato	Bicarbonato	Reactivo Silice
	(g/m <sup>3</sup> )					
4915/1	1.1	19000	54	2500	140	<2
4915/2	<1	19000	59	2500	140	<2
4915/3	1.7	14000	43	1300	54	35
4915/4	2	12000	35	730	28	49
4915/5	1.7	15000	47	1500	75	30
4915/6	1.9	14000	41	1200	58	38
4915/7	2.2	11000	34	530	14	54

Tabla VII.2 Concentraciones de los iones disueltos en las aguas termales de las ventilas submarinas de Punta Mita (análisis efectuados para agua por ICP en el IGNS unidades en ppm y g/m<sup>3</sup>)

ANALYTICAL REPORT :Punta Mita Submarine Fumerole Samples, Jalisco, Mexico						
Lab. Ref. no.		2100141	2100142	2100143	2100144	2100145
Collection Date		28/11/00	03/12/00	04/12/00	05/12/00	05/12/00
Clients Field ID		PM0001	PM0003(3)	PM0004(6)	PM0005(9)	PM0005(7)
Dioxido de Carbono	% gas (de gas total)	0.089	0.16	0.13	0.17	0.19
Acido sul	% gas (de gas total)	<0.001	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Metano	% gas (de gas total)	11.7	12.0	12.2	11.7	11.5
Nitrogeno	% gas (de gas total)	88	87	87	87	88
Argon	% gas (de gas total)	0.44	0.45	0.44	0.45	0.43
Oxigeno	% gas (de gas total)	0.046	0.017	0.057	0.18	<0.001
Helio	% gas (de gas total)	0.042	0.040	0.041	0.04	0.043
Hidrogeno	% gas (de gas total)	0.024	0.004	0.005	0.004	0.008

Tabla VII.3 Concentraciones de los gases termales de las ventilas submarinas de Punta Mita (análisis para gases en cromatógrafo de gases y unidades en %)

Se percibe en los datos correspondientes a los gases (ver tabla VII.3) una clara preponderancia del N<sub>2</sub> con el 87.4% de concentración sobre el resto de los componentes. El segundo lugar en concentración pertenece al CH<sub>4</sub> el cual ocupa alrededor del 11.82% de concentración. En menor proporción se tiene el Ar con .44 %, el He, el O<sub>2</sub> y por último el H. El H<sub>2</sub>S generalmente está como trazas, ver figura VII.3.

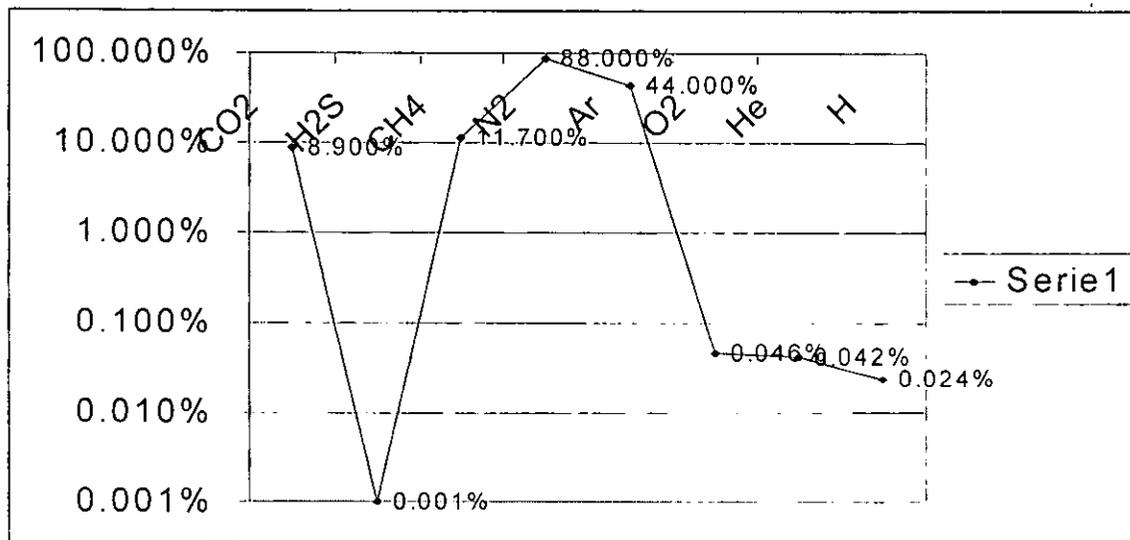


Fig. VII.3 - Gráfica que muestra la distribución de las concentraciones de los gases en porcentaje y escala logarítmica

La relación de concentraciones de los gases y su composición indica que se trata de gases de origen termogénico y no de gases originados en un sistema geotermal con una fuente volcánica.

Para determinar el origen del agua termal, o bien de los miembros finales cuya mezcla está representada por el agua que emana de las ventilas, generalmente se asume un elemento como tendiente a cero para tratar de determinar la composición original de los fluidos suponiendo que uno de ellos es el agua de mar. En la mayoría de los estudios se asume al Mg como el elemento que no se encuentra en el fluido original que se mezcla con el agua de mar, ya que en los fluidos geotérmicos el Mg se encuentra ausente por la solubilidad inversa de los minerales que lo contienen en concentraciones importantes. Partiendo de esta suposición, se hace una gráfica de distribución entre el elemento del cual se desea encontrar su concentración original en el fluido contra la concentración de Mg y a partir de esta gráfica se determina por regresión lineal el punto donde el Mg es igual con cero y se conoce entonces la concentración original del elemento en el fluido.

Una vez que se tomó el magnesio como elemento ausente en el miembro final de agua meteórica, se hicieron los cálculos para los elementos con la concentración de Mg = 0. De esta forma se pudo determinar la composición probable del agua desmezclada, o sea el agua que se mezcló con agua de mar para dar como resultado el agua termal que es descargada por las ventilas. En general, como se puede ver en las gráficas de la figura VII.4, las líneas se ajustan bastante bien a la distribución de las muestras aunque hay algunos elementos que presentan una mayor desviación, lo cual nos indica que probablemente el agua meteórica, además de la mezcla con agua de mar, podría haberse enriquecido en algunos elementos por mezcla con agua proveniente de las capas sedimentarias y que debido a su alto contenido en materia orgánica tendría altas concentraciones de I, esta agua también sería rica en Mn y Ba.

Referencia	T (Wa)	Ba	Ca	Mn	Ba	Mg	SiO <sub>2</sub>	I
Punta Banda	102	.94	1600	.81	.94	90	156	
agua desmezclada	80	.7665	1965.813	.0762	.7665	0	59.98	1.2
Manantial frío	21	N/D	80	N/D	N/D	51.6	50.1	N/D
Pescadero	67	N/D	254	N/D	N/D	.2	87	N/D
EPR 21°N	273	N/D	648.294	48.60817	N/D	0	1051.6	N/D
Guaymas	315	N/D	1254.504	8811.002	N/D	0	736.1	N/D

Referencia	K	Na	F	Cl	Br	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Mo
Punta Banda	410	5200	1.8	10800		351	347	N/D
agua desmezclada	128.9682	4338.473	2.24	10130	0.014	288.1685	.892	3.55e-3
manantial frío	4.36	48.53	.33	195	N/D	33.96	173	N/D
Pescadero	24	656	N/D	1106	N/D	633	8	N/D
EPR 21°N	939.3774	10483.44	N/D	18258.3	N/D	36.021	N/D	N/D
Guaymas	1671.036	11201.88	N/D	21245.2	N/D	0	N/D	N/D

Tabla VII.4 Análisis químicos de aguas de diferentes fuentes en comparación con los resultados de los cálculos de mezcla (Análisis tomados para Pescadero de Tello 1985; EPR 21°N y Guaymas de Von Damm et al., 1985 a, b; Punta Banda Vidal et al., 1978. Las unidades se encuentran dadas en mg/l).

Fig VII.4 Diagramas de distribución de los elementos de las ventilas graficados contra. Se realizó una regresión lineal para de terminar las concentraciones iniciales. Se incluye también la distribución de elementos deEPR 21°N y Guaymas cuando es posible.

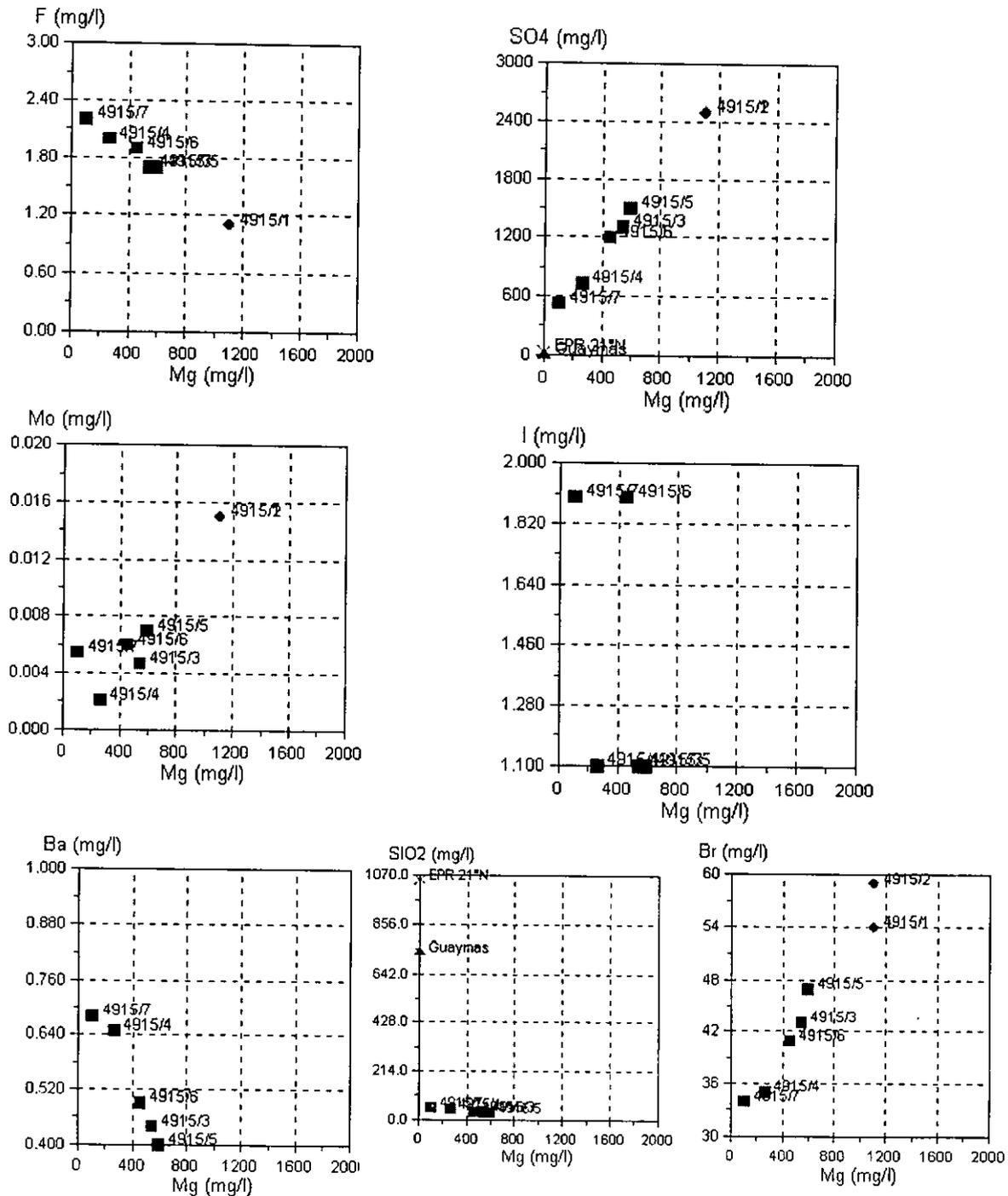
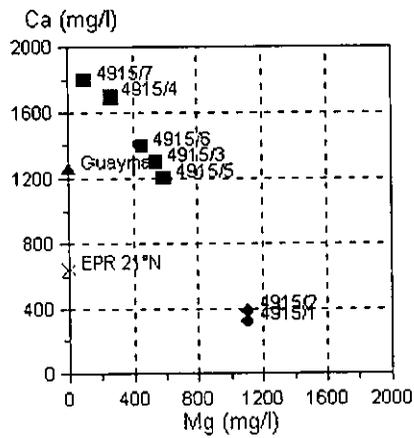
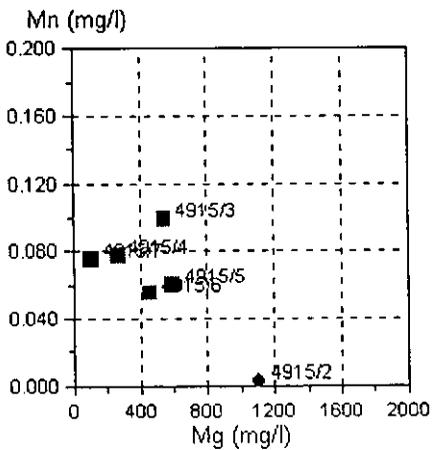
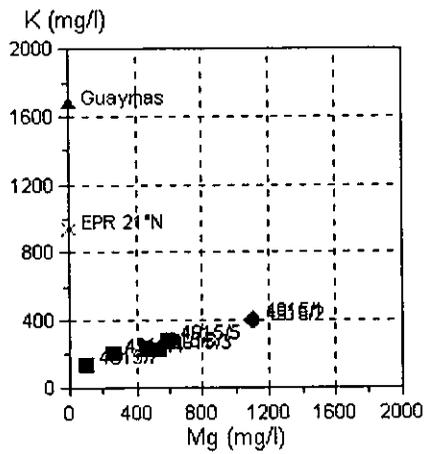
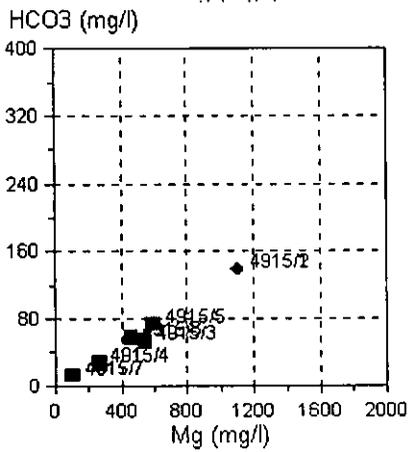
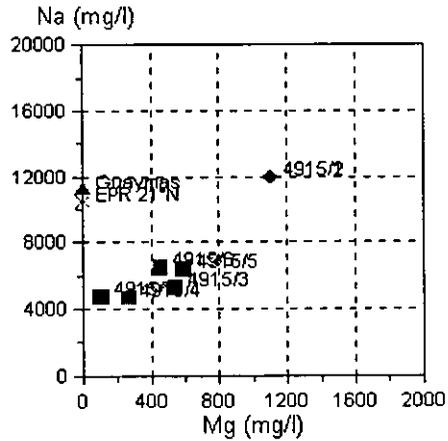
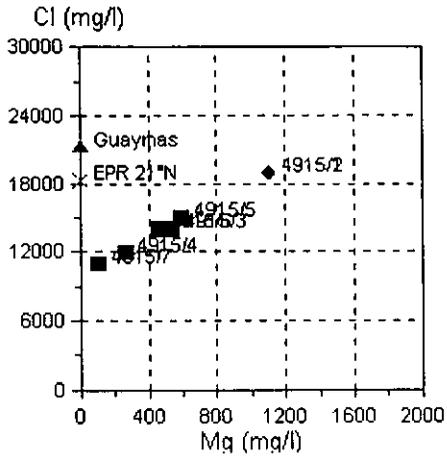


Fig.VII.4 Continuación



El agua que se considera como miembro final de la mezcla es de tipo Na – Ca – Cl, lo cual es un indicio de que es poco probable que sea de origen geotérmico, sino más bien de origen meteórico, debido a que las aguas geotérmicas no presentan mucho calcio debido a la solubilidad inversa que los minerales que contienen este elemento ver figura VII.5. Esto es válido tanto para el Ca como para el Mg, aunque no hay que descartar que ciertas reacciones y procesos de alteración que se dan en estos ambientes como la albitización, pueden causar el enriquecimiento del Ca en el fluido y un empobrecimiento de Na en el mismo como se observa en estudios de las ventilas submarinas profundas de Guaymas o del East Pacific Rise (EPR) en el paralelo 21°N. Aunque en el caso de Guaymas también se le atribuye a que el fluido atraviesa una capa de sedimentos con altos contenidos de Ca.

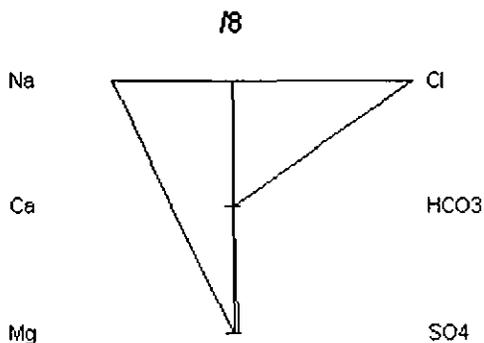


Fig. VII.5.- Diagrama de Stiff para la composición calculada del agua de origen geotérmico.

Al comparar el agua desmezclada con concentraciones calculadas y el agua de manantial frío, ver figura VII.6, la cual tomamos como referencia de posible agua original, encontramos que son muy parecidas salvo por los contenidos de Ca y Mg que son mucho mayores. Esto se podría explicar suponiendo el enriquecimiento en estos elementos durante su interacción con las capas sedimentarias y probable mezcla con el agua que éstas contienen.

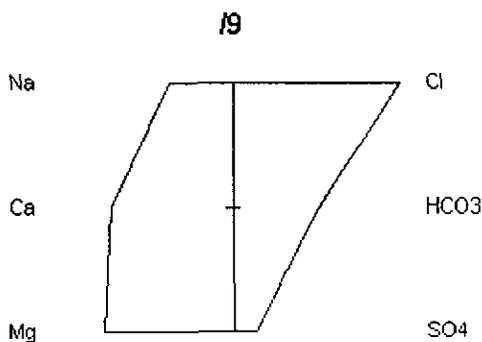


Fig. VII.6 Diagrama de Stiff para los iones mayores del agua muestreada del manantial de agua fría en la costa

Por otra parte, la presencia de ciertos metales, que son propios de sistemas geotérmicos, no se encuentra registrada en el fluido de las ventilas de Punta Mita. La mayoría de los elementos metálicos que se esperaría encontrar en un sistema geotérmico relacionado con una cresta oceánica se encuentran en cantidades muy escasas.

## VIII Conclusiones

Con base en los datos analizados en las ventilas hidrotermales de Punta Mita, las comparaciones con datos geoquímicos de manifestaciones de aguas termales en continente y en los sistemas de ventilas hidrotermales profundas estudiados en la zona del Golfo de California, de la Cuenca de Guaymas y del East Pacific Rise, junto con el sistema de ventilas costeras en el Océano Pacífico en el Norte de Baja California en la Punta Banda, se concluye lo siguiente:

1.- El sistema de ventilas hidrotermales de Punta Mita no tiene su origen en un sistema geotérmico con aportación de fluidos magmáticos en fase gaseosa o en fase líquida ya que no se detectó la presencia de estos fluidos en el agua o en los gases analizados. En el caso de los gases,  $H_2S$ ,  $HCl$  y  $CO_2$  se encuentran en concentraciones muy bajas, y con excepción del  $CO_2$ , no son registrables. En el caso de la fase líquida se encontró que algunos elementos disueltos, como el Na y el Cl, se presentan en concentraciones menores (5540 mg/l y 13200 mg/l en promedio respectivamente) que las del agua de mar local (12000 mg/l para Na y 19000 mg/l para Cl). Por otra parte, el líquido presenta un enriquecimiento en otros elementos que no son característicos de sistemas geotérmicos de alta temperatura, como por ejemplo un enriquecimiento en calcio el cual puede provenir de la solubilidad de este elemento a bajas temperaturas desde los minerales de los basaltos por los que circula este fluido.

También se tiene la presencia de gran cantidad de  $CH_4$  y  $N_2$  y bajas concentraciones en  $CO_2$ . Estas concentraciones de gases se relacionan con sistemas no magmáticos que involucran la circulación de agua meteórica calentada debido a la presencia de un gradiente geotérmico alto a través de materia orgánica. En el fluido descargado por las manifestaciones termales se encontró una cantidad apreciable de Ca que, debido a la solubilidad inversa que presentan los minerales que lo contienen no se encuentra en los fluidos geotérmicos de sistemas de alta temperatura.

2.- El sistema de ventilas hidrotermales de Punta Mita no tiene una relación con los sistemas geotérmicos del continente en el estado de Nayarit, ya que no se encontró un patrón de incremento de tal actividad hacia esta región lo cual ratifica la idea antes expuesta de que el sistema no tiene un origen magmático. Sin embargo, el fluido termal tiene características geoquímicas que se aproximan bastante a un agua de origen meteórico, similar a la que se muestreó en manantiales fríos cerca de la costa. El sistema de recarga de las aguas que penetran en el sistema requiere circular muy profundamente (a profundidades de más de 500m) para emerger en las ventilas a las temperaturas registradas.

3.- Las ventilas de Punta Mita no tienen una relación directa con los sistemas de ventilas hidrotermales profundas de Guaymas y el  $EPR 21^\circ N$  ya que no se encuentran en una zona de cresta oceánica, sino en una zona de subducción. Las concentraciones de Cl son mucho más altas (hasta casi 600 mmoles/l) en estos sistemas de ventilas que en los de Punta Mita (285.7 mmoles/l), la concentración de las ventilas de Punta Mita es incluso más baja que la del agua de mar (373 mmoles/l) para las muestras tomadas, y para la solución calculada sin mezcla es aún más diluida (285.7 mmoles/l) y en general este fenómeno se presenta para la mayoría de los elementos disueltos. Como el Na, que en el  $EPR 21^\circ N$  es de 456 mmoles/l y que en las muestras recolectadas es de solamente 242 mmoles/l y en el fluido original calculado antes de

la mezcla con el agua de mar es de 189 mmoles/l, ver tabla VIII.1. El Mg en los cálculos para Guaymas y EPR 21° N así como para este estudio se considera igual a cero por los cálculos realizados. Otro elemento a considerar es el Mn el cual presenta un enriquecimiento aunque poco comparado con el de el resto de los sistemas comparados, ver tabla VIII.1. Otro elemento, como ya se dijo, que presenta un enriquecimiento es el Ca el cual también se enriquece en las zonas de ventilas de EPR 21° N con concentraciones promedio de 16 mmoles/l y en las cuenca de Guaymas con valor promedio de 31 mmoles/l cuyos valores son bajos comparados a los de Punta Mita cuyo valor calculado de concentración es de 49 mmoles/l, ver tabla VIII.1.

Referencia	T °C	Ca	Mn	Mg	K
Punta Banda	102	40	1.4E-03	3.3	10.4
agua desmezclada	80	49	1.38E-03	0	3.3
agua marina lejos de las ventilas	21	8.2	< 1.8E-05	45.2	10.4
agua marina superficial en donde se encuentran las ventilas	21	9.7	6.3E-05	45.2	10
EPR 21°N	273	16.	.88	0	24
Guaymas	315	31.3	0.160	0	42.7

Reference	Na	Cl	SO4	HCO3	SiO2
Punta Banda	226.2	304.6	3.6	5.7	2.6
agua desmezclada	188.7	285.7	3	1.46E-02	1
agua marina lejos de las ventilas	522	536	26	2.3	< 3.3E-02
agua marina superficial en donde se encuentran las ventilas	522	536	26	2.3	< 3.3E-02
EPR 21°N	456	515	.375		17.5
Guaymas	487.2	599.25	0		12.25

Tabla VIII.1 Valores de los iones disueltos de los fluidos de las diversas manifestaciones termales comparadas en esta tesis en milimoles/l.

El sistema que se encuentra en Punta Banda Baja California (Vidal et al., 1978) es más parecido al de Punta Mita por las características generales de los fluidos ya que presenta enriquecimientos similares en elementos como el Mn (1474.3  $\mu$ moles/l) y una proporción similar de Ca, K, Mg, SO<sub>4</sub> y Na sin embargo presenta un enriquecimiento mucho mayor de HCO<sub>3</sub> (6 mmoles/l), ver tabla VIII.1. En lo que respecta a los gases aunque los gases principales también son el N<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, en las ventilas de Punta Banda existe una mayor proporción de CH<sub>4</sub> (51.4%) con respecto al N<sub>2</sub> (44.3%) que la que hay en Punta Mita donde la concentración del N<sub>2</sub> está muy por encima del CH<sub>4</sub>. Se puede suponer que el origen de este sistema es más parecido al de Punta Mita que a los sistemas de ventilas hidrotermales profundas, pero en Punta Mita hay una mayor influencia de componentes orgánicas provenientes de los sedimentos.

## Referencias

- CRM (Consejo de Recursos Minerales), 1994, Monografía Geológico – Minera del Estado de Nayarit. Primera Edición 1994. Editada por el Consejo de Recursos Minerales. Pachuca, Hgo. México. p 1 – 32
- Custodio, E., Llamas, M. R. H. 1983. Hidrología Subterránea segunda edición. Editorial Omega. Barcelona.
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vagelli, G., Petrone C. M., Manneti, P. 2000. Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 318, 161 – 185.
- Gastil, Gordon, Daniel Krummenacher, John Minch, 1979, The Record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin*. Part I, Vol. 90, p. 839-857.
- Giggenbach, W. F. 1988. Geothermal solute equilibria: Derivation of Na, K, Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- Helenes, J., Carreño, A. L. 1999. Neogen sedimentary evolution of Baja California in relation to regional tectonics. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 589 – 605.
- Henley, R. W., Truesdell, A. H., and Barton Jr, P. B. 1984. Fluid – Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. *Reviews in Economic Geology*, Volume I, 2th Edition, Society of Economic Geologists.
- Moore, J. C. (Comp.) 1999. Fluid Seeps at Continental Margins: A Report of a Workshop Defining Critical Research Issues Affecting Geology, Biology, the Oceans and the Atmosphere. Earth Sciences UC Santa Cruz, California.  
[http://www.soest.hawaii.edu/margins/seeps\\_workshop.html](http://www.soest.hawaii.edu/margins/seeps_workshop.html)
- Núñez-Cornú F.J., Prol-Ledesma R. M., Cupul-Magaña A., Suárez-Plascencia C. 2000. Near shore submarine hydrothermal activity in Bahía Banderas, western Mexico, *Geofísica Internacional*, Vol 39, 2, pp.171-178.
- Prol-Ledesma, R.M., Canet, C., Melgarejo, J.C., Tolson, G., Cruz-Ocampo, J.C., Rubio-Ramos, M.A., Ortega-Osorio, A., Torres-Vera, M.A., Reyes. A., Solis, G. 2001. Hot seeps in the Pacific Margin of central Mexico. *Geology*, (enviado).
- Santillán, Ladrón de Guevara Alberto. 2001. Evaluación de cambios de masa y movilidad de elementos para los basaltos asociados a ventilas hidrotermales submarinas en Punta Mita, Nayarit. Tesis para obtener el grado de ingeniero geólogo. Facultad de Ingeniería. UNAM. 65 pp.
- Tello-Hinojosa E. 1985. Reconocimiento y evaluación geoquímica de las zonas termales del estado de Nayarit. Informe, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotérmicos, Subgerencia de Estudios Geotérmicos, Departamento de Exploración.

Truesdell, A. H. 1984. Introduction to Chemical Calculations. In Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. Reviews in Economic Geology. Vol. 1. Society of Economic Geologists. 1-8

Vidal, V. M. V., Vidal, F. V., and Isaacs, J. D. 1978. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California. Journal of Geophysical Research, 83, No B4, 1757 – 1774.

Von Damm, K.L., Edmond, J. M. Grant, B., Measures, C. I. 1985<sup>a</sup>. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21° N, East Pacific Rise. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49, 2197 – 2220.

Von Damm, K.L., Edmond, J. M., Grant, B., Measures, C. I. 1985<sup>b</sup>. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California. Geochimica et Cosmochimica Acta, 49, 2221 – 2237.

Von Damm, K. L., Bray, A. M., Buttermore, L. G., Oosting, S. E. 1998. The geochemical controls on vents fluids from the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge. Earth and Planetary Science Letters, 160, 521-536.

<http://www.pmel.noaa.gov/vents/chemocean.html>, 2001-02-23, Página Web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

<http://www.inegi.gob.mx/entidades/espanol/fnay.html>, 2001 - 02 -23, Pagina Web del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

<http://maritime.haifa.ac.il/departm/lessons/ocean/lect08.htm>, 2001-17-04, Página Web del The Institute for Maritime Studies at the University of Haifa, Israel.

Anexo I

Datos de Hidrogeoquímicos de los manantiales del estado de Nayarit tomados de Tello 1985

ESTA COPIA NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

Tabla A.1 Valores químicos de los análisis de manantiales termales en continente de Nayarit en mg/l, T en °C y conductividad en  $\mu\text{mohs/cm}$ .

No	Sitio	pH	pH <sub>Lab</sub>	Cond	Temp.	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>
3	A. C. Quiviquinta		8.7	250	37	34	.5	27.2	.3	5.9	8
12	Pescadero	6	8	4490	67	656	24	254	.2	1106	633
13	Somatlán	6	7.7	245	37	32	3.2	26.6	.54	21.5	19.6
14	San Marcos Coyotlán		8.7	850	40	153	7.4	15.8	.06	19.6	300
15	Xola	6	8.5	900	75	157	6.4	15.2	.06	21.5	313
16	Sandiego del Naranjo	7	9	800	79.5	140	7.3	13	.12	21.5	252
17	Ruiz	6	7.9	720	30.5	115	3.9	22.2	.74	21.5	219
18	San Francisco	6	7.7	440	36	48	9.5	19.2	9.6	37.2	10
19	A.C. Fco. I Madero	6	7.7	450	37	49	9.5	19.8	9.8	41.1	10
20	Cerro el Sapo	6	7.9	380	33.5	46	8.3	18	9	33.3	10
21	Xinacate	7	9	340	70	64	2.2	12.2	.34	11.7	10.5
4	A. C. Zapotilo		8.7	375	37	73	2.4	3.2	.02	5.9	41.8
22	La fortuna	6	7.8	370	27	37	8.2	15.8	8.2	50.9	10
26	San Pedro Ixcatán	6.5	9	490	74	93	3.9	4	.1	86	85.9
27	Rosario Viejo	6	8.2	650	51	109	6.6	47.6	1.88	15.6	245
28	Caimanero	6	8.1	450	50	56	3.2	32	.3	9.8	90
29	Los Tepetates	6	8.1	905	45	129	17	30	5	164	10
30	La Palma	6	7.8	4000	59	696	68	43.8	4.2	1018	95
31	Trapichillo	6	8.4	425	34	67	12.9	7.2	4	45	10
32	Agua Miloya	6	8.2	540	71	109	4.2	11.6	.08	19.6	84.5
33	Límito	6	8.5	540	72	107	4.3	6	.04	27.4	59
34	Hervideros Molote	8	9.6	445	90	83	3.2	1.8	.08	43	35
5	A. C. Caramota	7	9	350	49	67	1.1	4	.06	17.6	37
35	Chico Molote	8	9.2	450	86	84	3.2	1.8	.44	43	35.2
36	Los Hervideros II	8	9.6	450	90	85	3.4	2	.44	194	34
37	Laguna Santa María del Oro	7	9.1	1400	26	161	21.6	37.6	62.2	92	54.5
38	Guásimas	6	8.4	690	31	86	15.6	26	11	62.6	10
39	A. C. Chiquita El Conde	6	9.1	510	38	70	12.5	11.8	8	56.7	13
40	Valle Verde	6	8.7	535	40	67	10	16.2	11.2	1050.9	10
41	Hervores	6	7.6	6500	28	1796	180	57.6	51.4	108	10
42	Jamurca	7	7.9	1260	46	268	8	17.8	1.6	113.5	10
43	El Salado	6	8.4	900	31	129	17.2	20.2	2.56	62.6	10
44	Valle de Banderas	7	7.6	600	53	92.9	2.3	19	2.8	62.6	76.4
6	La Pila	7	9	395	42	74	1.7	12.8	.3	11.7	51.5
45	El Terreno	6	8	300	32	24.9	5.3	24.4	8.74	9.8	10
46	La Galinda	6	8.3	260	31	30.7	9.3	11.8	1.64	5.9	10
47	Embarcadero de Vera	7	8.3	720	61	130	2.4	13.2	.72	90	27.47
48	Ocotillo	6	7.3	520	31	47.5	7.8	35.4	11.6	58.7	10
49	Pintadeño	7	7.8	225	32.5	14.8	5.8	13.4	7.12	7.8	10
50	A. C. Novillero	7	8.5	500	83	97.5	3.5	3.6	0	15.7	81.9
51	Los Nopalitos	7	8.6	640	80	129	5.3	4.8	.13	21.5	54.56
52	El Guayabo Huajimic	6	9	360	31	18.3	3.9	37.4	12.7	88.1	10
53	El Terreno Huajimic	6	8.2	220	39	31.1	.61	17.2	.02	5.9	10
54	Las Huertitas	6	8.6	300	31	24	4.5	17.6	8.64	11.7	10
7	El Chico	7	9.1	400	53	77	2.1	4.6	.02	13.7	52.8
55	Cacao	6	8.3	875	42	153	4.08	4	.04	101.8	107.89
56	San Blasito	7	8.6	300	50	57.1	.94	3.6	.27	3.9	10
57	Amatlan	6	8.2	2250	78	362	17.3	159	1.61	189.8	1106.9
58	El Coco II	6	8.8	570	35	66.2	6.7	17.8	12.54	52.8	16.22
59	A. C. Tetiltlán	6	8.8	900	47	112	15.9	18.6	16.04	127.2	10
60	Barrancas	6	8.4	200	28	11.2	4.4	11.2	6.62	7.8	10
61	A. C. El Tajo	6	8.6	620	60	105	2.94	14.2	1.29	19.6	86.14
8	Cucharas	6	9.5	240	35	35	12.8	12	1.22	9.8	17.8
9	El Guayabo	7	8.1	440	43	85	11.7	4	.3	35.2	25.7
10	A. C. San Miguel	7	8.6	1090	62	189	8.8	32.8	.62	19.6	423
11	Rosa Morada	6	8.3	490	42	86	3	10	.3	13.7	120

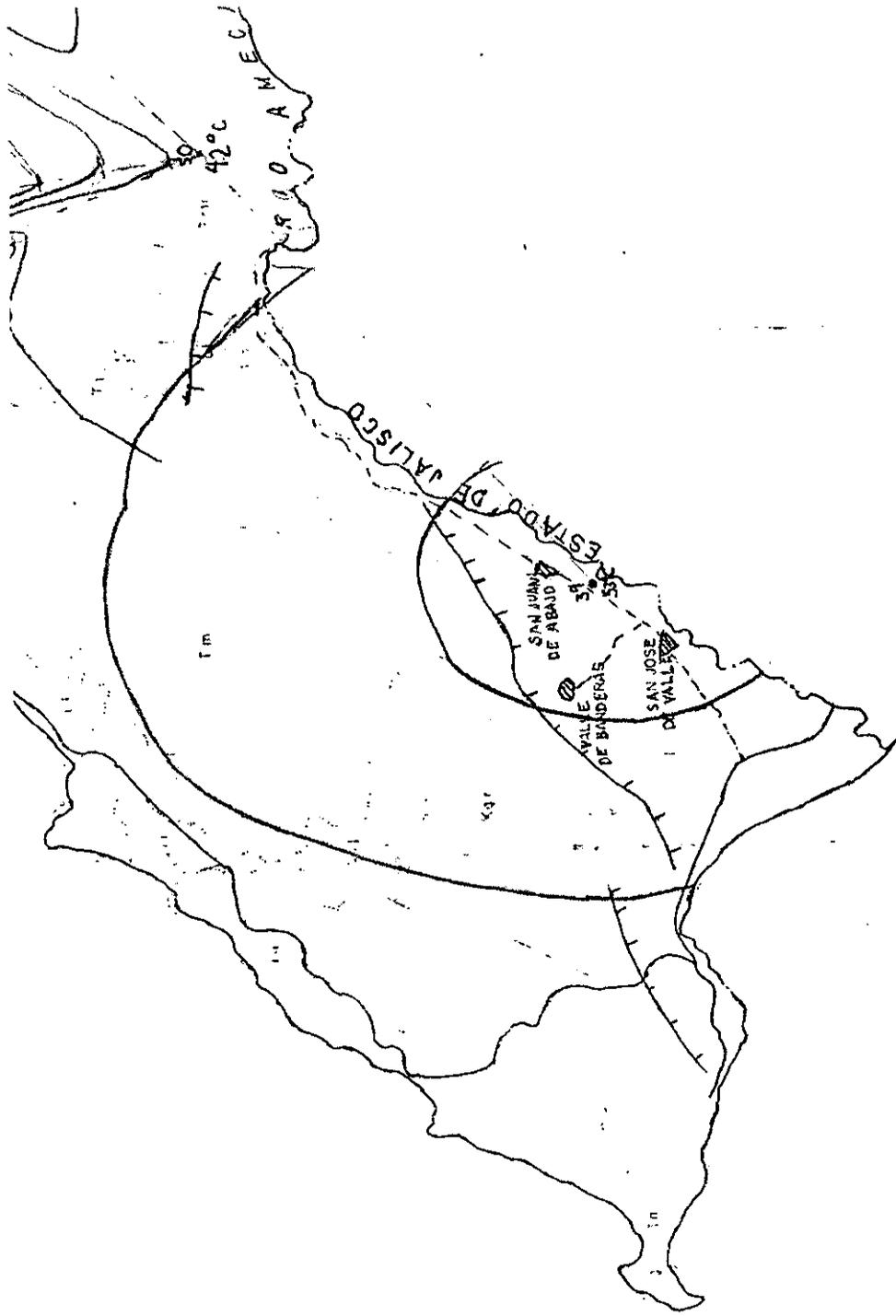
Tabla A.2.- Tabla con valores de los análisis de manantiales termales de Nayarit en mg/l  
(Continuación)

No	Sitio	HCO3	CO3	SIO2	B
3	A. C. Quiviquinta	136	2.6	67	.1
12	Pescadero	8		87	1.76
13	Somatlán	82		119	.1
14	San Marcos Coyotlán	58	.2	120	.44
15	Xola	53		89	.61
16	Sandiego del Naranjo	56	3.1	116	.7
17	Ruiz	61		55	.35
18	San Francisco	166		110	.1
19	A.C. Fco. I Madero	163		111	.17
20	Cerro el Sapo	144		96	.1
21	Xinacate	109	3.1	77	.26
4	A. C. Zapotilo	94	3.4	67	.26
22	La fortuna	91		91	.26
26	San Pedro Ixcatán	110	3.1	86	.26
27	Rosario Viejo	91		88	.61
28	Caimanero	104		81	.17
29	Los Tepetates	134		83	2.29
30	La Palma	391		147	10.59
31	Trapichillo	157		97	.26
32	Agua Miloya	201		86	.35
33	Limite	188	2.6	87	.26
34	Hervideros Molote	62	7	91	.53
5	A. C. Caramota	110	2.9	56	.35
35	Chico Molote	88	5.8	87	.53
36	Los Hervideros II	64	6.7	91	.53
37	Laguna Santa María del Oro	389	29.3	41	1.06
38	Guásimas	198	2.6	101	2.21
39	A. C. Chiquita El Conde	128	6.2	145	1.3
40	Valle Verde	184	3.1	143	1.3
41	Hervores	2340		44.9	23.04
42	Jamurca	402		58.7	.26
43	El Salado	178	27.2	118.9	1.32
44	Valle de Banderas	50		60.8	1.05
6	La Pila	110	2.9	61	.35
45	El Terreno	168		56.5	.35
46	La Galinda	100	2.3	86.4	.26
47	Embarcadero de Vera	162		51.1	1.15
48	Ocotillo	228		97.2	1.06
49	Pintadeño	106		99.5	.44
50	A. C. Novillero	112		88.6	.17
51	Los Nopalitos	178	7.9	95.1	.44
52	El Guayabo Huajimic	170	4.3	71.8	.08
53	El Terreno Huajimic	111		48.5	.17
54	Las Huertitas	68	2.2	89.1	.08
7	El Chico	97	5.8	74	.44
55	Cacao	55	4.6	67.9	1.32
56	San Blasito	113	2.2	74.2	0
57	Amatlan	35		175.9	1.24
58	El Coco II	155	10.1	175.9	1.24
59	A. C. Tetiltlán	170	104	159.6	3.88
60	Barrancas	78		82.1	
61	A. C. El Tajo	128	5.6	51.4	.53
8	Cucharas	83	2.6	44	.17
9	El Guayabo	129		61	1.41
10	A. C. San Miguel	78		106	.7
11	Rosa Morada	72		41	.1

Tabla A.3.- Tabla de Valores Calculados de Geotermómetros y Tipo de Agua

No	Sitio	T (°C)	K/Mg GIG83	SiO2 Chalc	Na/K FOUR79	Na-K-Ca	Alcalinidad mmol	ATipo
	A. C. Quiviquinta	37	37.0	87.0	94.0	3.0	2.22922	Na-Ca-HCO3
2	Pescadero	67	1.0	102.0	144.0	133.0	0.13113	Na-Ca-Cl-SO4
3	Somatlán	37	25.0	121.0	217.0	150.0	1.34409	Na-Ca-HCO3-Cl
4	San Marcos Coyotlán	40	1.0	122.0	162.0	145.0	0.95069	Na-SO4
5	Xola	75	2.0	103.0	150.0	138.0	0.86874	Na-SC4
6	San Diego del Naranjo	79.5	6.0	120.0	167.0	148.0	0.91791	Na-SC4
7	Ruiz	30.5	26.0	77.0	139.0	123.0	0.99987	Na-SO4
8	San Francisco	36	42.0	116.0	283.0	196.0	2.72095	Na-Ca-HCO3-Cl
9	A.C. Fco. I Madero	37	42.0	117.0	281.0	195.0	2.67178	Na-Ca-HCO3-Cl
10	Cerro el Sapo	33.5	43.0	108.0	273.0	190.0	2.36035	Na-Ca-Mg-HCO3-Cl
11	Xinacate	70	25.0	95.0	140.0	119.0	1.78665	Na-Ca-HCO3
12	A. C. Zapotilo	37	1.0	87.0	137.0	128.0	1.54078	Na-HCO3-SO4
13	La fortuna	27	42.0	105.0	296.0	199.0	1.49161	Na-Ca-Mg-HCO3-Cl
14	San Pedro Ixcatán	74	10.0	101.0	152.0	141.0	1.80304	Na-Cl-HCO3-SO4
15	Rosario Viejo	51	30.0	103.0	177.0	141.0	1.49161	Na-Ca-SO4-HCO3
16	Caimanero	50	20.0	98.0	173.0	132.0	1.70469	Na-Ca-SO4-HCO3
17	Los Tepetates	45	30.0	99.0	242.0	187.0	2.19643	Na-Cl-HCO3
18	La Palma	59	17.0	136.0	215.0	199.0	6.409	Na-Cl
19	Trapichillo	34	31.0	109.0	280.0	211.0	2.57343	Na-HCO3-Cl
20	Agua Miloya	71	7.0	101.0	147.0	132.0	3.29465	Na-HCO3-SO4
21	Límite	72	2.0	102.0	150.0	138.0	3.08156	Na-HCO3-SO4
22	Hervideros Molote	90	10.0	105.0	147.0	142.0	1.01626	Na-Cl-HCO3-SO4
23	A. C. Caramota	49	16.0	78.0	99.0	59.0	1.80304	Na-HCO3-SO4
24	Chico Molote	86	24.0	102.0	146.0	141.0	1.44243	Na-HCO3-Cl
25	Los Hervideros II	90	23.0	105.0	149.0	143.0	1.04904	Na-Cl
26	Laguna Santa María del Oro	26	53.0	62.0	244.0	190.0	6.37621	Na-Mg-HCO3-Cl
27	Guásimas	31	38.0	111.0	274.0	199.0	3.24548	Na-Ca-HCO3-Cl
28	A. C. Chiquita El Conde	38	38.0	135.0	272.0	202.0	2.09809	Na-HCO3-Cl
29	Valle Verde	40	43.0	134.0	254.0	188.0	3.016	Cl
30	Hervores	28	30.0	67.0	217.0	217.0	38.35563	Na-HCO3
31	Jamurca	46	27.0	80.0	131.0	131.0	6.5893	Na-HCO3-Cl
32	El Salado	31	24.0	121.0	243.0	191.0	2.91765	Na-HCO3-Cl
33	Valle de Banderas	53	44.0	82.0	121.0	108.0	0.81956	Na-Ca-Cl-SO4
34	La Pila	42	26.0	82.0	117.0	105.0	1.80304	Na-HCO3-SO4
35	El Terreno	32	47.0	78.0	292.0	185.0	2.75374	Ca-Na-Mg-HCO3
36	La Galinda	31	26.0	102.0	335.0	217.0	1.63913	Na-Ca-HCO3
37	Embarcadero de Vera	61	31.0	73.0	105.0	104.0	2.65539	Na-HCO3-Cl
38	Ocotillo	31	46.0	109.0	264.0	179.0	3.73721	Na-Ca-HCO3-Cl
39	Pintadeño	32.5	44.0	110.0	371.0	217.0	1.73748	Ca-Na-Mg-HCO3
40	A. C. Novillero	83		103.0	143.0	136.0	1.83582	Na-HCO3-SO4
41	Los Nopalitos	80	9.0	107.0	151.0	144.0	2.91765	Na-HCO3-SO4
42	El Guayabo Huajimic	31	54.0	91.0	292.0	176.0	2.78652	Ca-Mg-HCO3-Cl
43	El Terreno Huajimic	39	12.0	70.0	108.0	13.0	1.81943	Na-Ca-HCO3
44	Las Huertitas	31	48.0	103.0	278.0	181.0	1.11461	Na-Ca-Mg-HCO3
45	El Chico	53	2.0	93.0	126.0	119.0	1.58996	Na-HCO3-SO4
46	Cacao	42	2.0	88.0	125.0	128.0	0.90152	Na-Cl-SO4
47	San Blasito	50	30.0	93.0	99.0	55.0	1.85222	Na-HCO3
48	Amatlan	78	20.0	149.0	161.0	140.0	0.5737	Na-Ca-SO4-Cl
49	El Coco II	35	48.0	149.0	218.0	166.0	2.54065	Na-Mg-HCO3-Cl
50	A. C. Tetiltlán	47	42.0	142.0	249.0	193.0	2.78652	Na-Cl-CO3-HCO3
51	Barrancas	28	46.0	99.0	371.0	213.0	1.27852	Ca-Mg-Na-HCO3
52	A. C. El Tajo	60	34.0	73.0	128.0	117.0	2.09809	Na-HCO3-SO4
53	Cucharas	35	20.0	66.0	361.0	232.0	1.36048	Na-Ca-HCO3
54	El Guayabo	43	10.0	82.0	246.0	201.0	2.11448	Na-HCO3-Cl
55	A. C. San Miguel	62	18.0	114.0	159.0	141.0	1.27852	Na-SO4
56	Rosa Morada	42	21.0	62.0	141.0	125.0	1.18017	Na-SO4-HCO3

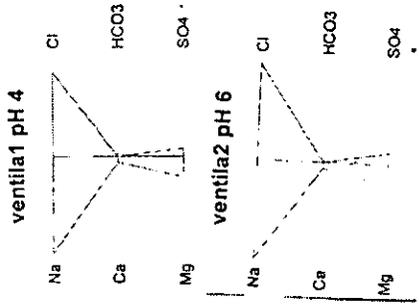
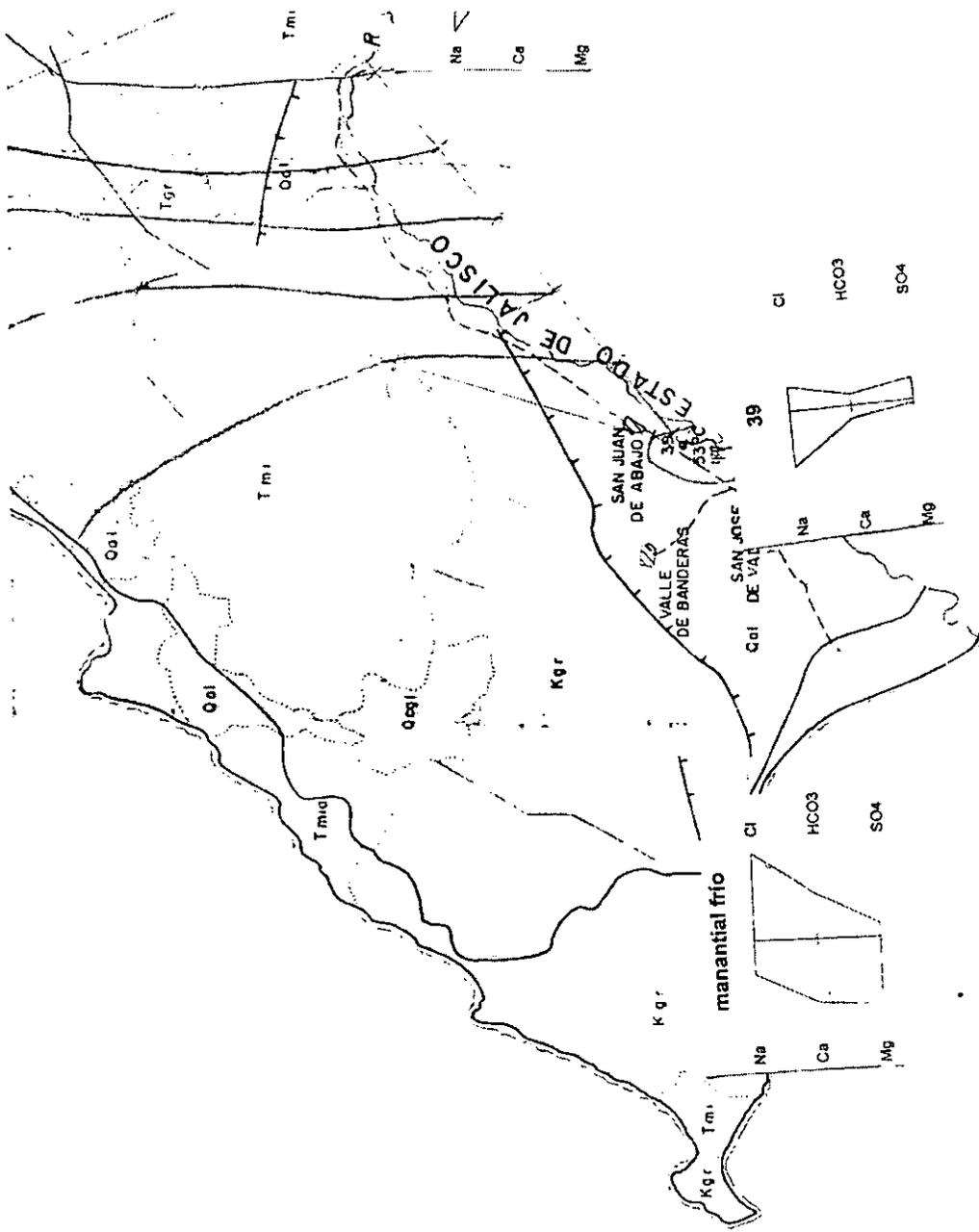
No	Sitio	T (°C)	K/Mg GIG83	SiO2 Chalc	Na/K FOUR79	Na-K-Ca	Alcalinidad mmol	ATipo
3	A. C. Quiviquinta	37	37.0	87.0	94.0	3.0	2.22922	Na-Ca-HCO3
12	Pescadero	67	1.0	102.0	144.0	133.0	0.13113	Na-Ca-Cl-SO4
13	Somatlán	37	25.0	121.0	217.0	150.0	1.34409	Na-Ca-HCO3-Cl
14	San Marcos Coyotlán	40	1.0	122.0	162.0	145.0	0.95069	Na-SO4
15	Xola	75	2.0	103.0	150.0	138.0	0.86874	Na-SO4
16	San Diego del Naranjo	79.5	6.0	120.0	167.0	148.0	0.91791	Na-SO4
17	Ruiz	30.5	26.0	77.0	139.0	123.0	0.99987	Na-SO4
18	San Francisco	36	42.0	116.0	283.0	196.0	2.72095	Na-Ca-HCO3-Cl
19	A.C. Fco. I Madero	37	42.0	117.0	281.0	195.0	2.67178	Na-Ca-HCO3-Cl
20	Cerro el Sapo	33.5	43.0	108.0	273.0	190.0	2.36035	Na-Ca-Mg-HCO3-Cl
21	Xinacate	70	25.0	95.0	140.0	119.0	1.78665	Na-Ca-HCO3
4	A. C. Zapotilo	37	1.0	87.0	137.0	128.0	1.54078	Na-HCO3-SO4
22	La fortuna	27	42.0	105.0	296.0	199.0	1.49161	Na-Ca-Mg-HCO3-Cl
26	San Pedro Ixcatán	74	10.0	101.0	152.0	141.0	1.80304	Na-Cl-HCO3-SO4
27	Rosario Viejo	51	30.0	103.0	177.0	141.0	1.49161	Na-Ca-SO4-HCO3
28	Caimanero	50	20.0	98.0	173.0	132.0	1.70469	Na-Ca-SO4-HCO3
29	Los Tepetates	45	30.0	99.0	242.0	187.0	2.19643	Na-Cl-HCO3
30	La Palma	59	17.0	136.0	215.0	199.0	6.409	Na-Cl
31	Trapichillo	34	31.0	109.0	280.0	211.0	2.57343	Na-HCO3-Cl
32	Agua Miloya	71	7.0	101.0	147.0	132.0	3.29465	Na-HCO3-SO4
33	Límite	72	2.0	102.0	150.0	138.0	3.08156	Na-HCO3-SO4
34	Hervideros Molote	90	10.0	105.0	147.0	142.0	1.01626	Na-Cl-HCO3-SO4
5	A. C. Caramota	49	16.0	78.0	99.0	59.0	1.80304	Na-HCO3-SO4
35	Chico Molote	86	24.0	102.0	146.0	141.0	1.44243	Na-HCO3-Cl
36	Los Hervideros II	90	23.0	105.0	149.0	143.0	1.04904	Na-Cl
37	Laguna Santa María del Oro	26	53.0	62.0	244.0	190.0	6.37621	Na-Mg-HCO3-Cl
38	Guásimas	31	38.0	111.0	274.0	199.0	3.24548	Na-Ca-HCO3-Cl
39	A. C. Chiquita El Conde	38	38.0	135.0	272.0	202.0	2.09809	Na-HCO3-Cl
40	Valle Verde	40	43.0	134.0	254.0	188.0	3.016	Cl
41	Hervores	28	30.0	67.0	217.0	217.0	38.35563	Na-HCO3
42	Jamurca	46	27.0	80.0	131.0	131.0	6.5893	Na-HCO3-Cl
43	El Salado	31	24.0	121.0	243.0	191.0	2.91765	Na-HCO3-Cl
44	Valle de Banderas	53	44.0	82.0	121.0	108.0	0.81956	Na-Ca-Cl-SO4
6	La Pila	42	26.0	82.0	117.0	105.0	1.80304	Na-HCO3-SO4
45	El Terreno	32	47.0	78.0	292.0	185.0	2.75374	Ca-Na-Mg-HCO3
46	La Galinda	31	26.0	102.0	335.0	217.0	1.63913	Na-Ca-HCO3
47	Embarcadero de Vera	61	31.0	73.0	105.0	104.0	2.65539	Na-HCO3-Cl
48	Ocotillo	31	46.0	109.0	264.0	179.0	3.73721	Na-Ca-HCO3-Cl
49	Pintadeño	32.5	44.0	110.0	371.0	217.0	1.73748	Ca-Na-Mg-HCO3
50	A. C. Novillero	83		103.0	143.0	136.0	1.83582	Na-HCO3-SO4
51	Los Nopalitos	80	9.0	107.0	151.0	144.0	2.91765	Na-HCO3-SO4
52	El Guayabo Huajimic	31	54.0	91.0	292.0	176.0	2.78652	Ca-Mg-HCO3-Cl
53	El Terreno Huajimic	39	12.0	70.0	108.0	13.0	1.81943	Na-Ca-HCO3
54	Las Huertitas	31	48.0	103.0	278.0	181.0	1.11461	Na-Ca-Mg-HCO3
7	El Chico	53	2.0	93.0	126.0	119.0	1.58996	Na-HCO3-SO4
55	Cacao	42	2.0	88.0	125.0	128.0	0.90152	Na-Cl-SO4
56	San Blasito	50	30.0	93.0	99.0	55.0	1.85222	Na-HCO3
57	Amatlan	78	20.0	149.0	161.0	140.0	0.5737	Na-Ca-SO4-Cl
58	El Coco II	35	48.0	149.0	218.0	166.0	2.54065	Na-Mg-HCO3-Cl
59	A. C. Tetiltlán	47	42.0	142.0	249.0	193.0	2.78652	Na-Cl-CO3-HCO3
60	Barrancas	28	46.0	99.0	371.0	213.0	1.27852	Ca-Mg-Na-HCO3
61	A. C. El Tajo	60	34.0	73.0	128.0	117.0	2.09809	Na-HCO3-SO4
8	Cucharas	35	20.0	66.0	361.0	232.0	1.36048	Na-Ca-HCO3
9	El Guayabo	43	10.0	82.0	246.0	201.0	2.11448	Na-HCO3-Cl
10	A. C. San Miguel	62	18.0	114.0	159.0	141.0	1.27852	Na-SO4
11	Rosa Morada	42	21.0	62.0	141.0	125.0	1.18017	Na-SO4-HCO3



11 20 20

105° 15'

1. 1. 0 2 4



105° 30'

1250000