

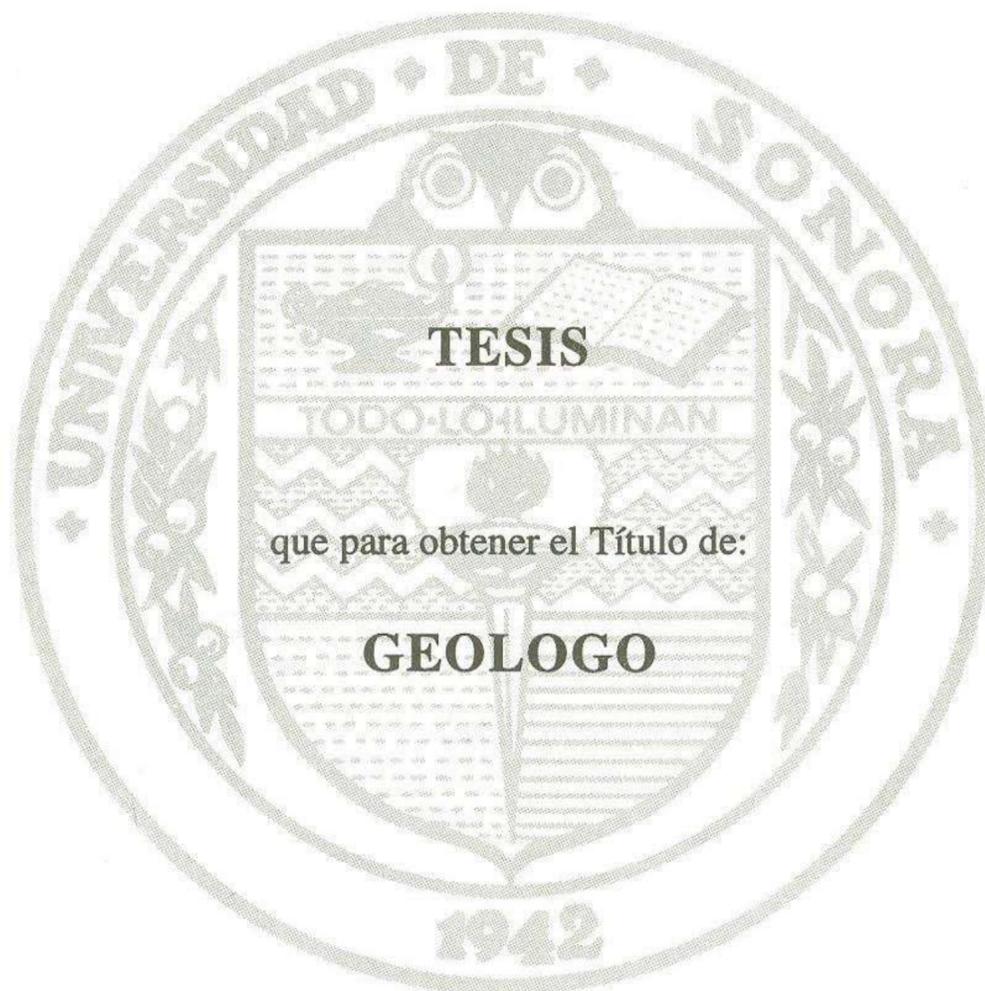
129

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISION DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**Compilación de la Geología e Interpretación
Genética del Depósito de Sulfato de
Sodio de Bacadéhuachi, Sonora.**



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

Presenta:

Luis Mario Barrera Gutiérrez

Hermosillo, Sonora

Septiembre de 1995

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



Departamento de Geología

1992: AÑO DE LA UNIVERSIDAD DE SONORA

Junio 30, 1995.

M.C. RAFEL RODRIGUEZ TORRES

Director de Tesis
Departamento de Geología
Universidad de Sonora
Presente



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingenieros
Depto. Geología
BIBLIOTECA

Por este conducto le comunico a que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por usted, intitulado:

"COMPILACION DE LA GEOLOGIA E INTERPRETACION GENETICA DEL DEPOSITO DE SULFATO DE SODIO DE BACADEHUACH, SONORA".

Esto es con el fin de que el alumno: **LUIS MARIO BARRERA GUTIERREZ**, pueda presentar su examen profesional, para obtener el título de Geólogo. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes sinodales:

**ING. EFREN PEREZ SEGURA
GEOL. JUAN RAMON GONZALEZ SANDOVAL
M.C. RAFAEL RODRIGUEZ TORRES**



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

Sin otro en particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"

DR. GUILLERMO A. SALAS PIZA
Jefe de Departamento



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

C.c.p. Interesado
Archivo
G.A.S.P.*ag

UNIVERSIDAD DE SONORA

Hermosillo, Sonora.

DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Tel. 17-31-81 EXT. 100 Y 11



Departamento de Geología

1992: AÑO DE LA UNIVERSIDAD DE SONORA

NOMBRE DE LA TESIS:

"COMPILACION DE LA GEOLOGIA E INTERPRETACION GENETICA DEL DEPOSITO DE SULFATO DE SODIO DE BACADEHUACHI, SONORA"

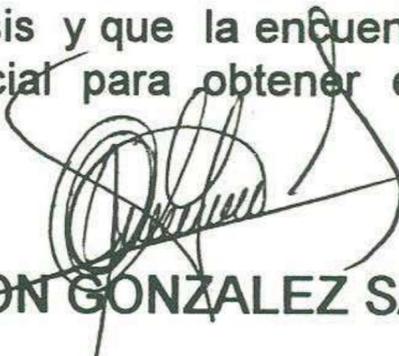
NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

LUIS MARIO BARRERA GUTIERREZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


ING. EFREN PEREZ SEGURA

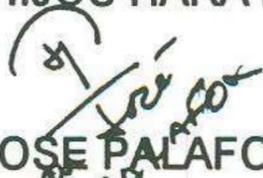
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


GEOL. JUAN RAMON GONZALEZ SANDOVAL

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.


M.C. RAFAEL RODRIGUEZ TORRES

ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"


GEOL. JUAN JOSE PALAFOX REYES
Jefe de Departamento



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingenieros
Depto. Geología
BIBLIOTECA



EL SABER DE MIS
HARA MI GRAND
BIBLIOTECA DE CIE
EXACTAS Y NATUR



VITRO QUIMICA, FIBRAS Y MINERIA

Monterrey, N.L. 18 de Julio de 1995

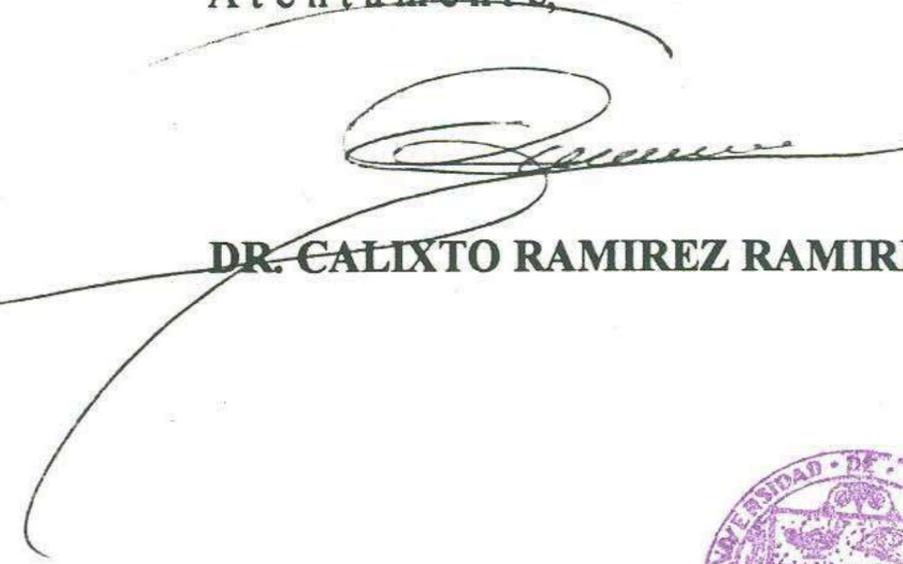
ING. LUIS M. BARRERA GUTIERREZ

Presente.-

Estimado Luis:

Después de leer tu trabajo sobre la Cuenca de Bacadehuachi el cual deseas presentar como trabajo de Tesis Profesional, considero que la información que contiene es de tipo académico. Por lo tanto, previa consulta con nuestro Director el Ing. Joaquín Durán, te extiendo la presente autorización para que procedas a utilizar dicho trabajo como material para tu Tesis Profesional.

Atentamente,


DR. CALIXTO RAMIREZ RAMIREZ

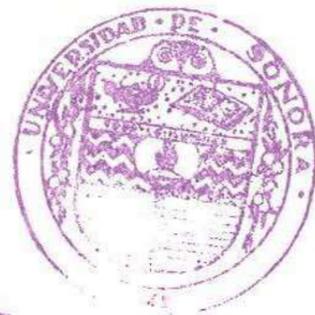
C.C. Ing. Joaquín Durán
Archivo



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA

COMPILACION DE LA GEOLOGIA E INTERPRETACION GENETICA DEL
DEPOSITO DE SULFATO DE SODIO DE
BACADEHUACHI, SONORA.

Luis Mario Barrera Gutiérrez

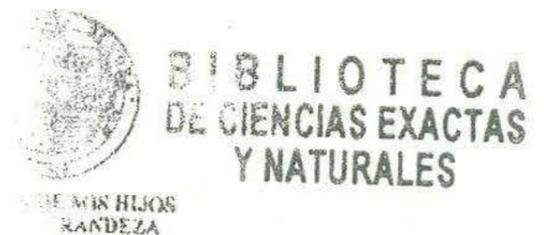
AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Marcia Desidere:

Por creer en mi con infinito amor y ser mi mas grande apoyo en todo momento.

A mis hijos Marcia Ivette y Luis Mario:

Por ser la alegría de mi corazón.



A mis padres Luis R. y Ma. Socorro:

Por haberme dado la oportunidad de vivir y enseñarme a amar la vida.

A mi familia y amigos:

Por estar siempre conmigo.



Este trabajo no estaría completo sin el debido reconocimiento a las personas que de muy diversas maneras influyeron en mi para realizarla.

A mis amigos M.C. Francisco J. Loera F. y M.C. Rafael Rodríguez T. por su empeño puesto para que este trabajo fuera realidad.

A mis maestros por todas sus enseñanzas.

A mis compañeros por el tiempo que compartimos.

Al Dr. Calixto Ramírez, por su apoyo.

A Materias Primas Monterrey, S.A. de C.V. por las facilidades otorgadas para elaboración del presente trabajo.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA

INDICE

INTRODUCCION	1
Método de Trabajo	2
Localización y Acceso	3
GEOLOGIA REGIONAL	5
Fisiografía	5
Marco Geológico Regional	7
GEOLOGIA DE LA CUENCA DE BACADEHUACHI.	13
Estratigrafía	13
Conglomerado Basal	13
Tobas Arenosas.	16
Tobas de Grano Fino	17
Areniscas, Conglomerados y Tobas	18
Conglomerado Superior.	19
Sedimentos Recientes	20
Rocas ígneas	20
Edad de la Cuenca y Correlación	21
GEOQUIMICA.	23
Evolución del Depósito.	23
Análisis de Isótopos	27
Isótopos de Hidrógeno y Oxígeno	27
Isótopos de Azufre	29
Química de Rocas	31

CONCLUSIONES 33

RECOMENDACIONES 35

BIBLIOGRAFIA 36



**BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES**

**EL SABER DE MIS HIJOS
PARA MI GRANDEZA**



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo es relacionar la geología del Valle de Bacadéhuachi con la génesis y evolución del depósito de sulfato de sodio que en él se encuentra, además de contribuir al conocimiento geológico del área. Para ésto, se realizó una compilación de diversas actividades de exploración realizadas por Minerales para la Industria, S.A. de C.V. en la región.

El depósito de sulfato de sodio de Bacadéhuachi ha sido conocido desde los primeros asentamientos humanos en la región. Este mineral, al encontrarse aflorando, formaba "lamederos" frecuentados por los primeros hatos de ganado que pastaron en el área.

Ultimamente el sulfato de sodio o "sal de cerro" a sido explotado ha pequeña escala cubriendo solamente las necesidades del mercado ganadero local.

El creciente uso industrial de esta sal despertó el interés de varias compañías mineras en el depósito de Bacadéhuachi las cuales han realizado diferentes trabajos de exploración a diversa escala.

En 1963 el Consejo de Recursos Minerales llevó a cabo algunos trabajos de geología superficial. Entre 1981 y 1982 la Compañía Tolsa, S.A. continuó con estos trabajos y desarrolló algunos sondeos geofísicos de resistividad (SEV), aparentemente con resultados poco halagadores. Posterior a ésto, el Grupo Peñoles, S.A. denunció los lotes que rodean a las concesiones más importantes del lugar. En 1982 Minerales para la Industria, S.A. de C.V. del Grupo Vitro, efectúa varios reconocimientos geológicos del área, los que en 1984 se formalizan para

efectuar una evaluación geológico-económica del yacimiento y así planear su posible comercialización. Estos trabajos culminaron con la adquisición de los derechos del depósito por esta compañía.

Método de Trabajo

Para definir la estratigrafía de la cuenca, se usó como base los mapas geológicos escala 1:10,000 de Snively (1991) y Ochoa *et al.* (1991), modificados según las apreciaciones del suscrito en el campo. También se incluyeron las descripciones petrográficas hechas por M. Fernández, de algunas de las unidades litológicas del área. Y para una mejor ubicación y correlación en tiempo y espacio, el Dr. M. Shafiqullah de la Universidad de Arizona, efectuó un fechamiento del basalto sobre el que se desarrolló la cuenca.

La evolución de la cuenca trató de definirse interpretando tanto la información estratigráfica de superficie como la obtenida del subsuelo por barrenos de diamante seleccionados de la fase exploratoria de Minerales para la Industria, S.A. de C.V.

Para la definición de la génesis del depósito, se interpretaron el muestreo y análisis geoquímico del agua superficial del valle efectuado por N. Armijo (Ochoa, *et al.*, 1991) y los análisis de isótopos estables de hidrógeno, oxígeno y azufre, efectuados por el suscrito en la Universidad de Arizona, bajo la supervisión de los Drs. J. Ruiz y C. J. Eastoe. También se efectuó un análisis químico a algunos basaltos de la región en los laboratorios ACME.

Localización y Acceso

El Valle de Bacadéhuachi se encuentra enclavado en la región serrana de Sonora, en su porción centro-este y a 190 kilómetros en línea recta al noreste de Hermosillo, Son. El acceso es por la carretera que une a los poblados de Ures, Moctezuma, Huásabas y la ranchería de El Coyote, siendo un recorrido de 225 kilómetros de carretera pavimentada. A partir de El Coyote se toma el camino de terracería que se desvía hacia el Sur, encontrándose, a 25 kilómetros, el poblado de Bacadéhuachi (Figura 1).

Existe una pista de aterrizaje en el poblado, pudiendo ser usada por aviones bimotores y monomotores, efectuándose en aproximadamente una hora el trayecto desde Hermosillo.

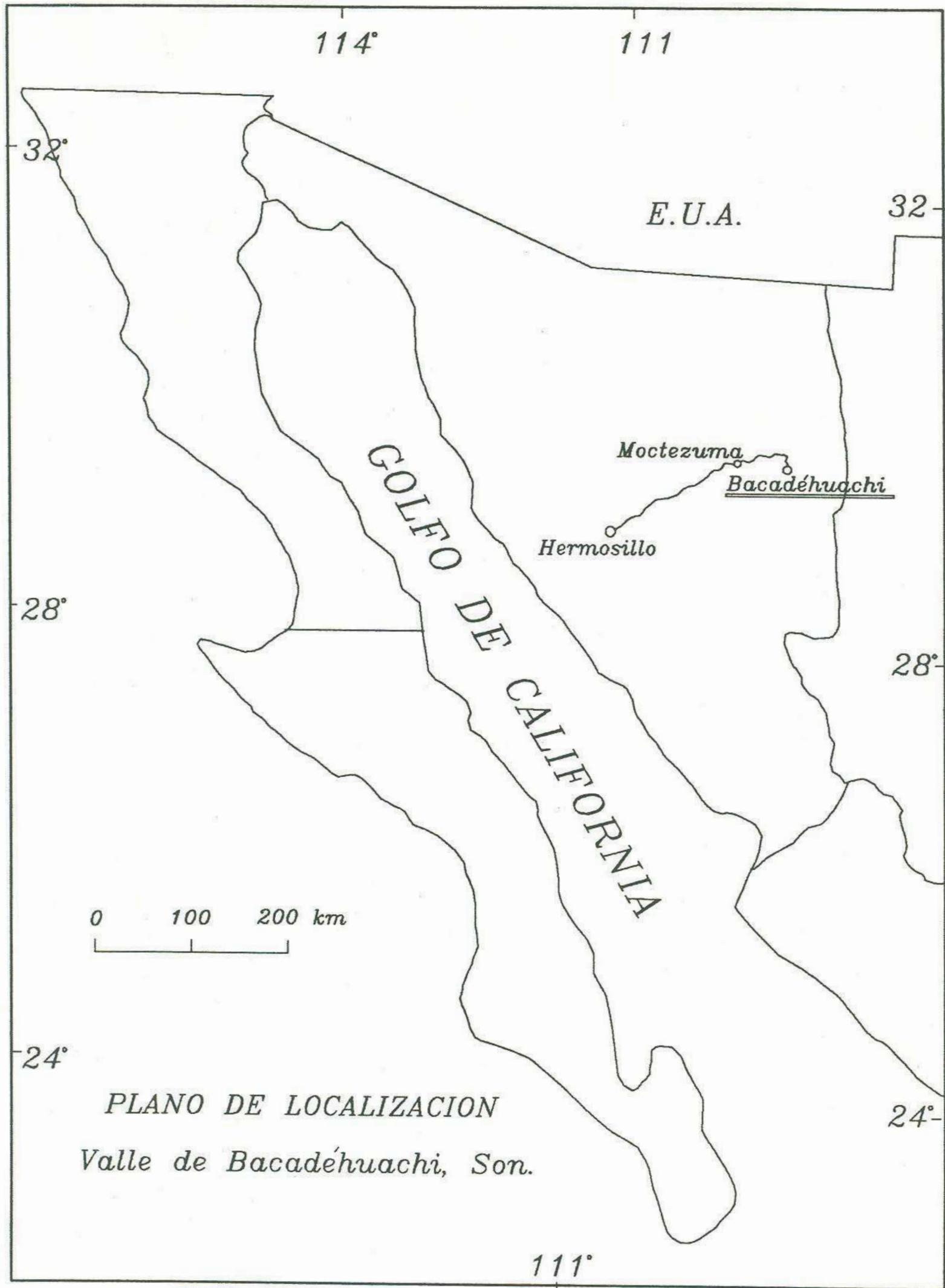


Figura 1



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES

GEOLOGIA REGIONAL

Fisiografía

Para definir el marco fisiográfico del área de estudio se utilizó la clasificación que INEGI (1981) publica, y donde se sitúa al Valle de Bacadéhuachi dentro de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental. Esta es la provincia de mayor área en el país, caracterizada por el gran volumen de rocas volcánicas que contiene y se extiende desde la frontera norte de México hasta el Eje Neovolcánico, bordeando la costa del Océano Pacífico por alrededor de 1,400 kilómetros y con 200 a 300 kilómetros de ancho.

Así mismo, se encuentra dentro de la Subprovincia de Sierras y Cañadas del Norte y la clase y tipo de topografía a la que se le asigna es el de Valle Intermontano (Figura 2).

El Valle de Bacadéhuachi se encuentra a una altura de 700 metros sobre el nivel medio del mar y limita al Este con la Sierra de la Aguja y al Norte y Oeste con la Sierra de Villa Hidalgo con elevaciones de más de 2300 y 1600 metros respectivamente.

El valle tiene una forma elíptica siendo su eje mayor el orientado Norte-Sur y con una longitud de 15 kilómetros, mientras que el eje Este-Oeste tiene ocho kilómetros en promedio.

Handwritten notes:
27/11/2010
300-200100
ms



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA

BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES

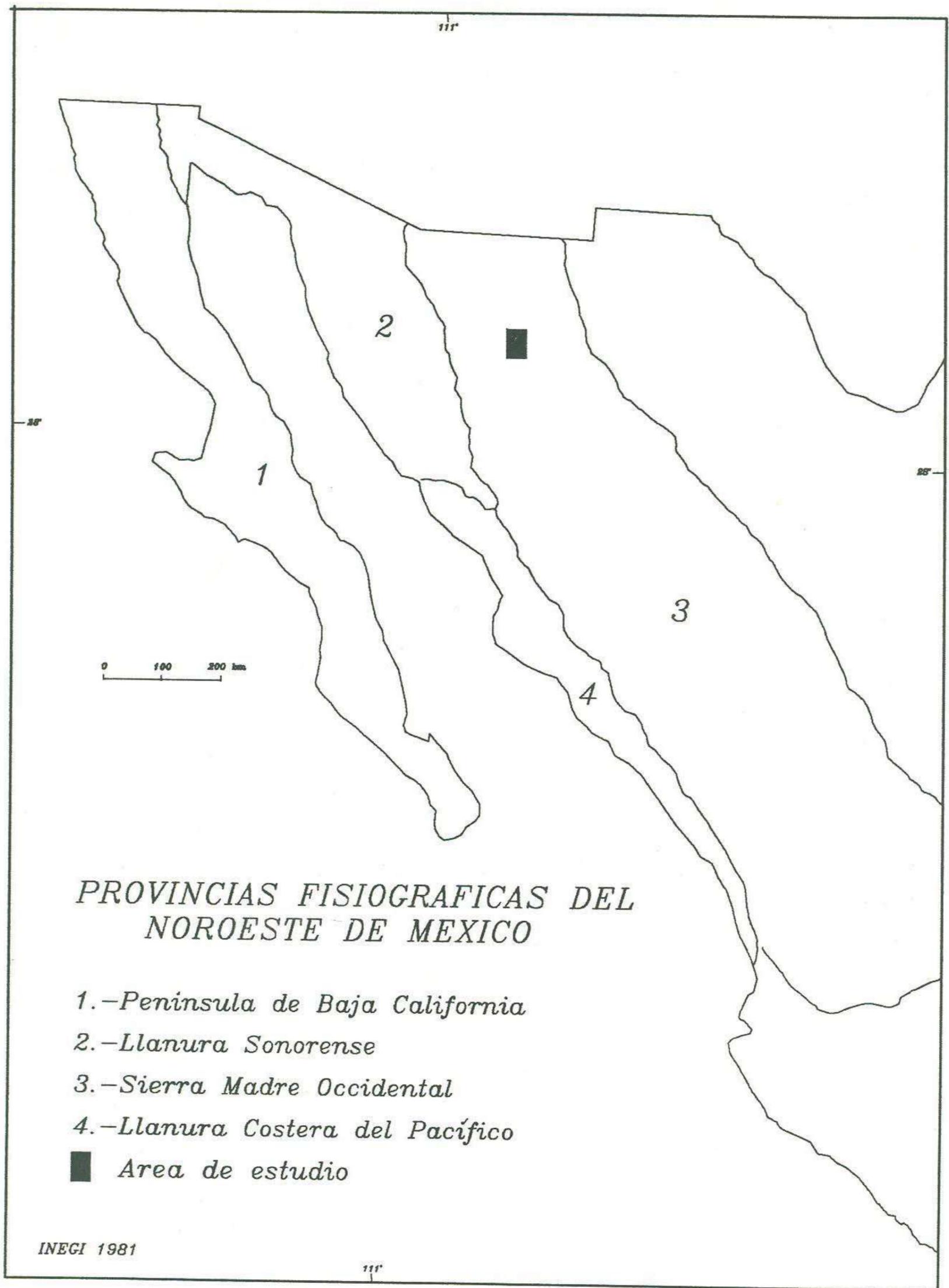


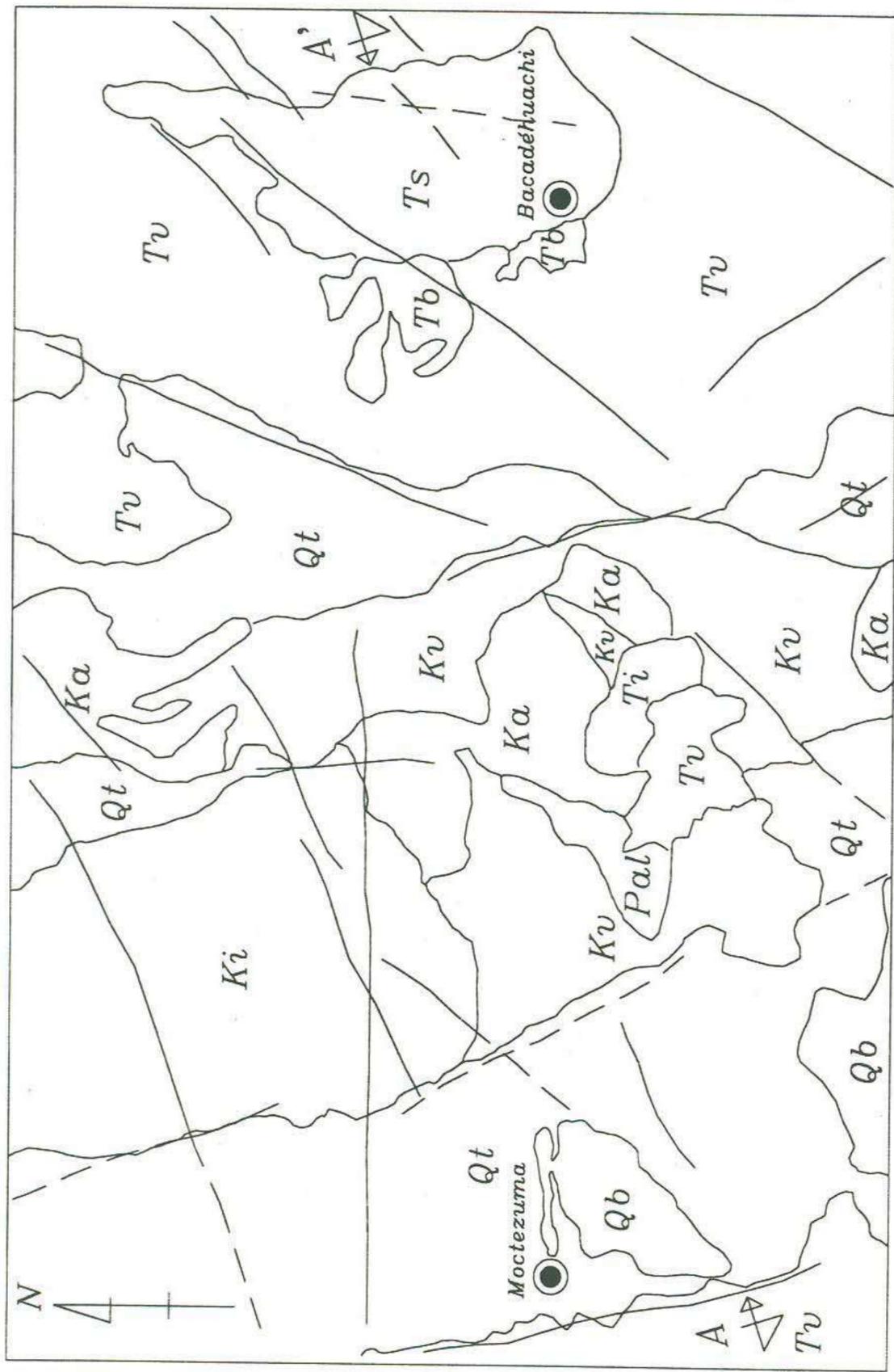
Figura 2

Marco Geológico Regional

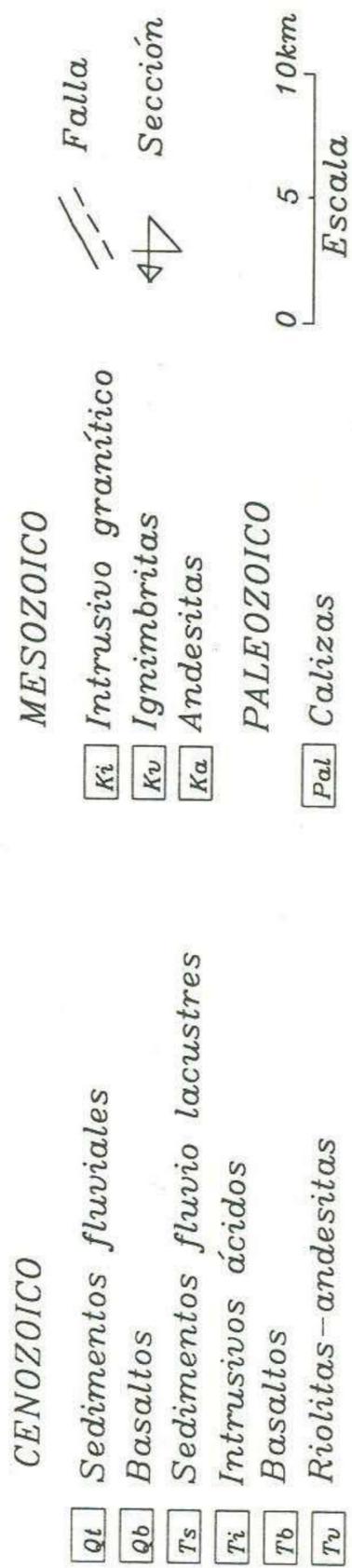
La geología que enmarca a la región del Valle de Bacadéhuachi, de acuerdo a las publicaciones disponibles hasta el momento, presenta un dominio muy marcado de rocas volcánicas terciarias, características de la Provincia de la Sierra Madre Occidental, aunque también afloran rocas de los eratemas Paleozoico y Mesozoico (Figura 3).

Las rocas paleozoicas están representadas por calizas grises con estratificación de mediana a gruesa con bandas y nódulos de pedernal. Estas rocas afloran en la Sierra de Ceniceros, al suroeste de Granados y se han correlacionado con las calizas del Paleozoico temprano de las Sierra de Los Ajos, Las Mesteñas y el distrito minero de Bisbee.

Los afloramientos mesozoicos están formados por rocas ígneas y sedimentarias de diversa composición. Dentro de las primeras se tienen rocas intrusivas graníticas y derrames andesíticos además de ignimbritas. Estas últimas varían en composición de riolitas a riodacitas y en ocasiones forman secuencias volcano-clásticas. Tanto las ignimbritas como las andesitas se consideran elementos constituyentes de un arco insular cordillerano. En las márgenes de este arco insular se desarrollaron depósitos subaéreos y submarinos representados por secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias.



GEOLOGIA REGIONAL



Modificado de Berlanga (1993)

Figura 3

Durante el Período Terciario se desarrollaron los enormes paquetes de rocas volcánicas que actualmente conforman la Sierra Madre Occidental. La parte basal se compone de tobas, derrames e intrusivos hipabisales de composición andesítica desarrollados durante las épocas Paleoceno-Eoceno y que pudieron ser extravasados por los mismos aparatos volcánicos del Mesozoico pero sin el ambiente de mares someros ni el insular. Estas rocas andesíticas son correlacionables con el "Complejo Volcánico Inferior" definido en Sinaloa (McDowell y Clabaugh, 1979).

Durante las épocas Oligoceno-Mioceno se desarrolla la secuencia de derrames y tobas de composición ácida predominantemente (ignimbritas principalmente), que conforman a la Sierra Madre Occidental y a las grandes mesetas adyacentes y que se relacionan en algunas áreas a basaltos fisurales. Las grandes calderas resurgentes que originaron estas rocas, dan lugar a la formación de depósitos de cuencas dentro y entre ellas, donde se dan gradaciones de secuencias volcánicas, volcano-clásticas y sedimentarias. La repartición geográfica actual de estos elementos está controlada por el evento "Basin and Range" del suroeste de los Estados Unidos.

Durante las épocas Plioceno-Pleistoceno se desarrollaron depósitos de sedimentos coluviales y aluviales que forman complejos de abanicos, los cuales gradúan en tamaño desde conglomerados hasta limos y en algunos casos desarrollan facies lacustres similares a los lagos de playa ("playa lake") de Arizona y Nuevo México. En el Período Cuaternario, se tienen las últimas evidencias de actividad volcánica representadas por las coladas de basalto emitidos por fisuras, como el caso de los basaltos de Moctezuma.

Debido a la actividad fluvial, en el Período Cuaternario se han desarrollado diversas cubiertas de sedimentos que varían entre gravas, limos y arcillas. Estos depósitos constituyen las actuales terrazas que bordean el cauce de las principales corrientes.

Evolución Tectono-Estructural de la Región

En la Epoca Mesozoica, se ha reconocido un elemento de arco volcánico cordillerano el cual debió haber estado activo desde principios del Período Cretácico hasta el Período Paleógeno. Su definición se efectuó con las secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias que afloran en las sierras de Juriquipa y Ceniceros en conjunto con el núcleo intrusivo de la Sierra de la Madera. El origen de la actividad de este paleo-elemento se debió a la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamericana y la variabilidad en la composición y el volúmen del material volcánico emitido fueron controlados por los cambios en la velocidad y el ángulo de subducción (Damon et al., 1981).

Se ha inferido la continuidad de la actividad de este arco volcánico insular cordillerano hasta el Período Paleógeno, debido a la secuencia basal andesítica presente en la Sierra Madre Occidental y conocida como las rocas del "Complejo Volcánico Basal" o "Complejo Volcánico Inferior" (McDowell y Clabaugh, 1979; Cochemé y Demant, 1991).

Los afloramientos de rocas riolíticas de los alrededores de Moctezuma y Bacadéhuachi permiten inferir la presencia de al menos una megacaldera que haya emitido esa gran cantidad de lavas y piroclásticos. Este elemento debió estar integrado al megacampo volcánico de la Sierra Madre Occidental que estuvo activo durante las épocas Oligoceno-Mioceno.

Hacia fines del Período Terciario y principios del Período Cuaternario se desarrollaron diversos rasgos-tectono-estructurales relacionados al fallamiento derivado del cizallamiento que generó la transcurrencia de la Placa Norteamericana con respecto a la Cresta del Pacífico.

De estos rasgos, resalta por su importancia el fallamiento derivado de esfuerzos extensionales que generó la provincia de "Basin and Range" y que define los actuales elementos estructurales regionales (Figura 4) y además, se asocia durante el Período Cuaternario a extravasación de magmas basálticos como el de la región de Moctezuma.

También son importantes los esfuerzos conjugados que originan fallamientos de corrimiento lateral, causantes del aporte de material proveniente del manto y de la presencia de manantiales termales (Rodríguez T., comunicación personal).

GEOLOGIA DE LA CUENCA DE BACADEHUACHI

Estratigrafía

La historia geológica de la Cuenca de Bacadéhuachi se desarrolló durante la parte media del Período Terciario y continúa hasta el presente. Las rocas más antiguas son riolitas y basaltos de las sierras que bordean a la cuenca, la cual se desarrolló por el fallamiento y deslizamiento hacia abajo de la sierra de Villa Hidalgo, contra el flanco oeste de la Sierra de la Aguja, posiblemente durante el evento de "Basin and Range". El relleno de esta cuenca se compone de una secuencia volcano-sedimentaria que Snively (1991) denomina de manera informal "Formación Bacadéhuachi" (Figura 5). Esta secuencia se encuentra basculada suavemente hacia el Este (a menos de 15°), por lo que las rocas más antiguas de la cuenca afloran en el flanco Oeste siendo más jóvenes hacia el Este (Figura 6). Esta secuencia volcano-sedimentaria fue dividida en cinco unidades descritas a continuación, de la más antigua a la más joven.

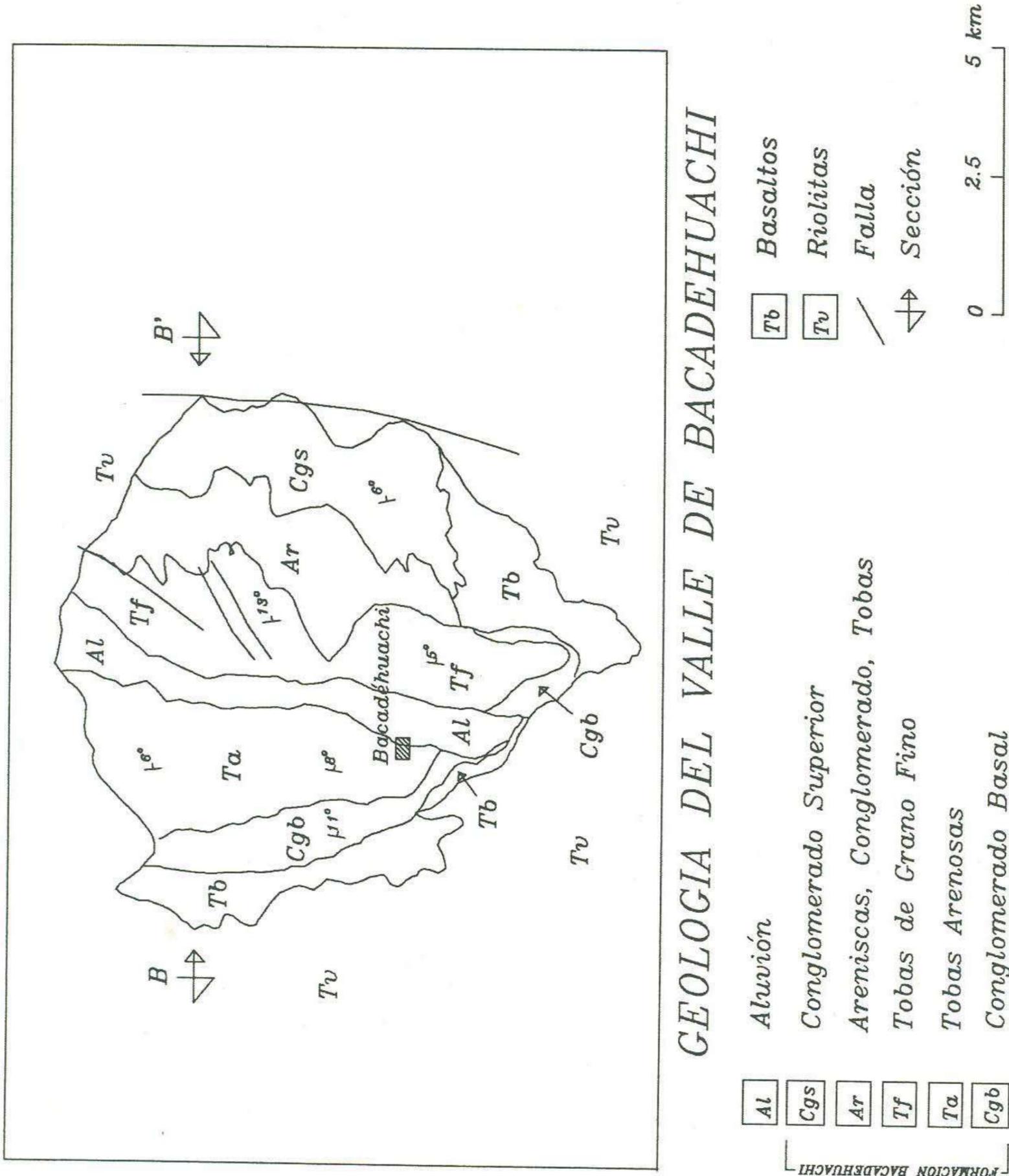
Conglomerado Basal

Esta unidad aflora en el flanco Oeste del Valle de Bacadéhuachi. Sobreyace a rocas basálticas de las épocas Oligoceno-Mioceno, que a su vez cubren a las ignimbritas del "Complejo Volcánico Superior" de la Sierra Madre Occidental. El conglomerado es una alternancia de conglomerados gruesos y areniscas conglomeráticas, moderadamente litificados y que están formados por clastos de andesitas, dacitas y riolitas con diámetros de hasta 15 centímetros. Es evidente la presencia de bloques de basalto que en ocasiones miden hasta 30 centímetros de diámetro.



BIBLIOTECA
DE CIENCIAS EXACTAS
Y NATURALES

EL SABER DE MIS HIJOS
PARA MI GRANDEZA

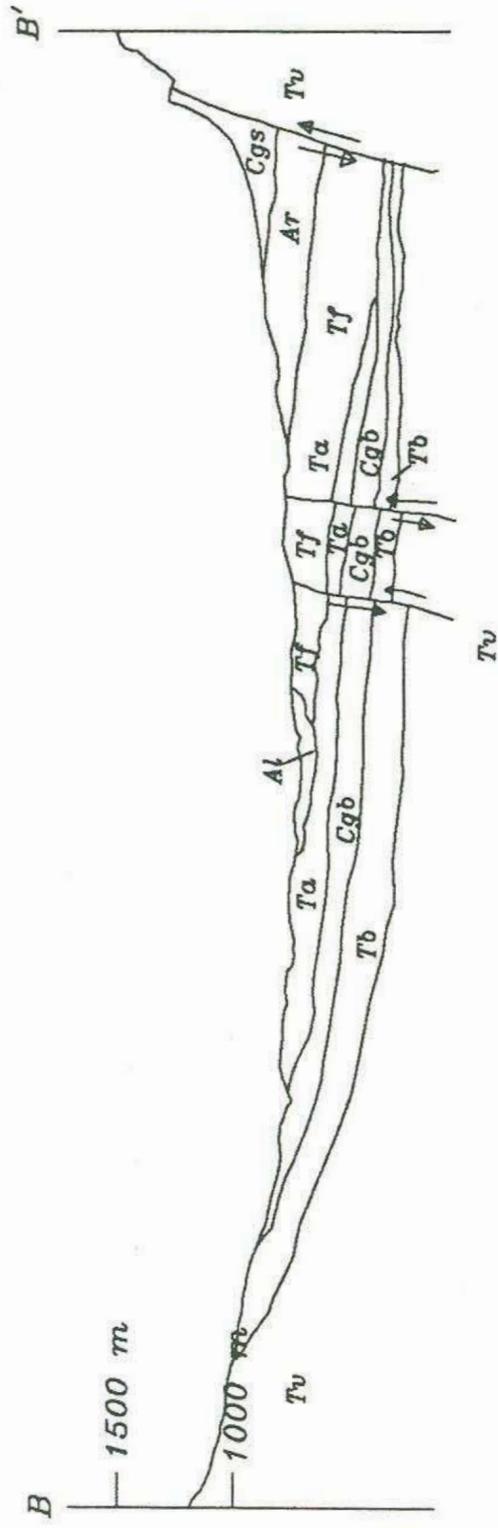


GEOLOGIA DEL VALLE DE BACADEHUACHI

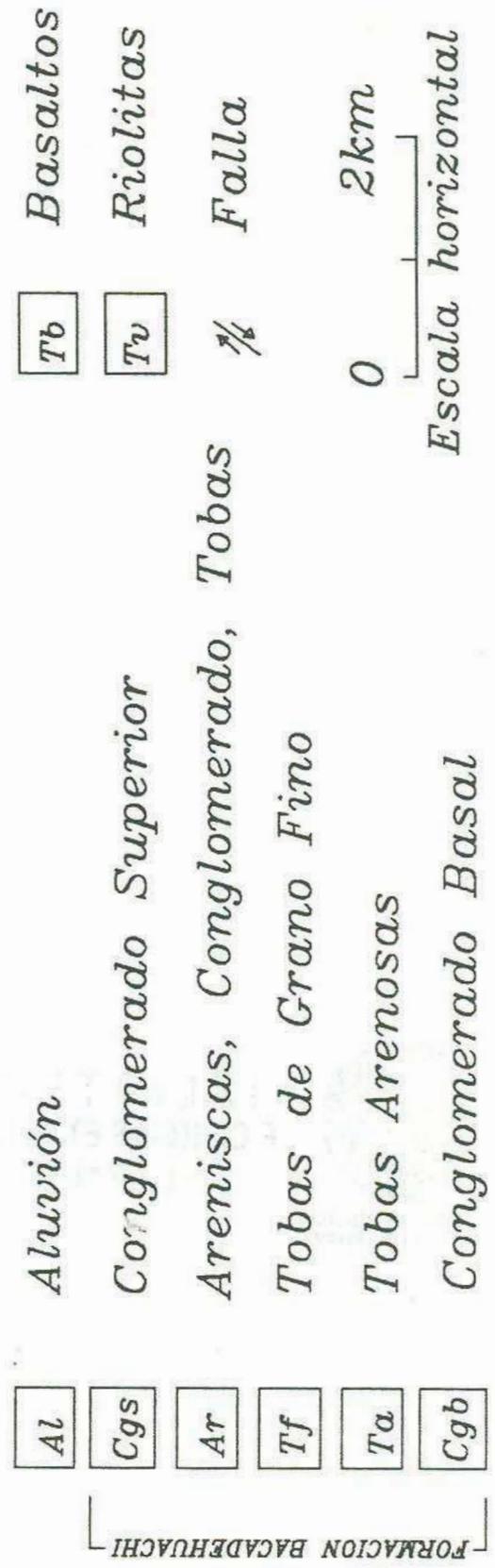
Modificado de Berlanga (1993)

Figura 5

CUENCA DE BACADEHUACHI



SECCION GEOLOGICO-ESTRUCTURAL DE LA CUENCA DE BACADEHUACHI



FORMACION BACADEHUACHI



Figura 6

Modificado de Berlanga (1993)

La matriz de este conglomerado está constituida por arenas de 0.5 a 1.0 milímetros de diámetro que a su vez se encuentran dentro de una pseudomatriz limo-arcillosa.

El espesor de la unidad puede variar desde 100 y hasta 290 metros. Su echado es de 11° a 13° hacia el Este y se comporta más o menos constante. Su contacto inferior representa un intervalo de erosión ya que sus clastos están algo redondeados.

Tobas Arenosas

Esta unidad sobreyace al conglomerado base y sus afloramientos están mejor expuestos en la parte suroeste del valle pues hacia el norte tiende a acuñarse además de estar cubierta por gravas y suelos recientes.

Se compone de tobas arenosas y limolíticas, su color varía entre gris, café y en ocasiones rojizas. Se encuentran intercaladas con delgados horizontes de areniscas de grano medio de colores claros y compuestas por fragmentos de roca y minerales subredondeados. La abundancia de estas capas de arenisca es característica de esta unidad, donde también se encuentra al menos un horizonte de zeolitas compuesto de analcima y clinoptilolita, principalmente.

El espesor de esta unidad es muy variable pero se considera menor a los 100 metros. Tiene un echado de 6° a 8°, preferentemente hacia el Este, aunque muy localmente se encontró hacia el Oeste.

Su contacto con la unidad que la infrayace, en la porción sur del valle, es gradual y difícil de precisar, notándose por los cambios en el color de gris a crema, en el tamaño del grano que es más fino y en el aumento de proporción de

las capas arcillosas. En cambio, en la porción media del valle, este contacto es claro y concordante con la unidad inferior.

Tobas de Grano Fino

Continuando estratigráficamente hacia arriba, en la parte central del valle y rumbo al este del mismo, aflora este paquete de tobas. La extensión de sus afloramientos es de al menos ocho kilómetros longitudinalmente y dos kilómetros en promedio en sección transversal. Hacia la margen sur del valle, cerca de la base de la cuenca, estos sedimentos se acuñan, mientras que hacia el norte se encuentran cubiertos por sedimentos recientes.

Esta unidad, en sus afloramientos, semeja sedimentos arcillosos, pero en realidad se trata de tobas bastante homogéneas, masivas, de colores café claro a rojizo. Megascópicamente se observan pequeños huecos de menos de dos milímetros de diámetro de forma irregular, producto de disolución o alteración de minerales. Estas tobas, o cenizas volcánicas, parecen haber sido depositadas en un ambiente acuoso que quizá implique un poco de transporte en suspensión de este material fino. Petrográficamente se describió como una toba alterada o lutita feldespática derivada de rocas volcánicas compuesta principalmente por clorita y sericita con cantidades menores de cuarzo, feldespatos, calcita, óxidos de hierro y cristales de sulfato de sodio (M. Fernández, comunicación personal).

Dentro de este paquete y en forma esporádica, se encuentran algunos lentes arenosos con clastos subredondeados, más o menos bien clasificados y de colores claros. Además, se encuentran algunos horizontes de material calcáreo con espesores de 10 a 15 centímetros y actitud similar al resto de la unidad. El estudio de lámina delgada indica que estos horizontes están compuestos por un 97% de calcita con un arreglo de mosaico, con poco cuarzo y



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA

fragmentos de feldespatos.

También, en la parte superior de esta unidad, se observan una gran cantidad de vetillas de yeso de dos a ocho centímetros de espesor. Su actitud, aunque cambiante, es de preferencia semi-horizontal con echados variables al Este y Oeste de 3° a 8° y algunos verticales, siendo esto último poco frecuente. Estas vetillas se observan solo en la margen este del arroyo Bacadéhuachi en una franja de unos cinco kilómetros de longitud con rumbo Norte-Sur.

El espesor para esta unidad se estima de más de 300 metros, sus echados varían entre 5° y 13° al Este.

Entre esta unidad y la que la infrayace, existe un gran parecido físico, por lo que su contacto no está bien definido, aunque parece ser gradual. No se descarta la posibilidad de que se trate de una misma unidad, siendo la diferencia entre ambas la marcada abundancia de horizontes de arenisca en la unidad inferior. Dichos horizontes se presentan solo de manera esporádica en esta unidad de Tobas de Grano Fino.

Areniscas, Conglomerados y Tobas

Continuando en sección transversal dentro del valle y hacia el Este, se encuentra esta unidad que se considera transicional entre el paquete de Tobas de Grano Fino y el Conglomerado Superior.

Esta unidad consta de areniscas de grano fino a medio y limolitas (o tobas ?) de color café claro, interestratificadas con conglomerados arenosos de colores oscuros con 10 a 15 centímetros de espesor. Los clastos de estos

conglomerados son de roca de composición intermedia a ácida, con tamaños de dos a ocho milímetros, de forma irregular y por lo general aplanados y dentro de una matriz arenosa donde predominan los minerales claros. Hacia la cima de la unidad se aprecian algunos nódulos aparentemente tobáceos de color blanco, forma irregular y diámetro de dos a cuatro centímetros. Esto último podría indicar un evento piroclástico contemporáneo al depósito de esta unidad. En lámina delgada se aprecian cristales de sulfatos, calcita y material volcánico además del detrítico, lo que hace suponer un ambiente de cuenca evaporítica contemporánea con eventos volcánicos.

El espesor de esta unidad no fue bien determinado pero no se considera mayor a 100 metros y su actitud es similar a la de las unidades adyacentes. Su contacto inferior es transicional siendo notable la presencia de las vetillas de yeso descritas en la zona de contacto con la unidad de Tobas de Grano Fino.



Conglomerado Superior

Es la unidad más joven de la Formación Bacadéhuachi. Sus afloramientos se encuentran solo en la porción este del valle en una franja de más de ocho kilómetros de longitud y son muy evidentes.

Esta unidad está formada por conglomerados, conglomerados arenosos y areniscas interestratificadas. Los clastos son de riolitas y andesitas de colores blanco a gris, de tamaños irregulares, aplanados y angulosos, su diámetro varía entre 10 y 15 centímetros y su distribución es caótica. Snively (1991) reporta horizontes de ignimbritas interestratificadas con los conglomerados.

Esta unidad es un poco variable en su actitud pues sus echados son de entre 5° y 8° con dirección entre el Este y el Noreste. Su contacto inferior es gradacional.

Sedimentos Recientes

La Formación Bacadéhuachi ha estado sujeta a una fuerte erosión ocasionada principalmente por el arroyo del mismo nombre, el cual actualmente drena de Norte a Sur siguiendo la zona de transición entre las unidades Tobas Arenosas y Tobas de Grano Fino. Tanto el arroyo como las sierras que circundan al valle, han aportado gran cantidad de gravas y bloques, además de suelos y que forman tanto las terrazas aluviales como los sedimentos fluviales que cubren actualmente a las unidades antes descritas.

Rocas ígneas

Como ya se ha indicado, la Cuenca de Bacadéhuachi evolucionó sobre un basamento de rocas extrusivas félsicas y básicas. Localmente las tobas y flujos riolíticos conforman gran parte de las sierras que bordean la cuenca y sus afloramientos dan origen a los imponentes cañones como el de La Cruz del Diablo, en la Sierra de Villa Hidalgo.

Las riolitas se presentan de color rojo, rosa y café rojizo. Su textura puede ser porfirítica o afanítica y vesicular. Están formadas por cuarzo y feldespato alcalino que por lo general se encuentra en la fracción criptocristalina. Los derrames se caracterizan por su textura fluidal. Estas rocas se encuentran intercaladas con dacitas-andesitas de color verde oscuro con matriz afanítica y fenocristales de plagioclasa como minerales esenciales y anfíbolos y piroxenos como accesorios.

Sobre estas riolitas, en el margen sur y sureste del valle, aflora un paquete de rocas basálticas que constituyen el basamento de los sedimentos de la cuenca. Toda esta secuencia volcánica se encuentra buzando suavemente hacia el Este en un ángulo menor a 15°. Esta actitud se atribuye a las estructuras regionales que moldearon la Provincia "Basin and Range".

Edad de la Cuenca y Correlación

Para tratar de ubicar en el tiempo la formación y el desarrollo de la Cuenca de Bacadéhuachi, se determinó la edad de las rocas basálticas sobre las que se desarrolló. La roca analizada se tomó de un afloramiento localizado en la parte sur de la cuenca en las coordenadas 29°47'13" latitud Norte y 109°10'21" longitud Oeste. La determinación se efectuó en la Universidad de Arizona por el Dr. M. Shafiqullah, utilizando el método Potasio-Argón.

La edad reportada para estos basaltos fue de 28.9 ± 0.6 millones de años, por lo que se ubican a fines de la Epoca Oligoceno y se pueden correlacionar con la "Secuencia Basáltica Oligoceno-Mioceno" descrita por Cochemé y Demant (1991) en la sección que elaboraron desde Mesa del Huracán hasta Mazocahui. De acuerdo a estos autores los basaltos de su secuencia son morfológicamente análogos a los basaltos toleíticos de provincias continentales, lo cual coincide con el resultado obtenido por el suscrito al graficar en un diagrama AFM la composición química de los basaltos de Bacadéhuachi (ver capítulo de Química de Rocas).

El término de la "Secuencia Basáltica Oligoceno-Mioceno", hace 17 millones de años aproximadamente, coincide con los primeros desarrollos de estructuras "Basin and Range" y es hasta entonces que se tienen las primeras acumulaciones de los sedimentos de la Formación Báucarit. En este trabajo se

estima que los sedimentos de la Cuenca de Bacadéhuachi podrían ser contemporáneos a los de dicha formación, habiendo existido un período de erosión entre los basaltos del piso de la cuenca y las primeras acumulaciones de la unidad descrita como Conglomerado Basal.

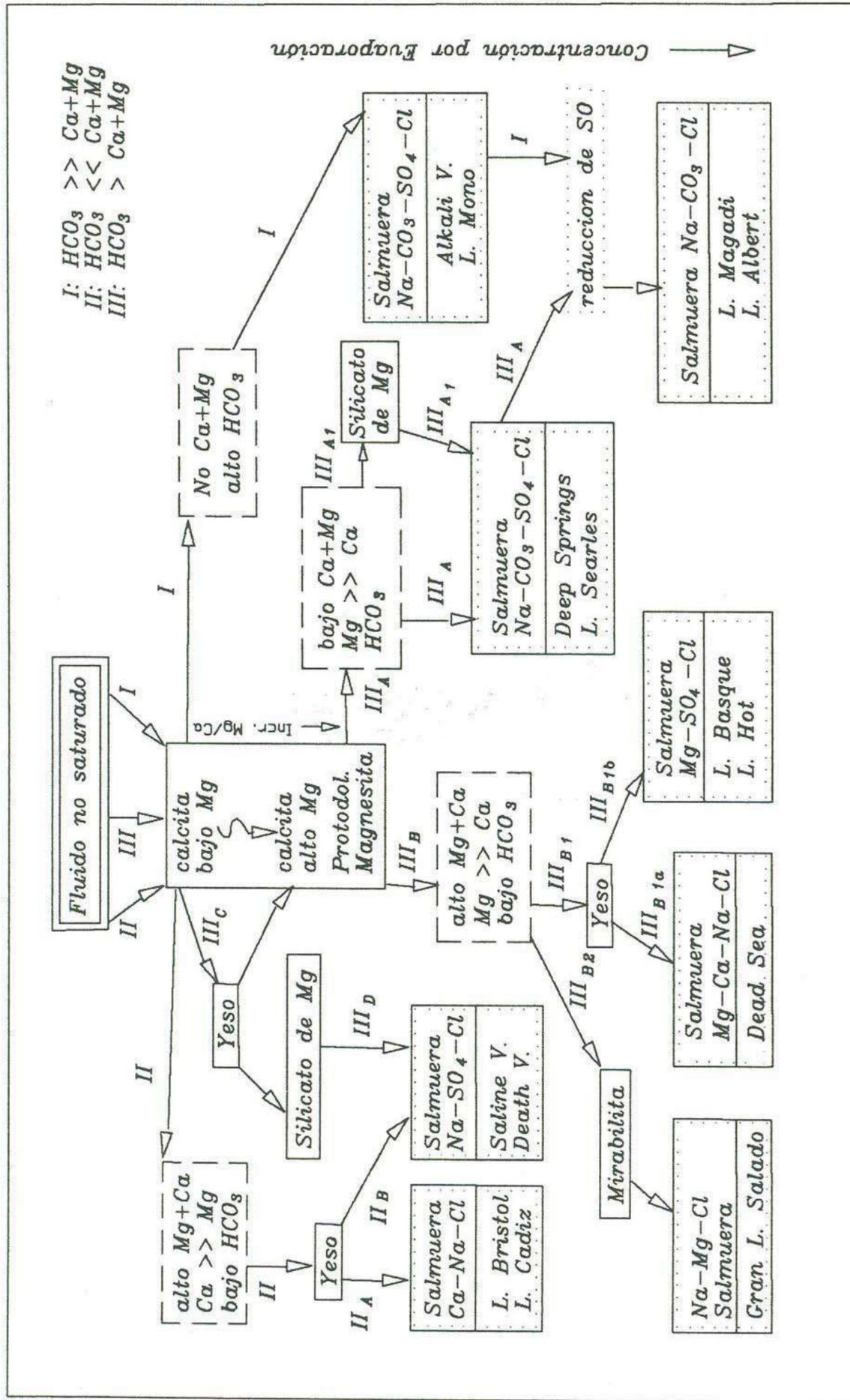


EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA

Evolución del Depósito

El análisis químico que Minerales para la Industria, S.A. de C.V. efectuó del agua de los manantiales y arroyos de la Cuenca de Bacadéhuachi, se elaboró para buscar elementos que contribuyeran a conocer más sobre la evolución de la salmuera de donde precipitaron las sales de sodio del lugar. Los resultados obtenidos indican que la composición química actual de estas aguas es diferente de aquellas en que se precipitaron originalmente dichas sales. Lo anterior se apoya en el diagrama de evolución de salmueras (Figura 7) de Eugster (1980) donde para obtener una salmuera de la que precipiten como sales primarias, en condiciones ambientales normales, yeso, globerita, tenardita y mirabilita, se debe evolucionar a partir de un fluido donde el contenido de $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{CO}_3 + \text{HCO}_3$, siendo a su vez $\text{Ca} > \text{Mg}$. Posterior a la precipitación del yeso y manteniéndose el sulfato en el sistema, se constituiría una salmuera del tipo $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$ de la que precipitarían además del yeso las sales glauberita, mirabilita y tenardita, completando el sistema la halita (Eugster, 1980).

Los resultados reportados de las muestras de agua analizadas indicaron la predominancia del HCO_3 sobre el contenido del $\text{Ca} + \text{Mg}$ lo cual llevará a la formación de salmueras del tipo $\text{Na-CO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$. De esta salmuera, además de tenardita y mirabilita, precipitarían sales de carbonato de sodio lo cual no se ha detectado en el depósito.



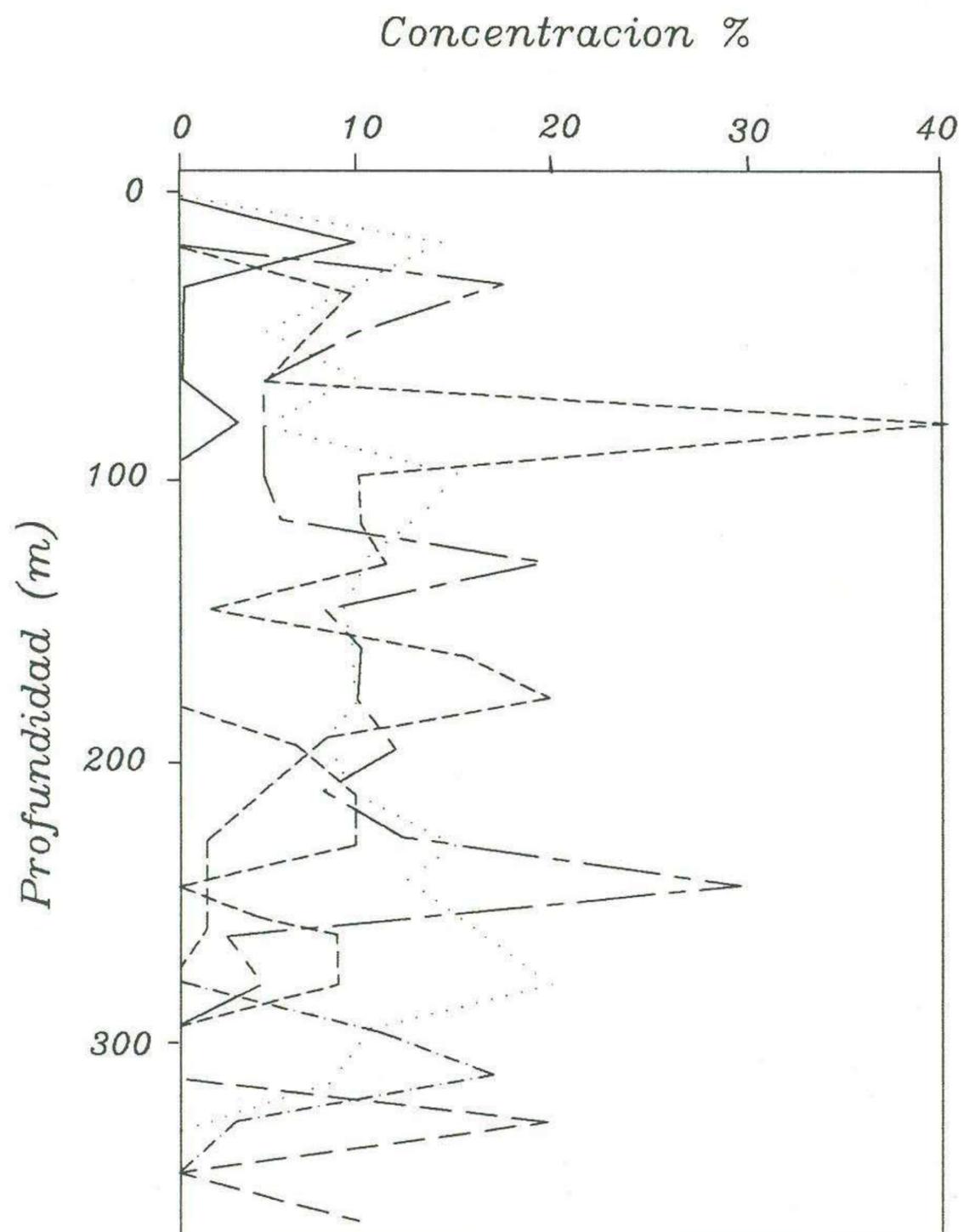
FLUJO DE EVOLUCION DE SALMUERAS

Para complementar los trabajos sobre la evolución del depósito de sales se efectuó un análisis de difracción de rayos X de muestras obtenidas del subsuelo (Ochoa *et al.*, 1991). De este estudio se definió la presencia de calcita, anhidrita, dolomita, glauberita y tenardita como minerales evaporíticos, además de analcima como mineral autigénico y yeso secundario.

Tomando la concentración relativa reportada por el laboratorio de las sales identificadas y graficándola contra la profundidad en la que se detectó (Figura 8), se efectuó una interpretación de como pudo haber evolucionado la cuenca dentro de ese intervalo muestreado. De acuerdo a esto, se cree que inicialmente la cuenca fue rellenada por material clástico consistente de cuarzo, feldespato y mica, posiblemente en un ambiente fluvial pues las muestras más profundas solo reportaron estos minerales. El cambio a condiciones lacustres está marcado por los primeros depósitos de calcita, dolomita y anhidrita registrados en el intervalo de los 370 metros hasta los 210 metros de profundidad. Un pronto incremento de la salinidad detectado a los 300 metros y que se acentúa a los 200 metros da inicio al depósito de las sales de sulfato, lo cual continúa hasta la superficie.

Debe observarse la relación entre la analcima y el sulfato de sodio que en la gráfica se presenta como una leve disminución del primer mineral cuando precipitan grandes cantidades del segundo. Esto se debe a que la constante presencia de analcima, mineral representativo de ambientes altamente alcalinos y salinos, podría contraponerse al ambiente de precipitación del sulfato de sodio, el cual tiende a ser más neutro.





CONCENTRACION DE SALES EN EL SUBSUELO DEL VALLE DE BACADEHUACHI

- | | |
|----------------|-----------------|
| — Glauberita | - - - Tenardita |
| — Yeso | Analcima |
| - - - Calcita | - - - Anhidrita |
| - - - Dolomita | |

Modificado de Ochoa et. al., 1991

Figura 8

En cuanto al yeso reportado a profundidades menores de 100 metros, que precipitó como mineral primario de la salmuera que originó al resto de las sales, se considera que fué removilizado a su posición actual, pues en el campo se observa en delgadas vetillas que rellenan fracturas inclusive de unidades litológicas posteriores a la que aloja al resto de las sales de la cuenca.

Análisis de Isótopos

Para poder formular hipótesis sobre el origen de los elementos que constituyen al sulfato de sodio (Na_2SO_4), así como del elemento que propició su posible movilización se efectuaron algunos análisis de isótopos estables de hidrógeno, oxígeno y azufre tanto de muestras de agua de manantiales de la región así como de agregados cristalinos de tenardita. Estos estudios fueron realizados por el suscrito en el laboratorio de geoquímica de la Universidad de Arizona dirigido por los Drs. J. Ruiz y C. J. Eastoe.

Isótopos de Hidrógeno y Oxígeno

Considerando que el determinar el tipo de solución en el cual los iones de sulfato y sodio pudieron haber sido transportados podría dar más indicadores sobre el posible origen y el ambiente de precipitación de la tenardita, se escogieron varias muestras de agua de los manantiales activos en la cuenca. Estas aguas son vertidas a temperatura ambiente y los resultados obtenidos varían para el incremento de deuterio entre -67 y -48 ‰ y para el de oxígeno entre -9.7 y -8.5 ‰, lo cual indica que las aguas muestreadas son de origen meteórico (Figura 9).

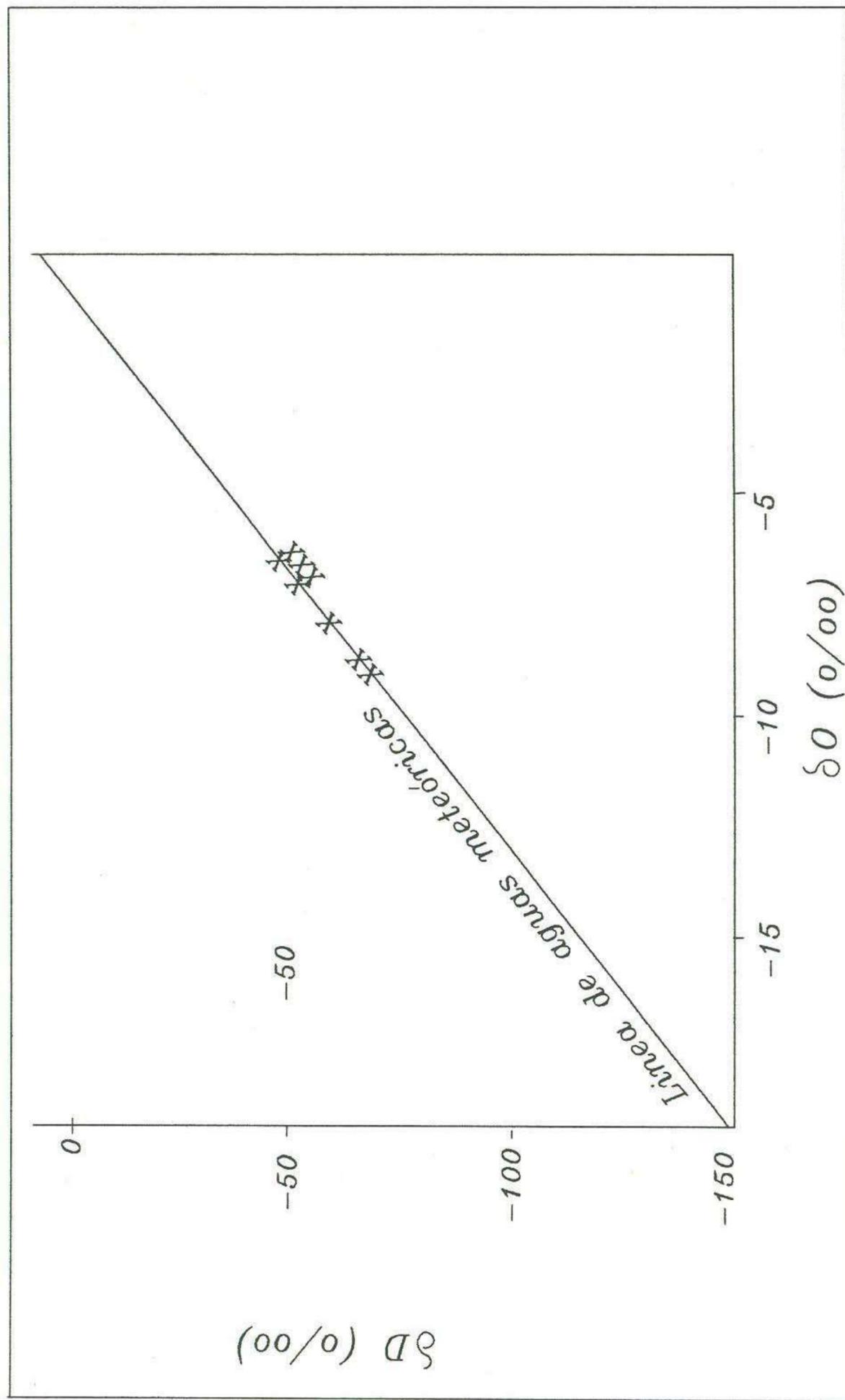


DIAGRAMA DE ISOTOPOS DE AGUA DE MANANTIALES
DEL VALLE DE BACADEHUACHI

X Muestras de manantiales

Figura 9

Si consideramos que el aporte principal de agua a la cuenca ha sido desde sus inicios mediante un sistema de manantiales similares al actual, entonces debemos suponer la infiltración de las aguas a través de las rocas de la región, las cuales fueron lixiviadas y aportaron los elementos constitutivos de los iones de sulfato y de sodio. Posterior a esto, los manantiales vertieron sus fluidos a la superficie, los cuales quedaron confinados dentro de una cuenca cerrada donde mediante evaporación se concentraron y precipitaron las sales de sulfato.

Isótopos de Azufre

En cuanto a la determinación del posible origen del ión sulfato, se efectuó un análisis de isótopos estables de azufre de muestras tanto de cristales de tenardita como de aguas de manantiales. Los resultados obtenidos indican un rango de valores entre 6.3 y 8.4 unidades de $\delta^{34}\text{S}$ obtenidos de la diferencia entre las lecturas de isótopos de masa 66 ($^{34}\text{S}^{16}\text{O}_2$) y masa 64 ($^{32}\text{S}^{16}\text{O}_2$) lo cual lo sitúa dentro de un rango de origen ígneo pero también se incluye dentro de un ambiente sedimentario (Figura 10).

Tomando en cuenta la geología que rodea a la Cuenca de Bacadéhuachi, se observa que ésta evolucionó sobre un basamento dominado en forma total por rocas volcánicas. Esto incrementa la posibilidad de que el ión azufre (^{34}S) que compone al ión sulfato de la tenardita, fuera obtenido de las rocas volcánicas, aunque no se debe descartar la posibilidad de un origen relacionado con rocas sedimentarias.

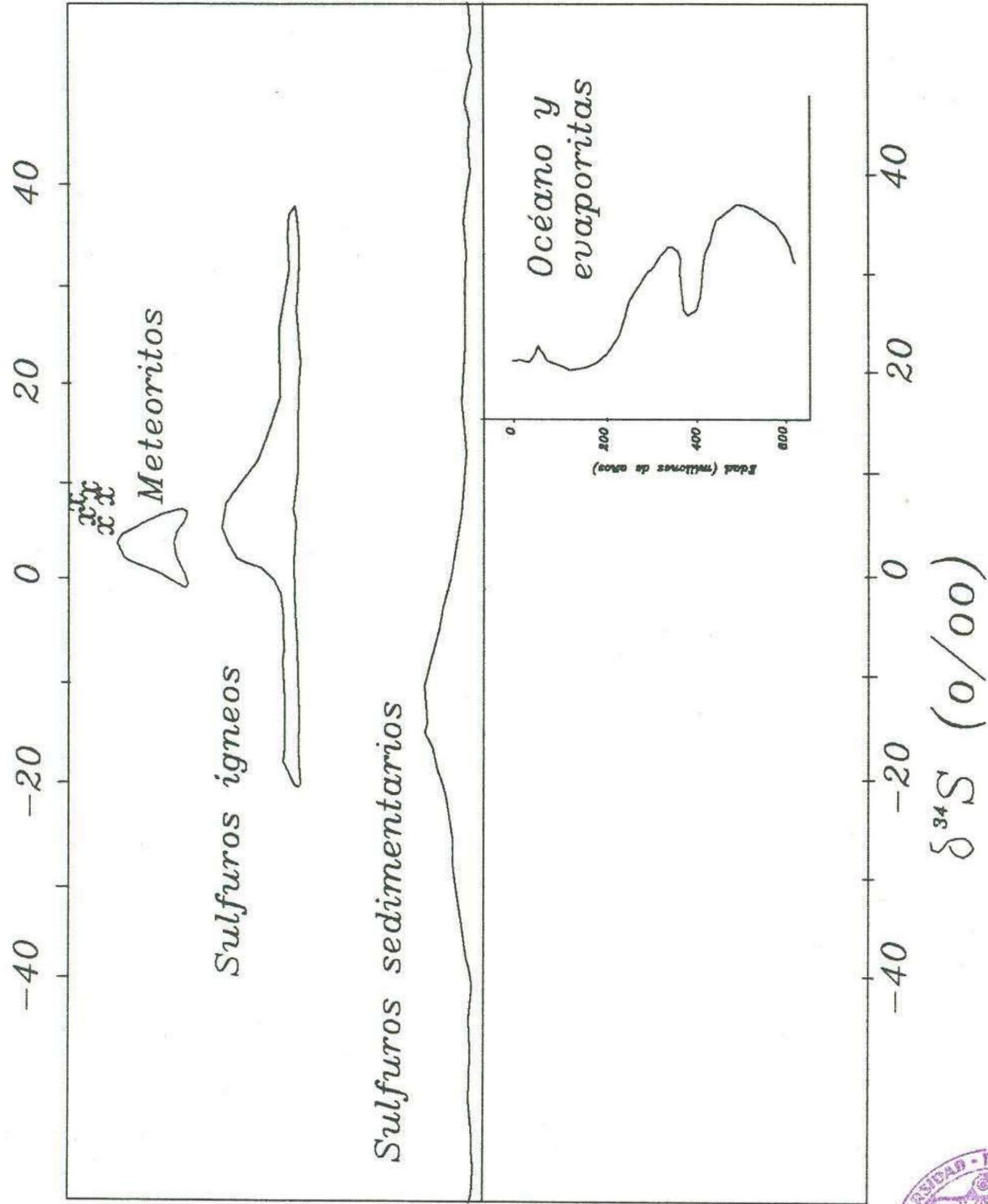


DIAGRAMA DE ISOTOPOS DE AZUFRE



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA

x Muestra

Culbert & Parré, 1986.

Figura 10

Química de Rocas

Continuando con el objetivo de conocer más sobre el origen de las rocas que formaron la Cuenca de Bacadéhuachi, el suscrito muestreó algunos afloramientos de basaltos para efectuar análisis químicos de roca total, elaborados posteriormente por los Laboratorios ACME de Vancouver, Canada.

Los resultados fueron procesados para obtener la norma CIPW a partir de la cual se obtuvieron los parámetros que permitieron elaborar las gráficas tanto de un diagrama AFM como la de clasificación de rocas volcánicas (Figura 11).

En el diagrama AFM se observa como dominan los óxidos de hierro y magnesio sobre los álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$), lo cual sitúa a los basaltos del área de Bacadéhuachi dentro de un contexto toleítico, similar al que Cochemé y Demant (1991) describen para los basaltos de su "Serie Basáltica Oligoceno-Mioceno".

En cuanto a la clasificación de los basaltos, éstos se graficaron dentro de los basaltos alcalinos, andesitas basálticas y traqui-andesitas.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA

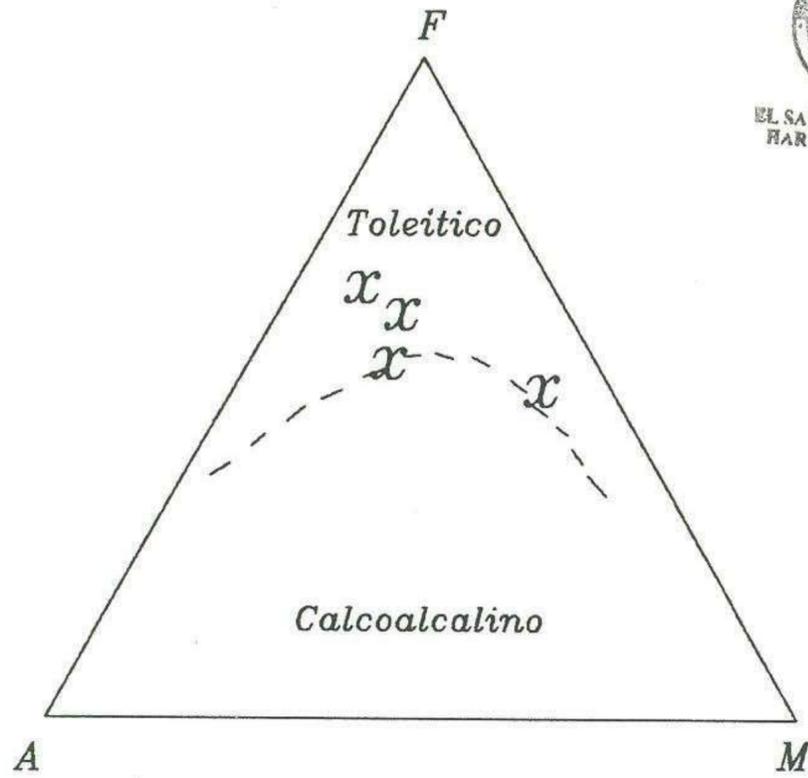
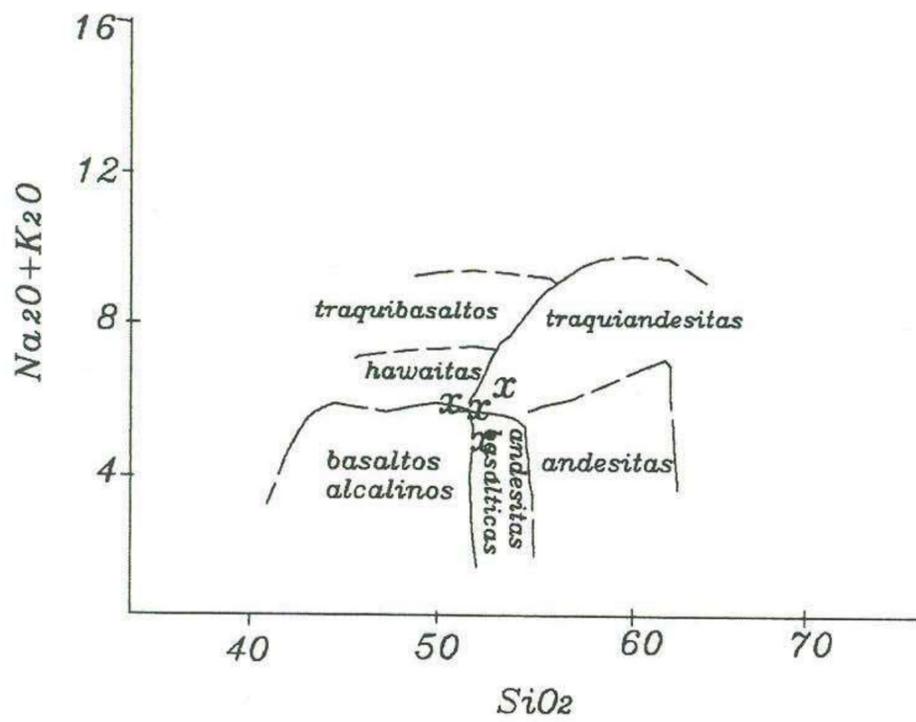
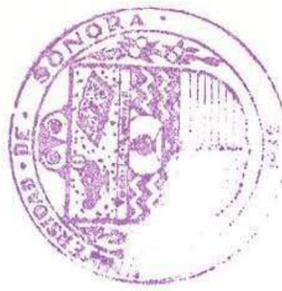


Diagrama AFM de Irvine & Baragar para los Basaltos del Valle de Bacadéhuachi



Clasificación de los basaltos del Valle de Bacadéhuachi (Cox, et al., 1979)

Figura 11



CONCLUSIONES

Del análisis de la información compilada por el autor para el presente trabajo se pudo concluir que:

- En la región donde se encuentra el Valle de Bacadéhuachi afloran rocas volcánicas terciarias y además rocas de las eras Paleozoica y Mesozoica.
- Como elementos estructurales, en la región se ha reconocido un arco volcánico cordillerano el cual debió de haber estado activo desde principios del Período Cretácico. También la actividad de al menos una megacaldera que debió estar integrada al megacampo volcánico de la Sierra Madre Occidental, activo desde las épocas Oligoceno-Mioceno.
- También de gran importancia fueron los rasgos derivados del fallamiento resultante de los esfuerzos extensionales que originaron la provincia de "Basin and Range".
- La historia geológica de la Cuenca de Bacadéhuachi se desarrolló durante la parte media del Período Terciario y continúa hasta el presente.
- Localmente las rocas más antiguas son las riolitas y basaltos sobre las que descansa una secuencia volcano-sedimentaria denominada de manera informal "Formación Bacadéhuachi" y que está compuesta por cinco unidades litológicas.
- La edad del basamento de la cuenca se determinó a partir de una roca basáltica por el método K/Ar habiéndose obtenido un valor de 28.9 ± 0.6 millones de años, por

lo que se ubica a fines de la época Oligoceno y se pueden correlacionar con la "Secuencia Basáltica Oligoceno-Mioceno" descrita por Cochemé y Demant (1991).

- La precipitación del sulfato de sodio en la cuenca de Bacadéhuachi debió ser a partir de una salmuera del tipo $\text{Na-SO}_4\text{-Cl}$.

- Se definió la presencia de calcita, anhidrita, dolomita, glauberita y tenardita como minerales evaporíticos primarios, además de analcima como mineral autigénico y yeso secundario.

- Los análisis de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno indican que las aguas del Valle de Bacadéhuachi corresponden a aguas meteóricas las que hipotéticamente, en los inicios de la cuenca, pudieron adquirir los iones de sulfato y de sodio a partir de la lixiviación de rocas del subsuelo durante su paso a través de ellas.

- Los isótopos de azufre indicaron un posible origen ígneo, aunque también podrían quedar incluidos en los de origen sedimentario.

- Análisis químicos de roca total indicaron que las rocas basálticas de Bacadéhuachi pertenecen a un contexto toleítico en general y se clasifican como andesitas basálticas, traquiandesitas y traquibasaltos.



RECOMENDACIONES

Se recomienda efectuar trabajos de estratigrafía en las cuencas adyacentes de Nácori Chico y Huásabas para establecer la relación que guardan con la de Bacadéhuachi.

También un estudio detallado que incluya la geoquímica de aguas y sedimentos podría aclarar los diferentes ambientes de depósito de estas cuencas y ayudar a su correlación en el espacio.

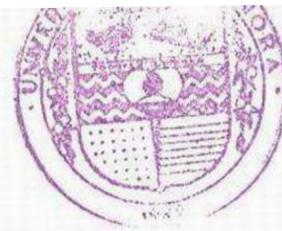
Se debe realizar un muestreo mayor para efectuar más determinaciones químicas de roca y así clasificar con certeza las rocas basálticas del área.



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
BIBLIOTECA DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingeniería
Depto. Geología
BIBLIOTECA



EL SABER DE MIS HIJOS
HARA MI GRANDEZA
Escuela de Ingenieros
Depto. Geología
BIBLIOTECA

BIBLIOGRAFIA

Berlanga, E.R. 1993. The Bacadéhuachi Thenardite Deposit. Presentado en: AIME Annual Meeting. Reno, Nevada. 29 pp.

Cochemé, J.J., Demant, A. 1991. Geology of the Yécora Area, North Sierra Madre Occidental, México. en Studies of Sonoran Geology, Ed. Efrén Pérez-Segura and César Jacques Ayala, G.S.A. Special Paper No. 254. pp. 81 - 94.

Cox, K.G., Bell, J.D., Pankhurst, R.J. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen and Unwin. London.

Damon, P.E., Shafiqullah, M., Clark, K.F. 1981. Age Trends of Igneous Activity in Relation to Metallogenesis in the Southern Cordillera. Ariz. Geol. Soc. Dig. No. 14. pp. 137-154.

Demant, A., Cochemé, J.J., Monyigny, R., Joron, J.L. 1993. The Tertiary Yecora Caldera, Sonora, México. en III Simposio de la Geología de Sonora y Areas Adyacentes. Resúmenes y Libreto Guía. UNAM-Uni-Son. pp 173-184.

Elston, W.E. 1984. Subduction of Young Lithosphere and Extensional Orogeny in Southern North America during Mid-Tertiary Age. Tectonics. Vol. 3, no. 2. pp. 229-250.

Eugster, H.P., 1980. Geochemistry of Evaporitic Lacustrine Deposits. Ann. Rev, Earth Planet. Sci. pp. 35-63.

Gilbert,J., Park,Ch. 1986. The Geology of Ore Deposits. W.H. Freeman and Company, New York. 985 pp.

Hall,W.E., Friedman,I. and Nash,J.T. 1974. Fluid Inclusion and Light Stable Isotope Study of the Climax Molibdenum Deposits, Colorado. Economic Geology. Vol. 69. pp 884-901. in Gilbert,J., Park,Ch. 1986. The Geology of Ore Deposits. W.H. Freeman and Company, New York. 985 pp.

INEGI. 1981. Carta Fisiográfica Tijuana escala 1:1,000,000

McDowell,F.W., Clabaugh,S.E. 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the Tectonic History of Western Mexico. en Chapin,C.E., Elston,W.E., eds., Ash-flows tuffs. Geological Society of America, Special paper 180. pp. 113-124.

Ochoa,L., Armijo,N., Barrera,L. 1991. Exploración por Carbonato de Sodio en la Cuenca de Bacadéhuachi, Son. M. P. I., S.A. de C.V. Reporte interno. 40 pp.

Orozco H.,L., Cervantes,A. 1986. Reporte de avance de la exploración geológico-minera del proyecto Bacadéhuachi, Sonora, México. M. P. I., S.A. de C.V. Reporte interno. 53 pp.

Roldán,J., Amaya,R., Cendejas,F. 1993. Geología de la Porción Oriental de Sonora Carretera Hermosillo- Yécora. en III Simposio de la Geología de Sonora y Areas Adyacentes. Resúmenes y Libreto Guía. UNAM-Uni-Son. pp 173-184.

Snively, Norman. 1991. Reconocimiento Geológico del Valle de Bacadéhuachi, Sonora, México. M. P. I., S.a. de C.V. Reporte Interno. 5 pp.