

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS

"EVALUACIÓN DEL FLUJO DE CALOR Y POTENCIAL GEOTÉRMICO
EN LA REGIÓN DE ENSENADA, B.C. MÉXICO"

TESIS

que para cubrir parcialmente los
requisitos necesarios para obtener
el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA COSTERA
presenta:

JOSÉ MARÍA BELTRÁN ABAUNZA

Ensenada, B.C., Septiembre de 1999.

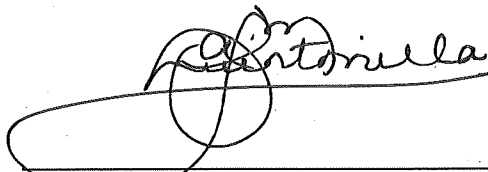
"EVALUACIÓN DEL FLUJO DE CALOR Y POTENCIAL GEOTÉRMICO
EN LA REGIÓN DE ENSENADA, B.C. MÉXICO"

TESIS

que para cubrir parcialmente los
requisitos necesarios para obtener
el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFÍA COSTERA
presenta:

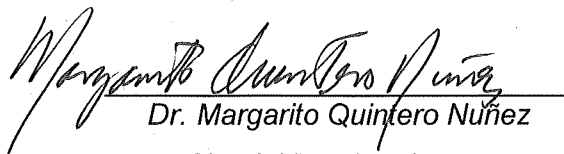
JOSÉ MARÍA BELTRÁN ABAUNZA

Aprobada por:



M.C. Ana Luz Quintanilla Montoya

Director de Tesis



Dr. Margarito Quintero Nuñez
Sinodal Propietario



Dr. René Pinet Plasencia
Sinodal Propietario

RESUMEN de la Tesis de José María Beltrán Abaunza presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCENOGRAFÍA COSTERA. Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 1999.

"EVALUACIÓN DEL FLUJO DE CALOR Y POTENCIAL GEOTÉRMICO
EN LA REGIÓN DE ENSENADA, B.C. MÉXICO"

En el presente estudio se evaluó el flujo de calor terrestre con base en la técnica del geotermómetro de sílice y a partir de estos resultados y mediante el diagrama de Lindal, se evaluó el potencial geotérmico para la región de Ensenada, Baja California. Se determinó que el valor medio de flujo de calor en el área de estudio es de $123.33 \pm 35.57 \text{ mW m}^{-2}$ ($2.95 \pm 0.85 \text{ HFU}$) y es considerado como alto debido a que excede 1.5 veces el valor promedio terrestre. Se identificaron cuatro zonas con alta actividad hidrotermal asociada a los principales sistemas de fallas de la región, y se considera a la región de Ensenada como un sistema geotérmico de baja temperatura, con valores sobre el nivel estático del agua que oscilan entre los 30° y los 108°C.

El presente trabajo concluye que Ensenada presenta un potencial geotérmico suficiente para desarrollar diferentes usos directos tales como invernaderos, industrias deshidratadoras y centros recreativos, y se comprueba que el área de la península de Punta Banda, presenta un potencial aparente de 1.45 MWatts que puede ser aprovechado como un recurso alternativo de energía complementario al actual suministro eléctrico de la región.

Palabras clave: *flujo de calor, potencial geotérmico, geotermometría, sílice.*

Marcela:

Es tu cercanía al mar
la que ahora me envuelve.

Y es la distancia,
la que te engrandece.

Has encontrado tu espacio
y hecho de él un hogar.

Despiertas y vives soñando,
y es cada sueño una realidad.

Y eres tú...
mi amiga...
mi Esposa...
...mi Vida.

DEDICATORIA

Al más grandioso investigador que he tenido la fortuna de conocer. No basado en Títulos y ostentosos reconocimientos, sino en el más sencillo y puro amor por la ciencia y el conocimiento. A ti Papá, que siempre me has transmitido con tu ejemplo el entusiasmo, alegría y amor por la vida y el carácter y disciplina necesarios para conquistar mis más elevados proyectos. Es en tu persona en la cual encuentro el más honorable Título que un hombre pueda tener: el ser Padre.

A la mujer en cuyos brazos se ha forjado mi espíritu. Mi mayor maestra y consejera. A ti Mami, que siempre has cuidado que no me rompa la cabeza y que no me falte un tornillo. Tú que me has brindado el equilibrio mediante la sensibilidad a la vida y a partir del cual he descubierto la grandeza de las cosas pequeñas. Porque siempre he sido tu pequeño y me has enseñado a crecer.

A la memoria de mis abuelitos:
Paulino, Lolita, Tere y José María.

A mi Directora de Tesis M.C. Ana Luz Quintanilla Montoya, que con la energía del viento y la calidez del sol, me ha brindado su apoyo, entusiasmo y amistad; mil gracias.

A mis Sinodales: Dr. René Pinet Plasencia por sus comentarios, tiempo y buen humor; y en especial al Dr. Margarito Quintero Nuñez por sus observaciones, apoyo y amistad brindadas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para realizar mis estudios de posgrado. Asimismo por el apoyo brindado para la realización de este proyecto mediante el convenio No. 4343P "Sistema de Evaluación Tecnológica de las Fuentes Alternas de Energía de Baja California" cuyo responsable es la M.C. Ana Luz Quintanilla M.

A la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas porque dentro de sus aulas encontré las herramientas para la realización de mis proyectos, y un espacio para mi realización personal. Asimismo por todo el apoyo que durante mi formación me ha brindado, y en especial al programa U.A.B.C. "Fuentes Alternas de Energía en B.C." con número de registro 4018 a cargo de la M.C. Ana Luz Quintanilla M., por las facilidades otorgadas para la culminación de este proyecto.

A la Fundación TELMEX, por la beca otorgada y por haber contribuido a mi formación académica.

A la Comisión Federal de Electricidad por las facilidades brindadas e información proporcionada para la realización de este proyecto.

Mil gracias a mis profesores que han compartido conmigo sus conocimientos y tiempo. En especial al Dr. Adán Mejía, M.C. Ramón Luna, M.C. Rubén Castro, M.C. Manuel Moreno, M.C. Rafael Hernández Walls, M.C. César García, por su amistad brindada.

Al entusiasta equipo de la revista de Ciencias Marinas, Hortencia, Miriam, Chris, Jenny, Raúl y Miguel.

A mis dos bellas hermanas: mi manita Edna y Nancy, por todo su amor y cariño.

A mi familia, que aunque lejana siempre ha estado conmigo.

A Angel, Paty y Ofe (teclitzin), mi nueva familia.

A Bertha y Conchita, mis nuevas abuelitas.

A mis compañeros y amigos. A Juan Carlos, Gil, Plata, Liza, Erika, Cuauh, Gerardo, René y Norma, Katia, Raquel y Alejandro, Daniel, Jesús, Flor, Chalo, Toto, Diego y Héctor.

A Roy, Mike y Manuel.

A todas aquellas personas que en alguna forma han compartido un momento de mi vida en Ensenada. Gracias.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.	1
I-1. Antecedentes.....	3
Regional	3
Local.....	4
I-2. Objetivo.....	10
I-3. Hipótesis.....	10
I-4. Área de estudio.....	11
II. METODOLOGÍA.	13
Obtención de los datos.....	13
II-1. Localización de pozos y manantiales con valores de temperatura superficial anormalmente alta.....	14
II-2. Clasificación del tipo de agua.	14
II-3. Geotermometría.....	15
II-4. Flujo de calor	16
II-5. Evaluación del potencial geotérmico de la región de Ensenada.	19
III. RESULTADOS Y DISCUSIONES	21
III-1. Localización de pozos y manantiales con valores de temperatura superficial anormalmente altos.....	21
III-2. Clasificación del tipo de agua.	25
III-3. Geotermometría.....	29
III-4. Flujo de Calor.....	32
III-5. Evaluación del potencial geotérmico.....	36

IV. CONCLUSIONES.....	51
V. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS:	53
VI. LITERATURA CITADA.....	55
VII. ANEXOS.....	61

Lista de Figuras

Figura 1. Provincias geoquímicas de B.C. (Fuente: Gastil y Bertine, 1981).....	8
Figura 2. Área de estudio (modificado de Gastil <i>et al.</i> , 1973)	12
Figura 3. Distribución de frecuencias de temperatura superficial en los pozos y manantiales analizados.....	22
Figura 4. Localización de los manantiales y pozos con valores de temperatura superficial anormalmente altos (modificado de Gastil <i>et al.</i> , 1973).....	24
Figura 5. Diagrama ternario utilizado para la identificación del tipo de agua en el área de estudio.	28
Figura 6. Flujo de calor en el área de estudio (modificado de Gastil <i>et al.</i> , 1973).	37
Figura 7. Diagrama de Línal (modificado de Línal, 1973).	42
Figura 8. Área de influencia geológica de la fuente de calor, en la península de Punta Banda (modificado de Gastil <i>et al.</i> , 1973).	49

Lista de Tablas

Tabla 1. Muestras con valores anormales de temperatura superficial.....23

Tabla 2. Valores estimados de flujo de calor a partir del geotermómetro de sílice.....33

Tabla 3. Escala cualitativa de flujo de calor.....36

EVALUACIÓN DEL FLUJO DE CALOR Y POTENCIAL GEOTÉRMICO EN LA REGIÓN DE ENSENADA, B.C. MÉXICO.

I. INTRODUCCIÓN.

El flujo de calor proveniente del interior de la Tierra nos permite hacer suposiciones aproximadas sobre el estado térmico de las partes centrales de nuestro planeta, las cuales no son accesibles a las mediciones directas de temperatura; este flujo se encuentra muy estrechamente relacionado a los levantamientos o a las subsidencias de la corteza terrestre, a la migración del agua, a la actividad volcánica, y al decaimiento de isótopos radioactivos (Buntebarth, 1994).

El flujo de calor terrestre se define en forma general como la cantidad de calor liberado al espacio desde el interior a través de una unidad de área en una unidad de tiempo; es el producto del incremento de la temperatura con la profundidad (gradiente geotérmico) y de la conductividad térmica de las rocas (flujo de calor conductivo) y es medido en miliwatts por metro cuadrado (Barbier, 1997).

El flujo de calor como parte de las técnicas de exploración geotérmica, es una de las herramientas más útiles para determinar el posible aprovechamiento del recurso geotérmico.

En México se carece de suficientes datos de flujo térmico, es decir, de mediciones directas de la variación vertical de la temperatura y de la conductividad de las rocas que se encuentran entre los puntos en los que se han llevado a cabo las mismas; sin embargo esta determinación de temperatura no es sencilla. Los estratos cercanos a la superficie pueden ser estudiados mediante pozos, cuyas perforaciones son costosas y por ello, la regla general en la determinación de temperaturas es utilizar métodos indirectos, (Buntebarth, 1994).

La asociación de minerales, que se forman uno al lado de otro en un medio geoquímico similar no permite, en general obtener conclusiones sobre la temperatura de formación de estos. Sin embargo, la presencia de elementos traza en la red cristalina, o la relación entre determinados iones e isótopos presentes en una fase permiten, empleando condiciones fisicoquímicas de equilibrio, una determinación más exacta de la temperatura de formación. También la solubilidad de materiales sólidos como el cuarzo o minerales conteniendo Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , permiten obtener información sobre la temperatura en solución.

Con base en las condiciones fisicoquímicas de equilibrio, Swamberg y Morgan (1979, 1980), han trabajado en el desarrollo de métodos opcionales, que permiten obtener una estimación del flujo de calor, a partir de una ecuación empírica que relaciona la temperatura estimada a partir del contenido de sílice en manantiales y pozos, con los datos de flujo térmico convencional.

La utilización de una técnica indirecta para calcular el flujo de calor e identificar áreas con anomalías térmicas susceptibles de ser aprovechadas como una fuente de energía alterna, contribuye a la obtención de un mayor conocimiento del potencial geotérmico de la región de Ensenada, B.C., a la vez que se promueve el interés en la investigación de dicho potencial.

I-1. Antecedentes.

Regional

La formación de la península de Baja California está asociada a una gran actividad tectónica debido al movimiento de las placas del Pacífico Norte, la placa de Norteamérica y la placa Farallón, (Atwater, 1970). Esta última, fue consumida en la trinchera Norteamericana a una velocidad promedio superior a la velocidad que se estaba creando en la zona de producción, asimismo, arrastrando a la placa Pacífico Norte y la zona de producción de ésta última y la Farallón hacia la zona de subducción en la frontera con la placa de Norteamérica, (Gastil *et al.* 1979).

Este evento dió origen al batolito peninsular, el cual posee una edad aproximada hasta la culminación de su emplazamiento de 95 millones de años (Cretácico medio), (Wong, 1980). Los fenómenos durante la intrusión del batolito en este periodo estuvieron acompañados por la existencia de vulcanismo del tipo andesítico - basáltico característico de una zona de subducción, originando depósitos de roca volcánica y volcanoclástica que en la actualidad están representados en la formación Alisitos, (Pou, 1982).

Un segundo evento tectónico importante para la península de Baja California es el que origina la apertura del Golfo de California, el cual provoca una migración de la península hacia el noroeste mediante la acción del sistema de fallas de San Andrés en el Golfo de California. Se inicia en la frontera Oligoceno - Mioceno, hace aproximadamente 30 millones de años, (Atwater, 1970).

Local.

De acuerdo con las regiones geomorfológicas descritas por Gastil *et al* (1975), la región de Ensenada pertenece a la provincia costera del Pacífico dentro de la subdivisión del plano costero de Todos Santos.

El plano costero de Todos Santos es una región de aproximadamente 150 km², que está ocupado por la ciudad de Ensenada, Valle de Maneadero, península de Punta Banda, y la bahía de Todos Santos. Esta región parece estar formada por una serie de bloques estructurales controlados por un sistema complejo de fallas normales y de rumbo originados quizá por las fuerzas de deformación que experimenta la península de Baja California en su movimiento de traslación hacia el noroeste, (Wong, 1980).

La denominada falla de Agua Blanca es una falla de rumbo con desplazamiento lateral derecho de una longitud aproximada de 130 km, (Allen *et al.*, 1960). Este sistema de falla es el causante de toda la fisiografía actual que se observa en la región del plano costero de Todos Santos, principalmente en el área de Punta Banda, Valle de Maneadero y la Bahía de Todos Santos, (Wong, 1980). Actualmente se considera como una falla activa, dada la ocurrencia de manantiales de agua caliente junto con la presencia de facetas triangulares y otras evidencias encontradas en el sector norte de la península de Punta Banda, (Pou, 1982).

Su origen se remonta al Jurásico Inferior, tiempo en que se formó la falla transforme o de frontera de dos segmentos de cresta oceánica, como resultado del avance de las placas de Farallón y Pacífico Norte hacia la zona de subducción en la frontera con la placa de Norteamérica. Durante el Jurásico - Cretácico actuó como una falla de rumbo con un movimiento relativo lateral izquierdo, (Gutiérrez, 1984).

Geográficamente ocurre desde el paso de San Matías al Oeste de la sierra de San Pedro Mártir en su región oriental, y se continúa hasta el Valle de Santo Tomás en donde se divide en dos sectores: el sector norte con un rumbo N48W hasta la península de Punta Banda, y el sector sur, con un rumbo N46W el cual se continúa hasta la intersección con la costa en bahía Soledad, al sur de la península de Punta Banda, (Gutiérrez, 1984).

A lo largo del trazo de esta falla afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias cuyas edades varían desde el periodo Jurásico hasta el Reciente, representadas principalmente por las Formaciones Alisitos y Rosario, así como por las rocas graníticas que constituyen el batolito peninsular, (Lira, 1995).

Dentro de los estudios más importantes que nos ayudan a definir el marco estratigráfico y estructural del área del plano costero de Todos Santos, tenemos el de Allen *et al.* (1960), en el cual se describe la falla de Agua Blanca y su relación estructural con la región norte de la península.

Gastil *et al.* (1975), realizan un reconocimiento geológico de Baja California, y presentan un estudio colateral de anomalías magnéticas regionales de la parte norte de la península realizado por Phillips (1975, citado en Gastil *et al.*, 1975).

La implicación tectónica de la falla de Agua Blanca en las inmediaciones de la península de Punta Banda, la trayectoria del sector sur de esta falla y la relación que guarda esta con las fallas de Maximinos y Santo Tomás, esta descrita por Wong (1980). Asimismo, Pou (1982), en su estudio de las características estructurales de las Islas de Todos Santos, B.C., encuentra que existe una relación entre las Islas de Todos Santos, y la península de Punta Banda, ya que enclavado en la zona del cañón de Todos Santos, se encuentra un *Horst* que presupone el hecho de que antiguamente las islas estaban unidas a la península de Punta Banda.

Gutiérrez (1984) realiza una reconstrucción tectónica de la región que ocupa la falla de Agua Blanca en la bahía de Todos Santos, Ensenada, B.C. y Cruz (1985), obtiene que la formación del Valle de Maneadero, en donde se encuentra la laguna costera de Punta Banda, es estructuralmente un medio graben el cual está controlado por las fallas de Agua Blanca, San Carlos y la falla que atraviesa la bahía de Todos Santos desde el Cerro el Vigía hasta intersectarse con la falla de Agua Blanca en el cañón submarino de Punta Banda.

Existen varios estudios geofísicos en la zona de estudio como por ejemplo: el levantamiento aeromagnético realizado por el Consejo de Recursos no Renovables (Anon. 1965, citado en Wong, 1980) entre la región de Ensenada y San Quintín; asimismo, Krause (1965) realizó un estudio de batimetría y magnetometría sobre el borde continental de California y Baja California en el cual se postula una posible continuación de la falla de Agua Blanca con rumbo hacia el Norte, casi paralela a la línea de costa, más aún, relaciona dicha falla a una anomalía magnética al oeste de Punta Descanso.

Petrick (1972), concluyó en su estudio de resistividad la probable posición de la falla de Agua Blanca y la profundidad al basamento en el Valle de Maneadero, la cual estimó en 1,828.8 m.

Strandstra (1972), realizó un estudio de potencial natural en el Valle de Maneadero y relaciona una anomalía negativa al paso de la falla de Agua Blanca, así como la actividad hidrotermal observada en ésta.

Hummel (1972), realizó una investigación con el objeto de determinar las características geotérmicas en el Valle de Maneadero, con respecto a temperaturas de agua subterráneas, lo que llevó a concluir la posible posición de la falla de Agua Blanca, así como la existencia de una fuente de poder geotérmica con una probable capacidad geotermal para suministrar electricidad a Ensenada y áreas circunvecinas.

Pohle (1977), realiza un estudio gravimétrico en el que determina la localización de la extensión norte de la falla de Agua Blanca a través del Valle de Maneadero, asimismo determina la profundidad del basamento rocoso a lo largo del lado norte de la extensión norte de la falla de Agua Blanca.

González (1977), realizó el primer estudio gravimétrico y magnético de la bahía de Todos Santos, en la que determina el paso de una falla secundaria que aflora en el Cerro el Vigía y se extiende en la bahía hasta intersectarse en el cañón submarino de Punta Banda con la falla de Agua Blanca.

Entre los estudios geoquímicos realizados destacan los de Vidal *et al.* (1978, 1981, 1982), quienes describen la actividad hidrotermal submarina en la Bahía Papalote, Ensenada, B.C.

La Universidad de San Diego California, E.U.A. (Gastil y Bertine, 1981), llevó a cabo un estudio geoquímico termal de California y Baja California que incluyó el muestreo de diferentes manantiales y pozos, así como la descripción de las localidades donde se encuentran, asimismo subdividen al Estado de Baja California en 5 provincias geoquímicas, ubicándose la región de Ensenada dentro de la provincia denominada Agua Blanca - San Miguel (ver Figura 1), en el cual se reportó la mayor concentración de manantiales activos y se determinó que las aguas son de composición cloro-sulfatadas.

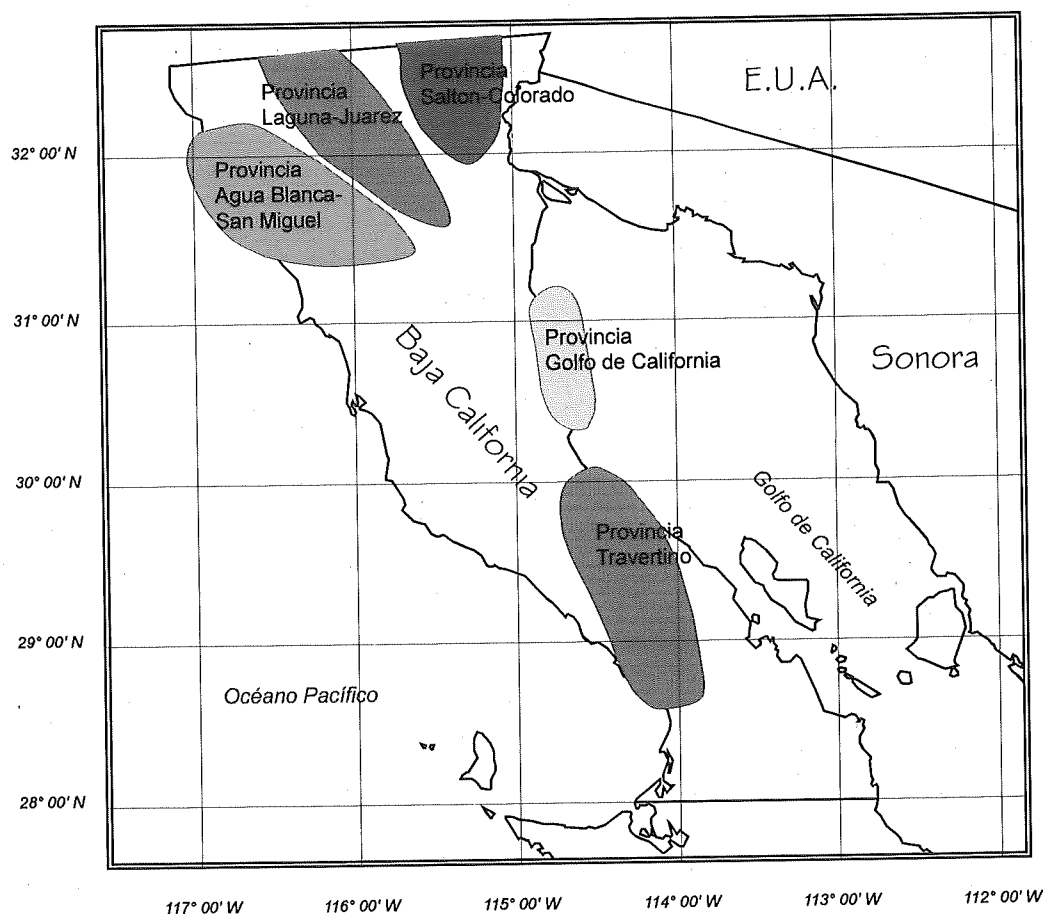


Figura 1. Provincias geoquímicas de B.C. (Fuente: Gastil y Bertine, 1981).

En 1982 un grupo de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) efectuó una serie de visitas a las manifestaciones termales en el área de Ensenada, señalando en la zona de la Joya temperaturas de 95°C en superficie y de 102°C sumergida bajo el mar en la Bufadora. En 1993 realizan un reconocimiento geotérmico de la zona, efectuando una descripción de las características geológicas y el muestreo de manantiales y pozos con temperaturas anómalas, y concluyen que el área de Punta Banda - Maneadero representa la de mayor potencial geotérmico, (Lira, 1995).

I-2. Objetivo.

General:

- Evaluar el potencial geotérmico y flujo de calor de los afloramientos hidrotermales que ocurren en la región de Ensenada, B.C. México.

Objetivos particulares:

- Localizar los pozos y manantiales de la región de Ensenada con valores de temperatura superficial anormalmente altos.
- Clasificar el agua de los pozos y manantiales con base en sus aniones dominantes.
- Estimar el flujo de calor en la región de Ensenada aplicando el método del geotermómetro de sílice.
- Evaluar el potencial geotérmico de la región de Ensenada mediante la identificación de áreas o sitios de interés geotérmico y, estimar el potencial geotérmico medido en watts, específicamente en el área de Punta Banda.

I-3. Hipótesis

La región de Ensenada, B.C. cuenta con el potencial geotérmico suficiente para ser aprovechado en forma directa, o como fuente de energía alterna.

I-4. Área de estudio.

El área de estudio se encuentra ubicada entre los 117°00' N 31°18' W y los 116°00' N 32°18' W. La región de Ensenada está localizada aproximadamente a 105 km al sur de la línea internacional entre México y Estados Unidos (ver Figura 2).

Tres grupos de rocas constituyen los principales ensambles litológicos del área: rocas pre-batolíticas, batolíticas y post-batolíticas.

- El grupo pre-batolítico está constituido por Formaciones marinas sedimentarias del Cretácico temprano (Albian) y por rocas metamórficas típicas de depósitos eugeosinclinales (Gastil *et al.* 1975).
- El grupo batolítico está formado por rocas plutónicas cristalinas de tonalita, gabro y granodiorita (Larsen, 1948 citado en Vidal *et al.*, 1982).
- El grupo post-batolítico está constituido por formaciones sedimentarias marinas del Cretácico Tardío (Maestrichtian), depósitos marinos del Plioceno, basalto del Mioceno, andesíticas volcánicas, y sedimentos no marinos de aluvión cuaternario (Gastil *et al.* 1975).

La región de Punta Banda se comporta estructuralmente como un elevado *horst*, con sus flancos controlados por la rama norte y sur de la extensión hacia el norte de la falla de Agua Blanca, siendo esta elevación la respuesta quizá a las fuerzas de deformación que experimentó la península. La región del Valle de Maneadero y su extensión en el interior de la bahía forman estructuralmente un bloque hundido con respecto a los demás (graben), con sus flancos controlados por fallas normales y paralelas, asociadas al sistema de falla de Agua Blanca. El resto de la bahía, así como la región comprendida desde Punta San Miguel hasta el ejido Chapultepec, forman estructuralmente un bloque levantado con respecto al graben (Wong, 1980).

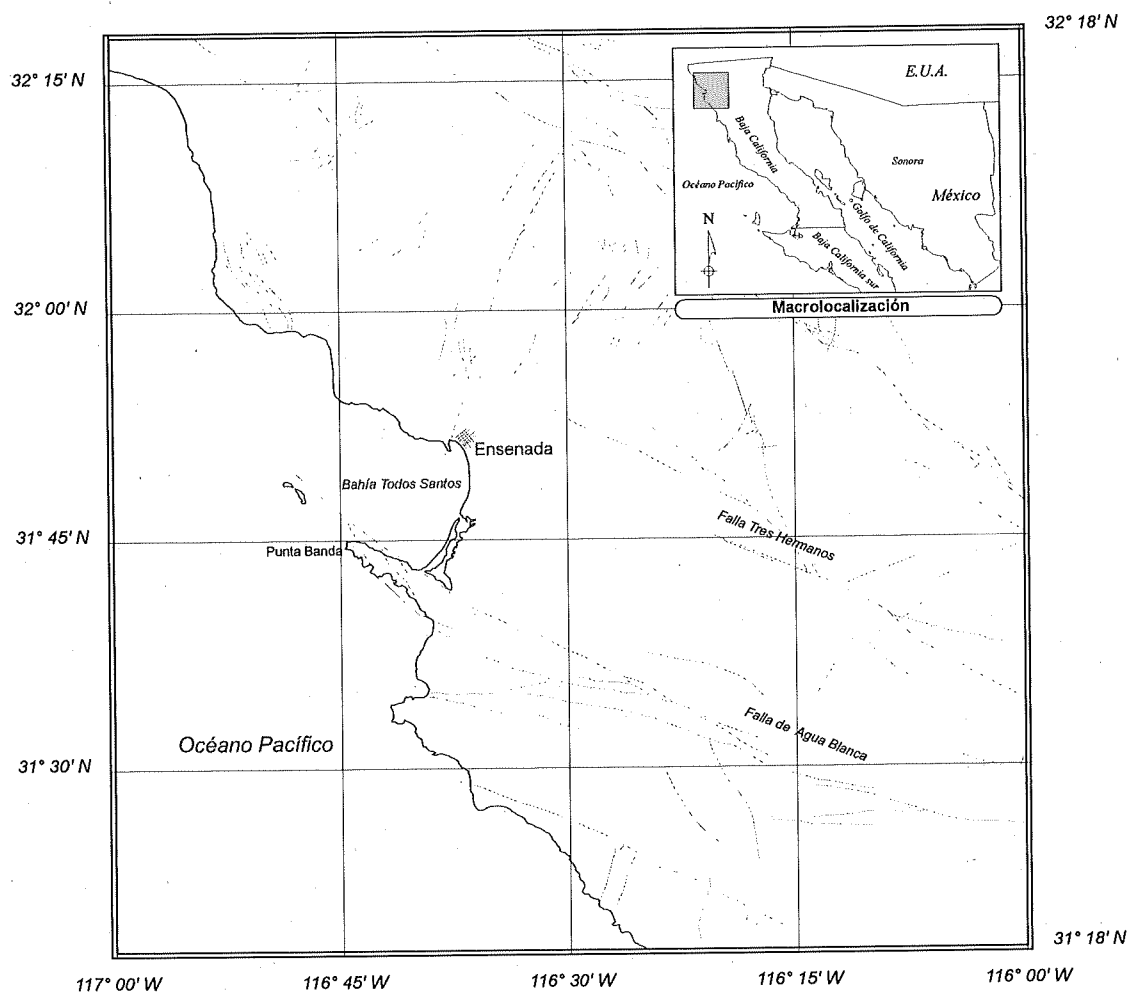


Figura 2. Área de estudio (Modificado de Gastil, 1973).

II. METODOLOGÍA.

Obtención de los datos.

La fase inicial de este trabajo, consistió en una búsqueda intensiva de literatura publicada y reportes técnicos acerca de las características químicas del agua de los pozos de la región de Ensenada. Las variables de interés por pozo para este estudio fueron: la temperatura superficial ($T^{\circ}\text{C}$), pH, $\text{SiO}_2(\text{mg/l})$, $\text{Na}^+(\text{mg/l})$, $\text{K}^+(\text{mg/l})$, $\text{Ca}^{2+}(\text{mg/l})$, $\text{Mg}^{2+}(\text{mg/l})$, $\text{Cl}^-(\text{mg/l})$, $\text{HCO}_3^-(\text{mg/l})$, $\text{CO}_3^{2-}(\text{mg/l})$, $\text{SO}_4^{2-}(\text{mg/l})$, B (mg/l). Los datos utilizados en el presente estudio provienen de: Alvarez (1993), Gastil y Bertine (1981), Vidal *et al.* (1978, 1981), SPP (1981) y James (1972). En total se obtuvieron datos de 62 pozos con valores para al menos una variable de interés.

Del total de los pozos, nueve de ellos fueron analizados por más de un autor. Para obtener un solo valor para cada variable repetida por pozo, se optó por utilizar el valor del análisis más reciente o el valor cuyo estudio presentará la mayor cantidad ú homogeneidad en sus datos. Las variables que no fueron repetidas por los autores, se combinaron para que por pozo se contara con la mayor cantidad de datos.

La ubicación de los pozos se llevó a cabo mediante la digitalización de los diferentes mapas de localización presentados por cada autor, ya que éstos, en su respectivo trabajo, no presentan dicha información.

Debido a la falta de homogeneidad en los datos tan solo 42 muestras poseen información completa para permitir la aplicación de la geotermometría. Los datos reportados para las 42 muestras analizadas se presentan en el Anexo 1.

II-1. Localización de pozos y manantiales con valores de temperatura superficial anormalmente alta.

El valor anormal de temperatura se definió como todo aquel valor de temperatura superficial que fuese igual al promedio de las muestras más una desviación estándar.

Las muestras que cumplieron con esta restricción fueron identificadas y localizadas en un plano para mostrar su ubicación, asimismo, se realizó una correlación entre estas muestras y el flujo de calor para determinar si existía alguna relación entre estas dos variables.

II-2. Clasificación del tipo de agua.

Con base en Nicholson (1993), se clasificó el tipo de agua de acuerdo a su anión dominante (cloro, bicarbonato, carbonato y sulfato). A pesar de no ser un esquema genético, esta clasificación nos permite inferir sobre el posible origen de las aguas.

Para la identificación del tipo de agua, se utilizó un diagrama ternario $\text{Cl} - \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 - \text{SO}_2$, con la ayuda del programa de software *HidroChem* de la compañía *RockWare, Inc. Versión 1997*, para 45 muestras que contaban con esta información (ver Anexo 2). Este tipo de diagrama se prefirió debido a su sencillez respecto a muchos otros gráficos que dividen las aguas en muchos tipos los cuales tienen poco significado interpretativo.

II-3. Geotermometría.

El contenido de SiO_2 de las aguas termales se utiliza frecuentemente para determinar la temperatura del reservorio, sin embargo existen ciertas restricciones para su uso.

Las suposiciones que se han formulado para la utilización de la composición química de manantiales y pozos de agua para estimar cuantitativamente las temperaturas bajo superficie, han sido discutidas (White, 1970; Fournier *et al.*, 1974), y pueden ser resumidas de la siguiente manera:

1. La concentración de los elementos o especies a utilizar por el geotermómetro es solamente controlada por una dependencia de las reacciones del fluido - mineral con la temperatura.
2. Debe existir un adecuado suministro de todos los reactantes.
3. Debe de obtenerse el equilibrio fluido - mineral en el reservorio.
4. Debe existir un flujo rápido hacia la superficie que no permita un re-equilibrio después de que el fluido haya dejado el reservorio, es decir, no deben existir reacciones cercanas a la superficie.
5. No debe haber mezcla o dilución del fluido con diferentes tipos de agua, y si esto sucediera debe ser posible la evaluación de los resultados de tal mezcla de agua.

Para el cálculo de la geotemperatura se utilizó el método del geotermómetro de sílice propuesto por Truesdell (1976), el cual se basa en una dependencia de la solubilidad del cuarzo en agua con la temperatura (Fournier y Rowe, 1966).

La ecuación que lo describe es la siguiente:

Geotermómetro de Sílice (Truesdell, 1976):

$$T^{\circ}C = \frac{1315}{5.205 - \log(SiO_2)} - 273.15 \quad (1)$$

donde:

$T^{\circ}C \Rightarrow$ Geotemperatura en grados Celcius

$SiO_2 \Rightarrow$ Contenido de Sílice disuelto en mg/l.

II-4. Flujo de calor

Swamberg y Morgan desarrollaron en 1979 una ecuación empírica que relaciona las temperaturas a profundidad obtenidas a partir del contenido de sílice en manantiales y pozos, con los datos de flujo térmico convencional; aplicaron la ecuación (1) a aproximadamente 100,000 análisis de sílice de aguas subterráneas en los Estados Unidos de América y los autores, desarrollaron la siguiente regresión lineal al promediar las geotemperaturas de sílice y los valores de flujo de calor en 5 principales provincias de flujo; en las cuales ambos parámetros fueron suficientemente abundantes para permitir el cálculo de valores medios representativos:

$$T_{SiO_2} = m q + b \quad (2)$$

donde:

$T_{SiO_2} \Rightarrow$ Temperatura estimada con el geotermómetro de sílice en grados Celsius

$q \Rightarrow$ flujo térmico en $mW m^{-2}$

m y b son constantes de ajuste

Las constantes de ajuste que proporcionan los autores fueron calculadas de la siguiente manera:

- Se calcularon las geotemperaturas de sílice en cada pozo y manantial de cada provincia de flujo y se promediaron.
- Si la desviación estándar de la distribución resultaba menor a 25°C y el valor de la media y moda eran aproximadamente iguales, se consideraba que el promedio era representativo de su respectiva provincia de flujo.
- Por otra parte, promediaron todas las medidas de flujo térmico convencional hechas en la misma provincia, con el fin de disponer de un par coordinado TSiO_2 -flujo térmico. Los pares coordinados de las provincias que cumplieron con las condiciones impuestas se graficaron y por medio del método de regresión lineal se determinó la pendiente cuando el valor de la ordenada al origen era de 12.4 ± 5.1 °C, temperatura media anual de los Estados Unidos.

Esta última restricción es razonable, según comentan los autores, debido a que en el caso de que el flujo térmico fuera igual a cero, la única fuente posible de suministro sería el sol, de modo que la temperatura del acuífero sería la media anual.

Con base en estos resultados, Swamber y Morgan, produjeron un mapa de flujo térmico en Estados Unidos, estimado con la temperatura de SiO_2 , y encontraron notables coincidencias con los resultados publicados por otros autores.

Posteriormente, Swamberg y Morgan (1980) repiten los cálculos de regresión pero no promedian los valores por provincia, sino en áreas de $1^\circ \times 1^\circ$ de latitud y longitud respectivamente, y establecieron nuevas restricciones para las constantes de ajuste.

El caso en el que se produjeron los mejores resultados fue aquel en el que se eliminaron del proceso los bloques con menos de 100 datos de TSiO_2 y/o desviación estándar mayor de 25°C y aquéllos en los que existían menos de tres determinaciones convencionales de flujo de calor o su desviación estándar fuera mayor al 20%. Logrando de esta manera obtener un índice de correlación de 0.95 y un valor de $0.670^\circ\text{C m}^2 \text{ mW}^{-1}$ para la constante m y $12.4 \pm 5.1^\circ\text{C}$ para la constante b en la ecuación (2).

En este estudio se utiliza para el cálculo de flujo de calor una modificación a la metodología propuesta por Swamberg y Morgan (1980), con las siguientes diferencias:

- 1) El cálculo del flujo de calor da un resultado local, es decir cada pozo representa su valor.
- 2) Debido a la carencia de determinaciones de flujo térmico convencional en el área de estudio, se tomó el valor propuesto por los autores de $0.670 \text{ m}^2 \text{ mW}^{-1}$ para la constante m .
- 3) De acuerdo con lo sugerido por los autores, se tomó el valor de la temperatura media anual de superficie en la localidad, siendo esta de 16.3°C para la región de Ensenada (INEGI, 1996) como el valor de la ordenada b en la ecuación (2).

Se utilizaron 26 pozos que presentaron la información reportada sobre el contenido de sílice disuelto en agua.

La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$Q = \frac{T_{geo} - T_0}{m} \quad (3)$$

donde:

$Q \Rightarrow$ Flujo de calor en mW m^{-2}

$m \Rightarrow 0.670^\circ\text{C m}^2 \text{mW}^{-1}$

$T_0 \Rightarrow$ Temperatura media anual de superficie en Ensenada = 16.3°C

$T_{geo} \Rightarrow$ geotemperaturas calculadas con el geotermómetro de SiO_2 .

II-5. Evaluación del potencial geotérmico de la región de Ensenada.

Esta evaluación se realizó en dos etapas:

- La primera consistió en establecer una escala cualitativa que nos facilitara la interpretación de los resultados obtenidos del flujo de calor local. Se asignaron los valores de flujo de calor bajo, medio y alto (ver Tabla 3, página 36); a partir del valor medio regional calculado según la metodología descrita por Swamberg y Morgan (1980).

Utilizando esta escala se identifican y localizan las muestras en un plano, y con base en el diagrama de Lëndal (1973), se proponen algunos usos directos que podrían aplicarse en las áreas identificadas como termales.

- La siguiente etapa consistió en una estimación cuantitativa del potencial geotérmico medido en Watts, para dos áreas específicas en Punta Banda, una cercana a la Bufadora que comprende un afloramiento hidrotermal submarino, y la segunda en el área de La Joya que comprende un afloramiento intermareal.

Esta estimación es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo [W/m}^2\text{]} \times \text{Área (m}^2\text{)} = \text{Potencial (Watts)} \quad (4)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

III-1. Localización de pozos y manantiales con valores de temperatura superficial anormalmente altos.

La Figura 3 muestra la distribución de frecuencias de la temperatura superficial en los pozos y manantiales analizados. Puede observarse que el 61.3% de las muestras se encuentran en el intervalo de temperatura que va de 15 a 25°C. El 33.9% de los datos se encuentran distribuidos en diferentes intervalos que van desde los 25°C a los 65°C. El 4.8% restante presenta temperaturas superiores a los 65°C. El valor promedio de temperatura superficial es de 30.21°C y se encontró un valor elevado en la desviación estándar de 20.47°C, debido a los valores extremos encontrados en los datos, con un mínimo de 10°C y un máximo de 108°C.

Se definió como valor anormal de temperatura superficial aquel valor que fuera mayor que el valor promedio de temperatura superficial más una desviación estándar, es decir, mayor a los 50.68°C. Por lo que podemos considerar estos sitios como fuentes termales.

Con base en esta definición se localizaron 10 muestras con temperaturas anormalmente altas (ver Tabla 1) que se encuentran dentro del intervalo de 50° C a 108° C. La localización de estas fuentes termales se muestra en la Figura 4.

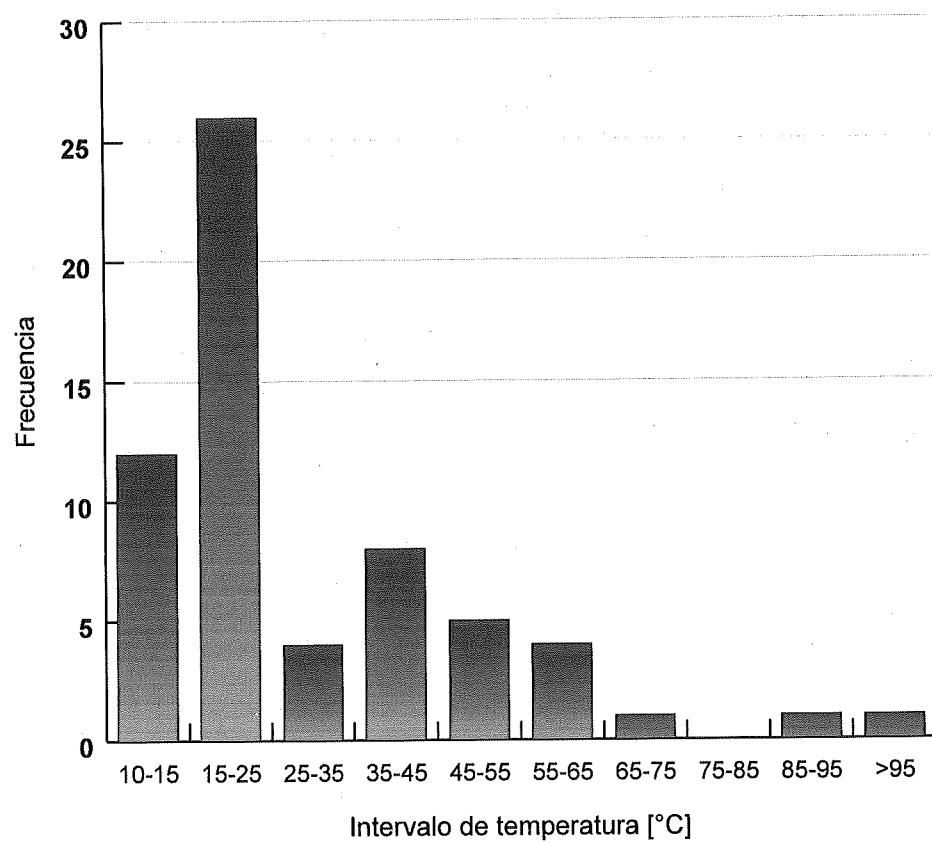


Figura 3. Distribución de frecuencias de temperatura superficial en los pozos y manantiales analizados.

Existe una correlación positiva ($r = 0.74$) entre las muestras identificadas con temperatura superficial anómala y el flujo de calor (Tabla 1).

Tabla 1. Muestras con valores anormales de temperatura superficial.

Número de muestra	Tipo Muestra	T°C superficial	Geo T°C de sílice	Flujo de calor $mW m^{-2}$
1 (e)	Manantial	108	163.46	219.63
2 (e)	Manantial	95	139.88	184.44
3 (a)	Pozo	70	129.55	169.03
4 (c)	Pozo	64	123.78	160.42
5 (c)	Manantial	60	131.37	171.75
6 (a)	Noria	60	136.03	178.70
7 (a)	Manantial	57	93.99	115.95
8 (a)	Manantial	55	93.99	115.95
9 (a)	Pozo	55	136.03	178.70
10 (a)	Manantial	50	91.83	112.73

Fuente: (a) Alvarez (1993); (c) Gastil y Bertine (1981); (e) Vidal (1978).

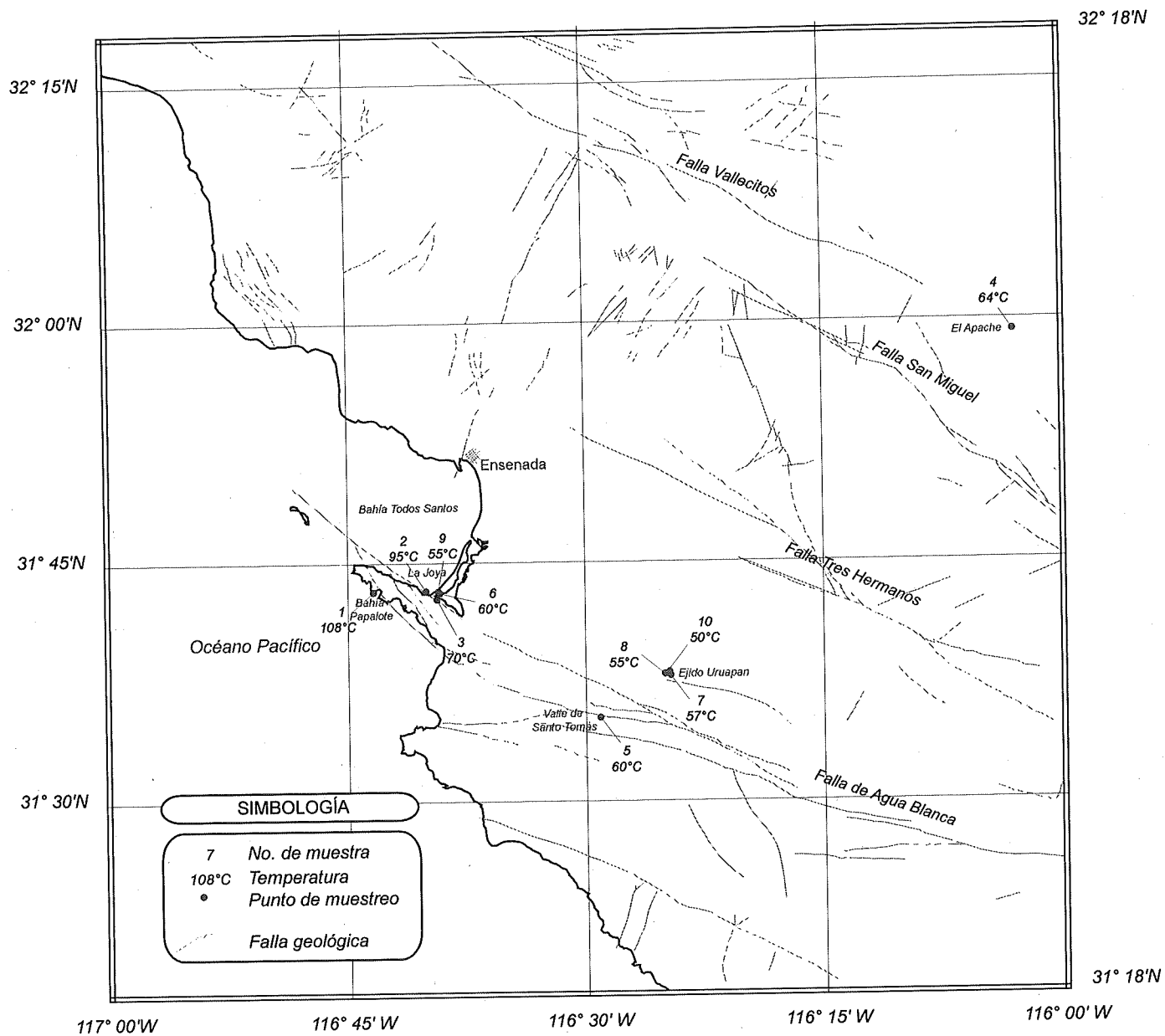


Figura 4. Localización de los pozos y manantiales con valores de temperatura superficial anormalmente altos (modificado de Gastil, 1973).

Con base en las máximas temperaturas encontradas en superficie y de acuerdo con Barbier (1997) y, Einarsson (1978), se puede clasificar el área de estudio como un sistema de baja temperatura, con temperaturas de agua medidas en superficie, que oscilan entre los 30° y los 108°C.

III-2. Clasificación del tipo de agua.

La composición química de las aguas termales puede proporcionar mucha información sobre el origen de las misma, así como de la temperatura del reservorio. Sin embargo, antes de iniciar un análisis con ayuda de geotermometría, es necesario identificar o reconocer qué tipos de aguas son las más adecuadas para validar y aplicar este método.

De acuerdo con Nicholson (1993), el fluido más común encontrado a profundidad en sistemas geotérmicos, es el que presenta un pH casi neutro y el cloro se presenta como anión dominante. Las aguas encontradas dentro de este perfil, en un campo geotérmico son comúnmente derivadas de este fluido profundo como consecuencia de procesos físicos y químicos. Las aguas cloradas son típicas de un fluido geotérmico encontrado a profundidad, y usualmente en sistemas de alta temperatura; éstas son las únicas aguas, de los afloramientos hidrotermales que pueden ser utilizadas con confianza en geotermometría.

La Figura 5 muestra el diagrama ternario utilizado para la identificación del tipo de agua presente en el área de estudio. Dependiendo de la cercanía de cada pozo a uno de los vértices sea Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ o SO_4^{2-} , se mostrará una distribución general de los pozos que puede ser interpretada como: aguas cloradas, sulfatadas o carbonatadas; o una mezcla de ellas.

Los resultados obtenidos a partir de la Figura 5 son los siguientes:

- El 84.7% de los pozos y manantiales estudiados presentaron al cloro como su anión dominante y el 15.3% al ion bicarbonato.
- La concentración de muestras cercanas al vértice de cloro y la dispersión observada hacia el centro de la gráfica es indicativa de procesos de dilución y mezcla, entre diferentes tipos de agua. Por lo que se clasificó al agua como cloruro - diluida bicarbonatada.

Es importante establecer la diferencia entre el agua carbonatada y el agua cloruro - diluida bicarbonatada (*dilute chloride -bicarbonate*) las cuales son genéticamente diferentes. Las aguas bicarbonatadas, son el producto de la condensación de vapor y gas en aguas subterráneas subsuperficiales pobremente oxigenadas (Nicholson, 1993; Fournier, 1981; Fournier y Truesdell, 1973). Su química no se encuentra relacionada a un equilibrio con el reservorio a profundidad, haciendo que la geotermometría sea inapropiada. Sin embargo, es común encontrar estos fluidos, definiendo los márgenes del un campo geotérmico (Nicholson, 1993). Por otro lado las aguas cloruro - diluidas bicarbonatadas, son aguas formadas por la dilución de un fluido clorado ya sea por aguas subterráneas o por aguas bicarbonatadas durante un flujo lateral y pueden llegar ser utilizadas en geotermometría. Estas se han encontrado generalmente en las descargas de los afloramientos en sistemas de baja temperatura (Nicholson, 1993), por lo que este resultado confirma la propuesta de que el área de estudio es un sistema geotérmico de baja temperatura.

De acuerdo con el estudio presentado por la Secretaria de Programación y Presupuesto (1981), para muestras representativas del Valle de Maneadero y San Vicente, el tipo de agua

identificada en el área de estudio coincide con los resultados de este estudio, es agua tipo cloruro diluida bicarbonatada con fuertes componentes sódicos y cálcicos.

Sin embargo, el estudio geoquímico de Gastil y Bertine (1981), menciona que en la provincia de San Miguel - Agua Blanca predominan los afloramientos cloro - sulfatados. Esta aparente diferencia puede estar relacionada con el número de pozos y afloramientos muestreados, así como el origen del objetivo del muestreo. Si se comparan los resultados de este trabajo con el de Gastil y Bertine (1981), se puede mencionar que en este estudio se considera un área menor e incluye manantiales, pozos y norias que no fueron tomados en consideración por el estudio de Gastil y Bertine (1981), ya que en este último, sólo se reportan pozos y manantiales con agua caliente y no toman en consideración los pozos de agua fría.

En el presente trabajo se realizó la integración de datos de diferentes autores, incluyendo los pozos y manantiales identificados en el estudio de Gastil y Bertine (1981) localizados dentro de nuestra área de estudio. Con esto se obtuvo, en un área más reducida, una mayor cobertura de pozos y una caracterización de agua más confiable.

El tener como resultado al ion cloro como anión dominante, permite la aplicación de la geotermometría, sin embargo, las concentraciones de sulfato y carbonato obtenidas indican la existencia de fluidos mixtos y reacciones cercanas a la superficie, lo que hace suponer que el fluido en algunos casos, esté siendo re-equilibrado durante su ascenso a la superficie o que no haya logrado el equilibrio agua-roca necesario para la aplicación estricta de los geotermómetros, tal como lo sugiere Fournier *et al.* (1974).

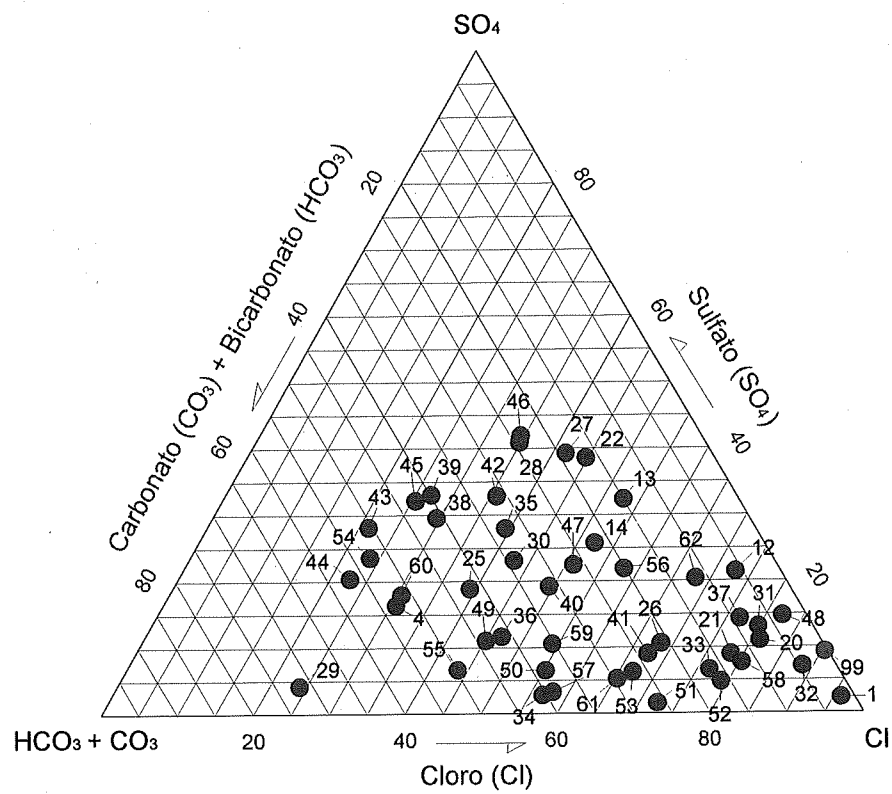


Figura 5. Diagrama ternario utilizado para la identificación del tipo de agua en el área de estudio.

III-3. Geotermometría.

Existen restricciones en la aplicación de la técnica del geotermómetro de sílice como se ha mencionado anteriormente, sin embargo se ha probado que ésta metodología proporciona una estimación útil de la temperatura en el reservorio (Buntebarth, 1994; Nicholson, 1993; Hilficker *et al.*, 1980; Fournier, 1977; Fournier y Truesdell, 1973; Ellis, 1970; Mahon, 1966) y es con base en las siguientes suposiciones que se da validez a la técnica empleada en el presente estudio.

- El método del geotermómetro de sílice utilizado está basado en una dependencia de la solubilidad del cuarzo en agua con la temperatura según lo manifiesta (Fournier y Rowe, 1966).
- Con base en las altas concentraciones de sílice reportadas (Anexo 1), podemos suponer un adecuado suministro de este mineral en el área de estudio.
- De acuerdo con las mediciones de tritio efectuadas por Vidal (1978), para estimar el tiempo de residencia del agua en diferentes manantiales y pozos dentro del área de estudio, se determina que el menor tiempo de residencia fue del orden de 50 a 60 años, encontrado en las aguas subterráneas del Valle de Maneadero y se menciona que este tiempo de residencia es suficientemente largo como para suponer la existencia del equilibrio fluido - mineral en el reservorio.

Existe evidencia suficiente para reconocer que las suposiciones de un flujo rápido hacia la superficie y la inexistencia de procesos de mezcla y dilución que eviten reacciones cercanas a la superficie; no son satisfechas en su totalidad.

Se cuenta con poca información acerca del gasto o flujo de agua en los pozos analizados, y se sabe, según lo observado en la Figura 5, de la existencia de procesos de mezcla y dilución. Surge entonces la interrogante de ¿Cuál será el error, en el presente estudio, de utilizar datos que pueden reflejar fluidos mixtos o un re - equilibrio del fluido - mineral durante su ascenso?.

El establecimiento del equilibrio en el reservorio, tal como lo menciona Fournier (1977), va a depender de los siguientes factores: la cinética de la reacción, la temperatura del reservorio, la reactividad de la pared de la roca, las concentraciones del elemento indicador en el agua, y el tiempo de residencia del agua en el reservorio a una temperatura particular. Por lo que bajo ciertas situaciones, el equilibrio en el reservorio puede ser obtenido por algunas reacciones y no por otras.

Asimismo, el hecho de que el agua encuentre un re-equilibrio o no, después de haber dejado el reservorio durante su flujo hacia la superficie, depende de factores similares: la tasa o razón de flujo, la vía de ascenso, el tipo y reactividad de la roca por la que atraviesa, la temperatura inicial del reservorio, y la cinética de varias reacciones que pudieran ocurrir.

Partiendo de la suposición de que existen pozos y manantiales que se presentan como una mezcla de agua caliente encontrada a profundidad mezclada con un agua fría más superficial, se puede tener o no un equilibrio parcial o completo.

Si el equilibrio químico se establece después de la mezcla, el geotermómetro indicará la temperatura del fluido mixto, y no del componente de agua caliente que se encuentra a profundidad, por lo que se estima una temperatura menor a la existente realmente en el reservorio (Fournier, 1977, Buntebarth, 1994). Si no se lograra el equilibrio del fluido-mineral según lo menciona Hilfiker et al. (1980), los resultados obtenidos darían valores poco confiables como sería que la mayoría de las geotemperaturas calculadas fuesen muy altas es decir, se encontrarán en el intervalo de 200°C a 300°C, o demasiado bajas, es decir, menores a 10°C o con valores negativos, teniendo en este caso que eliminar estas muestras del estudio.

Se puede mencionar entonces que el mayor error esperado al utilizar estos datos, sería el de subestimar la temperatura encontrada a profundidad.

Este estudio utilizó además del geotermómetro de sílice, el geotermómetro de Na-K-Ca (Fournier y Truesdell, 1973), para aquellos pozos que carecían de información relativa a sílice, pero que contaran con datos de sodio, potasio y calcio que nos permitieran tener una mayor cobertura de pozos y manantiales para el cálculo de la temperatura a profundidad.

No se utilizó la técnica de Na-K propuesta por Fournier (1981), debido a que la técnica de Na-K-Ca se ha probado que da mejores estimaciones de temperatura para aguas a profundidad, según lo manifiesta Fournier (1977), en sistemas de bajas temperatura.

Sin embargo los resultados obtenidos mediante esta técnica, en su mayoría (más del 50%) fueron poco confiables; puesto que los valores de temperatura fueron negativos o muy bajos.

Esto es debido a errores sistemáticos, como lo menciona Buntebarth (1994), en los cuales la fuente termal puede encontrarse dentro de una cuenca sedimentaria, como es el caso del Valle de Maneadero, donde cuerpos de sales monomineralógicos pueden provocar alteraciones considerables. Asimismo, y con base en Fournier (1977), este geotermómetro es mayormente sensible a los procesos de dilución, que el geotermómetro de sílice; y Nicholson (1993) menciona que la aplicación de la técnica de Na-K-Ca para aguas cloruro-diluidas bicarbonatadas, como es el caso de este estudio; puede causar problemas en los resultados, debido a la adición del ión bicarbonato que controlaría el equilibrio de la reacción, obteniéndose lecturas erróneas.

La baja correlación obtenida entre los valores de geotemperatura calculados mediante la técnica de SiO_2 y Na-K-Ca ($r < 0.2$), y la baja confiabilidad de las estimaciones realizadas con la técnica de Na-K-Ca, dió como resultado evitar incluir los resultados obtenidos mediante esta técnica por ser poco confiables y no aportar mayor claridad o conocimiento a este estudio. Por lo tanto, solo se consideraron 26 muestras con datos de sílice suficientemente confiables para realizar los cálculos de geotermometría y flujo de calor.

III-4. Flujo de Calor

Los resultados obtenidos de flujo de calor a partir de las geotemperaturas calculadas anteriormente se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores estimados de flujo de calor a partir del geotermómetro de sílice.

Número de muestra	Tipo de muestra	SiO ₂ mg/l	Geo T°C de sílice	Flujo de calor	
				mW m ²	HFU
1	Manantial	156 (e)	163.46	219.63	5.25
2	Manantial	105 (e)	139.88	184.44	4.41
3	Pozo	87 (a)	129.55	169.03	4.04
4	Pozo	78 (c)	123.78	160.42	3.84
5	Manantial	90 (c)	131.37	171.75	4.11
6	Noria	98 (a)	136.03	178.70	4.28
7	Manantial	42 (a)	93.99	115.95	2.77
8	Manantial	42 (a)	93.99	115.95	2.77
9	Pozo	98 (a)	136.03	178.70	4.28
10	Manantial	40 (a)	91.83	112.73	2.70
11	Pozo	52 (a)	103.75	130.52	3.12
12	Manantial	98 (c)	136.03	178.70	4.28
13	Manantial	48 (b)	100.03	124.97	2.99
14	Manantial	47 (c)	99.07	123.53	2.96
15	Manantial	38 (b)	89.59	109.38	2.62
16	Noria	36 (a)	87.25	105.90	2.53
17	Noria	32 (a)	82.27	98.46	2.36
18	Noria	32 (a)	82.27	98.46	2.36
19	Pozo	94 (a)	133.73	175.28	4.19
21	Manantial	86 (c)	128.93	168.10	4.02
22	Manantial	92 (c)	132.56	173.53	4.15
23	Pozo	12 (a)	45.57	43.69	1.05
24	Pozo	27 (a)	75.32	88.09	2.11
25	Manantial	40 (c)	91.83	112.73	2.70
31	Pozo	36 (e)	87.25	105.90	2.53
37	Noria	47 (c)	99.07	123.53	2.96

Fuente: (a) Alvarez. (1993); (b) James (1972); (c) Gastil y Bertine (1981); (d) S.P.P. (1981); (e) Vidal (1978).

El interés de este estudio es conocer si existen anomalías en el flujo de calor local. Este flujo puede ser interpretado como una anomalía cuando difiere del valor medio regional (García, 1989); es decir de un valor de referencia.

Para determinar el valor medio regional, no se tomaron en consideración las muestras identificadas como áreas termales (Tabla 1), las cuales de acuerdo con Swamberg y Morgan (1980), se omiten deliberadamente con la finalidad de obtener un valor representativo que no se vea afectado por posibles anomalías y pueda ser considerado como un valor medio o normal.

De esta manera, se obtuvo una geotemperatura promedio de $98.93 \pm 23.83^{\circ}\text{C}$ para 16 muestras representativas del área de estudio y con base en el método de Swamberg y Morgan (1980), se obtuvo un valor medio regional de $123.33 \pm 35.57 \text{ mW/m}^2$ ($2.95 \pm 0.85 \text{ HFU}$).

¿Qué tan representativo es este valor medio regional, si para su cálculo solo se utilizaron 16 muestras dentro del área de estudio?

Swamberg y Morgan (1980) mencionan que para estimar el flujo de calor regional a partir del geotermómetro de sílice, debe emplearse el mismo criterio utilizado por ellos en su metodología. Es decir, utilizar 100 muestras que cubran un área de 1° de longitud x 1° de latitud. Sin embargo mencionan que esto podría involucrar considerables gastos y tiempo y que con una menor cantidad de datos puede hacerse una estimación confiable. Ponen como ejemplo 2 estudios en los que con un número pequeño de muestras se obtuvieron resultados exitosos:

El primero en la región norte del Estado de Nueva York, U.S.A., en donde solo 10 muestras fueron utilizadas; y el segundo en la región Este del desierto de Egipto, donde se utilizaron 28 muestras.

García (1989) afirma que este método es aplicable y útil, aun cuando el número de muestras sea menor, siempre y cuando cumpla con la restricción de utilizar la desviación estándar ($< 25^{\circ}\text{C}$) y exista una buena cobertura del área. Las muestras analizadas cumplen con estas restricciones. Por lo que podemos afirmar que el valor medio regional calculado es representativo del área de estudio.

En términos del grado de precisión del método, los autores obtienen el mismo mediante la siguiente relación:

$$7.5 \pm 0.067 \, q \, [\text{mW m}^{-2}] \quad (5)$$

Donde q es el valor calculado de flujo de calor; mediante ésta se estimó el máximo error obtenido el cual resulta ser de 15.76 mW m^{-2} .

Esta técnica ha probado ser una de las más aceptadas a nivel mundial, especialmente en los países en desarrollo, en los cuales la falta de presupuesto no permite llevar a cabo estudios que incluyan la perforación de pozos para realizar las mediciones de flujo de calor. Un ejemplo de ello es la base de datos de flujo de calor de Venezuela, que esta basada en su totalidad por mediciones realizadas a partir de métodos geoquímicos (Hamza y Muñoz, 1996).

III-5. Evaluación del potencial geotérmico

Parte I.

Con el fin de facilitar la interpretación de nuestros resultados de flujo de calor local, se definió la siguiente escala cualitativa, tomando como valor de referencia el valor medio regional de flujo de calor calculado con anterioridad:

Tabla 3. Escala cualitativa de flujo de calor.

Flujo de calor	Intervalo
bajo	$q < 87.76$
medio	$87.76 \leq q \leq 123.33$
alto	$q > 123.33$

$q \Rightarrow$ flujo de calor calculado

La Figura 6 muestra las áreas que presentaron alguna anomalía térmica, así como la clasificación y localización de las muestras de acuerdo con la Tabla 3.

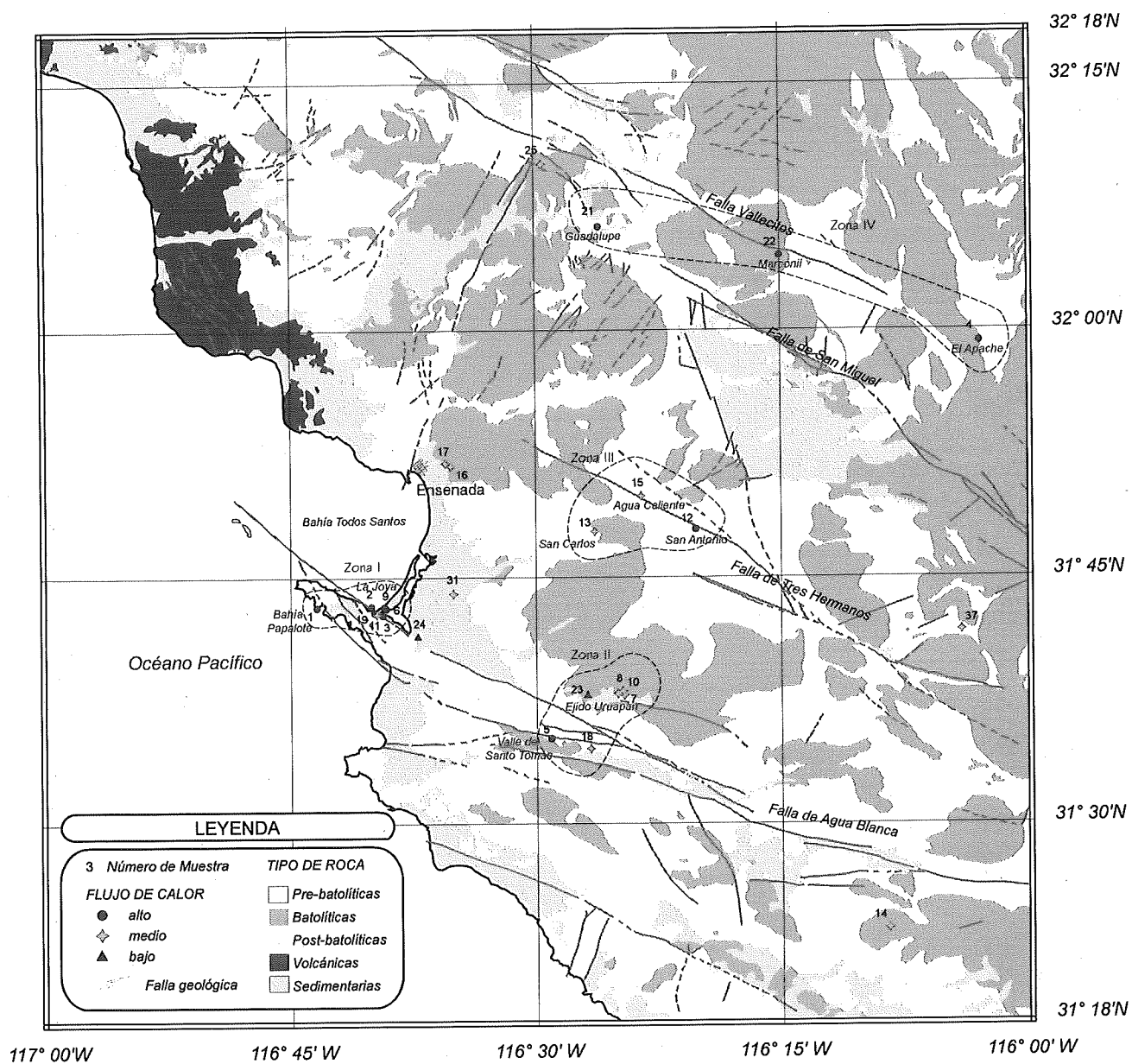


Figura 6. Flujo de calor en el área de estudio (modificado de Gastil *et al.*, 1973).

Se identificaron 4 zonas que presentan por lo menos una muestra con un valor de flujo de calor clasificado como alto y alguna anomalía térmica.

Zona I (muestras 1,2,3,6, 9,11 y 19).

- La muestra 1 corresponde al afloramiento hidrotermal submarino de Punta Banda, en Bahía Papalote, se encuentra localizado a 400 metros fuera de la costa y a una profundidad de 30 metros. Presenta un basamento volcánico de rocas que varían en su composición de riolacitas - dacitas, y que subyace sobre sedimentos marinos calcáreos (coquina) (Vidal *et al.*, 1978).
- La muestra 2 se localiza en la zona entre mareas del campo turístico La Joya, en Punta Banda. Asimismo las muestras 3,9,11 y 19 se localizan en el área del campamento turístico La Joya y la muestra 6 en el campo turístico Agua Caliente. Las rocas que influncian a estas aguas son de origen volcánico, dacitas o cuarzo - andesitas con sedimentos aluviales y posiblemente marinos, (Alvarez, 1993).

Zona II (muestras 5, 7, 8 y 10).

- La muestra 5 corresponde a un manantial, localizado aproximadamente a 2 km al oeste de la Carretera Federal No. 1 en el lado norte del valle de Santo Tomás. Se encuentra ubicada sobre rocas pre-batolíticas, formadas principalmente por depósitos sedimentarios de la formación alisitos (Gastil,1975).

- Las muestras 7, 8 y 10, consisten en un grupo de manantiales situados sobre las márgenes de un arroyo que baja por el cañón de la Grulla. Se ubican aproximadamente a 3.4 Km al NE de la falla de Agua Blanca, en el Ejido Uruapan. El tipo predominante de roca en el área es cuarzo-diorita (Lira, 1995).

Zona III (muestras 12, 13 y 15).

- La muestra 12 corresponde a un manantial ubicado en San Antonio, localizado sobre la falla Tres Hermanos. Sobreyacen rocas prebatolíticas principalmente meta-andesitas, tonalitas y pizarras (Gastil y Bertine, 1981).
- La muestra 13 pertenece a un manantial localizado en el Poblado de San Carlos; topográficamente se encuentra al SW, más abajo que el afloramiento de Agua Caliente y en el mismo en el patrón de drenaje que éste último. Aflora sobre rocas pre-batolíticas, principalmente basaltos – volcánicos, andesitas y dacitas (James, 1972).
- La muestra 15 es representativa de un manantial en agua caliente aproximadamente a 20 kilómetros al Este de Ensenada. El tipo de roca que influye en la química de este afloramiento es un plutón de cuarzo-diorita (Allen *et al.*, 1960).

Zona IV (muestras 4,21 y 22).

- La muestra 4 corresponde a un pozo conocido como El Apache, localizado aproximadamente a 8.5 km al NE del Rancho La Huerta, en el valle de Ojos Negros. Los principales ensambles litológicos están formados por rocas batolíticas, principalmente granito y tonalita (Gastil,1975).

- La muestra 21 representa al manantial Guadalupe, localizado en valle del mismo nombre. El agua aflora en rocas prebatolíticas metaclásticas, en una zona cortada por numerosos diques de roca volcánica del Mesozoico (Gastil y Bertine, 1981).
- La muestra 22 corresponde a un manantial conocido como Marconi, localizado a 1 km de la falla de San Miguel; el tipo principal de roca en este es la tonalita (Gastil y Bertine, 1981).

Para definir una escala cualitativa de flujo de calor (Tabla 3), basada en el valor medio regional, se eliminaron las muestras identificadas como fuentes termales (Tabla 1) debido a lo mencionado anteriormente. Se encontró a su vez, una correlación positiva entre el flujo de calor y la temperatura del agua en superficie de las muestras, Por tal motivo se esperaba encontrar en estas fuentes termales un valor de flujo de calor alto de acuerdo a la escala utilizada. Esto se cumplió en la zona I, en la cual, todas las fuentes termales presentaron un flujo de calor mayor a los 123.33 mW m^{-2} . En la zona II solo la muestra 5 cumplió con esta suposición, mientras que las muestras 7,8 y 10 identificadas como fuentes termales; presentaron un flujo de calor medio.

Las muestras 12 en la zona III, 21 y 22 en la zona IV; presentaron un flujo de calor alto a pesar de no haber sido identificadas como fuentes termales.

Estos resultados permiten llevar a cabo las siguientes suposiciones:

- 1) La definición de temperatura anormal propuesta, discrimina radicalmente el 19.35% de las muestras que podrían catalogarse igualmente como fuentes termales, pero que presentan una temperatura más moderada que va de los 30°C a los 49°C. Tal es el caso de las muestras 12 y 22.
- 2) El valor medio de flujo de calor en la región de $123.33 \pm 35.57 \text{ mW/m}^2$ ($2.95 \pm 0.85 \text{ HFU}$) es alto, de acuerdo con Barbier (1997), que menciona que el promedio de flujo de calor en la Tierra es de 82 mW/m^2 . Lo anterior indica que el valor medio de flujo de calor para la región de Ensenada es 1.5 veces mayor que el valor promedio terrestre, sin embargo, es similar al valor reportado por Sclater y Francheteau (1970) de 2.82 HFU para las provincias más jóvenes del Pacífico Norte (menores a 10 millones de años).
- 3) La mayoría de los pozos y manantiales que presentaron una temperatura superficial mayor a los 30°C, y los clasificados como sitios de alto flujo de calor; muestran una clara tendencia a alinearse con los principales sistemas de fallas de la región. Lo que nos hace suponer que la actividad termal encontrada, se encuentra íntimamente relacionada con la actividad de estos sistemas. Asimismo, esto permite suponer que existe recurso geotérmico potencial que pudiera ser aprovechado.

El diagrama de L ndal (1973) que se muestra en la Figura 7 es una herramienta que nos permite identificar a partir de la temperatura del fluido geotérmico, los diferentes procesos susceptibles a utilizarse.

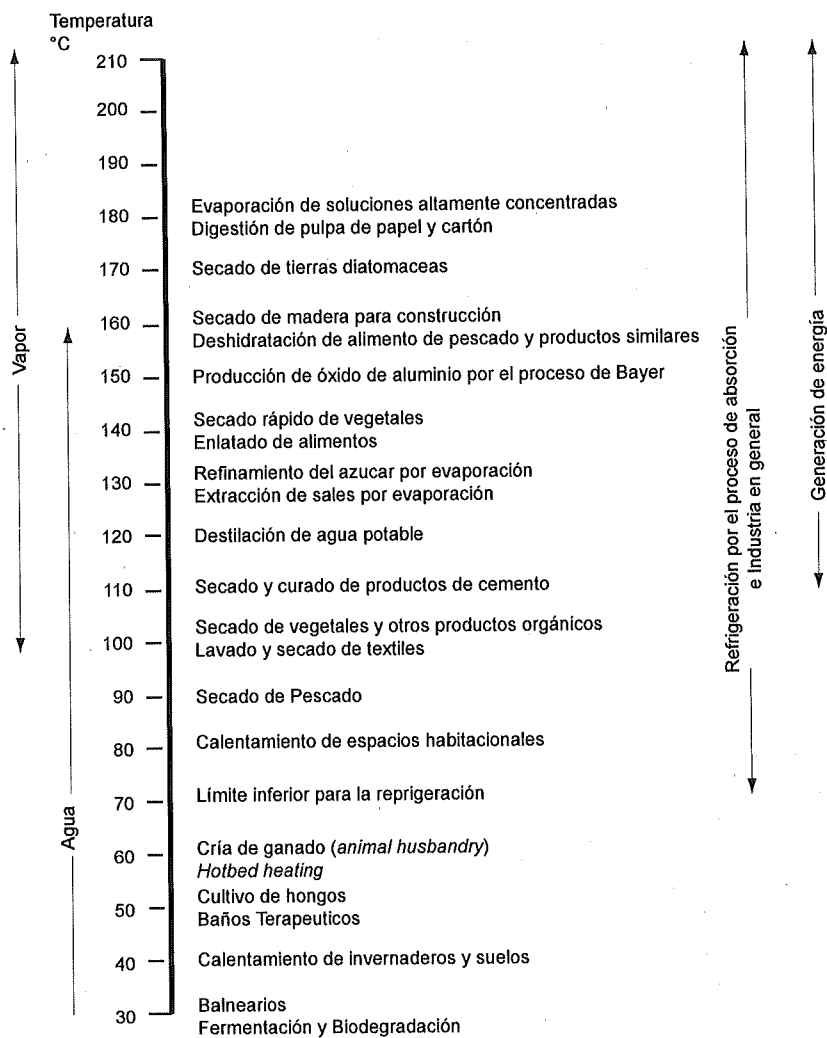


Figura 7. Diagrama de L ndal. (Modificado de L ndal, 1973)

Actualmente, en la zona de estudio se encuentran en explotación algunos pozos y manantiales de manera comercial.

Los principales usos que se le ha dado a estas aguas termales son domésticos y recreativos. En San Carlos y Agua Caliente, muestras 13 y 15 respectivamente con temperaturas máximas observadas de 43°C y 42°C; los manantiales se han utilizado como balnearios donde la gente puede bañarse y nadar en albercas con agua caliente.

En el Ejido Uruapan, las muestras 7, 8 y 10 con temperaturas medidas de 50-57°C, son otro ejemplo de uso privado de las aguas termales, ya que sólo a los habitantes del lugar se les permite el uso de los afloramientos. Estas aguas se utilizan en estanques para baño y en lavanderías.

Otros afloramientos que no se encuentran identificados dentro de las zonas de la Figura 6, y que han sido utilizados de manera comercial, pertenecen a las muestras 16 y 17, los baños públicos Lourdes (42°C) y Acapulco (40°C) respectivamente; ambos localizados en Ensenada.

En la ciudad de Ensenada podemos encontrar diversos sectores productivos que podrían verse beneficiados con el aprovechamiento del recurso geotérmico de la región, tales como el agropecuario, industrial, pesca, comercio y servicios, etc.

Con base en el diagrama de Lándal (1973, ver Figura 7), podemos proponer algunos ejemplos de usos directos que podrían ser utilizados en la región.

- ***Aprovechamiento del calor geotérmico para el desarrollo de Invernaderos con producción comercial.***

Una gran cantidad de cultivos altamente comerciales se llevan a cabo en invernaderos calentados con geotermia en Hungría, Rusia, Nueva Zelandia, Japón, Islandia, China y Estados Unidos principalmente. Estos cultivos incluyen vegetales como calabacitas, pepinos, berenjena, lechuga y tomate; flores, plantas de ornato; cactáceas y viveros forestales (Ortega, 1997). En México solo se cuenta con invernaderos de esta naturaleza en proyectos piloto (ejemplo: Los Azufres, Michoacán).

En Ensenada, podrían emplearse estos sistemas de producción en las inmediaciones de las fuentes termales y utilizar el fluido geotérmico para proveer el calor necesario para la calefacción de los invernaderos.

- ***Aprovechamiento de la energía geotérmica para la deshidratación de frutas y legumbres.***

La deshidratación de frutos y legumbres proporciona la ventaja de conservar el producto por un periodo de tiempo mayor; diversifica su presentación y regula la saturación del mercado (Casimiro-Espinoza, 1997).

Este tipo de aprovechamiento geotérmico ha sido utilizado con gran éxito a nivel mundial en países como China, Hungría, Kenya, Rusia, Nueva Zelandia, E.U.A., los cuales tienen plantas deshidratadoras a nivel industrial.

La experiencia adquirida en el uso directo de la energía geotérmica en México indica que la construcción y operación de un deshidratador de vegetales es una aplicación viable y económica, habiéndose obtenido resultados satisfactorios con el deshidratador que opera en Los Azufres, Michoacán, (Casimiro-Espinoza, 1997).

Con la instalación de deshidratadores, los productores tienen la posibilidad de diversificar sus productos en el mercado y venderlos con un mayor margen de ganancia, ya que se aprovechará la ventaja de la proximidad a una fuente de energía sin hacer una gran inversión en la transportación de su producto para su transformación.

- ***Aprovechamiento de la energía geotérmica para la deshidratación de productos de pescado.***

Ensenada cuenta con una de las mayores actividades pesqueras del país; esta actividad ha propiciado el establecimiento de variadas industrias que procesan harina de pescado o algún producto derivado del mismo. De acuerdo con Arason y Árnason (1992), existen posibilidades aún sin explorar para la utilización de la energía geotérmica en regiones con puertos de altura, localizados en áreas geotérmicas.

La deshidratación de productos y pescado ha sido empleada principalmente en Islandia, donde los pescados y cortes de pescado son deshidratados, así como las algas marinas son deshidratadas y procesadas (Líndal, 1992).

Ensenada presenta las condiciones ideales para el desarrollo de este tipo de industria.

- ***Aprovechamiento de la energía geotérmica en el sector turístico.***

Los Etruscos, Romanos, Griegos, Hindúes, Chinos, Mexicanos y Japoneses han dejado evidencia del uso del agua caliente, desde tiempos ancestrales, debido a la creencia popular de que estas aguas poseen cualidades curativas. En la Edad Media, los árabes y turcos desarrollaron y difundieron el uso tradicional de baños termales, después conocidos como baños Turcos (Barbier, 1997).

Los afloramientos dentro del Ejido Uruapan, el área de La Joya y bahía Papalote (La Bufadora), pueden considerarse como sitios estratégicos para el desarrollo de centros "holísticos" recreativos conocidos como "Spa", en donde se le ofrezca al visitante un sitio místico, ideal para el descanso y meditación, alejado de la ciudad, en un ambiente rico y sensual, con piscinas con agua caliente, baños de lodo y baños curativos; centro de masajes y medicina alternativa, lugares ideales para aliviar el estrés.

Parte II.

El sistema de fallas de Agua Blanca, se dice que es el responsable de la formación de la península de Punta Banda, B.C. (Allen *et al.*, 1960). Esta estructura tectónica y los eventos volcánicos intermitentes asociados, que datan del Cretácico tardío y del Terciario, le han dado su forma y altura actuales y han creado afloramientos hidrotermales, subaéreos, intermareales y submarinos (Vidal y Vidal, 1981).

Las manifestaciones termales asociadas con la falla de Agua Blanca muestran una tendencia progresiva a descargar con mayores temperaturas conforme la falla entra al océano (Vidal *et al.* 1978). La descarga de agua más caliente (107°-109°C) ocurre en el afloramiento hidrotermal submarino de Punta Banda (muestra 1, Figura 6). La contraparte de este afloramiento submarino es el de Médanos de Punta Banda, un afloramiento intermareal localizado en el área de La Joya, en la parte norte de la península de Punta Banda (muestra 2, Figura 6). Este afloramiento intermareal presenta una temperatura de descarga de 90°-95°C en algunas de sus manifestaciones de playa y temperaturas de 40°- 65°C a unas pocas decenas de metros tierra adentro, en manantiales y pozos (muestras 3,6,9,11 y 19, Figura 6), Vidal y Vidal (1981).

Debido a el alto grado de fracturamiento de la península de Punta Banda y la relativa cercanía de los afloramientos hidrotermales en el área de La Joya y Bahía Papalote (La Bufadora), es posible inferir que estas áreas están siendo influenciadas por la misma fuente de calor, por ello las diferencias existentes en el flujo de calor local, pueden estar mayormente relacionadas con las distintas conductividades térmicas y el mayor o menor grado de fracturamiento

(incrementando la permeabilidad) de los tipos de roca presentes por las cuales asciende el fluido.

Con base en lo anterior, se definió un área de influencia geológica de la fuente de calor que incluyera los afloramientos hidrotermales de la zona I y II, con una superficie de 8.4 km² (1.2 km ancho x 7 km de largo), ver Figura 8.

Se simplificó el sistema geotérmico del área de influencia, bajo las siguientes premisas:

- *El flujo de calor es constante a lo largo del tiempo.*
- *No existen gradientes horizontales de flujo de calor.*
- *El valor del flujo de calor se considera homogéneo en toda el área.*

A partir de la ecuación (4), si se toma el promedio de flujo de calor local de todas las muestras en la zona I, (176.62 mW/m² [4.23 HFU]) como el valor representativo del área de influencia; y se considera un área de 8.4 km², se obtiene que el potencial energético del área es de:

$$(176.62 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-2}) \cdot (8.4 \times 10^6 \text{ m}^2) = 1'483'608 \text{ Watts.}$$

$$\approx 1.48 \text{ MWatts.}$$

Este resultado, se encuentra influenciado por la estimación del tamaño del área seleccionada, sin embargo es semejante al valor reportado por Vidal (1978) para el área de la Bufadora de 2.1 Mwatts; por tal motivo se puede aseverar que es lo suficientemente preciso para los fines comparativos de este estudio.

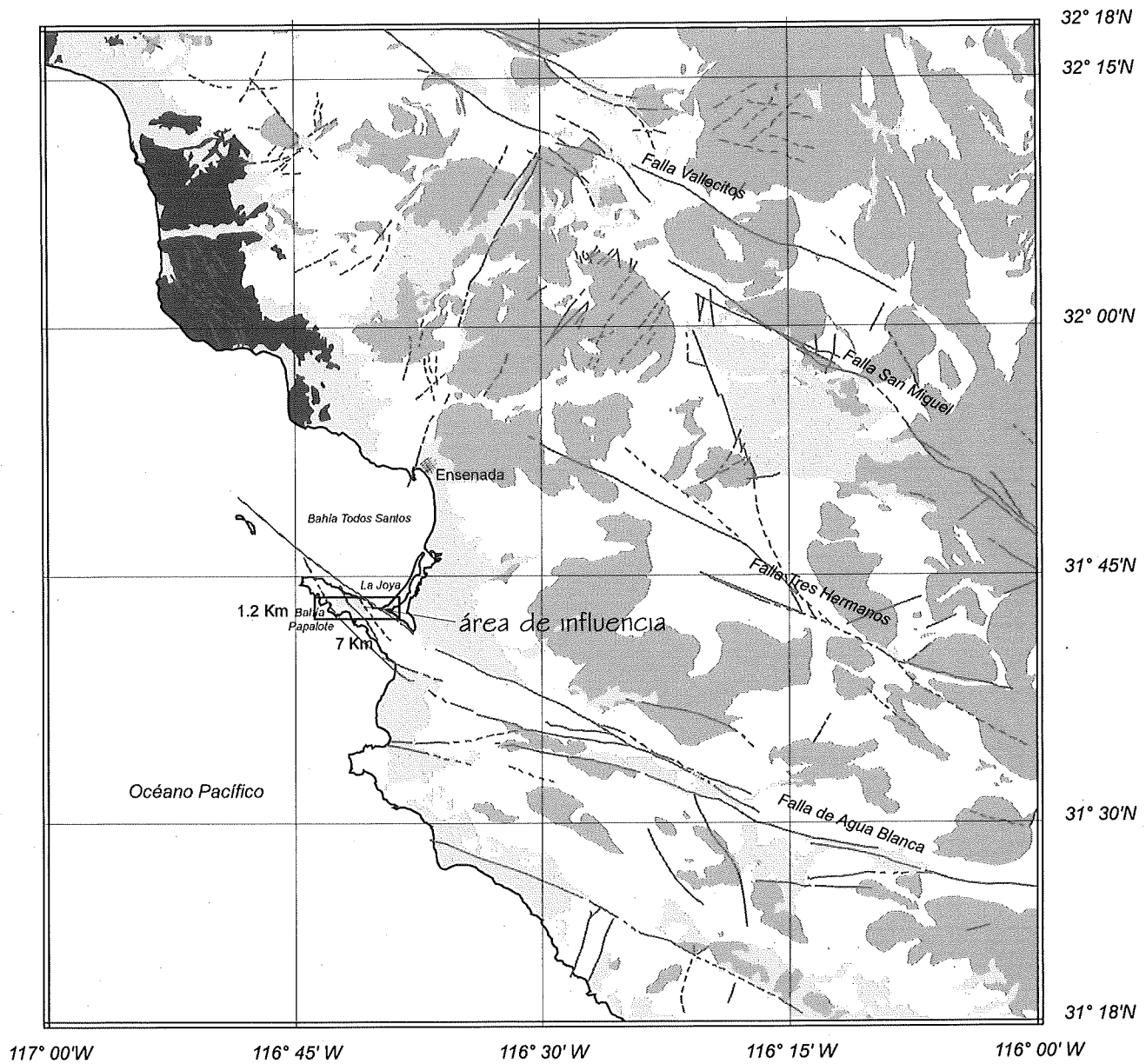


Figura 8. Área de influencia geológica de la fuente de calor, en la península de Punta Banda (modificado de Gastil *et al.*, 1973).

El calor estimado en la región de Punta Banda puede ser utilizado en conjunto con intercambiadores de calor para la producción de electricidad y agua potable, sin embargo, es necesario más que una anomalía térmica para obtener el recurso geotérmico productivo; se requiere también de un reservorio, es decir de un cuerpo de roca suficientemente grande y permeable a una profundidad accesible para la perforación. Este cuerpo de roca debe contener grandes cantidades de fluidos, agua o vapor, que transfieran el calor hacia la superficie. El reservorio debe estar rodeado por rocas más frías conectadas hidráulicamente al reservorio caliente por fracturas y fisuras, las cuales proveen de canales para que el agua de la lluvia o superficial penetre bajo tierra, Barbier (1997).

Debido al carácter cortical de la Falla de Agua Blanca (Allen *et al.* 1960), la región de Ensenada, en especial la península de Punta Banda, puede permitir el ascenso de fluidos hidrotermales profundos, calentados primeramente por conducción de calor a través del manto hacia la corteza y después transmitiendo su calor por un proceso de convección debido a la circulación profunda; pudiendo estos fluidos ser alojados en la zona de alto fracturamiento asociada a la falla, y contener un reservorio geotérmico en la zona debido a las condiciones litológicas favorables que presentan las formaciones Alisitos y Rosario.

Por tanto, existe el recurso geotérmico suficiente para proveer a Ensenada y sus alrededores con energía eléctrica, mediante el uso de plantas de energía binarias.

IV. CONCLUSIONES.

- ✓ La región de Ensenada, Baja California se clasifica como un sistema de baja temperatura, con temperaturas de agua sobre el nivel estático que oscilan entre los 30° y los 108°C.
- ✓ El tipo de agua identificada en el área de estudio es primordialmente cloruro – diluida bicarbonatada; presentando el 84.7% de los pozos y manantiales al ion cloro como su anión dominante.
- ✓ Se localizaron 10 puntos con temperaturas sobre el nivel estático del agua, mayores a 60°C, clasificadas como anormales que indican la presencia de una posible fuente termal asociada a la actividad de la falla de Agua Blanca, en las áreas de: Bahía Papalote (La Bufadora), La Joya, Ejido Uruapan
- ✓ El valor medio regional de flujo de calor calculado para el área de estudio es de: $123.33 \pm 35.57 \text{ mW/m}^2$ ($2.95 \pm 0.85 \text{ HFU}$). Este valor se considera alto, debido a que excede 1.5 veces el valor promedio terrestre.
- ✓ Se identificaron 4 zonas con alta actividad hidrotermal.
 - La zona I, perteneciente a las áreas de Bahía Papalote y la Joya, en la península de Punta Banda; se caracterizó por tener la mayor actividad hidrotermal de la zona, con valores de temperatura de agua superficial anormales (55°- 108°C) y un flujo de calor alto ($>123.33 \text{ mW/m}^2$), encontrándose también una correlación positiva entre ambas variables.

- La zona II, agrupa a los afloramientos localizados en el Ejido Uruapan y Valle de Santo Tomás. Presentan temperaturas sobre el nivel estático de 40° a 60°C y un flujo de calor medio.
 - La zona III, incluye a los afloramientos de San Antonio, San Carlos y Agua Caliente con temperaturas de descarga que oscilan entre los 43° y 48°C, y un flujo de calor medio.
 - La zona IV, incluye las manifestaciones de Marconni, El Apache y los manantiales de Guadalupe; con temperaturas reportadas de descarga de 32°, 64° y 33°C respectivamente; y un flujo de calor alto.
- ✓ El termalismo encontrado en las distintas zonas está asociado con la actividad de los principales sistemas de fallas de la región (Agua Blanca -Zona I y II-, Tres Hermanos – Zona II –, San Miguel - Vallecitos –Zona IV–); al parecer se deriva de la circulación de fluidos calentados a profundidad.
- ✓ Actualmente, en la zona de estudio, están siendo explotados algunos pozos y manantiales de manera comercial; lo que pone de manifiesto el elevado potencial geotérmico de la región. Los principales usos que se le ha dado a estas aguas termales son domésticos y recreativos, sin embargo, Ensenada presenta un potencial aparente para desarrollar otros usos como son: invernaderos, industrias deshidratadoras y centros recreativo- terapéuticos de 1^{er} mundo, aprovechando el calor geotérmico de la región.
- ✓ El área de la península de Punta Banda, presenta un potencial aparente de 1.45 MWatts; que puede ser aprovechado como apoyo en el sector eléctrico de la región.

V. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS:

La técnica del cálculo de flujo de calor mediante el geotermómetro de sílice demostró ser una herramienta útil, para aquellas regiones con las que no se cuenta con mediciones directas de flujo de calor pero que cuentan con análisis químicos del agua de los pozos y manantiales.

Sin embargo en el presente estudio se tuvo la dificultad de obtener una base de datos más completa, que permitiera obtener mayor precisión en los cálculos, para poder definir con más detalle las áreas con posibilidades geotérmicas, motivo por el cual se hacen las siguientes recomendaciones:

- Llevar a cabo un estudio geoquímico de todos los pozos y manantiales de la región, que complementen la información existente, con el fin de determinar el origen de las aguas, y determinar su grado de mezcla para obtener resultados más confiables con los distintos geotermómetros. Asimismo, este estudio permitirá identificar los límites de las distintas provincias geotérmicas y la existencia del acuífero geotérmico.
- Determinar el gasto de agua en los pozos y manantiales que presenten alguna anomalía térmica, con el objetivo de estimar la tasa a la cual podrían ser aprovechados, y en función de ello, evaluar su posible uso directo.

- Realizar la perforación de por lo menos un pozo, en el área de La Joya, Punta Banda, para conocer los diferentes tipos de roca presentes y las conductividades térmicas de las mismas. Estimar de manera directa el flujo de calor y proporcionar una aproximación a la profundidad del reservorio.
- Realizar diversos estudios de geofísica (gravimetría, magnetometría, sismología) y la integración de los existentes, con énfasis en el área de Bahía Papalote, para obtener un modelado del basamento y definir su comportamiento en el subsuelo.

VI. LITERATURA CITADA.

Allen, C.R. L.T. Silver y F.G. Stehli, 1960. Agua Blanca Fault - a major transverse structure of northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. America Bull.* 71: 457-482.

Alvarez, R.J. 1993. Reconocimiento geotérmico en el área de Ensenada, B.C. Residencia General de Cerro Prieto, CFE, Informe interno.

Arason, S. and H. Árnason, 1992. Utilization of geothermal energy for drying fish products. *Geothermics*, 21 (5/6): 745-757.

Atwater, T. 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of Western North America. *Geol. Soc. America Bull.*, 18: 3513-3536.

Barbier, E. 1997. Nature and technology of geothermal energy: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1 (1/2): 1-69.

Buntebarth, G. 1994. Geotermia. Introducción a los aspectos aplicados y teóricos de la conducción del calor en la Tierra. Grafos Editores S.A. de C.V. Primera edición. México, D.F. 183 pp.

Casimiro-Espinoza, E. 1997. Uso de la energía geotérmica para la deshidratación de frutas y legumbres, experiencia en Los Azufres, Mich. México. *Geotermia. Rev. Mex. de Geoenergía*. 13(1): 57-59.

Cruz Blancas, Ezequiel, 1985. Origen de la laguna costera de Punta Banda. Tesis de licenciatura, ESCM, UABC. Ensenada, B.C. 56 pp.

Einarsson, S.S., 1978. Opportunities for direct use of geohat in Central America and other tropical countries. *Geothermics*, 6: 209-219.

Ellis, A.J. 1970. Quantitative interpretation of chemical characteristics of hydrothermal systems. En Proceedings United Nations Symp. on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970, Vol. 2, Part 1. *Geothermics*, Spec. Issue 2, 516-528.

Fournier, R.O., and J.J. Rowe, 1966. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet stream wells. *Amer. J. Sci.*, 264: 685-697.

Fournier, R. O. and Truesdell A.H., 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Cosmochim. Acta* 37: 1255-1275.

Fournier, R.O., White, D.E. and Truesdell, A.H., 1974. Geochemical indicators of subsurface temperature -1, Basic assumptions. *U.S. Geol. Survey J. Res.* 2, 259-262.

Fournier, R.O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5: 41-50.

Fournier, R.O. 1981. Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In: *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*. Edited by L. Rybach and L.J.P. Muffler. John Wiley & Sons Ltd., New York, 109-143.

García Estrada, G.H., 1989. Técnicas de medida del flujo térmico en continentes, métodos opcionales y su aplicación en México. *Geotermia, Rev. Mex. Geoenergía*. 5 (3): 375-410.

Gastil, R.G., R.P. Phillips y E.C. Allison, 1975. Reconnaissance geology of the state of Baja California. *The Geological Society of America, Inc., Memoir* 140. Boulder Colorado, USA. 170 pp.

Gastil, R.G., G. Morgan y D. Krummenacher, 1979. The tectonic history of peninsular California and adjacent Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90(9): 839-857.

Gastil, R.G. and Bertine, Kathe K. 1981. Thermal water provinciality in southern and Baja California, U.S.A. and Mexico (abstr.): *Geological Society of America*. Abstracts with programs, 13(2), p. 57.

González Serrano, A., 1977. Anomalías gravimétricas y magnéticas de la bahía de Todos Santos. Tesis de licenciatura, ESCM, UABC, Ensenada, B.C.

Gutiérrez Gutiérrez Cesáreo Alfredo, 1984. Reconstrucción tectónica de la región que ocupa la falla de Agua Blanca en la bahía de Todos Santos, Baja California México. Tesis de licenciatura, ESCM, UABC. Ensenada B.C. 45 pp.

Hamza V.M. y M. Muñoz, 1996. Heat flow map of South America. *Geothermics*, 25 (6): 599-646.

Hilfiker, K., C. Hanley, D. Hodge, P. Morgan, J. Maxwell and C. Swamberg, 1980. Correlation of silica heat flow and temperature gradients, central and western New York. *Geothermal Resources Council, Transactions* Vol. 4: 209-212.

Hummel, P. 1972. Self potencial survey of part of the Agua Blanca geothermal zone. Undergraduate Research Report, SDSU, 1981 v. 21.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1996. Ensenada. Estado de Baja California. Cuaderno Estadístico Municipal. Edición 1995. México.

James A. L. 1972. Geochemical evaluation of temperature at depth for a proposed geothermal reservoir in the Ensenada-Punta Banda area, Baja California, México. Undergraduate Research Report, SDSU, U.S.A.

Krause, D.C., 1965. Tectonics, bathymetry, and geomagnetism of the southern continental borderland west of Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76: 617.

Lindal, B. 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In *Geothermal energy: Earth Science*. UNESCO, Paris. p. 135-148.

Lindal, B. 1992. Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations. *Geothermics*, 21 (5/6): 591-604.

Lira H.H. 1995. Posibilidades geotérmicas de la Falla de Agua Blanca, B.C. Residencia General de Cerro Prieto. Informe técnico RE 30/95.

Mahon W.A.J. 1966. Silica in hot water discharge from drillholes at Wairakei, New Zealand. *N.Z.J. Sci.* 9: 135-144.

Nicholson, K. 1993. Geothermal fluids. Chemistry and exploration techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 263 pp.

Ortega-Varela, J.R.Z. 1997. Uso de la geotermia para el desarrollo de invernaderos, experiencia en Los Azufres, Mich., México. *Geotermia. Rev. Mex. de Geoenergía*. 13 (1): 61-64.

Petrick, B., 1972. Agua Blanca geothermal investigation, resistivity survey. Undergraduate Research Report, SDSU v.20 pt 3.

Pou Albero, Sergio, 1982. Estudio de la tectónica de las islas de Todos Santos, B.C. México. Tesis de licenciatura, E.S.C.M., U.A.B.C. 36 pags.

Pohle, C.R. 1977 A Gravity survey along the north side of the Agua Blanca Fault, B.C. Undergraduate Research Report, SDSU v. 30 pt. 3.

Sclater, J.G., and J. Francheteau, 1970. The implications of terrestrial heat flow observations on current tectonic and geochemical models of the crust and upper mantle of the earth. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 20: 509-542.

Strandstra, R., 1972. Self potencial survey of part of the Agua Blanca geothermal zone. Undergraduate Research Report, SDSU v. 20 pt. 3.

SPP, 1981. Carta Hidrológica de Aguas subterráneas. Escala 1:250000. Ensenada H11-2. Secretaria de Programación y Presupuesto.

Swamberg, C.A. y P. Morgan, 1979. The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow: A new heat flow map of the United States. *Pure Appl. Geophys.* 117(1/2): 227-241.

Swamberg, C.A. Morgan, 1980. The silica heat flow interpretation technique: Assumptions and applications. *Jour. Geophys. Res.* 85(B12): 7206-7214.

Truesdell, A.H. 1976. Summary of section III, Geochemical techniques in exploration, *Proc. 2nd U.N. Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources*, Vol. I, 53-79, Washington.

Vidal, V.M.V., 1978. Studies of marine hydrothermal activity in a costal environment – Punta Banda, Baja California norte, México – and its geochemical implications for modelling marine hydrothermal processes in the ocean, Ph.D. dissertation, Univ. of Calif., San Diego. 216 pp.

Vidal, V.M.V., F.V. Vidal, J.D. Isaacs, y D.R. Young, 1978. Coastal submarine hydrothermal activity off northern Baja California. *J. Geophys. Res.* 83 (B4): 1757-1774.

Vidal, V.M.V., F.V. Vidal, 1981. Coastal submarine hidrothermal activity off northern Baja California. 2. Evolutionary History and Isotope Geochemistry. *J. Geophys. Res.* 86(B10): 9451-9468

Vidal , F.V., J. Welhan, and V.M.V. Vidal, 1982. Stable isotopes of helium, nitrogen, and carbon in a coastal submarine hydrothermal system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 12: 101-110.

White, D.E. 1970. Geochemistry applied to the discovery, evaluation, and exploitation of geothermal energy resources (Proc. U.N. Symp. on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970). *Geothermics Sp. iss.* 2,1: 58-80.

Wong Ortega, Victor Manuel, 1980. Implicaciones tectónicas de la falla de Agua Blanca en la bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, B.C.

VII. ANEXOS.

Anexo I. Valores reportados para las 42 muestras analizadas.

Número de muestra	Tipo Muestra	T°C sup.	pH	SiO ₂ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	B mg/l
1 (e)	Manantial	108	6.1	156	5200	410	1600	80	10800	347		351	23
2 (e)	Manantial	95	7.5	105									
3 (a)	Pozo	70	4.5	87	2125	123	676	8	4670				11.14
4 (c)	Pozo	64	7.6	78	99	2.1	2	2.4	80	75	80	58	1.5
5 (c)	Manantial	60	7.0	96	68	5	22	28	60	236			0.95
6 (a)	Noria	60	6.6	98	2500	128	752	52	5375				11.41
7 (a)	Manantial	57	9.1	42	200	5	10	0.01	229				1.04
8 (a)	Manantial	55	8.5	42	217	5	13	0.32	247				0.94
9 (a)	Pozo	55	5.2	98	2313	126	695	1.4	5023				10.33
10 (a)	Manantial	50	9.3	40	204	5.38	10	0.01	238				1.04
11 (a)	Pozo	49	6.7	52	2500	126	914	63	5552				9.80
12 (c)	Manantial	48	7.2	98	144	6.9	7.2	0.06	290	27	6.7	116	0.77
13 (b)	Manantial	44		48	61	5.4	5.6		125	61		104.2	
14 (c)	Manantial	44	7.9	47	166	3.1	1.5	0.21	100	22	25	67	
15 (b)	Manantial	43		38	111	3.2	7.2	0.48	175	6.1			
16 (a)	Noria	42	6.8	36	813	19	276	186	2203				1.13
17 (a)	Noria	40	7.2	32	771	19	295	188	2203				1.37
18 (a)	Noria	40	7.0	32	192	8.71	63	10.40	273				1.66
19 (a)	Pozo	40	6.6	94	1542	129	705	43	4935				11.14
21 (c)	Manantial	33	7.4	86	230	3.6	3.1	0.9	290	33	24	45	1.5
22 (c)	Manantial	32	7.3	92	130	2.7	1.4	0.03	88	24	16	103	0.14
23 (a)	Pozo	29	7.3	12	192	5	82	334	291				0.67
24 (a)	Pozo	27	7.1	27	93	4	66	36	251				0.54
25 (c)	Manantial	22	6.0	40	72	6.6	78	6	98	180	<1	64	<0.1
27 (d)	Pozo	20	8.0		190.9	7.4	148	89.3	326.6	256.2		417.1	
28 (d)	Noria	20	7.8		190.9	8.2	130	74.2	248.5	274.5	12	396.5	
29 (d)	Noria	20	7.7		41.9	3.9	43	19.1	46.2	237.9		11	
30 (d)	Noria	20	7.8		92	3.1	75	33.8	156.2	213.5		114.7	
31 (e)	Pozo	20	7.0	36	310	9	480	107	1500	230		334.8	
32 (d)	Manantial	20	8.2		357.2	7.8	144	158.6	1143.1	85.4	6	124.8	
34 (d)	Noria	18	8.3		73.8	0.4	60	26.5	163.3	164.7	18	11	
35 (d)	Noria	18	7.6		82.6	10.9	57	52.3	149.1	213.5		144	

Continuación Anexo I. Valores reportados para las 42 muestras analizadas.

Número de muestra	Tipo Muestra	T°C sup.	pH	SiO ₂ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	B mg/l
36 (d)	Manantial	18	8.0		51.5	4.3	35	18	92.3	140.3		31.2	
37 (c)	Noria	18	5.9	47	200	38	6		245	49		62	1.1
38 (d)	Pozo	18	7.7		76.6	4.7	64	32.2	99.4	237.9		135.4	
39 (d)	Pozo	18	8.0		57	5.1	60	35.9	81.7	207.4		135.4	
40 (d)	Manantial	18	8.6		88.6	2	8	1	78.1	85.4		41.3	
42 (d)	Pozo	18	8.0		71.8	3.9	76	26.3	117.2	176.9		145.9	
43 (d)	Pozo	18	7.6		52.4	4.7	42	21.4	46.2	189.1		83	
44 (d)	Manantial	18	7.7		55	7.8	56	35.4	67.5	292.8		83	
45 (d)	Pozo	18	7.8		69.5	3.9	56	42.1	85.2	244		145.9	
48 (d)	Noria	18	7.7		634.1	12.1	233	206.5	1583.3	103.7		385.9	
99 (e)	Agua de mar	12	8.0	0.37	10500	380	400	1350	19000	142		2630	4.6

Fuente: (a) Alvarez. (1993); (b) James (1972); (c) Gastil y Bertine (1981); (d) S.P.P. (1981); (e) Vidal (1978).

Anexo 2. Valores de los aniones dominantes utilizados para la identificación del tipo de agua.

Número de muestra	Tipo Muestra	T°C sup.	Cl ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
1 (e)	Manantial	108	10800	347		351
4 (c)	Pozo	64	80	75	80	58
12 (c)	Manantial	48	290	27	6.7	116
13 (b)	Manantial	44	125	61		104.2
14 (c)	Manantial	44	100	22	25	67
21 (c)	Manantial	33	290	33	24	45
22 (c)	Manantial	32	88	24	16	103
25 (c)	Manantial	22	98	180	<1	64
26 (d)	Manantial	20	195.3	103.7		41.3
27 (d)	Pozo	20	326.6	256.2		417.1
28 (d)	Noria	20	248.5	274.5	12	396.5
29 (d)	Noria	20	46.2	237.9		11
30 (d)	Noria	20	156.2	213.5		114.7
31 (e)	Pozo	20	1500	230		334.8
32 (d)	Manantial	20	1143.1	85.4	6	124.8
33 (d)	Manantial	19	532.5	152.5	24	62.4
34 (d)	Noria	18	163.3	164.7	18	11
35 (d)	Noria	18	149.1	213.5		144
36 (d)	Manantial	18	92.3	140.3		31.2
37 (c)	Noria	18	245	49		62
38 (d)	Pozo	18	99.4	237.9		135.4
39 (d)	Pozo	18	81.7	207.4		135.4
40 (d)	Manantial	18	78.1	85.4		41.3
41 (d)	Manantial	18	284	170.8		51.8
42 (d)	Pozo	18	117.2	176.9		145.9
43 (d)	Pozo	18	46.2	189.1		83
44 (d)	Manantial	18	67.5	292.8		83
45 (d)	Pozo	18	85.2	244		145.9
46 (d)	Manantial	18	227.2	219.6	24	375.4
47 (d)	Manantial	18	347.9	237.9	36	208.3
48 (d)	Noria	18	1583.3	103.7		385.9
49 (d)	Noria	17	124.3	183	12	41.3
50 (d)	Manantial	16	127.8	152.5		20.6
51 (d)	Manantial	15	372.8	183	24	11
52 (d)	Manantial	15	500.6	152.5	12	41.3
53 (d)	Noria	15	571.6	372.1	12	73

Continuación Anexo 2. Valores de los aniones dominantes utilizados para la identificación del tipo de agua.

Número de muestra	Tipo Muestra	T°C sup.	Cl ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
54 (d)	Manantial	15	46.2	164.7	6	62.4
55 (d)	Manantial	15	99.4	158.6	18	20.6
56 (d)	Manantial	15	305.3	170.8	6	156.5
57 (d)	Manantial	15	142	164.7		11
58 (d)	Manantial	15	639	164.7		83
59 (d)	Manantial	13	195.3	219.6		51.8
60 (d)	Manantial	12	78.1	201.3	12	62.4
61 (d)	Manantial	12	188.2	122	12	20.6
62 (d)	Pozo	10	766.8	225.7		313

Fuente: (b) James (1972); (c) Gastil y Bertine (1981); (d) S.P.P. (1981); (e) Vidal (1978).