

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



**DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA APLICADA**

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA EN EL  
ACUÍFERO DEL VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA,  
MÉXICO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**EDGARDO TEJADA BAUTISTA**

Ensenada, Baja California, México, 21 de Noviembre de 2003

**RESUMEN** de la tesis de **Edgardo Tejada Bautista**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **CIENCIAS DE LA TIERRA** con orientación en **GEOFÍSICA APLICADA**. Ensenada, Baja California, Noviembre de 2003.

## **ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**

Resumen aprobado por:

Dr. Rogelio Vázquez González  
Director de Tesis

El agua subterránea en la zona del valle de Mexicali ha sido afectada en cantidad y calidad por la explotación intensiva ocasionada por las actividades agrícolas. Otro aspecto particular de esta región, que tiene relación con las condiciones hidrogeoquímicas del acuífero, es la actividad geotérmica presente. La importancia del recurso ha motivado la ejecución de diversas campañas de muestreo y análisis de la calidad del agua subterránea, por parte de la Comisión Nacional del Agua (CNA), esta información es básica para estudiar la evolución del sistema geohidrológico y determinar los factores de mayor importancia en el acuífero. En este trabajo se analiza detalladamente información hidrogeoquímica de los pozos del acuífero del valle de Mexicali, para definir el tipo y calidad de agua, asimismo se establece la correlación con la litología presente en el área considerando la dirección de flujo subterráneo.

El área en estudio se ubica al noreste de Baja California, cubriendo una extensión aproximada de 5600 km<sup>2</sup>. Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó una base de datos hidrogeoquímicos proveniente de 228 pozos para un periodo de ocho años (1987-1995 excepto 1993). Después de un proceso de recopilación, análisis y depuración utilizando entre otros el criterio del balance iónico, se obtuvieron un total de 918 análisis químicos con las concentraciones (en ppm) de seis iones principales: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> y de sólidos totales disueltos (STD). Con base en esta información se hizo la caracterización hidrogeoquímica del acuífero, considerando: a) los resultados del tipo o familia de agua en función de los iones dominantes, b) la calidad del agua de acuerdo a la concentración de STD y, c) las variaciones del tipo de agua tomando en cuenta la dirección de flujo subterráneo.

Como resultado se presentan y discuten mapas del área de estudio donde se muestra la distribución espacial de los pozos, su clasificación en familias de agua y la concentración de STD. La caracterización hidrogeoquímica del acuífero forma la base para postular un modelo conceptual capaz de explicar las condiciones actuales.

**Palabras clave:** caracterización hidrogeoquímica, sólidos totales disueltos, flujo subterráneo, valle de Mexicali, correlación litológica.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Edgardo Tejada Bautista** as a partial requirement to obtain the **MASTER OF SCIENCE** degree in **EARTH SCIENCE** with orientation in **APPLIED GEOPHYSICS**. Ensenada, Baja California, Mexico. November 2003.

## **ANALYSIS AND CHARACTERIZATION HYDROGEOCHEMISTRY IN THE AQUIFER OF THE MEXICALI VALLEY, BAJA CALIFORNIA, MEXICO**

The groundwater in the zone of the valley of Mexicali has been affected in amount and quality by the intensive operation caused by the agricultural activities. Another particular aspect of this region, that has relation with the hydrogeochemistry conditions of the aquifer, is the geothermal activity present. The importance of the resource has motivated the execution of diverse campaigns of sampling and analysis of the groundwater quality, by Comision Nacional del Agua (CNA), this information is basic to study the evolution of the geohydrologic system and to determine the factors of greater importance in the aquifer. In this work hydrochemistry information of wells of the aquifer of the valley of Mexicali is analyzed in detail, to define the type and quality of the groundwater, also settles down the correlation with the present litology in the area considering the direction of underground flow.

The area in study is located in the northeast of Baja California, covering an approximated extension of 5600 km<sup>2</sup>. For the development of the present work a hydrochemistry database originating from 228 wells for a period of eight years was used (1987-1995 except 1993). After a process of compilation, analysis and depuration using among others the criterion of the ionic balance, a total of 918 chemical analyses with concentrations (in ppm) of six main ions was obtained: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and Cl<sup>-</sup> and total dissolved solids (TDS). Based in this information the hydrogeochemistry characterization of the aquifer, was performed considering: a) the results of the type or water family based on dominant ions, b) the quality of the water according to the STD concentration and, c) the evolution of the water, taking into account the direction of underground flow.

As result appears and discusses maps of the area where it is display the space distribution of wells were configured and discuss, its classification in water families and the concentration of TDS. The hydrogeochemistry characterization of the aquifer forms the base to postulate a conceptual model that explains the present conditions.

**Keywords:** hydrogeochemistry characterization, totals dissolved solids, subterranean flow, Mexicali valley, lithologic correlation.

## DEDICATORIA

*A mis amados padres ACELA y ANTONIO por creer en mi, por su esfuerzo y por su apoyo incondicional en todo momento.*

*A mis adorables hermanas AGLAE y MAYRA ACELA por su confianza y por estar siempre cerca de mi.*

*A mis respetables abuelos.*

*A mis apreciables tíos.*

*A mis queridos primos.*

*A Sergio, Miguel, Lety, Andrés, Lucero, Marcos, Saúl, Laura, Fabiola y Alejandro por estar conmigo en todo momento.*

*A Mary y Anita por hacer especial mi vida en Ensenada con su amistad.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi amigo y director de tesis: Dr. Rogelio Vázquez González por su confianza e incondicional apoyo en la realización de este trabajo.

A los miembros de mi comité de tesis: M.C. Francisco Suárez Vidal, Dr. Arturo Martín Barajas, Dr. Marco Antonio Pérez Flores y Dra. María Lucila Lares Reyes por su disposición, paciencia y orientación en el desarrollo del trabajo.

Al Dr. Thomas Kretzschmar por sus asesorías en este trabajo.

A Humberto S. Benítez Pérez, Ramón Mendoza Borunda, Rufino J. García López, José de J. Mojarro Bermúdez, Alejandro Díaz Fernández y Jaime Calderón González por su apoyo técnico en esta investigación y por su amistad.

A Martha E. Barrera López, Guadalupe Zepeda Tapia, Concepción González Martínez, María del Carmen Pérez Aguilar e Ivonne Pedrín Morales por su apoyo en las labores administrativas.

A Marisela Aguilar Juárez y Ana Rosa Soto Rincón por su valiosa amistad y apoyo.

Al CONACyT que me brindó los medios para realizar mis estudios de maestría a través de la beca-crédito otorgada.

A la división de Ciencias de la Tierra del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

A Minerva López Guzmán por su gran ayuda y apoyo en esas largas noches de trabajo en las caballerizas.

A mis entrañables amigos del alma: Sergio, Miguel, Lety, Andrés, Lucero, Marcos, Saul, Laura, Fabiola y Alejandro por sus palabras de aliento y sincera amistad.

A la familia Malagón Pimentel por la confianza y apoyo que depositaron en mi.

A mi tío Blas Guzmán y su familia por toda la ayuda que me brindaron.

A mis amigos y compañeros del CICESE por permitirme convivir con ellos: Sergio Peralta, Jorge Granados, Gabriel Hernández, Hilarión Sánchez, Juan C. Campos, Joel Rodríguez, Ma. Elena Vázquez, Adriana Arroyo, Selene Solorza, Aarón del Valle, Claudia Herrera, Rubén Campos, Rosa Carrillo, José M. Chora, Joel Antúnez, Fátima Carrillo, Martín Pacheco, Ricardo Antonio, Juan C. Cerda, Miguel Oliver, Gema Ibarra, Isaac Antuna, Alejandro Kurczyn, Armando López, Juan M. Espinosa, Margarita Almeida, Mario Vega, Daniel Peralta, Gustavo Arellano, Euclides Ruíz, Olga Saraychikina, Mónica Zegarra, Bertha Serrato, Daniel Amaya, Aimee Orcí, Almendra Villela, Selene Lino y a todos los que omito por causas ajenas a mi voluntad...

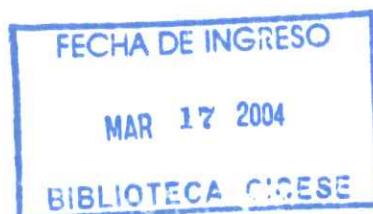
## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>I INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 Planteamiento del problema	3
I.2 El delta del río Colorado	4
I.2.1 Características fisiográficas y sedimentológicas	5
I.2.2 Impacto socioeconómico	5
I.3 Localización del área de estudio	6
I.4 Objetivos	6
I.5 Metodología	7
<b>II EL ACUÍFERO DEL VALLE DE MEXICALI</b>	<b>11</b>
II.1 Climatología	11
II.2 Relieve y Geomorfología	12
II.3 Marco Geológico	13
II.4 Ambientes de depósito	16
II.5 Hidrogeología	18
II.6 Flujo regional	22
II.7 Calidad química del agua subterránea	24
II.8 Geotermia	25
<b>III HIDROGEOQUÍMICA</b>	<b>29</b>
III.1 Iones analizados	29
III.2 Clasificación química del agua subterránea	31
III.3 Calidad de los análisis químicos	33
III.4 LEEGRAM	33
<b>IV TIPOS DE AGUA, SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS, IONES PRINCIPALES</b>	<b>40</b>
IV.1 Análisis y Distribución para 1987	42
IV.2 Análisis y Distribución para 1988	43
IV.3 Análisis y Distribución para 1989	46
IV.4 Análisis y Distribución para 1990	47
IV.5 Análisis y Distribución para 1991	50
IV.6 Análisis y Distribución para 1992	52
IV.7 Análisis y Distribución para 1994	54
IV.8 Análisis y Distribución para 1995	56
IV.9 Síntesis de resultados	59

## CONTENIDO (continuación)

	Página
<b>V CORRELACIÓN ENTRE TIPO Y CALIDAD DEL AGUA CON LA LITOLOGÍA, VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS FAMILIAS DE AGUA</b>	<b>62</b>
V.1 Correlación: tipo de agua y calidad química - litología	62
V.2 Variación espacial y temporal de las familias de agua	66
V.3 Variación de las familias de agua para 1987	67
V.4 Variación de las familias de agua para 1990	68
V.5 Variación de las familias de agua para 1995	69
<b>VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>70</b>
VI.1 Modelo Conceptual Hidrogeoquímico	70
<b>VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>76</b>
VII.1 Conclusiones	76
VII.2 Recomendaciones	77
<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>78</b>
<b>ANEXOS</b>	
A Mapas	
B Descripciones sedimentológicas hechas en campo	
C Hoja de registro de muestras de agua	
D Archivos de entrada y salida del programa LEEGRAM	
E Diagramas de Lee y diagramas de Piper	
F Isoconcentración de $Cl^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Na^+$ y $Ca^{2+}$	

*Nota: Los anexos C, D, E y F se presentan en disco compacto por razones de espacio.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización del área de estudio	8
2	Mapa de Regiones Fisiográficas en el valle de Mexicali (tomado de Vázquez González <i>et al.</i> , 1998)	14
3	Esquema tridimensional de la distribución de litofacies en la zona del Campo Geotérmico de Cerro Prieto y sus inmediaciones. La exageración vertical es 25:1 con respecto a la escala horizontal (tomado de Vázquez González <i>et al.</i> , 1998)	20
4	Mapa tectónico regional del noroeste de la Provincia Extensional del Golfo. Las localidades con sedimentos marinos definen la extensión del proto-Golfo en la cuenca de Salton (modificado de Winker y Kidwell, 1986)	23
5	Evolución química del contenido de sólidos totales disueltos (tomado de Vázquez González <i>et al.</i> , 1998)	26
6	Profundidades de muestreo de agua subterránea: integrada (izquierda) y específica (derecha); (modificada de Cherry, 1983)	31
7	Diagrama de Lee. Los STD están representados por un arco en escala de 1000 ppm por círculo. Todas las opciones son desplegadas. La mitad izquierda del diagrama correspondiente a cationes está en línea punteada para indicar desequilibrio en las cargas. El sector de arco cerrado denota que la determinación de los STD es aceptable. También se muestra la razón de carga (+/-), la razón de los STD medidos y calculados ( $R_{lds}$ ) y la concentración de Cl (tomado de Lee, 1998)	34
8	Diagrama de Stiff convencional. A la derecha se muestran los tres aniones principales, a la izquierda los tres cationes principales. La forma del diagrama indica las proporciones relativas de los diferentes iones y el tamaño indica las concentraciones totales, la escala es expresada en meq/L (tomado de Drever, 1997)	35
9	Ejemplo de un diagrama de Piper. La esquina A corresponde al 100% de Mg en el triángulo de los cationes, en el cuadrilátero corresponde a 100% de Ca+Mg, 0% de Na+K, 100% de alcalinidad y 0% de $SO_4+Cl$ . La esquina B corresponde al 100% de $SO_4$ en el triángulo de los aniones, en el cuadrilátero corresponde a 100% de Na+K, 0% de Ca+Mg y 100% de $SO_4+Cl$ (después de Piper, 1944)	38

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
10	Facies hidroquímicas basadas en el porcentaje de equivalentes totales de cada ion (después de Back, 1966)	39
11	Descripción esquemática del Modelo Conceptual Hidrogeoquímico en planta (modificado de Vázquez González <i>et al.</i> , 1998)	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Clasificación del agua subterránea basándose en la concentración de STD	32
II	Clasificación química del agua subterránea de acuerdo a los iones dominantes	32
III	Uso principal para el que se recomienda el agua en función de la concentración de STD (según NOM-127-SSA1-1994)	41
IV	Límites permisibles para uso y consumo humano de características químicas del agua de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994	41
V	Resumen de los tipos de agua predominantes, de las concentraciones mínima, máxima y promedio para los STD y los iones principales en el valle de Mexicali para el periodo 1987-1995 (excepto 1993). También se muestra el número de análisis químicos para cada año	61

# ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

## I INTRODUCCIÓN

Un aspecto muy importante del agua subterránea es su calidad, la cual se determina a partir de análisis físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde sencillos hasta muy complejos. El tipo de análisis dependerá del uso a que se destine el agua (agropecuario, abastecimiento público, industrial, generación de energía eléctrica, entre otros), así como de algunas características observadas en la zona donde ésta se encuentre (por ejemplo, contenidos de nitratos y organismos coliformes en poblados cercanos a establos).

De acuerdo al INEGI (1995), el recurso hidráulico para el estado de Baja California es insuficiente con relación a las bajas precipitaciones que se presentan. Exceptuando el valle de Mexicali, la infraestructura hidráulica superficial en la entidad es escasa. La baja precipitación cuando ocurre en general escurre al mar, y un mínimo porcentaje permanece y se infiltra, recargando los acuíferos y dando vida al manantialismo. Es entonces el agua subterránea, la fuente más importante para el sostenimiento de las distintas actividades que se desarrollan en el estado de Baja California.

Para sistematizar de alguna manera la información química del agua, se cuenta con distintos esquemas de clasificación, un ejemplo es el que considera el contenido de sólidos totales disueltos (agua dulce, salobre, salada y salmuera), y otro el que toma en cuenta los iones dominantes presentes (aguas cloruradas, sulfatadas, bicarbonatadas, sódicas, cálcicas y magnésicas). Para determinar si alguna fuente de agua puede ser apta para un uso

específico se utilizan los límites máximos permisibles propuestos por la Secretaría de Salud, la Organización Mundial de la Salud, las Normas Oficiales Mexicanas, entre otros ordenamientos legales.

La hidrogeoquímica se encarga de estudiar la parte del ciclo hidrológico que relaciona el carácter químico del agua con su medio ambiente natural y las rocas y suelos con los que tiene contacto. El agua en el continente debe completar su regreso al océano, una parte del agua que escurre se infiltra en el suelo moviéndose gradiente abajo, cuando esto sucede una parte del agua se infiltra en el suelo moviéndose hacia abajo, luego en dirección lateral y, por fin, llega a los lagos, los ríos o directamente al océano. Cuando la velocidad de caída de la lluvia es mayor que la capacidad del suelo para absorberla, el agua adicional fluye sobre la superficie en lagos y arroyos, ocurriendo el proceso denominado *escurrimiento*.

Gran parte del agua que se infiltra o se escurre vuelve a la atmósfera por medio de la evaporación desde el suelo, los lagos y las corrientes. Además, parte del agua que se infiltra en el suelo es absorbida por las plantas, que después la liberan a la atmósfera, ocurriendo el proceso llamado transpiración. Dado que es difícil distinguir claramente entre la cantidad de agua que se evapora y la cantidad que es transpirada por las plantas, se suele utilizar el término evapotranspiración para definir el efecto combinado. Cuando la precipitación cae en áreas muy frías (latitudes o elevaciones altas) el agua no puede infiltrarse, escurrirse o evaporarse inmediatamente, entra a formar parte de nieve o de un glaciar, de modo que los glaciares almacenan grandes cantidades de agua sobre la tierra.

Es importante saber que el ciclo hidrológico está en equilibrio. Dado que el vapor de agua total de la atmósfera permanece constante, la precipitación anual media sobre la

---

Tierra debe ser igual a la cantidad de agua evaporada. Sin embargo, si se consideran sólo los continentes, la precipitación excede a la evaporación. A la inversa, sobre los océanos, la evaporación supera a la precipitación. Dado que el nivel de los océanos mundiales no está disminuyendo, el sistema debe estar en equilibrio. En resumen, el ciclo hidrológico representa la circulación continua del agua de los océanos a la atmósfera, de la atmósfera a la tierra y, de la tierra al mar.

### **I.1 Planteamiento del problema**

Es importante analizar y caracterizar hidrogeoquímicamente un acuífero para determinar y distinguir los tipos de agua predominantes y su respectiva calidad. Esta acción se considera necesaria porque la calidad varía y cambia con el tiempo. La calidad se ve modificada por diversos factores pero en el valle de Mexicali la actividad agrícola e industrial son los factores más importantes. Para llevar a cabo la caracterización química se requieren análisis químicos de muestras de agua que sean representativas del acuífero y que sean extraídas del mayor número de pozos en el área. Esto permite identificar familias de agua que caracterizan un acuífero.

El propósito de este trabajo es establecer una caracterización hidrogeoquímica para el acuífero del valle de Mexicali que ayude a definir los criterios técnicos necesarios para establecer las condiciones hidrogeoquímicas (tipo y calidad de agua) prevalecientes hasta el año 1995. Este trabajo debe servir como soporte y referencia para el apropiado manejo del recurso hidráulico subterráneo y de esta forma tener un mejor entendimiento y aprovechamiento de la calidad química del acuífero.

---

El enfoque del trabajo está dirigido a la recopilación, análisis, depuración e integración de información química, geológica y geohidrológica disponible. Para ello se deberá tomar en cuenta los resultados de la familia, la calidad y la variación del agua considerando la dirección del flujo subterráneo.

## I.2 El delta del río Colorado

Una de las principales preocupaciones en la región del delta del río Colorado es la salinidad, que es elevada como resultado de una combinación de procesos naturales y humanos. Sin interferencia de la actividad humana, los manantiales salinos, la erosión de formaciones geológicas salinas y los efectos de concentración de la evaporación y transpiración, generarían una salinidad de 334 mg/L en la represa Imperial. En décadas pasadas, las actividades humanas han exacerbado el problema de la salinidad en la parte baja del río Colorado: hacia 1997, las extracciones fuera de la cuenca por irrigación, construcción de embalses, la evaporación y el uso municipal e industrial aumentaron la salinidad media anual a 704 mg/L en la presa Imperial (Cohen y Henges, 2001).

La elevada salinidad en los años 60s fue motivo para que al tratado EU-México de 1944 se le agregara la minuta 242. Allí se establece que la salinidad media anual del agua entregada a México en el lindero internacional norte no excedería en más de 115 mg/L ( $\pm 30$  mg/L). La salinidad aguas arriba de la presa Morelos permaneció dentro de los parámetros fijados por la minuta 242. En años de no inundación, el agua en la presa Imperial contenía 784 mg/L de sólidos totales disueltos (STD) y aguas arriba de la presa Morelos había 122 mg/L, que decreció a 47 mg/L en años de inundación. A pesar de una menor concentración de STD aguas arriba de la presa Morelos, las concentraciones de sal aumentaron en el cauce

principal del río Nuevo, en canales de drenaje y en sitios de recolección de descargas agrícolas. La salinidad aumentó en años de no inundación conforme disminuyó la descarga. La salinidad en el cauce principal aguas arriba de su confluencia con el río Hardy, varió entre 1,810 mg/L a 560 mg/L durante el evento de inundación de 1997 (Cohen y Henges, 2001).

### **I.2.1 Características fisiográficas y sedimentológicas**

Dos factores importantes caracterizan el delta del río Colorado: un rápido y abundante aporte de sedimentos producidos por el levantamiento del Plateau del Colorado y la estructura dinámica de la cuenca donde el río acumula esos sedimentos. La extensión de la región del delta del río Colorado está definida por sedimentos aluviales, variando desde arcillosos en el valle Imperial, hasta arenosos en la ribera del río Colorado aguas abajo de la presa Morelos.

### **I.2.2 Impacto socioeconómico**

La región del delta del río Colorado es objeto de creciente interés binacional. Una gran parte de este interés se centra en las áreas de humedales y riveras del delta que todavía quedan. Una región de unas 60,000 hectáreas a lo largo de ambos lados de la frontera (tramo de 37 km de la frontera entre México y Estados Unidos definido por el río Colorado) entre Baja California y Sonora. Aún así, un enfoque limitado en lo que queda del delta sería demasiado restrictivo: los usos y flujos de agua en toda la región fronteriza del río Colorado son de interés, en vista de que el área es centro de transferencias de agua,

planes de conservación y restauración del hábitat y de esfuerzos en cuanto a tratamiento de aguas de desecho (Cohen y Henges, 2001).

El río Colorado representa una importante fuente de agua para México y Estados Unidos. En términos ecológicos los recursos del delta son impresionantes, sustenta más de 160 mil aves costeras, 60 mil aves acuáticas y una docena de especies de animales y plantas amenazados o en peligro de extinción. Pero además de la importancia ecológica del río Colorado, el agua que nos proporciona sirve para regar más de 200 mil hectáreas de cultivo en el valle de Mexicali, y además da agua para uso urbano e industrial en las principales ciudades de Baja California (Cruz Hernández, 2002).

### **I.3 Localización del área de estudio**

El valle de Mexicali se ubica en el noreste de Baja California (figura 1), cubriendo una extensión aproximada de 5,600 km<sup>2</sup>. Colinda al norte con la línea fronteriza México-Estados Unidos, al sur con los ríos Colorado y Hardy, al oeste con las Sierras Cucapá y El Mayor, y al este con la Mesa de Sonora y el Desierto de Altar en Sonora. A lo largo de 32 km, el Río Colorado forma la frontera natural entre Baja California en México y Arizona en Estados Unidos.

### **I.4 Objetivos**

El objetivo principal es caracterizar hidrogeoquímicamente al acuífero del valle de Mexicali, asimismo establecer la correlación que existe entre el tipo y calidad del agua con la litología del acuífero superficial (< 200 m), tomando en cuenta la dirección de flujo subterráneo. La motivación de esta investigación es aportar con detalle las características

---

hidrogeoquímicas sobre el acuífero, al menos para el periodo 1987-1995, además de que se tiene acceso (información de CNA y CFE) a bases de datos químicos, litológicos y geohidrológicos para estos años.

Los objetivos particulares de este trabajo son los siguientes:

- a) Organizar una base de datos químicos ordenada y depurada con los pozos que se tomarán en cuenta para el análisis hidrogeoquímico del área.
- b) Obtener la clasificación del tipo de agua subterránea en el acuífero y su calidad.
- c) Elaborar un registro para cada muestra de agua con el resultado del análisis químico y su calidad considerando el balance iónico de cargas (electroneutralidad); así también su clasificación de acuerdo a los iones dominantes y al contenido de sólidos totales disueltos.
- d) Establecer la correlación entre información litológica y tipo (clorurada, sulfatada, sódica, cálcica) y calidad (dulce, salobre, salada) del agua en el acuífero, considerando la dirección del flujo subterráneo.
- e) Elaborar mapas temáticos del área de estudio para mostrar la distribución espacial de los pozos, la concentración de sólidos totales disueltos y la clasificación en familias de agua considerando los iones dominantes.
- f) Proponer un modelo conceptual hidrogeoquímico del acuífero capaz de explicar las condiciones hidrogeoquímicas y las correlaciones antes mencionadas.

### **I.5 Metodología**

La realización de este trabajo consta de tres etapas fundamentales: 1) recopilación y revisión de información previa, 2) trabajo de campo y 3) análisis, interpretación e integración.

---

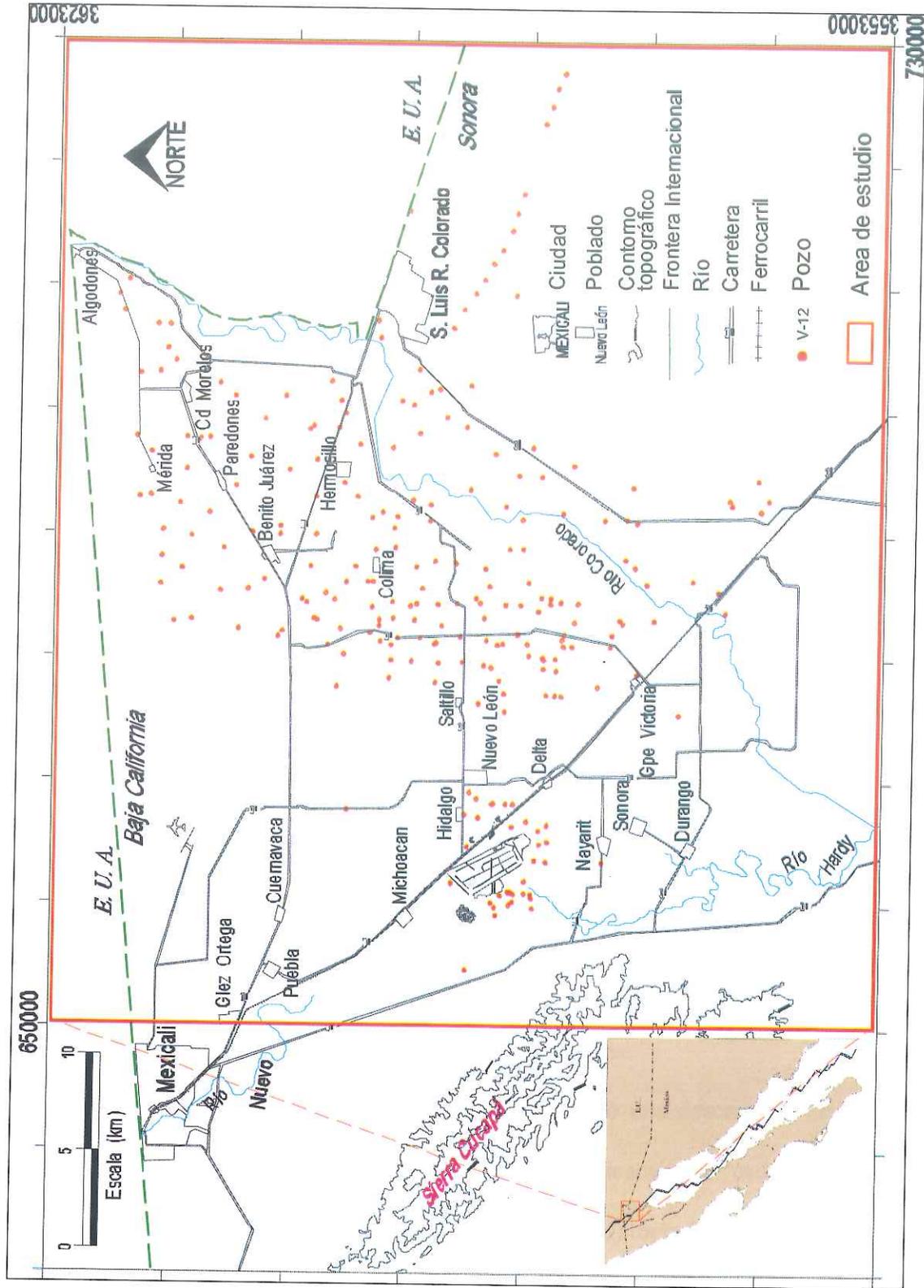


Figura 1. Localización del área de estudio.

1) *Recopilación y Revisión de Información Previa:*

Se recopiló, revisó, organizó, depuró y sistematizó toda la información disponible sobre la zona en estudio: publicaciones, informes, tesis, boletines hidrométricos, cartas topográficas, cartas geológicas, bases de datos, entre otros; para establecer un panorama general de la información disponible sobre las condiciones hidrogeoquímicas, geológicas y geohidrológicas del área. Esta etapa sirvió para programar el trabajo de campo.

Las fuentes más importantes para nuestras bases de datos fueron la Comisión Nacional del Agua (CNA) a través de la Gerencia Regional de la Península de Baja California, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia Regional de Cerro Prieto, la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) a través del Instituto de Ingeniería y diversos informes técnicos generados en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) a través de los departamentos de Geofísica Aplicada y Geología.

2) *Trabajo de Campo:*

Consistió fundamentalmente en recorridos para observaciones granulométricas en los ambientes sedimentarios cercanos al cauce del río Colorado y Hardy con la finalidad de tener una herramienta más de interpretación y correlacionar e integrar los datos hidrogeoquímicos obtenidos y la información litológica (ambientes sedimentarios) y geohidrológica (dirección de flujo subterráneo) consultada.

Se visitaron siete sitios, en cada uno se realizó una descripción sedimentológica sobre los flancos o sobre el mismo lecho del río; la ubicación de cada sitio se obtuvo en coordenadas UTM para su ubicación y se tomaron fotografías donde se aprecian las descripciones hechas (anexo B).

3) *Análisis, Interpretación e Integración:*

Previo al análisis se obtuvieron mapas temáticos del periodo 1987-1995 (excepto 1993) que muestran la distribución espacial de los pozos, su clasificación por familia de agua, la concentración de sólidos totales disueltos y la concentración de iones principales. Posteriormente se analizó y describió con detalle cada mapa, quedando plasmada esta información en el capítulo IV. De esta forma se obtuvo la caracterización hidrogeoquímica para cada año. La interpretación e integración se basó en los datos obtenidos y en la información consultada, esto dió como resultado las bases y elementos necesarios para caracterizar hidrogeoquímicamente al acuífero del valle de Mexicali, con lo que se propone un modelo conceptual hidrogeoquímico que se describe en el apartado VI.1.

## II EL ACUÍFERO DEL VALLE DE MEXICALI

El agua subterránea en la zona del valle de Mexicali ha sido afectada en cantidad y calidad por la explotación intensiva ocasionada por la actividad agrícola. En este valle se desarrollan dos actividades económicas principalmente: 1) la producción agrícola intensiva con base en los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, y 2) la generación de energía eléctrica a partir de la extracción de vapor de la parte profunda de la cuenca.

En este capítulo se describen ciertos aspectos y características considerados importantes acerca del valle de Mexicali y de su acuífero, con el fin de tener un panorama general y en ocasiones detallado, de términos y datos que se manejan en este trabajo. Este capítulo se dividió en ocho apartados: 1) Climatología, 2) Relieve y Geomorfología, 3) Marco Geológico, 4) Ambientes de depósito, 5) Hidrogeología, 6) Flujo regional, 7) Calidad química del agua subterránea y 8) Geotermia. A continuación se presenta la descripción de cada uno de ellos.

### II.1 Climatología

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), el valle de Mexicali tiene clima de tipo cálido seco, muy árido, con régimen de lluvias de invierno y con una oscilación anual de temperaturas medias mensuales muy extrema (García *et al.*, 1996).

La precipitación en el valle de Mexicali registra promedios que varían desde los 75.5 mm/año en la ciudad de Mexicali, a 60.4 mm/año en la presa Morelos y 55.5 mm/año en la estación Delta. El régimen pluviométrico en el valle está muy influenciado por los sistemas frontales de invierno que llegan del oeste-noroeste, presentando máximos en los

---

meses de diciembre (11.1 mm) y enero (9.8 mm), siendo junio el mes más seco (0.2 mm). Sin embargo, en los meses de julio y agosto existe una segunda temporada de lluvias generada por la llegada ocasional de humedad y de tormentas tropicales ya debilitadas.

Las variaciones en las temperaturas muestran un amplio espectro en el valle de Mexicali, con valores promedio diarios entre -7.0 °C y hasta 54.3 °C con un valor medio anual de 33.1 °C en la estación climatológica de Mexicali (García *et al.*, 1996).

La evaporación está directamente relacionada con las temperaturas del aire y el suelo y el contenido de humedad de la atmósfera, presentando fuertes variaciones a lo largo del año. En la estación meteorológica cercana a la laguna de evaporación y dentro del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), durante 1993 se registraron valores máximos de evaporación superiores a 300 mm, durante los meses de junio y julio y valores mínimos de 61 mm en el mes de enero (Ramírez Hernández, 1997). Por su parte, en la ciudad de Mexicali, en la presa Morelos y en la estación Delta, se han registrado evaporaciones promedio de 2176, 2898 y 2000 mm/año respectivamente, durante el período comprendido entre 1948-1991 (INEGI, 1995).

## II.2 Relieve y Geomorfología

El relieve topográfico en el área de estudio es muy bajo, siendo el límite oeste la parte más elevada con un promedio de 21 m sobre el nivel del mar, y disminuyendo hacia el este donde la elevación es del orden de 11 m sobre el nivel del mar. Interrumpiendo el patrón topográfico descrito, destaca el volcán Cerro Prieto en la porción centro occidental del área cuya elevación es de 223 m. A escala regional, el valle presenta una pendiente suave y uniforme partiendo del poblado Algodones en el extremo noreste (figura 1), cuya

---

elevación es de 34 m sobre el nivel del mar; el gradiente topográfico es del orden de 1:2000, tanto en dirección oeste como al sur de este punto (Ariel, 1967).

A escala regional, se distinguen cuatro unidades fisiográficas presentes: planicies, mesetas, terrazas y montañas (Ariel 1967, CNA 1992, Ramírez Hernández, 1997); (figura 2).

El valle de Mexicali se ubica en la planicie de inundación moderna del delta del Río Colorado. Ésta se considera, a su vez, parte de la provincia fisiográfica del Colorado (Paredes, 1964: en Ariel, 1967). La zona agrícola se desarrolla en la planicie de inundación que presenta pendientes topográficas muy suaves.

Las mesetas se definen por sus pendientes topográficas pronunciadas o escalones en el contacto con la planicie deltaica y extensiones planas por arriba del nivel base de erosión. La mayor de éstas es la mesa arenosa de San Luis Río Colorado al este y le sigue en extensión la mesa de Andrade en la parte nororiental (figura 2).

Las terrazas aluviales se presentan al pie de la Sierra Cucapá en la porción oeste del valle. Los macizos montañosos están representados por la Sierra Cucapá, ya mencionada y la Sierra El Mayor al suroeste.

### II.3 Marco Geológico

La planicie deltaica del río Colorado (figura 2), forma parte de la depresión estructural del Salton. A escala regional, el área corresponde a una gran cuenca de origen tectónico, rellena de sedimentos continentales y marinos Terciarios-Cuaternarios que sobreyacen un basamento de rocas graníticas. El límite occidental de la cuenca lo forma la Sierra Cucapá, que está compuesta por rocas ígneas intrusivas, principalmente por tonalita

y granodiorita y por rocas metamórficas (Vázquez González *et al.*, 1998). La estructura volcánica de Cerro Prieto en el centro-oeste del valle, consta de dos centros eruptivos superpuestos, de composición andesítica y riodacítica.

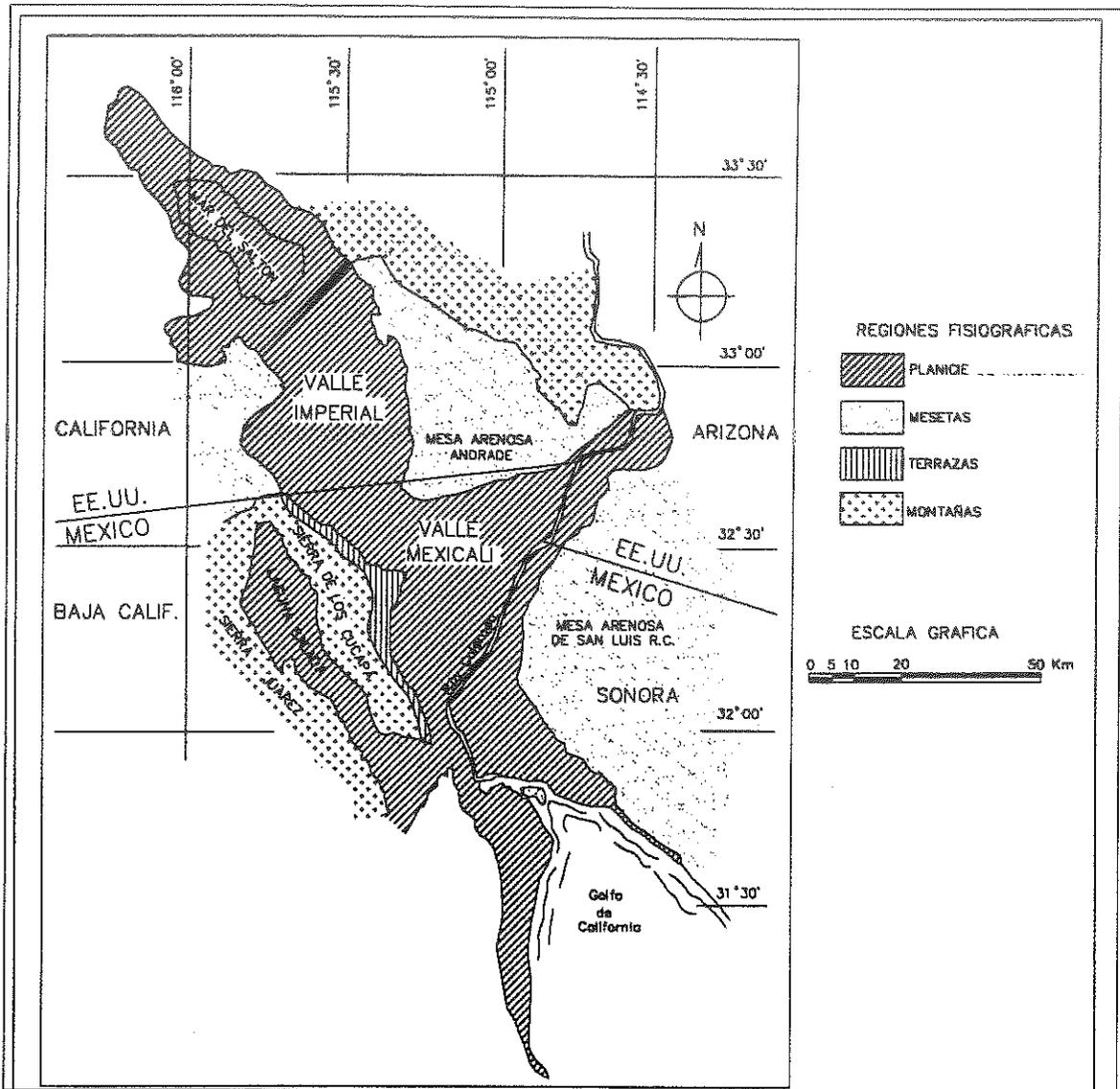


Figura 2. Mapa de Regiones Fisiográficas en el valle de Mexicali (tomado de Vázquez González *et al.*, 1998).

Esta depresión estructural se formó a consecuencia de la definición del nuevo límite entre las placas Pacífico y Norteamérica y la incorporación de la península de Baja California a la Placa Pacífico, entre los 12 y los 6 millones de años (m.a.). Este proceso se completó hace 3 ó 4 m.a. en el Plioceno tardío. En la región noroeste del actual Golfo de California, la extensión de la corteza se inició en el Mioceno medio-superior (Lee *et al.*, 1996), y evolucionó paulatinamente hacia el predominio de las fallas transformes con movimiento relativo lateral derecho del sistema San Andrés-Golfo de California (Crowell, 1987).

En el caso del valle de Mexicali y del valle Imperial, la distribución de los sedimentos marino-deltaicos se ha visto afectada ampliamente por el movimiento hacia el NW de la península de Baja California, a lo largo del sistema de falla de San Andrés, desde hace aproximadamente 4 m.a. Se ha estimado una velocidad de desplazamiento de ~36 mm/año a lo largo de la falla San Andrés, que junto con el desplazamiento de las fallas al norte de la península (e.g. Imperial, Elsinore, Laguna Salada, Cerro Prieto, etc.), sugiere un desplazamiento de rumbo NNW de la península del orden de 300 km, con respecto al continente (Humphrey y Weldon, 1991). El efecto de este movimiento en la desembocadura del Río Colorado durante el Plio-Cuaternario es el alargamiento de las cuencas de Salton y de Cerro Prieto en cuencas tipo "pull-apart" elongadas en dirección NW, presentando volcanismo reciente (riolita-dacita), que constituye la fuente de calor para los yacimientos geotérmicos.

La información obtenida con la perforación de pozos geotérmicos permite definir la litología del subsuelo agrupándola en tres unidades principales: A, B y C (Arellano y Gutiérrez, 1986). La unidad A corresponde a los depósitos fluvio-deltaicos cuaternarios que

---

se presentan desde la superficie y está constituida por gravas, arenas, limos y arcillas no consolidadas sobreyaciendo capas de lutitas semiconsolidadas. La unidad B, que subyace la anterior, se compone de lutitas con intercalaciones laminares de areniscas alternadas irregularmente con estratos de limolitas y lutitas. Recubriendo a la secuencia de lutitas, areniscas y limolitas, se encuentra una capa de lodolitas de distribución irregular. La unidad B ha sido considerada en otros trabajos (CNA, 1992) como integrada por tres unidades litológicas principales: lutitas grises, lutitas cafés y lodolitas.

La unidad C corresponde a las rocas graníticas del basamento las cuales afloran en la Sierra Cucapá. Dentro del CGCP, las rocas del basamento han sido cortadas por los pozos M-3, M-96 y S-262 a profundidades de aproximadamente 2550, 2800 y 1500 m, respectivamente. De acuerdo a los datos de columnas litológicas de los pozos en la zona de Cerro Prieto, se ha estimado que el espesor de la unidad A es del orden de 1000 a 1500 m, mientras que la unidad B tiene un espesor promedio de 3000 m (Arellano y Gutiérrez, 1986).

#### **II.4 Ambientes de depósito**

Al sur de la frontera, las unidades sedimentarias del Cuaternario no han sido definidas con nombres formales, pero en el valle de Mexicali la capa de sedimentos no consolidados tiene varios cientos de metros de espesor y se les atribuye una edad del Pleistoceno (Cotton y Vonder Haar, 1981). Esta capa superficial, localmente, incluye depósitos terrígenos de ambientes de planicie deltaica dominada por mareas, ambientes de planicie deltaica dominada por el río, depósitos de abanicos aluviales y depósitos eólicos.

---

Mayer Pérez (1968) en un estudio fotogeohidrológico a la escala del valle de Mexicali, reporta que los primeros 150 m de los depósitos deltaicos de la planicie de inundación, consisten en sedimentos areno-limosos en los cortes sobre el cauce del Río Nuevo y al sur del CGCP.

Una zona de transición a depósitos de arenas y gravas se presenta hacia el este, a la altura del Ejido Yucatán. Las facies de gravas y conglomerados de esta capa superficial son mucho más abundantes hacia la zona al sur de Algodones en una franja de varios kilómetros de ancho siguiendo el cauce principal del Río Colorado hacia el sur, lo que representa un incremento de las facies de canal del sistema distributivo deltaico en la región centro-oriental del valle de Mexicali.

De acuerdo con la descripción disponible de las columnas litológicas y en la información puntual sobre componentes secundarios (materia orgánica, fósiles), Vázquez González *et al.* (1998) interpretaron tres ambientes de depósitos (figura 3):

1. Ambiente de planicie deltaica dominada por los procesos fluviales que predomina hacia el E-NE.
2. Ambiente lagunar-deltaico definido en la zona del campo geotérmico.
3. Zona de depósitos distales de los abanicos aluviales que afloran de la Sierra Cucapá.

En la planicie deltaica dominada por el río, la alternancia de gravas y de sedimentos areno-limosos que predomina al E-NE, representan depósitos de canales distributivos y depósitos de banco del río durante periodos de inundación, con la expansión de la zona de canales distributivos activos. Los cuerpos de grava representan las facies de canal que migran lateralmente y cambian su cauce por procesos de avulsión. Alternativamente, los canales pueden ser ocupados únicamente en periodos de máxima avenida y son

---

abandonados en condiciones "normales" cuando se define un cauce principal. Los cauces abandonados son posteriormente cubiertos con arenas y limos de depósitos de bancos (levee deposits) y de planicies de inundación, y en regiones áridas como en la planicie deltaica del río Colorado, los depósitos eólicos pueden rellenar y cubrir los depósitos de canal.

Los depósitos limo-arcillosos que dominan la porción central en donde se ubica el campo geotérmico representan condiciones estuarinas o lagunares, posiblemente en un ambiente lagunar deltaico, con condiciones de depósito de muy baja energía (figura 3). En los primeros 200 metros de la columna litológica de algunos pozos ubicados en la zona del campo geotérmico, están reportados fragmentos de gasterópodos y algunas bioestructuras. Cotton y Vonder Haar (1981) reportan ostrácodos y nanofósiles a 138 metros de profundidad en el pozo M-93, y a 350 m en el M-11, indicando que esos microfósiles calcáreos son típicos de ambientes de baja energía, y podrían representar condiciones lagunares o estuarinas.

En los depósitos más recientes (<200 m), es evidente la expresión morfológica de los abanicos aluviales que se extienden hasta el límite oeste del campo geotérmico, por lo que las facies de grano grueso que se observaron al poniente de las facies de lodos corresponden a la progradación reciente de los abanicos aluviales de la Sierra Cucapá (figura 3).

## II.5 Hidrogeología

El acuífero para uso agrícola en la región del valle de Mexicali, se localiza en la unidad litológica correspondiente a los depósitos deltaicos Cuaternarios, definida

---

anteriormente como unidad A (Arellano y Gutiérrez, 1986). Esta unidad que se presenta desde la superficie y hasta una profundidad aproximada de 200 m, está formada principalmente por gravas, arenas, limos y arcillas, con una distribución espacial acorde a la variación de los ambientes sedimentarios del delta del río Colorado. De manera sintetizada la litología se agrupa en dos tipos:

- detrítico grueso, constituido por arenas, arenas limosas y gravas, que corresponden a los subambientes deltaicos más energéticos presentes en la zona noreste del valle de Mexicali (gravas de fondo de canal, barras arenosas de canal).
- detrítico fino, que incluye arenas de grano fino, limos y arcillas indicando subambientes de baja energía, correspondientes a depósitos del prodelta (banco, canales meándricos, planicies de inundación) y las partes distales de la desembocadura de canales en el frente deltaico, evidentes en la porción centro occidental de la planicie de inundación incluyendo la zona del CGCP.

Eventos extraordinarios en las descargas del río ocasionaron variaciones en los patrones de transporte y distribución de sedimentos, dando origen a intercalaciones granulométricas.

El relleno de la porción occidental del valle tiene un origen distinto, relacionado con el aporte de los abanicos aluviales que descienden de la Sierra Cucapá e intercalado con depósitos deltaicos. Son sedimentos con un elevado contenido de arenas y gravas. El contacto entre depósitos aluviales y fluviales se sitúa aproximadamente en el borde oeste de la laguna de evaporación en la zona del CGCP. El límite oeste de los sedimentos no consolidados y por lo tanto del acuífero somero, es la sierra Cucapá y El Mayor que constituyen fronteras impermeables para el flujo de agua subterránea.

---

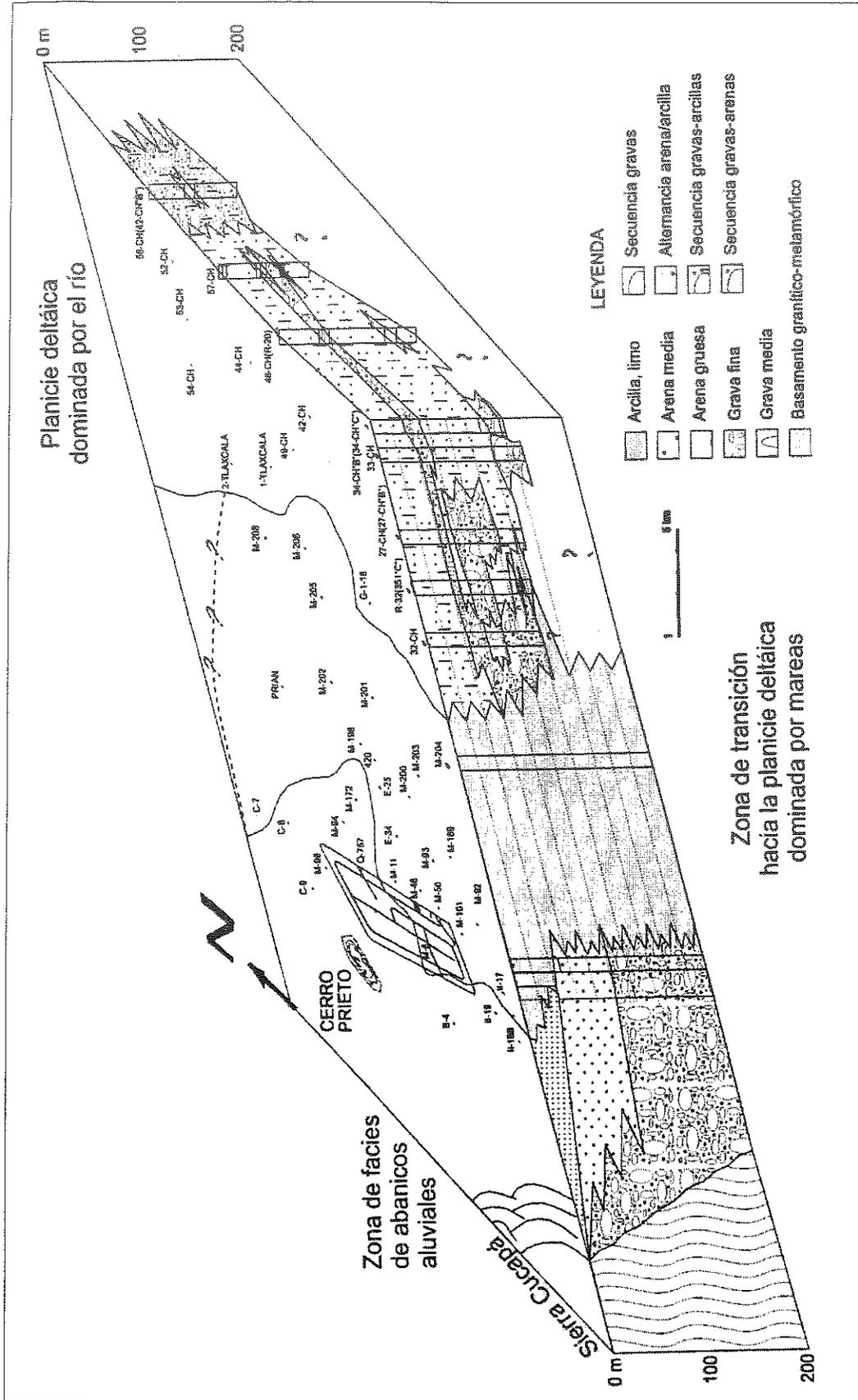


Figura 3. Esquema tridimensional de la distribución de litofacies en la zona del Campo Geotérmico de Cerro Prieto y sus inmediaciones. La exageración vertical es 25:1 con respecto a la escala horizontal (tomado de Vázquez-González et al., 1998).

El espesor de los sedimentos fluvio-deltaicos no consolidados, que constituyen el acuífero se incrementa en dirección noreste, a partir de la zona geotérmica; al oeste del CGCP en los pozos M-6 y M-3 el espesor es de entre 400 a 500 m, formando en la dirección aproximada NNW-SSE, la parte más somera de la base del acuífero; la profundidad del horizonte impermeable aumenta hasta valores superiores a los 2000 m, en el borde oriental de la zona geotérmica. Al oeste del CGCP se presenta una subcuenca limitada por la Sierra Cucapá con un espesor de sedimentos no consolidados de 1300 m hacia el NW incrementándose al SE con valores próximos a los 2000 m.

En resumen, se puede definir el acuífero del valle de Mexicali, como un acuífero de tipo libre, de espesor variable y no homogéneo, emplazado en una secuencia sedimentaria de origen fluvio-deltaico con intercalaciones de materiales de diferente permeabilidad, que ocasiona situaciones de confinamiento a escala local, pero que en conjunto, se comporta como una sola unidad geohidrológica.

La alimentación del acuífero en el valle de Mexicali fue determinada por el estudio preliminar de Ariel (1967), identificando dos tipos: una de agua subterránea que circula por las formaciones de los depósitos deltaicos, procedente del norte, noreste y oriente del Distrito (Mesa Pilot Knob y Mesa de Yuma en EUA, y Mesa de San Luis, Sonora), y la otra catalogada como *agua volcánica* que emerge de mantos más profundos. Estudios recientes (CNA, 1995), confirman que se mantienen las entradas de agua que provienen del norte, noreste y oriente.

---

## II.6 Flujo regional

El valle de Mexicali presenta un parteaguas superficial que cruza en diagonal desde la Sierra Cucapá a la altura del volcán Cerro Prieto hacia el ápice del delta en Algodones (figura 4). Al norte de este parteaguas los escurrimientos superficiales drenan hacia el río Nuevo, y en épocas históricas (en 1907) el río Colorado desbordó este parteaguas a través de un cauce posiblemente ubicado en el canal Imperial y el río Nuevo que drenaron hacia la cuenca de Salton (figura 4). Al sur del parteaguas el flujo superficial es a través del cauce moderno del río Colorado y en menor escala a través del río Hardy.

Se ha sugerido que el flujo subterráneo presenta estos mismos patrones de distribución hacia el NW y hacia el SW según la interpretación de los niveles piezométricos de pozos en todo el valle (Dutcher *et al.*, 1972). Las incursiones del Río Colorado hacia la cuenca de Salton al parecer fueron frecuentes durante periodos de máximas avenidas antes de este siglo y antes de la construcción de una barrera artificial después de la inundación de 1907. Es importante mencionar que la cuenca de Salton se encuentra topográficamente más abajo que el valle de Mexicali, por lo que se ha sugerido que parte del flujo subterráneo del río se desvía hacia el Salton.

Las direcciones de flujo en condiciones estáticas del acuífero, se han determinado para diferentes años, y en términos generales presentan las mismas características: un flujo hacia el oeste cambiando de dirección al poniente de Mexicali hacia el norte retornando a los EUA, otro flujo con dirección suroeste hacia la Sierra Cucapá, que al oeste de la zona de pozos se divide en dos direcciones; una hacia el NW y la otra al SE. Un tercer flujo sigue aproximadamente el cauce del Río Colorado, hacia el Golfo de California.

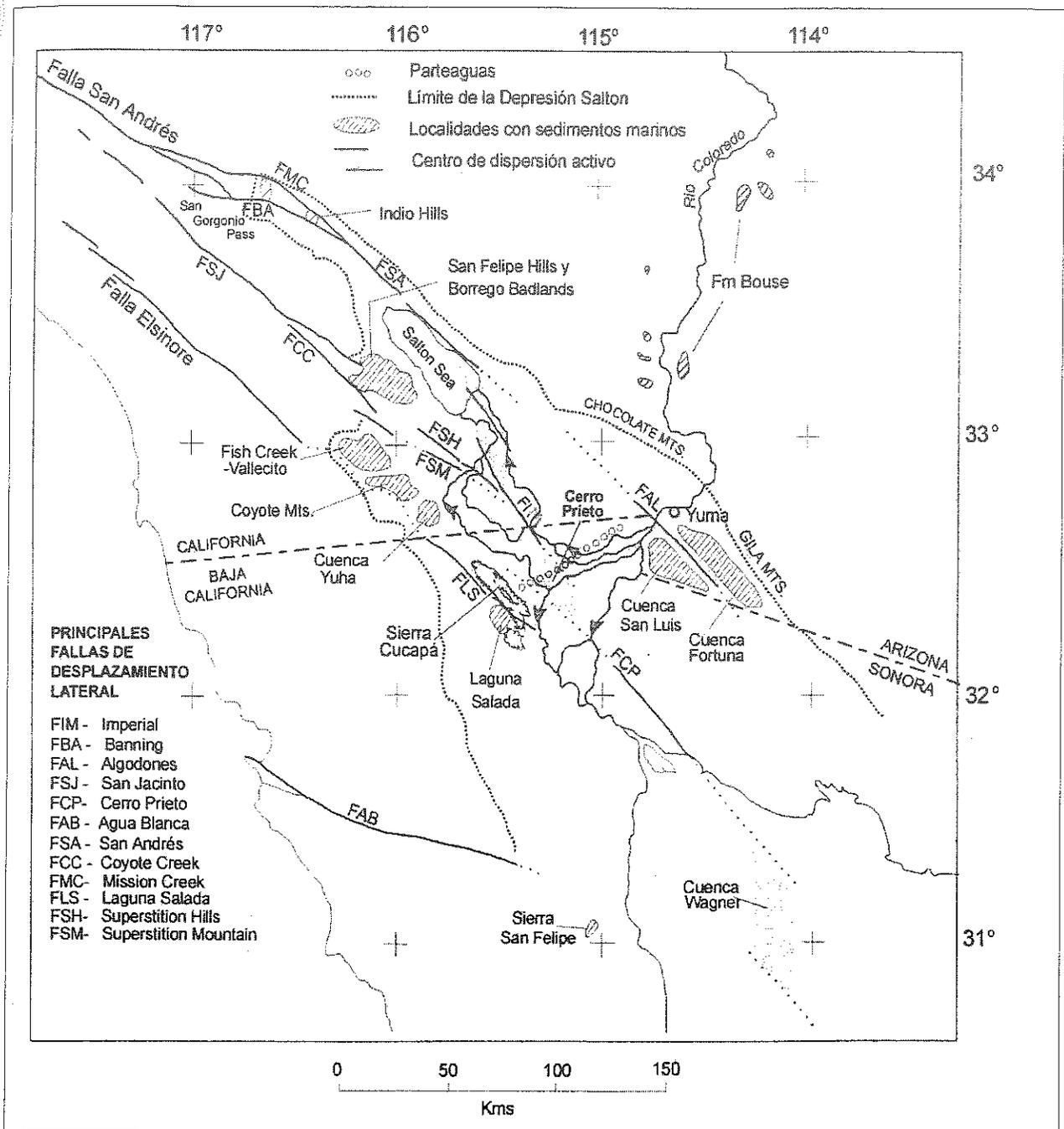


Figura 4. Mapa tectónico regional del noroeste de la Provincia Extensional del Golfo. Las localidades con sedimentos marinos definen la extensión del proto-Golfo en la cuenca de Salton (modificado de Winker y Kidwell, 1986).

## II.7 Calidad química del agua subterránea

La calidad del agua extraída del subsuelo se determina con base en la estimación de las cantidades de iones en solución como componentes individuales, o bien como una medida global en lo que se conoce como sólidos totales disueltos (STD). En el acuífero del valle de Mexicali los cationes más comunes son: el sodio, calcio y magnesio, y en cuanto a los aniones son los del tipo cloruros, sulfatos y bicarbonatos.

De acuerdo a los análisis químicos de muestras de agua en la zona de riego del valle de Mexicali, se observan las siguientes características que fueron reportadas por López López (1991) utilizando datos de CNA correspondientes al período de 1961 a 1988.

- La calidad del agua subterránea ha tenido un deterioro a través del tiempo, que se evidencia por el incremento en la concentración de STD. El contenido de STD muestra una tendencia general de incremento, ya que el promedio en la zona en 1961, era de 1095 mg/L, mientras que el valor medio en 1988 fue de 1685 mg/L.
  - El acuífero recibe agua fuertemente mineralizada de los flujos subterráneos provenientes de la zona entre la presa Morelos y San Luis Río Colorado y de la Mesa Arenosa de San Luis. En 1992 se reporta que ingresaron 7.8 millones de metros cúbicos al subsuelo de descargas de aguas residuales de San Luis Río Colorado (CNA, 1993), situación que permanece en 1995 (CNA, 1995).
  - Las entradas de agua de mejor calidad son las que provienen del Canal Todo Americano y las de la presa Morelos, cabe mencionar que este es un tema de especial importancia debido a que han sido anunciadas modificaciones en la obra del Canal Todo Americano.
-

- Los pozos ubicados al noroeste del valle de Mexicali presentan los mayores incrementos, tanto en STD como en sodio, calcio, sulfatos y bicarbonatos.
- En los pozos ubicados al sur y centro de la zona de extracción (figura 1), la composición química del agua tuvo poca variación en el período 1961-1988.

La situación en años posteriores respecto al valor medio de STD tuvo modificaciones llegando a 1746 mg/L en 1992, presentando una ligera recuperación en 1995 con un valor medio de 1540 mg/L. Para este último año (1995) se observan los valores máximos de 2500 mg/L en pequeñas áreas localizadas en la mayor parte de la zona de riego del valle de Mexicali, excluyendo las regiones noreste y sureste. En la figura 5 se presenta en forma gráfica el comportamiento ya descrito de los STD entre 1961 a 1995 (CNA, 1995), aclarando que los valores de STD que muestra dicha figura son el promedio aritmético de las mediciones en el total de pozos del año correspondiente.

## II.8 Geotermia

En 1959 ante la creciente demanda de energía eléctrica, se inició en el valle de Mexicali, la exploración de la zona conocida como Laguna de los Volcanes por sus importantes manifestaciones geotérmicas superficiales. El propósito fue el de evaluar el potencial de la zona para producir energía eléctrica a partir del vapor geotérmico. Los resultados exploratorios fueron alentadores corroborados con las primeras perforaciones, dando lugar a uno de los campos geotérmicos más grandes del mundo: el Campo Geotérmico de Cerro Prieto.

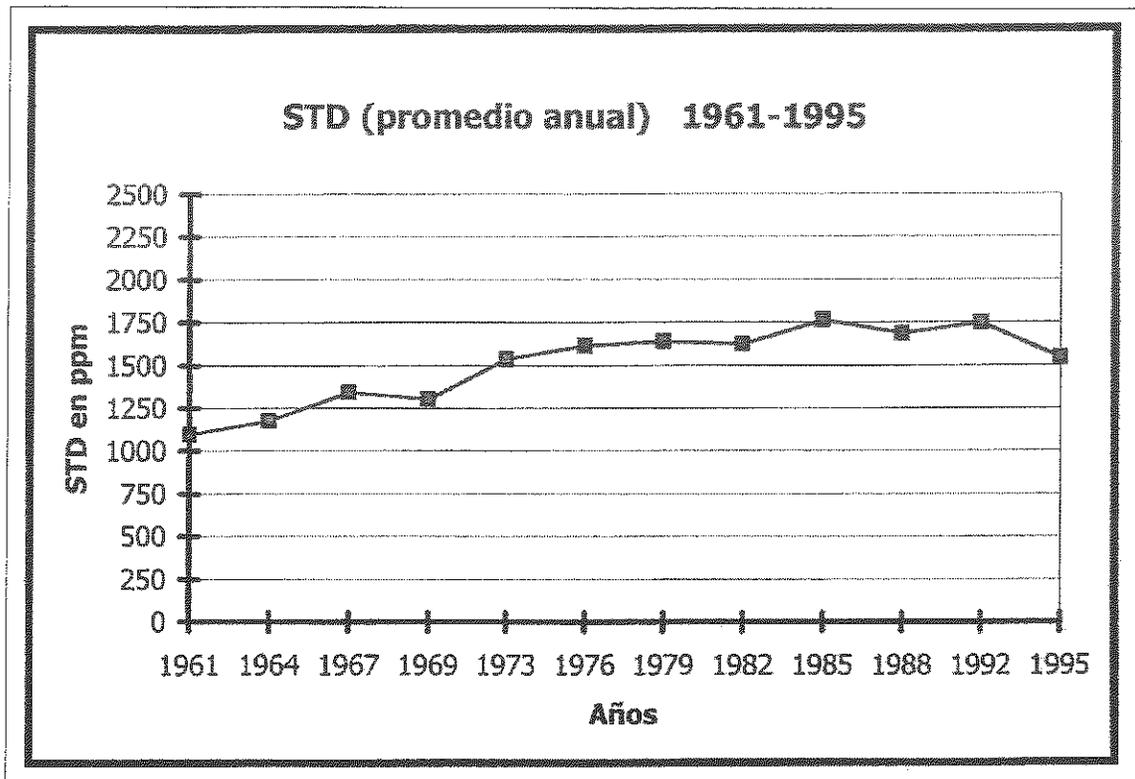


Figura 5. Evolución química del contenido de sólidos totales disueltos (tomado de Vázquez González *et al.*, 1998).

El yacimiento geotérmico de Cerro Prieto está contenido en la unidad B (descrita en el apartado II.3), la cual está compuesta por alternancias de lutitas y areniscas principalmente. La secuencia sedimentaria ha sido alterada hidrotermalmente a diferentes temperaturas, dando origen a la formación de clorita e illita y la adición de cementante calcita, ocasionando la reducción de porosidad y permeabilidad y litificación de los sedimentos (Lyons y Van de Kamp, 1980; Elders *et al.*, 1984).

Aunado a lo anterior, el marco tectónico en la zona está representado por un sistema de fallas de carácter regional orientadas N 42-45° W conocidas como las fallas Imperial y Cerro Prieto y asociada a ellas, una serie de fallas secundarias con direcciones perpendiculares a las

anteriores (fallas H, L, S, en Halfman *et al.*, 1984), ha ocasionado el desplazamiento vertical por secciones de los estratos. El resultado de la alteración hidrotermal y los desplazamientos verticales en zonas de falla, es una estructura compleja del yacimiento geotérmico, con horizontes productores de vapor a diferentes profundidades. De acuerdo a gran cantidad de estudios sobre el campo geotérmico estos horizontes productores se identifican como reservorios Alfa, Beta y Gamma.

El reservorio Alfa, es el más superficial y se ubica en la parte oeste del campo. Se encuentra a profundidades de 1000 a 1500 m, y originalmente presentaba temperaturas de 260 a 310 °C. Cubre una extensión aproximada de 4.5 km<sup>2</sup> y se ubica al oeste de la vía del ferrocarril. A esta zona también se le identifica como Cerro Prieto 1 (CP1).

El reservorio Beta, se extiende bajo el campo de Cerro Prieto (aproximadamente 15 km<sup>2</sup>) y tiene profundidades entre 1500 y 2700 m, presenta temperaturas de 320 a 340 °C y es de donde se obtiene la mayor producción de vapor (Truesdell *et al.*, 1989; 1992). El reservorio Beta está dividido por la falla H reportada por Halfman (1984) que atraviesa el campo en dirección al Ejido Hidalgo y que presenta un desplazamiento vertical; la zona de pozos al SE de la falla (bloque bajo) se identifica como Cerro Prieto 2 (CP2); la zona de pozos al NW de la misma corresponde a Cerro Prieto 3 (CP3).

El reservorio Gamma se encuentra a mayor profundidad que los otros dos y es actualmente explotado en la zona NE del campo, en lo que corresponde a Cerro Prieto 4 (CP4).

La interacción entre el acuífero somero del valle de Mexicali y el yacimiento geotérmico tiene dos componentes: una de origen natural y la otra inducida por la explotación del yacimiento. Entre las de origen natural, la más importante es la descarga de

---

fluidos geotérmicos calientes al acuífero somero, ocasionando las manifestaciones de actividad termal en la superficie del terreno, y el incremento de la concentración de sales debido a la mezcla con las aguas de los estratos superiores (ver por ejemplo los datos de 1995 para los pozos II-4, II-9, II-12, S-16, en el anexo C).

### III HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogeoquímica estudia el resultado combinado de la composición del agua que entra al acuífero y de las reacciones que tiene con los minerales presentes en la roca. Además de los procesos naturales que controlan la calidad química, hay otros factores que influyen en la contaminación del agua, tal como el nitrato de los fertilizantes, la lluvia ácida (aunque no es el caso de nuestra área de estudio), las descargas de aguas domésticas, etc. Todo esto afecta la composición química del agua subterránea.

El uso clásico de los análisis químicos de agua en la hidrología es generar información concerniente a la calidad de ésta. La hidrogeoquímica también permite rastrear los orígenes y la historia del agua. Su composición cambia mediante reacciones químicas con el ambiente y su calidad puede dar información acerca de los ambientes por los cuales el agua ha circulado.

En este capítulo se detallan a continuación los aspectos importantes en cuanto a los iones analizados; los esquemas de clasificación química utilizados y la calidad de los análisis químicos empleados. También se describe de forma sintetizada las características principales del programa utilizado en la obtención de las representaciones gráficas de las muestras de agua.

#### III.1 Iones analizados

Cuando una sal se disuelve en agua, su molécula se disocia en iones electropositivos (cationes) y electronegativos (aniones) de los cuales se requiere conocer su concentración en cada una de las muestras colectadas. Esto se logra mediante la realización de análisis

---

químicos del agua muestreada. La exhaustividad del análisis está en función de los usos que pretenda destinarse el agua.

Para el presente trabajo, se consideró una base de datos hidrogeoquímicos proveniente de 302 pozos de CNA bien identificados con clave, coordenadas UTM para su ubicación y análisis químico. De este último, se reportó la determinación de 6 iones principales: Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y Cloro ( $\text{Cl}^-$ ), que son los que proporcionan al agua la mayor parte de su salinidad. Los años considerados con datos son 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1994 y 1995. Al depurar esta base de datos se obtuvo 228 pozos con los cuales se trabajó. De éstos, específicamente se contó con 105 análisis para 1987, 144 para 1988, 41 para 1989, 153 para 1990, 138 para 1991, 120 para 1992, 59 para 1994 y 158 para 1995; generando un total de 918 análisis químicos hechos por la CNA y la CFE para el área de estudio. De lo anterior se observa que los años con menos datos son 1989 y 1994, mientras que 1988, 1990 y 1995 son los años con mayor cantidad de datos.

La concentración de los iones determinados se expresa en partes por millón (ppm), sin embargo, hay equivalencia en miligramos por litro (mg/L) si la densidad de la muestra de agua es de 1 gramo/centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

La profundidad de muestreo es considerada de tipo integrada y no de tipo específica (figura 6); por lo tanto, la composición química refleja una muestra representativa del intervalo ranurado del pozo y con este tipo de muestreo se identifican patrones regionales en la composición química del agua y su relación con el tipo de roca; el muestreo a profundidad específica es utilizado para estudiar procesos hidrogeoquímicos con más detalle.

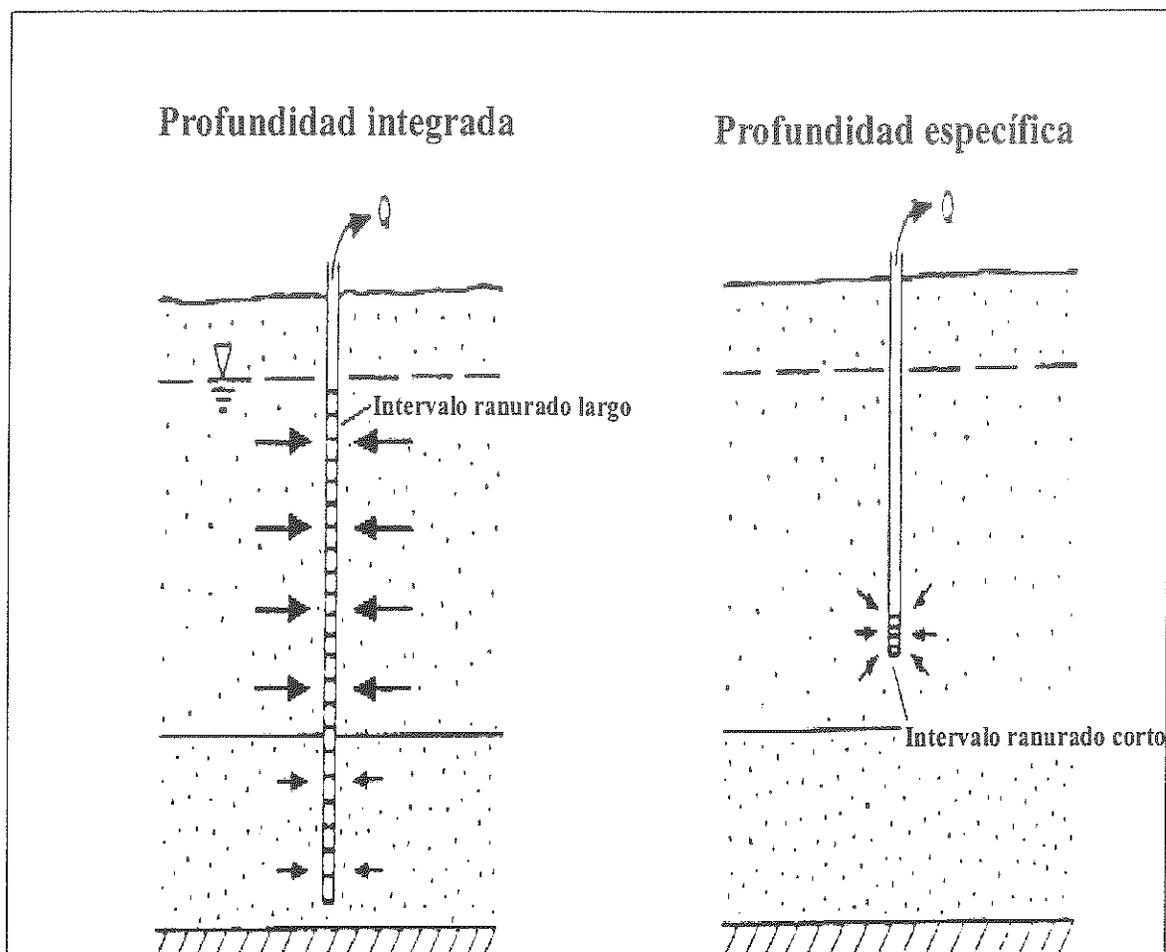


Figura 6. Profundidades de muestreo de agua subterránea: integrada (izquierda) y específica (derecha); (modificada de Cherry, 1983).

### III.2 Clasificación química del agua subterránea

El objetivo principal de clasificar las aguas subterráneas es proporcionar información acerca de su composición química y su origen. Existen numerosos esquemas de clasificación, pero en el presente trabajo se utilizó el que toma en cuenta la concentración de sólidos totales disueltos (STD) (Custodio y Llamas, 1983), obteniéndose

cuatro tipos (tabla I) y el que clasifica de acuerdo a los iones dominantes presentes, dando 9 familias, permitiendo conocer los aniones y cationes dominantes (tabla II).

**Tabla I. Clasificación del agua subterránea basándose en la concentración de STD.**

Clasificación	Concentración de STD en ppm
Agua dulce	0 – 1,000
Agua salobre	1,000 – 10,000
Agua salada	10,000 – 100,000
Salmuera	Mayor a 100,000

**Tabla II. Clasificación química del agua subterránea de acuerdo a los iones dominantes.**

Bicarbonatada			Sulfatada			Clorurada		
Ca	Mg	Na	Ca	Mg	Na	Ca	Mg	Na

Es importante señalar que para la primera clasificación, los STD son simplemente la suma de todos los constituyentes disueltos en la muestra de agua (en este caso, aniones más cationes). La segunda consiste en nombrar el agua por el anión y el catión que sobrepasa al 50% de sus sumas respectivas (por ejemplo, clorurada-sódica). Si ninguno de los cationes y/o aniones supera este porcentaje, se nombran los dos iones más abundantes.

### III.3 Calidad de los análisis químicos

De acuerdo con Appelo y Postma (1993) se distinguen en general dos tipos de errores en los análisis químicos: a) *errores estadísticos*, que reflejan fluctuaciones aleatorias en los procesos analíticos y b) *errores sistemáticos*, que muestran desviaciones sistemáticas debido a procedimientos defectuosos o interferencias durante el análisis.

La exactitud de los análisis químicos utilizados se estimó mediante la expresión (1) conocida como Electro-Neutralidad (EN), ésta considera que la suma de cargas positivas y negativas en el agua tienen que estar balanceadas. Las sumatorias se realizaron tomando en cuenta los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y los aniones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ; todos expresando su concentración en miliequivalentes por litro (meq/L).

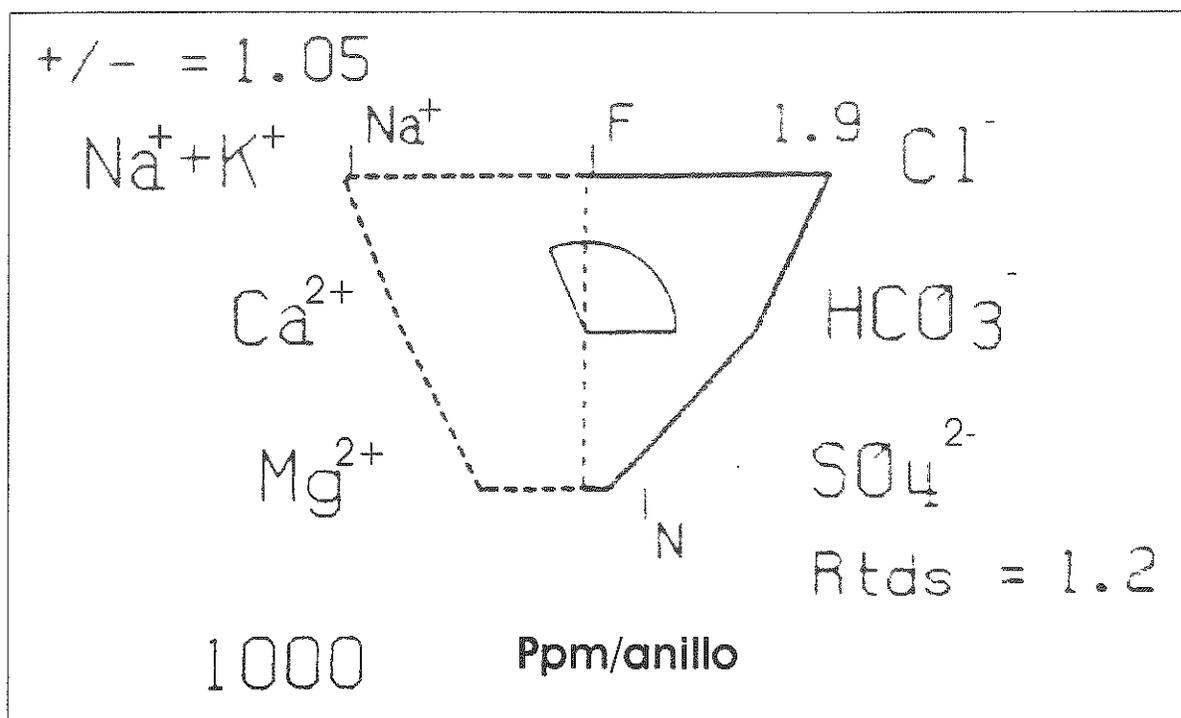
$$\text{EN}(\%) = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} (100) \quad (1)$$

Se consideró como análisis aceptable aquel cuya EN fuera menor de 5%, los que superaron este porcentaje no fueron considerados y se eliminaron (anexo C). Dado que la concentración de nuestros análisis está dada en ppm y para (1) se requiere meq/L fue necesario recalcular cada uno de los análisis químicos.

### III.4 LEEGRAM

LEEGRAM es un programa en lenguaje Fortran desarrollado para el reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos subterráneos y para el agrupamiento de masas de agua en forma cuantitativa, especialmente en áreas con alta variabilidad en la concentración de STD (Lee, 1998).

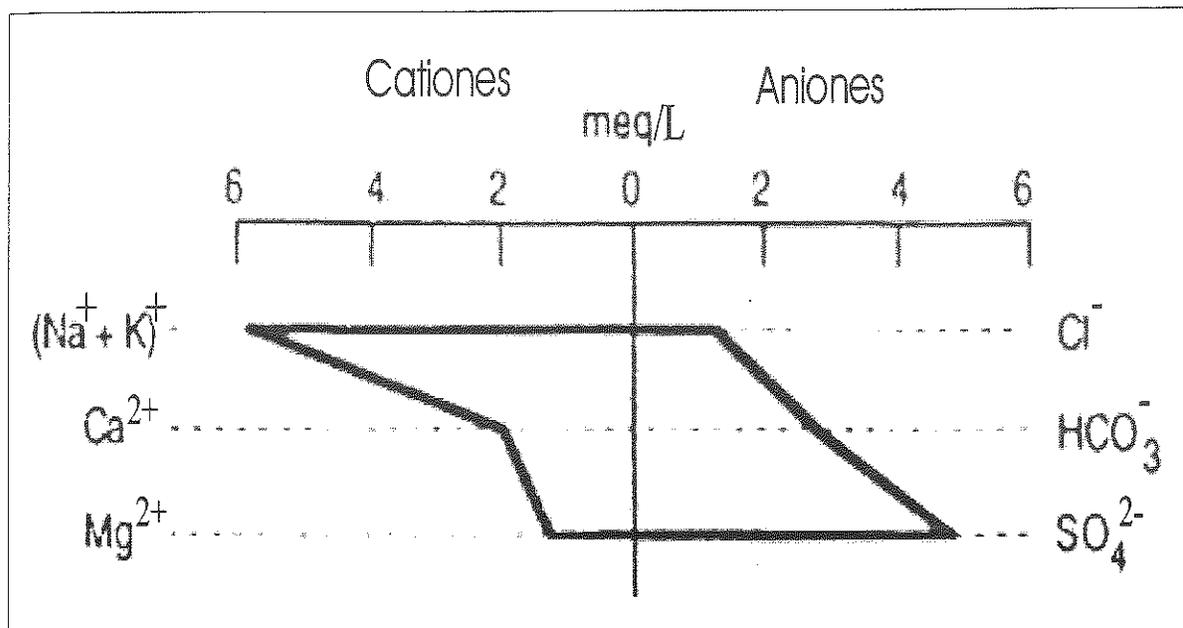
El programa introduce un nuevo significado en las representaciones gráficas mediante diagramas de Lee (figura 7) y con el uso de círculos que denotan en el mismo diagrama la concentración de los STD; esto facilita el observar a primera vista el tipo de agua en función de los iones dominantes y su calidad química en términos de la concentración de STD en diagramas totalmente homogéneos.



**Figura 7. Diagrama de Lee.** Los STD están representados por un arco en escala de 1000 ppm por círculo. Todas las opciones son desplegadas. La mitad izquierda del diagrama correspondiente a cationes está en línea punteada para indicar desequilibrio en las cargas. El sector de arco cerrado denota que la determinación de los STD es aceptable. También se muestra la razón de carga (+/-), la razón de los STD medidos y calculados ( $R_{tds}$ ) y la concentración de Cl (tomado de Lee, 1998).

Es importante señalar que un diagrama de Lee está basado en un diagrama de Stiff convencional, que como se ilustra en la figura 8, despliega las concentraciones en meq/L de siete iones principales ordenados en tres pares ( $\text{Na}+\text{K}-\text{Cl}$ ;  $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ ;  $\text{Mg}-\text{SO}_4$ ). Del lado

derecho a partir del eje central del diagrama se tiene a los aniones y del lado izquierdo a los cationes. Una escala se anexa y su tamaño depende del valor de las concentraciones de los iones. Cabe mencionar que para este trabajo sólo se consideraron 6 iones principales, quedando excluido el ion  $K^+$  debido a que no se contó con datos suficientes, por lo tanto, su valor fue considerado como cero. Esto no modifica de manera importante la forma del diagrama, dada la menor concentración relativa de este ion en comparación con los demás elementos que forman el diagrama.



**Figura 8. Diagrama de Stiff convencional.** A la derecha se muestran los tres aniones principales, a la izquierda los tres cationes principales. La forma del diagrama indica las proporciones relativas de los diferentes iones y el tamaño indica las concentraciones totales, la escala es expresada en meq/L (tomado de Drever, 1997).

Expresado lo anterior, un diagrama de Lee es similar a un diagrama de Stiff con ciertas modificaciones. La principal es la normalización de las concentraciones individuales con respecto a la Concentración Iónica Total (CIT), esta normalización conserva la forma

del diagrama porque las razones iónicas son guardadas, esto armoniza la distribución del tamaño en el diagrama, pero ignora las concentraciones absolutas. Sin embargo, esta falta es compensada utilizando los círculos y arcos mencionados al inicio del apartado para representar esta concentración tal como se muestra en la figura 7.

La finalidad de utilizar este programa fue obtener la clasificación del tipo de agua subterránea en el acuífero del valle de Mexicali y asimismo definir su calidad; de esta manera, se cumple con uno de los objetivos particulares del trabajo. Lo anterior se logró mediante la obtención de una representación gráfica para cada análisis químico (diagramas de Lee). Se utilizaron 15 archivos de entrada ordenados de acuerdo al formato requerido por el programa, en dichos archivos se especificaron datos como: clave del pozo, año de obtención de la muestra, concentración (en ppm) de los iones ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) y de los STD. Para más detalle en cada archivo se puede consultar el anexo D.

Se eligieron las distintas opciones al ejecutar el programa, se especificó el tipo de diagrama a desplegar, el número de diagramas por página, la escala para los STD, el balance de la carga, la razón entre los STD medidos y los STD calculados, el nombre del archivo de salida, entre otras opciones. De esta manera, se generaron 15 archivos de salida (para más detalle en cada archivo se puede consultar el anexo D), 918 representaciones gráficas en diagramas de Lee ordenadas en conjuntos de 12 muestras por página y 15 diagramas de Piper (para más detalle en cada diagrama se puede consultar el anexo E). Con esto se pudo observar a primera vista el tipo de agua en función de los iones dominantes y su calidad en términos de los STD.

Respecto a los diagramas de Piper (figuras 9 y 10), que es una más de las opciones que provee LEEGRAM para visualizar de manera agrupada estos diferentes tipos de agua,

se comenta que para este caso particular no se utilizaron dichos diagramas debido a que el programa no maneja más de 100 datos al mismo tiempo. Para ello se recurrió a la generación de mapas que mostraran estos datos, para que en conjunto y por cada año se establecieran estas agrupaciones.

Se generó un registro en formato Excel para las 918 muestras, con su clave, el análisis químico, el recálculo de la concentración de ppm a meq/L, el balanceo de cargas mediante la EN y la clasificación de acuerdo a los iones dominantes y a la concentración de STD (anexo C).

Esta base de datos constituye el cimiento de la tesis y aunque requirió una gran inversión de tiempo constituye una de las aportaciones más importantes de este estudio.

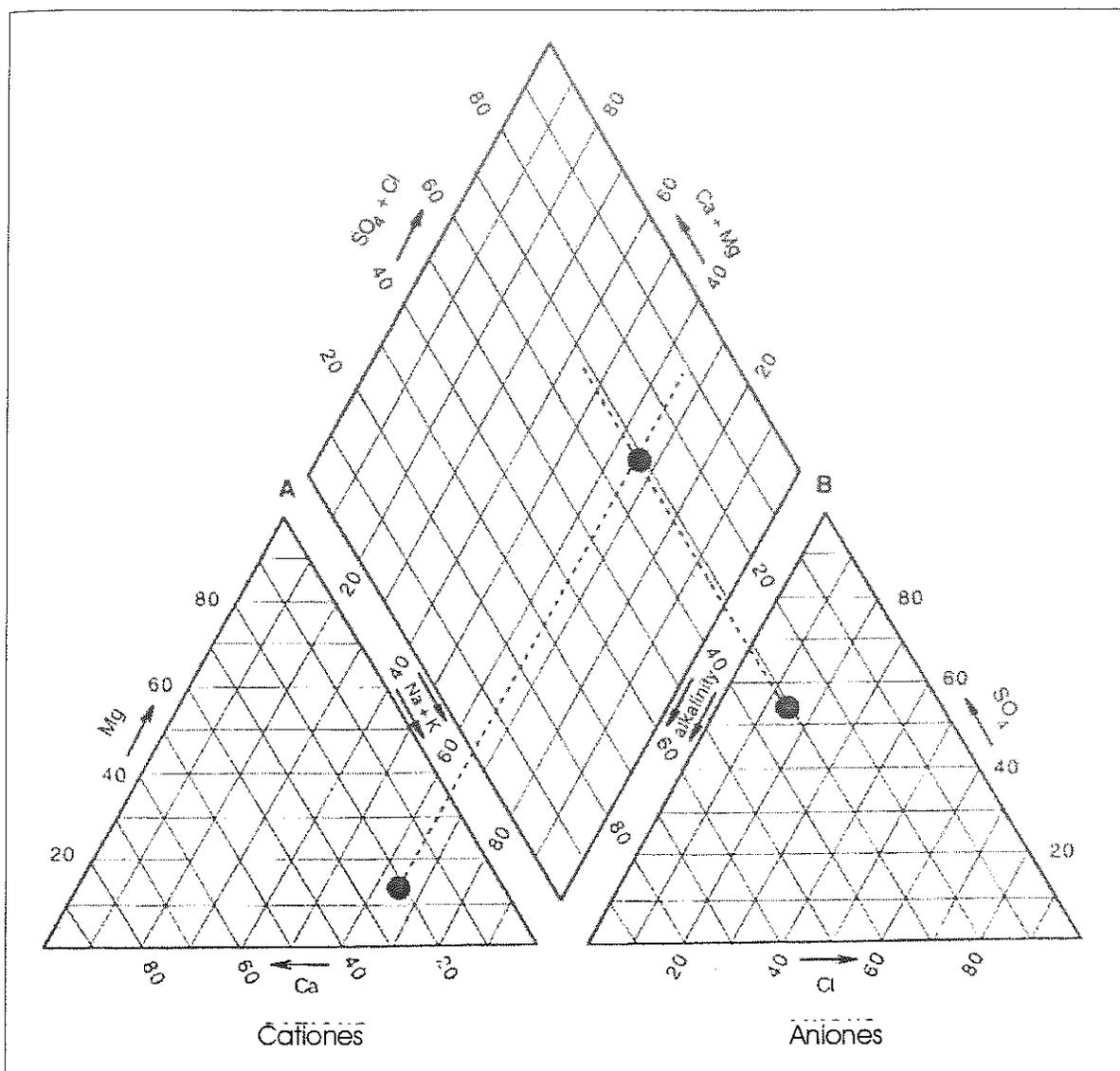


Figura 9. Ejemplo de un diagrama de Piper. La esquina A corresponde al 100% de Mg en el triángulo de los cationes, en el cuadrilátero corresponde a 100% de Ca+Mg, 0% de Na+K, 100% de alcalinidad y 0% de SO<sub>4</sub>+Cl. La esquina B corresponde al 100% de SO<sub>4</sub> en el triángulo de los aniones, en el cuadrilátero corresponde a 100% de Na+K, 0% de Ca+Mg y 100% de SO<sub>4</sub>+Cl (después de Piper, 1944).

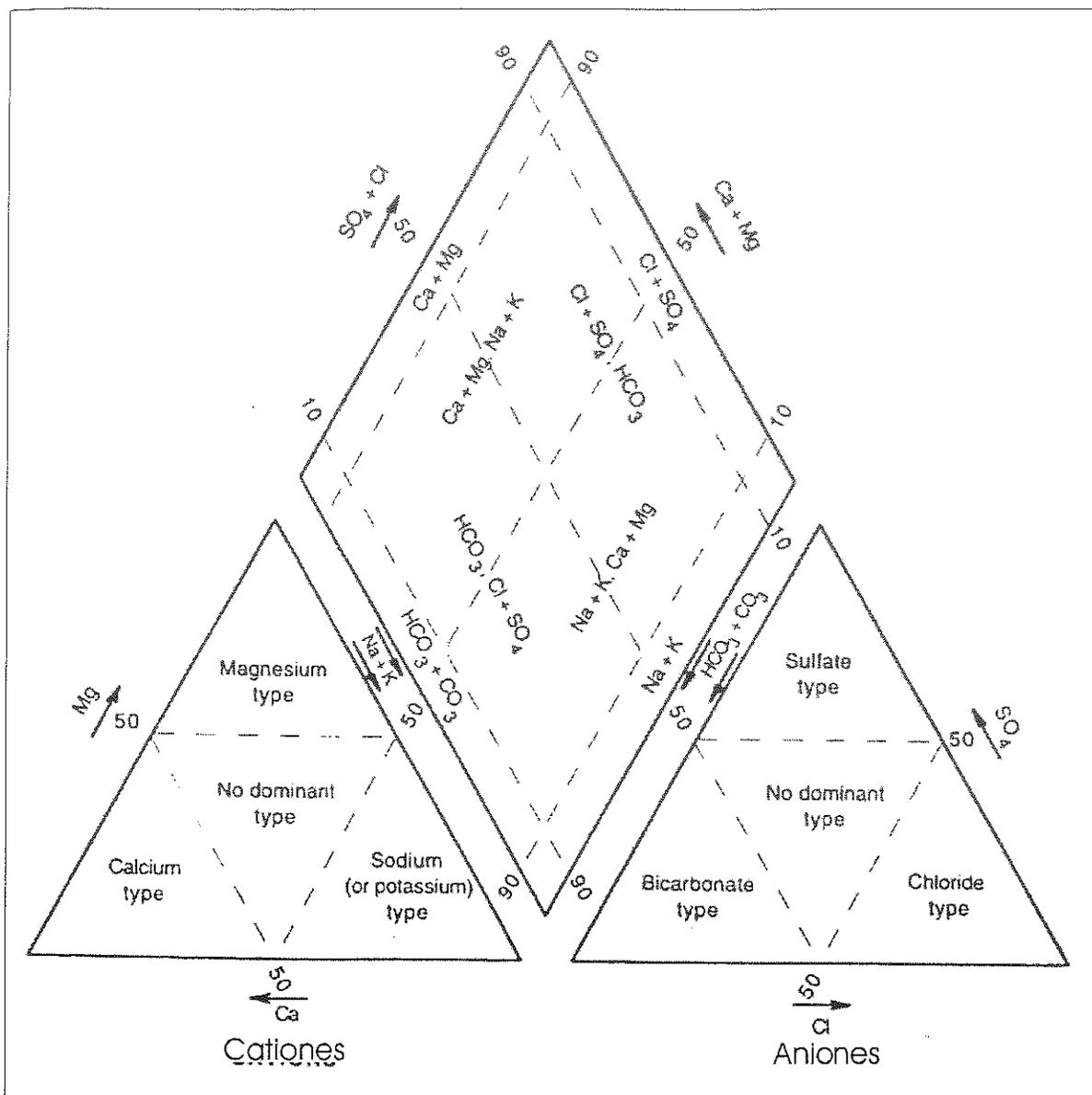


Figura 10. Facies hidroquímicas basadas en el porcentaje de equivalentes totales de cada ion (después de Back, 1966).

#### IV TIPOS DE AGUA, SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS, IONES PRINCIPALES

En este capítulo se analiza y describen los diferentes tipos de agua para cada año, obtenidos en función de los iones dominantes y su distribución espacial en el área de estudio. Se describe la concentración de STD, sus variaciones y su distribución en la zona estudiada, se señala además, su clasificación de acuerdo a este parámetro (STD) y el uso principal para el cual se recomienda el agua (tabla III). Finalmente, se describen las concentraciones de los iones principales más abundantes en el área ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ), indicando su distribución espacial en la región y su comparación con los límites permisibles (tabla IV) de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 referente a "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

Toda la descripción y el análisis realizados, son a partir de mapas generados de los datos químicos depurados, donde se observó detalladamente la distribución y agrupamiento de pozos por familia de agua, la concentración de STD y las concentraciones de los iones principales.

Enseguida se ilustran las tablas III y IV utilizadas de referencia para el análisis y descripción detallada para cada año de los parámetros mencionados. Al final del capítulo se hace una síntesis de los resultados obtenidos con referencia en la tabla V.

**Tabla III. Uso principal para el que se recomienda el agua en función de la concentración de STD (según NOM-127-SSA1-1994).**

Clasificación del agua en función de la concentración de STD	Principal uso del agua
Aguas dulces (< 1000 ppm)	- Recomendables para consumo humano.
Aguas salobres (1000-10,000 ppm)	- Recomendables para uso agrícola si los STD son menores a 3000 ppm. - No recomendables para consumo humano.
Aguas saladas (10,000-100,000 ppm)	- No recomendables para consumo humano ni para uso agrícola.

**Tabla IV. Límites permisibles para uso y consumo humano de características químicas del agua de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994.**

Característica química	Límite permisible (mg/L)
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	400
Sodio	200
Sólidos Totales Disueltos	1000

#### IV.1 Análisis y Distribución para 1987

Para este año se contó con información de 105 análisis químicos y se obtuvo como resultado la clasificación del agua en 6 familias: cloruradas-sódicas (Cl-Na), cloruradas-cálcicas (Cl-Ca), sulfatadas-sódicas (SO<sub>4</sub>-Na), sulfatadas-cálcicas (SO<sub>4</sub>-Ca), bicarbonatadas-sódicas (HCO<sub>3</sub>-Na) y bicarbonatadas-cálcicas (HCO<sub>3</sub>-Ca). De acuerdo al mapa 1 (anexo A), la distribución espacial en el área de estudio muestra que predominan en la periferia las aguas tipo Cl-Na. En la parte central se observa una mayor variación en cuanto al tipo de agua, predominando las SO<sub>4</sub>-Na, Cl-Ca y SO<sub>4</sub>-Ca. Las de tipo HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca son las más escasas, encontrándose sólo en los pozos 13-Valle y R-10, respectivamente.

Respecto a la concentración de STD de 1987, se observa en el mapa 1-A (anexo A) que varía entre 520 y 2804 ppm (pozos 276-B y 19-000-I-C, respectivamente), se advierten valores menores a 1000 ppm, lo que implica tener aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano, en tres zonas: al sur y sureste de San Luis Río Colorado (SLRC); al norte del ejido Hermosillo y al noreste del ejido Guadalupe Victoria. El resto del área presenta aguas salobres, pero de acuerdo a la tabla III, estas aguas salobres pueden tener un uso agrícola. Las concentraciones más elevadas se perciben hacia el noroeste y sur de la zona en estudio, con valores superiores a 1500 ppm.

Con relación a los iones principales, se tiene que el ion Cl<sup>-</sup> (anexo F) presenta valores entre 114 y 738 ppm (pozos 276-B y 1-Nuevo Michoacán, respectivamente); de acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en tres zonas: al sur y sureste de SLRC; al noreste del ejido Guadalupe Victoria y al norte del ejido Hermosillo; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más

elevadas al sur y centro-oeste de la zona, con valores por encima de 550 y 450 ppm respectivamente.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 38 y 960 ppm (pozos R-10 y 19-000-I-C, respectivamente); con referencia en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran al este, suroeste y una porción al norte de la zona de estudio; para el resto del área las concentraciones sobrepasan el límite para consumo humano, localizándose las más altas al sur y noroeste de la región, con valores promedio de 500 y 650 ppm respectivamente.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 78 y 632 ppm (pozos 276-B y 1-Nuevo Michoacán, respectivamente); con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran al sur y sureste de SLRC; al noreste del ejido Guadalupe Victoria; al norte del ejido Hermosillo y al noreste, este y sur del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones superan el límite para consumo humano, hallándose las más elevadas al sur y noroeste de la zona, con valores superiores a 400 ppm.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 24 y 328 ppm (pozos 1-Bolsa, V-11 y 9-4-I-3-I); en la tabla IV no se menciona su límite permisible por lo que sólo nos limitamos a decir que las más altas concentraciones se localizan al centro-norte y centro-oeste de la región, con valores mayores a 200 ppm.

#### **IV.2 Análisis y Distribución para 1988**

De este año, a diferencia del anterior, se dispuso de más análisis químicos, 144. De ellos se obtuvo como resultado la clasificación del agua en 5 familias: Cl-Na, Cl-Ca,  $\text{SO}_4$ -Na,  $\text{SO}_4$ -Ca y  $\text{HCO}_3$ -Na. Con base en las observaciones hechas al mapa 2 (anexo A). La

distribución en el área de estudio muestra que predominan en la periferia norte, sur y este las aguas tipo Cl-Na, en la parte central y oeste existe una mayor variación en cuanto al tipo de agua, prevaleciendo las Cl-Ca,  $\text{SO}_4\text{-Na}$  y  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ . Las de tipo  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  son más escasas, se encuentran localmente distribuidas solamente en ocho pozos del área estudiada. Como se puede observar, al igual que en 1987 se conserva la predominancia de los distintos tipos de agua en la región.

Respecto a la concentración de STD para este año, se observa en el mapa 2-A (anexo A) que varía entre 623 y 2991 ppm (pozos 9-Bórquez y 3-Yucatán, respectivamente), notándose un aumento en más de 100 ppm con respecto al año anterior. Se aprecian valores menores a 1000 ppm en las siguientes áreas: al sur y sureste de SLRC (igual que el año pasado); al noreste, este y sureste del ejido Guadalupe Victoria; al noroeste del ejido Paredones y al suroeste del ejido Algodones; por consiguiente, se clasifican como aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano; el resto del área se clasifica como aguas salobres, pero con referencia en la tabla III, estas aguas salobres pueden ser utilizadas para riego agrícola. Las concentraciones más altas se advierten hacia el noroeste, sur (igual que el año anterior) y centro del área estudiada, con valores superiores a 2000 ppm; este dato con respecto al del año pasado es mayor en más de 500 ppm.

Con relación a los iones principales, se tiene que el ion  $\text{Cl}^-$  (anexo F) presenta valores entre 121 y 824 ppm (pozos 276-B, 2-Sociedad San Luis y 3-Yucatán), apreciándose un ligero aumento con respecto al año pasado. De acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al noroeste, este, sur y sureste de SLRC (mismo que el año anterior); al noreste y este del ejido Guadalupe

---

Victoria (igual que el año pasado); al sureste del ejido Saltillo; al suroeste del ejido Algodones; al noreste y sureste del ejido Hermosillo; al norte y noroeste del ejido Colima y al oeste del ejido Mérida. Para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas al sur, centro (mismas que el año anterior) y noroeste de la zona en estudio, con valores por encima de 500 ppm, similares a los de 1987.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 38 y 1008 ppm (pozos 1-Ulloa y 9-4-I-3-I, respectivamente); con referencia en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran al centro, este, suroeste y parte del norte de la zona de estudio; para el resto del área las concentraciones rebasan el límite, localizándose las más altas al sur, suroeste y norte de la región, con valores promedio de 450, 600 y 750 ppm respectivamente. Se observa que los valores son similares con respecto al año 1987.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 92 y 598 ppm (pozos 276-B, 9-8-2-Derecha y 1-Nuevo Michoacán, 3-Yucatán); con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al sureste y suroeste de SLRC (igual que el año pasado); al noreste del ejido Guadalupe Victoria (misma que el año anterior); al sureste y noroeste del ejido Hermosillo; al norte, sur y oeste del ejido Colima; al suroeste del ejido Algodones y al oeste del ejido Mérida. Para el resto del área las concentraciones superan tal límite, hallándose las más elevadas en los mismos sitios que 1987 (sur y noroeste de la zona) con iguales valores (superiores a 400 ppm).

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 20 y 320 ppm (pozos 9-Bórquez y 9-4-I-3-I, respectivamente), que son semejantes a 1987. Concentraciones permisibles se desconocen porque no son reportadas en la tabla IV, pero las más altas se localizan al noroeste de la zona con valores superiores a 200 ppm.

### IV.3 Análisis y Distribución para 1989

Este año es el que tiene menos datos, sólo se cuenta con 41 análisis químicos. De ellos se obtuvo como resultado la clasificación del agua en 6 familias: Cl-Na, Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na, SO<sub>4</sub>-Ca, HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca. De acuerdo al mapa 3 (anexo A), la distribución espacial en el área estudiada indica que hay variación en cuanto al tipo de agua, pero se observa una predominancia hacia la parte sureste y norte de aguas tipo Cl-Na, en la parte central predominan las Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na y SO<sub>4</sub>-Ca. Las de tipo HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca son muy particulares y escasas, encontrándose sólo en los pozos 1-Ulloa y 1-Monumentos, respectivamente. Como en los años anteriores, prevalecen las mismas condiciones en cuanto al tipo de agua dominante.

Sobre la concentración de STD en este año, se observa en el mapa 3-A (anexo A) que varía entre 582 y 2659 ppm (pozos 1-Ulloa y 9-4-I-3-I, respectivamente), siendo notable una ligera disminución respecto a 1987 y 1988. Se advierten valores menores a 1000 ppm al sur y sureste de SLRC (igual que los años anteriores) y al noroeste del ejido Paredones (igual que el año pasado), lo que implica tener aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano en estas zonas; el resto del área presenta aguas salobres, pero de acuerdo a la tabla III, estas aguas salobres pueden tener un uso agrícola. Las concentraciones más elevadas se perciben en las inmediaciones del ejido Paredones, con valores superiores a 2000 ppm; la parte central del área promedia 1500 ppm.

En relación con los iones principales, se tiene que el ion Cl<sup>-</sup> (anexo F) presenta valores entre 114 y 724 ppm (pozos 1-Ulloa y 9-4-I-3-I, respectivamente); de acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se localizan al oeste, sur y sureste de SLRC (igual que los años anteriores); en las inmediaciones del ejido Ciudad Morelos; al noroeste del

ejido Paredones y al noreste del ejido Hermosillo; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas en las inmediaciones del ejido Paredones con valores superiores a 500 ppm, similares a 1987 y 1988.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 48 y 864 ppm (pozos 1-Ulloa y 7-3-III-7, respectivamente); con referencia en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en la periferia del área, sólo la parte central excede este límite, localizándose las mayores concentraciones en las inmediaciones del ejido Paredones con valores superiores a 700 ppm. Se observa que estos valores son similares con respecto a 1987 y 1988.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 74 y 442 ppm (pozos 1-Ulloa y 7-3-III-7, respectivamente); con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en la periferia del área excepto hacia el centro, oeste y sureste de dicha zona; para el resto las concentraciones superan tal límite, hallándose las más elevadas en las inmediaciones del ejido Paredones con valores superiores a 300 ppm. Se observa que este parámetro disminuyó en más de 100 ppm con respecto a 1987 y 1988.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 28 y 320 ppm (pozos V-4-W y 9-4-I-3-I, respectivamente). En la tabla IV no se menciona su límite permisible por lo que sólo nos limitamos a decir que las más altas concentraciones se localizan en las inmediaciones del ejido Paredones con valores superiores a 200 ppm. Este valor se mantuvo para los años anteriores.

#### IV.4 Análisis y Distribución para 1990

Este año es de los que cuenta con 153 análisis químicos que es el mayor número de datos, de los que se obtuvo como resultado la clasificación del agua en 6 familias: Cl-Na,

Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na, SO<sub>4</sub>-Ca, HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca. Con base en las observaciones hechas al mapa 4 (anexo A), la distribución en el área de estudio muestra que predominan en la periferia las aguas tipo Cl-Na. En la parte central existe una mayor variación en cuanto al tipo de agua, prevaleciendo las Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na y SO<sub>4</sub>-Ca. Las de tipo HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca son las más escasas, encontrándose localmente distribuidas en cinco pozos del área estudiada únicamente. Al igual que en 1987, 1988 y 1989 se mantienen condiciones idénticas en cuanto a los tipos de agua predominantes en la región.

Respecto a la concentración de STD para este año, se observa en el mapa 4-A (anexo A) que varía entre 642 y 3285 ppm (pozos R-18 y 3-Nuevo Michoacán, respectivamente), siendo notorio un aumento de al menos 300 ppm con respecto a los años antes analizados. Se aprecian valores menores a 1000 ppm en las siguientes áreas: al sur y sureste de SLRC (igual que los años anteriores); al noreste, este y sureste del ejido Guadalupe Victoria; al este del ejido Saltillo; en las inmediaciones y al oeste del ejido Colima; al noroeste del ejido Paredones; al sur del ejido Mérida y al suroeste del ejido Algodones; por consiguiente, estas zonas se clasifican como aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano; el resto del área presenta aguas salobres, pero con referencia a la tabla III, algunas de estas aguas salobres pueden ser utilizadas para riego agrícola. Las concentraciones más altas se advierten al sur, centro y noroeste de la zona en estudio, con valores superiores a 2000 ppm. Este valor se mantiene desde los últimos dos años.

Con relación a los iones principales, se tiene que el ion Cl<sup>-</sup> (anexo F) presenta valores entre 128 y 1235 ppm (pozos R-10 y 3-Nuevo Michoacán, respectivamente), apreciándose un fuerte aumento (más de 400 ppm) con respecto a 1987, 1988 y 1989. De

acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: en las inmediaciones, al sureste y suroeste de San Luis Río Colorado (mismos que en los años anteriores); al noreste y este del ejido Guadalupe Victoria; al este y sureste del ejido Saltillo; en las inmediaciones y al oeste del ejido Colima; al noroeste del ejido Paredones; al noroeste y norte del ejido Ciudad Morelos y al suroeste del ejido Algodones; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas al sur, centro y noroeste de la zona en estudio, con valores superiores a 500 ppm. Esto es similar a lo observado en los años anteriores.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 38 y 960 ppm (pozos 4-H y 11-Villahermosa, respectivamente); con referencia en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en la periferia del área con excepción de la parte sur, centro y oeste donde las concentraciones rebasan el límite, localizándose las más altas en las inmediaciones del ejido Paredones con valores superiores a 700 ppm.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 78 y 876 ppm (pozos R-62, R-10 y 3-Nuevo Michoacán); con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al sur y sureste de SLRC, al sureste y norte del ejido Hermosillo; al noreste del ejido Guadalupe Victoria; al norte, sur y oeste del ejido Colima; al noroeste del ejido Paredones; en las inmediaciones del ejido Mérida y al suroeste del ejido Algodones; para el resto del área las concentraciones superan tal límite, encontrando las más elevadas al sur del área y en la parte oeste del ejido Paredones, con valores superiores a 400 ppm.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 20 y 376 ppm (pozos 1-Bolsa y 9-4-I-3-I, respectivamente); en la tabla IV no se menciona su límite permisible por lo que

solamente se puede decir que las más altas concentraciones se localizan hacia el centro, norte y oeste de la zona con valores superiores a 200 ppm.

#### IV.5 Análisis y Distribución para 1991

Para este año se contó con información de 138 análisis químicos. Se obtuvo como resultado la clasificación del agua en 6 familias: Cl-Na, Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na, SO<sub>4</sub>-Ca, HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca. De acuerdo al mapa 5 (anexo A), la distribución espacial en el área estudiada indica que predominan en la periferia norte, sur y este las aguas tipo Cl-Na, en la parte central y oeste existe una mayor variación en cuanto al tipo de agua, prevaleciendo las Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Ca y SO<sub>4</sub>-Na. Las de tipo HCO<sub>3</sub>-Na y HCO<sub>3</sub>-Ca son más escasas y locales, encontrándose distribuidas sólo en ocho pozos de la región. Al igual que en los años antes analizados, se mantienen las mismas condiciones en cuanto a los tipos de agua predominantes en la región.

Sobre la concentración de STD para este año, se observa en el mapa 5-A (anexo A) que varía entre 630 y 3487 ppm (pozos 1-Ulloa y 2-Treviño, respectivamente). Este es el año que presenta la concentración más elevada, comparada con el año anterior, aumentando 200 ppm. Se advierten valores menores a 1000 ppm al sur y sureste de SLRC (igual que los años anteriores); al noreste y este del ejido Guadalupe Victoria; al oeste del ejido Mérida y al suroeste del ejido Algodones; lo que implica tener aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano; el resto del área presenta aguas salobres, pero de acuerdo a la tabla IV, algunas de estas aguas salobres pueden tener un uso agrícola. Las concentraciones más elevadas se perciben hacia el sur, centro, oeste y noroeste de la región en estudio, con valores superiores a 2000 ppm.

---

En relación con los iones principales, se tiene que el ion  $\text{Cl}^-$  (anexo F) presenta valores entre 121 y 980 ppm (pozos 1-Ulloa, 70-C y 2-Treviño); siendo notoria una disminución en el valor máximo de 245 ppm con respecto a 1990. De acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se localizan al sur y sureste de SLRC (igual que en años anteriores); al noreste del ejido Guadalupe Victoria; al sureste del ejido Saltillo; al oeste del ejido Colima; al oeste del ejido Mérida y al suroeste del ejido Algodones; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas al sur, sureste, centro y noroeste de la zona en estudio con valores superiores a 500 ppm.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 48 y 1037 ppm (pozos 1-Bolsa y 2-Treviño, respectivamente); con referencia a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en la periferia del área estudiada excepto una porción al oeste y suroeste; en el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose al sur, suroeste, centro y noroeste valores superiores a 400 ppm, llegando hasta más de 800 ppm al este del ejido Colima y al oeste del ejido Paredones.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 78 y 632 ppm (pozos R-62 y 2-Treviño, respectivamente); con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al sur y sureste de SLRC, al norte y sureste del ejido Hermosillo; al noreste del ejido Guadalupe Victoria; al este del ejido Saltillo; al norte y noroeste del ejido Colima; al suroeste del ejido Algodones y al oeste del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones superan tal límite, hallándose las más elevadas al sur, sureste y noroeste de la zona con valores superiores a 400 ppm.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 20 y 368 ppm (pozos 1-Bolsa y 136-B, respectivamente); en la tabla IV no se define su límite permisible pero podemos comentar

que las más altas concentraciones se localizan al centro, norte y oeste de la zona con valores superiores a 200 ppm.

#### IV.6 Análisis y Distribución para 1992

Este año también cuenta con 120 análisis químicos que es un buen número de datos. Con ellos se logró obtener la clasificación del agua en 6 familias: Cl-Na, Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na, SO<sub>4</sub>-Ca, HCO<sub>3</sub>-Na y cloruradas-magnésicas (Cl-Mg). Con base en las observaciones hechas al mapa 6 (anexo A), la distribución en el área de estudio muestra que predominan en la periferia norte, sur y este las aguas tipo Cl-Na, hacia la parte central y oeste existe una mayor variación en cuanto al tipo de agua, prevaleciendo las Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na y SO<sub>4</sub>-Ca. Las de tipo HCO<sub>3</sub>-Na y Cl-Mg son más escasas y particulares, las primeras se localizan sólo en tres pozos del área en estudio y las últimas sólo en uno. Se mantiene al igual que en los años anteriores la predominancia de los mismos tipos de agua en la región.

Respecto a la concentración de STD en este año, se observa en el mapa 6-A (anexo A) que varían entre 711 y 3444 ppm (pozos 33-CH y 6-9-2, respectivamente), notándose que estos valores son similares a los del año anterior. Se aprecian valores menores a 1000 ppm en las siguientes áreas: al sureste de SLRC (igual que los años antes analizados); al noreste del ejido Guadalupe Victoria y una pequeña porción al noroeste de la región estudiada; por consiguiente, se clasifican como aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano; el resto del área presenta aguas salobres, pero con referencia en la tabla III, algunas de estas aguas salobres pueden ser utilizadas para riego agrícola. Las concentraciones más altas se advierten hacia el sur, suroeste, centro, oeste y norte de la zona en estudio, con valores superiores a 2000 ppm.

---

Con relación a los iones principales, se tiene que el ion  $\text{Cl}^-$  (anexo F) presenta valores entre 128 y 809 ppm (pozos R-10 y 6-9-2, respectivamente); apreciándose una ligera disminución en la concentración (171 ppm) con respecto al año 1991. De acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al sureste de SLRC (misma que en años anteriores); al noreste del ejido Guadalupe Victoria; al noroeste del ejido Paredones y al noroeste del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas al sur, suroeste, centro y norte de la zona en estudio, con valores por encima de 500 ppm.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 38 y 1094 ppm (pozos 33-CH y 6-9-2, respectivamente); con referencia a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en la periferia de la zona de estudio excepto una porción al oeste, suroeste y sur; para el resto del área las concentraciones rebasan el límite, localizándose al sur, suroeste, centro, oeste y norte valores superiores a 400 ppm, llegando hasta más de 800 ppm al suroeste del ejido Mérida, al noreste del ejido Saltillo y al este del ejido Colima.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 115 y 655 ppm (pozos R-6, R-10, 1-Bórquez y 1-Nuevo Michoacán); con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al sur y oeste de SLRC, al noreste del ejido Hermosillo; al sureste del ejido Saltillo; al oeste del ejido Colima; al noroeste del ejido Paredones y al noroeste del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones superan tal límite, hallándose las más elevadas al sur, suroeste y noroeste de la zona con valores superiores a 400 ppm.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 24 y 352 ppm (pozos 25-Valle y A-N-4-5, respectivamente); en la tabla IV no está definido su límite permisible pero se puede

comentar que las más altas concentraciones se localizan al centro, norte y oeste de la zona con valores superiores a 200 ppm.

#### IV.7 Análisis y Distribución para 1994

Este año, al igual que 1989, es de los más escasos en cuanto a datos y se dispone solamente de 59 análisis químicos. Estos datos permiten clasificar el agua en 5 familias: Cl-Na, Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na, SO<sub>4</sub>-Ca y HCO<sub>3</sub>-Na. De acuerdo al mapa 7 (anexo A), la distribución espacial indica que hay variación en el tipo de agua, pero se observa una predominancia en la parte este, suroeste y noroeste de aguas tipo Cl-Na, en la parte central predominan las SO<sub>4</sub>-Na, Cl-Ca y SO<sub>4</sub>-Ca. Las de tipo HCO<sub>3</sub>-Na son muy locales y escasas, encontrándose sólo en los pozos R-120 y 33-CH.

Sobre la concentración de STD en este año, se observa en el mapa 7-A (anexo A) que varía entre 669 y 2839 ppm (pozos R-120 y 11-Villahermosa, respectivamente), siendo notable una disminución del valor máximo en 600 ppm con respecto al año anterior. Se advierten valores menores a 1000 ppm al sur y sureste de SLRC (igual que los años anteriores); al sureste del ejido Saltillo; al este del ejido Hermosillo y al norte y noroeste del ejido Paredones; lo que implica tener aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano en estas zonas; el resto del área presenta aguas salobres debido a la concentración superior a los 1000 ppm (tabla III), estas aguas salobres pueden tener un uso agrícola. Las concentraciones más elevadas se perciben hacia el este del ejido Ciudad Morelos; al noroeste del ejido Paredones; al suroeste del ejido Hermosillo y al suroeste del ejido Colima, con valores superiores a 2000 ppm. La parte central del área promedia 1500 ppm.

En relación con los iones principales, se tiene que el ion  $\text{Cl}^-$  (anexo F) presenta valores entre 135 y 603 ppm (pozos 7-3-III-2 y 57-CH, respectivamente), apreciándose una disminución en la concentración (200 ppm) con respecto al año 1992. De acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se localizan al sur de SLRC (igual que los años anteriores); al este del ejido Hermosillo; al suroeste del ejido Ciudad Morelos; al sureste del ejido Saltillo y al noroeste del ejido Paredones; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas al sur y noroeste del ejido Paredones; al suroeste del ejido Hermosillo; al suroeste del ejido Colima y al suroeste del ejido Benito Juárez, con valores superiores a 500 ppm.

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 96 y 960 ppm (pozos R-120 y 11-Villahermosa, respectivamente); con referencia en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en la periferia del área, sólo la parte central y oeste excede este límite, localizándose la mayor concentración al noroeste del ejido Paredones con valor superior a 800 ppm.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 92 y 448 ppm (pozos R-120 y 11-Villahermosa, respectivamente), con respecto al año anterior disminuyó la concentración en 200 ppm. Con base en la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran al sur de SLRC; al sureste del ejido Saltillo; al noreste del ejido Hermosillo; al sureste del ejido Benito Juárez y al sureste y suroeste del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones superan tal límite, hallándose las más elevadas en las inmediaciones del ejido Paredones; en las inmediaciones del ejido Hermosillo; al suroeste del ejido Benito Juárez; al suroeste del ejido Colima y al noreste del ejido Ciudad Morelos; con valores superiores a 300 ppm.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 28 y 332 ppm (pozos V-12 y 57-CH, respectivamente); en la tabla IV no se define su límite permisible pero se puede comentar que las más altas concentraciones se localizan hacia la parte central del área, con valores superiores a 200 ppm.

#### IV.8 Análisis y Distribución para 1995

Este es el último año de análisis, a diferencia de los anteriores, en éste se incluyen 30 análisis químicos de la zona del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), para el resto del área se cuenta con 128 datos por lo que en conjunto suman 158 siendo el año con mayor número de análisis. La descripción de los STD y de los iones principales para el área del CGCP se hará de manera separada debido a sus elevadas concentraciones.

De este modo se obtuvo como resultado la clasificación del agua en 7 familias: Cl-Na, Cl-Ca,  $\text{SO}_4$ -Na,  $\text{SO}_4$ -Ca,  $\text{HCO}_3$ -Na,  $\text{HCO}_3$ -Ca y  $\text{SO}_4$ -Mg. Con base en las observaciones hechas al mapa 8 (anexo A), la distribución en el área de estudio muestra que predominan en la zona del CGCP, en la periferia norte, sur y este, las aguas tipo Cl-Na; hacia la parte central y oeste existe una mayor variación en el tipo de agua, prevaleciendo las Cl-Ca,  $\text{SO}_4$ -Na y  $\text{SO}_4$ -Ca. Las de tipo  $\text{HCO}_3$ -Na,  $\text{HCO}_3$ -Ca y  $\text{SO}_4$ -Mg son escasas y locales, encontrándose sólo en los pozos R-6, R-10 e II-8-B respectivamente. Se mantiene al igual que en años anteriores la predominancia de los mismos tipos de agua en la región.

Respecto a la concentración de STD en este año, se observa en el mapa 8-A (anexo A) que varía entre 615 y 2683 ppm (pozos R-10 y 11-Villahermosa, respectivamente), siendo notoria una disminución de 150 ppm con relación al año anterior. Se aprecian valores menores a 1000 ppm en las siguientes áreas: al sur, sureste y suroeste de SLRC

(igual que los años antes analizados); al este y noreste del ejido Guadalupe Victoria; al suroeste del ejido Colima; al norte del ejido Hermosillo y al noroeste del ejido Paredones; por consiguiente, se clasifican como aguas dulces consideradas de buena calidad para consumo humano; el resto del área presenta aguas salobres si observamos la tabla III, estas aguas salobres pueden ser utilizadas para riego agrícola. Las concentraciones más altas se advierten hacia el suroeste, centro, oeste y noroeste de la zona en estudio, con valores superiores a 2000 ppm.

Para el área del CGCP (mapa 8-A, anexo A) las concentraciones oscilan entre 7075 y 52,352 ppm (pozos S-26 y S-16, respectivamente), si observamos la tabla III, estas aguas salobres (pozos I I-15-B y S-26) y saladas no se consideran recomendables para consumo humano ni para uso agrícola, el promedio de las concentraciones es de 30,000 ppm.

Con relación a los iones principales, se tiene que el ion  $Cl^-$  (anexo F) presenta valores entre 121 y 778 ppm (pozos R-6, R-10 y 214-C), apreciándose un aumento de 175 ppm en el valor máximo con relación al año 1994. De acuerdo a la tabla IV, concentraciones permisibles se encuentran en las siguientes zonas: al sureste y suroeste de SLRC (mismas que en años anteriores); al noreste del ejido Guadalupe Victoria; al suroeste del ejido Colima; al norte del ejido Hermosillo y al sureste y noroeste del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones exceden este límite, encontrándose las más elevadas al suroeste, centro y noroeste de la zona en estudio, con valores por encima de 500 ppm.

Para la zona del CGCP las concentraciones de  $Cl^-$  (anexo F) varían entre 3559 y 32,747 ppm (pozos S-26 y S-16, respectivamente), se observa que las altas concentraciones sobrepasan los límites permisibles para consumo humano (tabla IV) encontrándose las más

elevadas al sur del ejido Hidalgo y al suroeste de la Laguna de Evaporación Cerro Prieto con valores superiores a 20,000 ppm, mostrando una clara influencia de la descarga natural de aguas geotérmicas (ver apartado II.8 sobre Geotermia).

El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) muestra valores entre 67 y 960 ppm (pozos V-11 y 11-Villahermosa, respectivamente); concentraciones permisibles para consumo humano (tabla IV) se encuentran en la periferia de la zona de estudio excepto una porción al oeste y suroeste; para el resto del área las concentraciones rebasan el límite, localizándose al oeste, centro y norte valores superiores a 400 ppm llegando hasta más de 800 ppm al noroeste del ejido Paredones.

Para la región del CGCP las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  (anexo F) fluctúan entre 0.9 y 2328 ppm (pozos II-2 e II-10, respectivamente), con referencia a la tabla IV, concentraciones permisibles se observan en toda la margen centro-oeste del campo geotérmico, para el resto del área las concentraciones exceden el límite llegando hasta más de 1000 ppm en promedio hacia la parte este del CGCP.

El ion  $\text{Na}^+$  (anexo F) exhibe valores entre 80 y 471 ppm (pozos R-10 y 4-H, respectivamente); concentraciones permisibles para consumo humano (tabla IV) se encuentran en las siguientes zonas: al sureste y suroeste de SLRC, al sur del ejido Colima; al sureste del ejido Saltillo; al norte, noreste y noroeste del ejido Hermosillo; al sur y oeste del ejido Mérida; para el resto del área las concentraciones superan tal límite, hallándose las más elevadas al noroeste de la región con valores superiores a 400 ppm.

Para el área del CGCP las concentraciones de  $\text{Na}^+$  (anexo F) oscilan entre 2325 y 17,200 ppm (pozos S-26 y S-16, respectivamente), con referencia a la tabla IV, se observa que las altas concentraciones superan los límites permisibles encontrándose las más

elevadas al sur del ejido Hidalgo y al suroeste de la Laguna de Evaporación con valores superiores a 8000 ppm.

El ion  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) despliega valores entre 28 y 304 ppm (pozos 1-Bolsa, V-11 y 145-B, 199-C); en la tabla IV no se define su límite permisible pero se puede mencionar que las más altas concentraciones se localizan al centro, norte y oeste de la zona con valores superiores a 200 ppm.

Para la zona del CGCP las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  (anexo F) varían entre 94 y 4168 ppm (pozos S-26 e II-12, respectivamente), como se mencionó anteriormente su límite permisible no está definido (tabla IV) pero se observa que hacia la margen este del campo geotérmico llegan a tener más de 2000 ppm en promedio.

#### IV.9 Síntesis de resultados

Del análisis anterior y con base en la tabla V se puede resumir lo siguiente:

- Son 4 los principales tipos de agua que predominan en el área de estudio, en las inmediaciones o periferia prevalece la de tipo Cl-Na y hacia las partes centrales varía entre Cl-Ca,  $\text{SO}_4\text{-Na}$  y  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ .
  - La concentración de STD en general es variable, de 1987 (1506.10 ppm) a 1989 (1323.59 ppm) disminuyó en promedio 180 ppm. De 1989 a 1992 (1678 ppm) aumentó paulatinamente en promedio 350 ppm, siendo este último año el que registra la mayor concentración. Entre 1992 y 1995 (1458.69 ppm) disminuye gradualmente la concentración de STD hasta 220 ppm en promedio.
-

- En general se tienen aguas dulces de buena calidad para consumo humano en la región al sur y sureste de San Luis Río Colorado. Hacia la región oeste de la zona predominan aguas salobres que pueden ser consideradas para uso agrícola.

- El ion  $\text{Cl}^-$  muestra también un comportamiento variable, de 1987 (358.01 ppm) a 1990 (346.88 ppm) mostró una ligera disminución. De 1990 a 1992 (390.13 ppm) aumentó 44 ppm, siendo este último año el que presenta la mayor concentración. De 1992 a 1995 volvió a disminuir ligeramente su concentración hasta quedar en 347.99 ppm.

- El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  se comporta igualmente de forma variable, de 1987 (400.77 ppm) a 1990 (360.01 ppm) mostró una disminución de 40 ppm. De 1990 a 1992 (437.43) presentó un aumento en su concentración de 77 ppm, siendo este último año el que registró el máximo valor. Finalmente, de 1992 a 1995 disminuyó ligeramente su concentración hasta quedar en 393.77 ppm.

- El ion  $\text{Na}^+$  muestra un comportamiento también variable, de 1987 (242.37 ppm) a 1991 (235.03 ppm) exhibe una ligera disminución de 7 ppm. De 1991 a 1992 (281.62 ppm) aumentó su concentración 46 ppm, siendo este último año el que presenta el máximo valor. De 1992 a 1995 (230.02 ppm) disminuyó 51 ppm.

- El ion  $\text{Ca}^{2+}$  tiene un comportamiento igualmente variable, de 1987 (149.73 ppm) a 1989 (140.49 ppm) su concentración disminuyó ligeramente 9 ppm. De 1989 a 1992 (166.27 ppm) presenta un aumento de 26 ppm, siendo este último año el que presenta la máxima concentración. De 1992 a 1995 vuelve a disminuir ligeramente su concentración (8 ppm) hasta quedar en 155.08 ppm.

---

La zona que muestra la influencia de mezcla con aguas geotérmicas se ubica al NE y SE (áreas con pozos) del CGCP observándose concentraciones de STD superiores a 20,000 ppm.

En general se observan las máximas concentraciones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  hacia la parte oeste de la zona de estudio, las de menor valor se localizan al sureste del área. Este comportamiento es similar al de los STD.

En la región del CGCP el tipo de agua predominante es Cl-Na, las concentraciones de STD y de iones principales están muy por encima de los límites permisibles.

Tabla V. Resumen de los tipos de agua predominantes, de las concentraciones mínima, máxima y promedio para los STD y los iones principales en el valle de Mexicali para el periodo 1987-1995 (excepto 1993). También se muestra el número de análisis químicos para cada año.

	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1994	1995	1995*	
<b>Análisis Químicos</b>	105	144	41	153	138	120	59	128	30	
<b>Tipos de Agua Predominantes</b>	Cl-Na SO <sub>4</sub> -Na Cl-Ca SO <sub>4</sub> -Ca	Cl-Na Cl-Ca SO <sub>4</sub> -Na SO <sub>4</sub> -Ca	Cl-Na							
<b>STD en ppm (mín-máx-prom)</b>	520 2804 1506.10	623 2991 1492.25	582 2659 1323.59	642 3285 1465.67	630 3487 1529.53	711 3444 1678	669 2839 1508.54	615 2683 1458.69	7075 52352 25384	
<b>Cl en ppm (mín-máx-prom)</b>	114 738 358.01	121 824 355.49	114 724 316.83	128 1235 346.88	121 980 366.72	128 809 390.13	135 603 331.27	121 778 347.99	3559 32747 15099.3	
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en ppm (mín-máx-prom)</b>	38 960 400.77	38 1008 369.17	48 864 322.41	38 960 360.01	48 1037 377.03	38 1094 437.43	96 960 400.81	67 960 393.77	0.9 2328 529.96	
<b>Na<sup>+</sup> en ppm (mín-máx-prom)</b>	78 632 242.37	92 598 236.08	74 442 201.39	78 876 235.61	78 632 235.03	115 655 281.62	92 448 229.25	80 471 230.02	2325 17200 7252	
<b>Ca<sup>2+</sup> en ppm (mín-máx-prom)</b>	24 328 149.73	20 320 153.88	28 320 140.49	20 376 153.58	20 368 161.10	24 352 166.27	28 332 163.66	28 304 155.08	94 4168 1330.57	

\* Datos del CGCP

## V CORRELACIÓN ENTRE TIPO Y CALIDAD DEL AGUA CON LA LITOLOGÍA, VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LAS FAMILIAS DE AGUA

Este capítulo inicia estableciendo la correlación que hay entre el tipo de agua y su calidad con respecto a la litología presente en el área tomando en cuenta la dirección de flujo subterráneo, para ello se seleccionó 1995 porque es último año del que se tienen datos. Posteriormente se describe la variación de las familias de agua en la zona de estudio. Es importante mencionar que la variación documentada es de carácter espacial y temporal considerando también la trayectoria del flujo subterráneo. Respecto a la variación espacial se comentan los cambios naturales que experimentan las aguas en su composición química y referente a la variación temporal se definen los cambios del tipo de agua a través del tiempo, considerando en este caso los años 1987, 1990 y 1995, elegidos con base en la información disponible y porque representan la parte inicial, media y final del periodo de años considerado en este estudio.

Se dividió el capítulo en cinco apartados: a) Correlación: tipo de agua y calidad química – litología, b) Variación espacial y temporal de las familias de agua, c) Variación de las familias de agua para 1987, d) Variación de las familias de agua para 1990 y e) Variación de las familias de agua para 1995. A continuación se presenta la descripción de cada uno de ellos.

### V.1 Correlación: tipo de agua y calidad – litología

Un objetivo común de muchos hidrogeoquímicos es establecer una relación entre litología y composición de las aguas subterráneas. Aunque indudablemente existe una

---

relación, en ella, intervienen otros factores de origen externo como composición iónica del agua de lluvia, evaporación, precipitación, entre otros. Por ello las correlaciones establecidas por algunos autores han tenido un éxito limitado y su aplicabilidad está restringida a las zonas en las que se establecieron.

En el caso del valle de Mexicali, el propósito de correlacionar para 1995 el tipo de agua subterránea y su calidad con la litología del área en estudio, tomando en cuenta la dirección de flujo subterráneo, es determinar si existe alguna correspondencia entre estos parámetros, lo cual es un objetivo particular de este trabajo. Se ha tomado como referencia la información descrita en los apartados II.3, II.4, II.6 y IV.8. Es importante aclarar que la litología en el área está referida a la descripción textural (gravas, arenas, limos, arcillas) de los sedimentos de la capa superficial (<200 m) en el valle y esto es debido a que la información litológica de los pozos con que se contó, está basada en este tipo de descripciones.

Para la correlación tipo de agua – litología se utilizaron los mapas 8, 8-B (anexo A) y la figura 3, de aquí se determinó que los tipos de agua predominantes en el área del valle de Mexicali (Cl-Na, Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na y SO<sub>4</sub>-Ca) se encuentran en un ambiente sedimentario de planicie deltaica dominada por procesos fluviales (siendo en este caso el río Colorado). En este ambiente predomina una alternancia de gravas y de sedimentos areno-limosos que representan depósitos de canales distributarios y depósitos de banco del río durante periodos de inundación, con la expansión de la zona de canales distributarios activos.

Hacia la parte SW del área de estudio es esperado que la situación sea diferente debido a la presencia de una zona de transición hacia un ambiente de planicie deltaica dominada por mareas, algunos pozos con aguas tipo Cl-Na se ubican en esta zona pero el

---

límite entre este ambiente y el de planicie deltaica dominada por el río se toma como una banda (franja de ancho variable), puesto que es una zona transicional de ambientes sedimentarios.

Sobre la zona del CGCP sólo existe un tipo de agua predominante (Cl-Na) y las condiciones sedimentarias son diferentes, el ambiente de depósito en el que se localizan estas aguas es una zona de transición entre un ambiente de planicie deltaica dominada por mareas y una zona de facies de abanicos aluviales. En el primer ambiente prevalecen depósitos limo-arcillosos que representan condiciones estuarinas o lagunares, posiblemente en un ambiente lagunar-deltaico con condiciones de depósito de muy baja energía. En el segundo ambiente destacan facies de grano grueso (arenas y gravas) que corresponden a la progradación reciente de los abanicos aluviales de la Sierra Cucapá (figura 3).

Para realizar la correlación calidad del agua – litología se utilizaron los mapas 8, 8-A (anexo A) y la figura 3 nuevamente, donde se determinó que para la zona del valle de Mexicali las aguas dulces de buena calidad para consumo humano y las aguas salobres para uso agrícola se encuentran en un ambiente sedimentario fluvial donde predomina la alternancia de gravas y de sedimentos areno-limosos, en esta región las concentraciones de STD no exceden las 2700 ppm.

Para el área del CGCP se establece que la predominancia de aguas saladas de muy mala calidad, no aptas para consumo humano ni para uso agrícola, se localizan en un ambiente sedimentario lagunar-deltaico que transiciona a un ambiente de abanicos aluviales, dicha transición es de depósitos limo-arcillosos a depósitos de grano grueso (arenas y gravas) provenientes de la Sierra Cucapá hacia el oeste; en esta zona las

---

concentraciones de STD promedian 30,000 ppm, indicando la influencia de las manifestaciones termales de la descarga del yacimiento.

Señalado lo anterior, y como se mencionó al inicio del apartado, no es fácil establecer con detalle la relación entre la litología y las diversas familias de agua, menos aun cuando la información sobre estos parámetros es limitada. No obstante, se puede establecer que de acuerdo a la información con la que se cuenta, los diferentes tipos de agua en el valle de Mexicali pertenecen al mismo ambiente sedimentario (tipo fluvial). Lo mismo sucede con su calidad química, salvo en la región del CGCP donde se puede observar que las concentraciones de STD son muy elevadas en depósitos sedimentarios limo-arcillosos pero habrá que tomar con reserva este dato porque tal vez tenga influencia la actividad geotérmica en el área.

La relación entre litología y tipo de agua en general tiende a ser (Custodio y Llamas, 1983) de la siguiente manera: aguas de terrenos sedimentarios de origen marino algo arcillosos son Cl-Na; aguas de terrenos evaporíticos son  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ; aguas de terrenos sedimentarios de origen continental algo arcillosos son  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ; aguas de terrenos graníticos son  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  y  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  y aguas de terrenos kársticos son  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  o  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , (estos últimos no se presentan en la zona de estudio).

Por tanto, se puede suponer que para la zona de estudio las aguas subterráneas probablemente están circulando por terrenos de alta evaporación y con formación de suelos caliche, dando tal vez el carácter sulfatado al agua. Pero esta propuesta deberá ser tomada con reserva porque falta información geológica más detallada de la región. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que la intensa actividad agrícola y las condiciones climáticas extremas puedan también tener influencia en el origen de estas aguas sulfatadas.

---

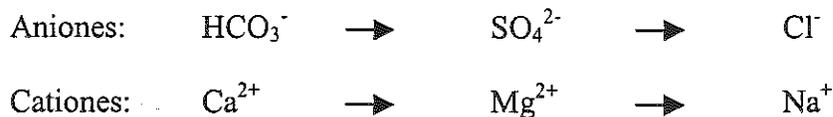
## V.2 Variación espacial y temporal de las familias de agua

En los siguientes tres apartados se analizará y describirá la variación espacial y temporal de las familias de agua.

La variación espacial es el cambio natural que experimentan las aguas subterráneas en su composición química. Esto se debe a la interacción agua-roca en los distintos ambientes sedimentarios por procesos de disolución de minerales y/o de materia orgánica y de la precipitación de nuevos componentes. Cabe señalar que en esta variación se considera la dirección del flujo subterráneo hacia el SW tal como se menciona en el apartado II.6.

Custodio y Llamas (1983) explican que las aguas naturales tienden a ir aumentando su mineralización hasta el punto de saturación en los diferentes iones. Así, entre los aniones primero satura el ion  $\text{HCO}_3^-$ , lo que produce la precipitación de calcita, incluso ya desde la infiltración. Más tarde el ion  $\text{SO}_4^{2-}$  que produce yeso; el ion  $\text{Cl}^-$  no llega a saturar normalmente. Entre los cationes primero satura el ion  $\text{Ca}^{2+}$ , más difícilmente el ion  $\text{Mg}^{2+}$ , mientras que el ion  $\text{Na}^+$  no llega a saturar normalmente.

De esta forma, la variación normal de un agua en vías de saturación es que sucesivamente vayan dominando los siguientes iones:



Esta variación tan sencilla admite excepciones. Se supone que en el agua infiltrada dominan los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , pero en ciertas condiciones estos iones no están presentes y entonces puede empezarse la secuencia en un lugar más avanzado o sufrir un retroceso para luego tomar la variación normal. Si el medio es fuertemente reductor se puede tener una reducción bacteriana del  $\text{SO}_4^{2-}$  mucho más rápida que su disolución, en cuyo caso, este

---

ión no llegará a niveles de saturación y será de pocas ppm. Si hay aporte de  $\text{CO}_2$  durante la reducción de los sulfatos, por cualquier otro mecanismo, el contenido en  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  puede aumentar de forma inesperada.

Al aumentar la concentración de sales, aumenta la fuerza iónica y por lo tanto la solubilidad de los iones se incrementa ligeramente. Los iones que antes saturaban pueden aumentar ligeramente su concentración. Los cambios de bases pueden alterar la evolución de los cationes, no sólo en la relación entre elementos alcalinos y alcalinotérreos, sino también entre el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ .

Con la variación temporal hacemos referencia a los cambios que experimenta el agua subterránea (para un mismo sitio) en su composición química a través del tiempo, en este caso nos enfocamos a mencionar si existen o no variaciones del tipo de agua entre los años 1987, 1990 y 1995.

### V.3 Variación de las familias de agua para 1987

En el mapa 1-B (anexo A) se observa la distribución y agrupamiento de las diferentes familias de agua. Espacialmente la variación del agua se puede resumir de la siguiente manera: la parte N-NE del área de estudio contiene aguas cloruradas sódicas, siguiendo la trayectoria del flujo subterráneo cambia en la porción central a aguas sulfatadas sódicas y cálcicas. Finalmente hacia la parte S-SW de la zona las aguas son cloruradas cálcicas y sódicas. La distribución espacial en sentido NE-SW se puede escribir como sigue:

Cl-Na –  $\text{SO}_4$ -Na –  $\text{SO}_4$ -Ca –  $\text{SO}_4$ -Na – Cl-Ca – Cl-Na

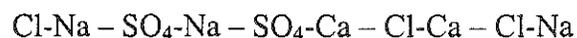
---

En vista de los cambios longitudinales descritos se sugiere de acuerdo a la variación normal del agua y al orden de saturación de iones principales que las aguas del acuífero del valle de Mexicali no son de reciente infiltración. La escasez del ion  $\text{HCO}_3^-$  sugiere que hubo poca recarga de aguas meteóricas; asimismo la predominancia de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sugiere largos tiempos de residencia del agua en el subsuelo\*.

Este año se utilizó como base para hacer las comparaciones correspondientes con los años 1990 y 1995.

#### V.4 Variación de las familias de agua para 1990

Para este año y de acuerdo a lo observado en el mapa 4-B (anexo A), espacialmente se distingue una tendencia similar al año 1987. La parte N del área de estudio contiene aguas cloruradas sódicas. Siguiendo las líneas de flujo subterráneo se aprecia un cambio en la porción central a aguas sulfatadas sódicas y cálcicas. Finalmente hacia la parte SW se presentan aguas cloruradas cálcicas y sódicas. De manera concisa, la variación espacial del agua subterránea a lo largo del cauce del río para este año es como sigue:



Observamos que los diversos tipos de agua entre 1987 y 1990 son similares. En la región NE y SW del área se mantienen los mismos tipos de agua, pero hacia la parte central, la variación de las familias de agua que se aprecia en 1987 no se manifiesta para 1990, específicamente en el tipo  $\text{SO}_4\text{-Na}$  al W del ejido Hermosillo (mapa 1-B), que sólo se presenta en 1987 y no en 1990.

---

\* El tiempo de residencia es relativo, se considera largo cuando es de algunas centenas, miles y hasta millones de años; se considera corto cuando es menor a decenas de años.

---

Del mismo modo que el año 1987, la escasez del ión  $\text{HCO}_3^-$  sugiere poca recarga de aguas meteóricas en la zona y además que estas aguas no son de reciente infiltración. La predominancia de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sugiere tiempos de residencia largos del agua en el subsuelo.

#### V.5 Variación de las familias de agua para 1995

En este año y de acuerdo a lo observado en el mapa 8-B (anexo A), espacialmente se advierte una tendencia similar a la de 1987 y 1990. La distribución de iones se puede resumir del siguiente modo: la parte N del área de estudio contiene aguas cloruradas sódicas. Siguiendo la trayectoria de flujo subterráneo, se aprecia un cambio en la porción central a aguas sulfatadas sódicas y cálcicas. Finalmente, hacia la parte SW de la zona, el agua cambia a aguas cloruradas cálcicas y sódicas. De forma precisa se puede escribir que la variación espacial del agua subterránea para este año es como sigue:



Temporalmente observamos que las diferentes familias de agua entre 1990 y 1995 son idénticas; en la región NE, SW y central del área se mantienen los mismos tipos de agua; comparando 1995 con 1987 se mantienen las mismas familias de agua, excepto en la porción central donde en 1987 es más variable el tipo de agua con respecto a 1995.

Al igual que los años 1987 y 1990, la escasez del ion  $\text{HCO}_3^-$  sugiere que las aguas no son de reciente infiltración y que hubo poca recarga de aguas meteóricas en la región; de igual forma la predominancia de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  sugiere largos tiempos de residencia del agua en el subsuelo para la mayoría de los pozos situados en la periferia de la zona del cauce principal del río Colorado.

---

## VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo, se describe el resultado de la integración de los datos y de los resultados de la distribución del agua por año. Se utilizó la variación y distribución de los tipos de agua dominantes en el área, concentraciones de STD y de iones principales ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ), correlación entre el tipo de agua y su calidad con la litología. Se consideró la dirección del flujo subterráneo y la variación espacial y temporal de las familias de agua. La integración de los datos se sintetiza en un modelo conceptual hidrogeoquímico propuesto que se discute posteriormente.

### VI.1 Modelo Conceptual Hidrogeoquímico

Como producto del análisis, interpretación e integración de características de la zona de estudio, ahora se cuenta con un conjunto de argumentos técnicos que sirven como base para proponer el modelo conceptual hidrogeoquímico del acuífero del valle de Mexicali. Es importante definir, antes de iniciar la descripción del modelo, lo que se entiende en la literatura como un modelo conceptual.

Tomando como referencia el texto de Anderson y Woessner (1992) se postula la siguiente definición:

Un modelo conceptual es una representación gráfica que tiene como propósito construir una versión simplificada del problema real y organizar los datos de campo relacionados al mismo, de tal forma que el sistema pueda ser analizado. En el proceso de la elaboración del modelo será necesario hacer simplificaciones, ya que una reconstrucción completa del sistema real no es factible.

---

El modelo resultante consiste en una descripción esquemática simplificada del modelo conceptual hidrogeoquímico para el acuífero del valle de Mexicali. Este modelo se basa en un modelo conceptual geohidrológico previo, propuesto por Vázquez González *et al.* (1998).

El sistema geohidrológico analizado corresponde a un acuífero libre no homogéneo emplazado sobre un estrato impermeable de relieve irregular, lo que ocasiona espesores saturados de 500 a más de 2500 m. Un rasgo importante en el área de estudio es un parteaguas superficial que cruza en diagonal iniciando desde la Sierra Cucapá a la altura del volcán Cerro Prieto hacia el NE, y que divide el valle en dos vertientes, una al NW que drena hacia el río Nuevo y la otra al SW con dirección al río Hardy (figura 11).

En la zona estudiada se identifican dos ambientes sedimentarios principales originados por el proceso de depositación deltaica, y un tercero relacionado con los abanicos aluviales de la Sierra Cucapá. Al NE, se encuentran facies arenosas de la planicie deltaica dominada por el río Colorado, en estos ambientes sedimentarios predominan aguas salobres y dulces tipo cloruradas sódicas-cálcicas y sulfatadas cálcicas-sódicas; hacia la porción SW y asociadas a las facies distales de los abanicos aluviales, predominan aguas saladas tipo cloruradas sódicas. Los contactos entre las facies sedimentarias son transicionales y dan como resultado interdigitación de sedimentos con diferencias texturales. Sin embargo el carácter químico del agua no cambia.

El flujo subterráneo entra al modelo conceptual por la parte NE donde predominan las facies arenosas y aguas salobres tipo cloruradas sódicas, lo que implica una conductividad hidráulica de media a alta y el espesor del paquete sedimentario es mayor. Continúa hacia el SW, enfrentando la transición con los sedimentos de lodos de baja

---

conductividad hidráulica y una variación del tipo de agua a sulfatadas sódicas-cálcicas permaneciendo salobres con concentraciones de STD no mayores a 3000 ppm. Aquí, el espesor saturado es menor, ocasionando un aumento del gradiente hidráulico y el cambio de dirección en las líneas de flujo iniciando la separación de las dos vertientes de descarga. En la porción SW, el agua cambia a tipo cloruradas sódicas-cálcicas conservando su carácter salobre; la separación de las direcciones del flujo se acentúa al acercarse al campo geotérmico de Cerro Prieto, haciéndose divergente y paralelo al límite impermeable que forma la Sierra Cucapá (figura 11).

Los pozos en la zona del CGCP se ubican sobre la transición entre las facies de lodos y de abanicos aluviales predominando aguas saladas tipo cloruradas sódicas con altas concentraciones promedio de STD de 30,000 ppm.

El modelo conceptual hidrogeoquímico obtenido representa una versión simplificada pero completa del acuífero del valle de Mexicali. Las limitaciones en la información litológica detallada no lo descalifica en cuanto al propósito de describir una versión simplificada del problema real, de tal forma que el sistema pueda ser analizado. Constituye a la vez el marco de referencia para el diseño de programas de monitoreo y estudios específicos de carácter hidrogeoquímico a futuro.

La familia de agua que predomina en las inmediaciones del área de estudio es clorurada sódica, esto sugiere que su tiempo de residencia en el subsuelo es relativamente largo debido a que estos iones son los últimos en saturar en la variación normal de las aguas naturales. Respecto a su origen existe incertidumbre para decir con exactitud por dónde han circulado estas aguas, por la razón de que la información litológica es insuficiente, no

obstante, podemos suponer que su tránsito es a través de sedimentos con alta concentración de sales, posiblemente con estratos de origen marino (Custodio y Llamas, 1983).

Hacia la porción central de la zona estudiada predominan aguas de tipo sulfatadas, tanto sódicas como cálcicas, lo que sugiere una posible circulación por rocas o materiales sedimentarios de tipo evaporítico (Custodio y Llamas, 1983). Pero nuevamente, por la limitada información litológica no es posible asegurarlo. Sin embargo, también existe la posibilidad de que la intensa actividad agrícola en la región y las condiciones climáticas extremas (elevadas temperaturas, escasa precipitación) puedan tener influencia en el origen de las aguas sulfatadas. Puede suceder que el uso excesivo de fertilizantes en el área de pozos agrícolas asociado a la recarga artificial de los excedentes de agua en la extracción continua (bombeo) del agua subterránea, más las altas temperaturas que imperan en la zona (fuerte evapotranspiración), den como resultado que en las capas superficiales de sedimento se acumulen sales, que después son infiltradas al acuífero por la recarga artificial o por la lluvia, generando un incremento en las concentraciones de estos iones en el agua intersticial.

La calidad del agua subterránea en el valle de Mexicali está teniendo un deterioro continuo desde el inicio de la explotación del acuífero. Lo anterior se ha relacionado estrechamente con la sobreexplotación de los recursos hidráulicos disponibles (CNA, 1995). Otras posibles causas que se consideran en el reporte citado son:

1. Agotamiento paulatino de los volúmenes de agua de buena calidad depositados en el subsuelo.
  2. La recirculación de agua bombeada propicia incremento en la salinidad.
-

3. La aplicación de fertilizantes, la pobre precipitación, el agua aplicada al riego y la alta evaporación, favorece la formación de sales.

Las causas del deterioro en la calidad del agua pueden resumirse como originadas por el ciclo definido por:

extracción - evaporación - infiltración - extracción

debido a la recirculación de aguas de riego; a la entrada de aguas de mala calidad provenientes de áreas adyacentes y a la presencia de aguas salobres de origen natural en el subsuelo (López López, 1991).

---

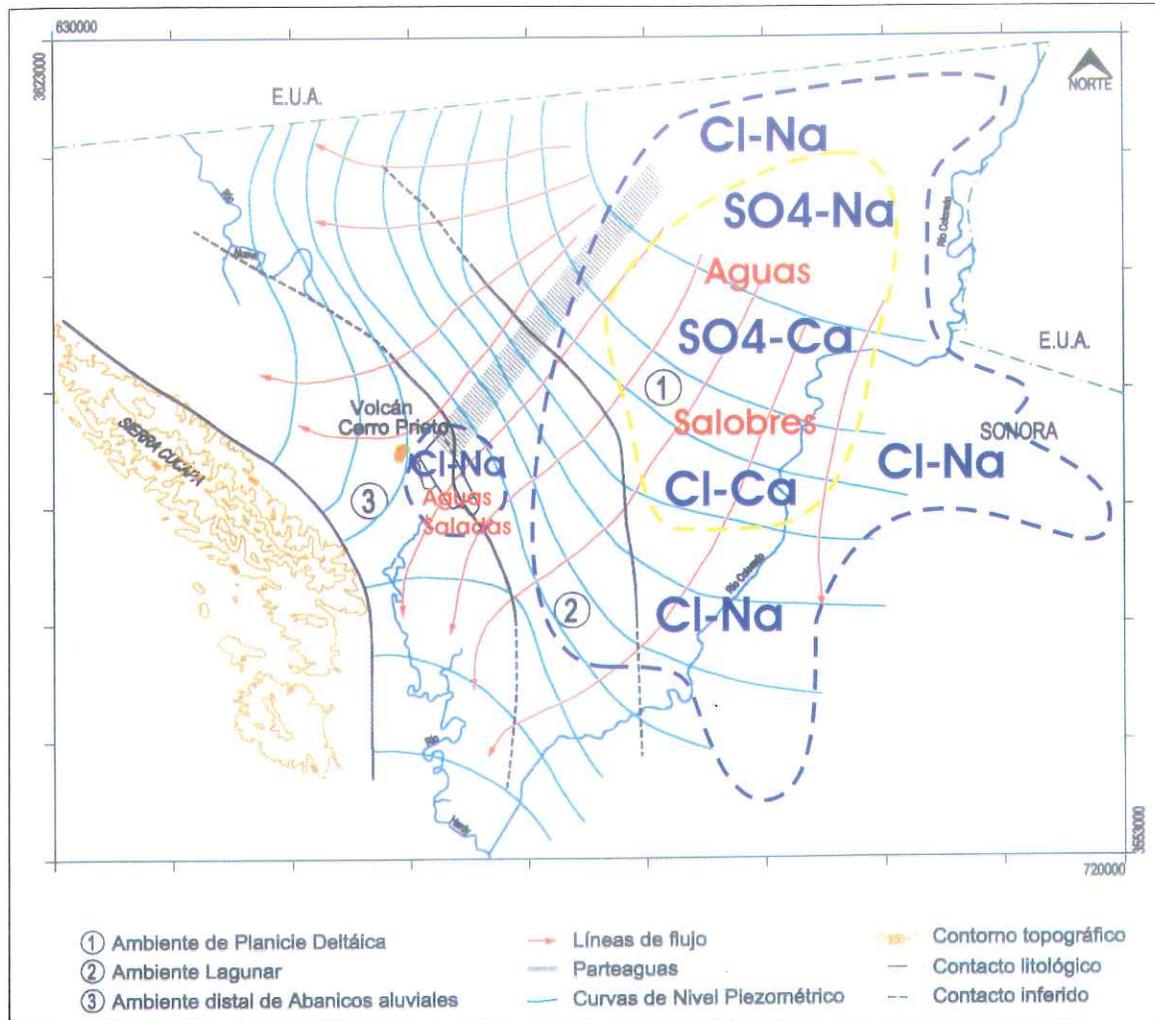


Figura 11. Descripción esquemática del Modelo Conceptual Hidrogeoquímico en planta (modificado de Vázquez González *et al.*, 1998).

## VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VII.1 Conclusiones

1. Se identificaron cuatro principales tipos de agua que predominan en el valle de Mexicali: en las inmediaciones prevalece la de tipo Cl-Na y hacia la parte central varía entre Cl-Ca, SO<sub>4</sub>-Na y SO<sub>4</sub>-Ca.
  2. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) varió entre los años considerados, de 1987 (1506.10 ppm) a 1989 (1323.59 ppm) disminuyó en promedio 180 ppm. De 1989 a 1992 (1678 ppm) aumentó paulatinamente en promedio 350 ppm, siendo este último año el que registra la mayor concentración. Entre 1992 y 1995 (1458.69 ppm) disminuye gradualmente la concentración de STD hasta 220 ppm en promedio.
  3. Existen aguas dulces de buena calidad para consumo humano en el área de San Luis Río Colorado y sus inmediaciones. Hacia la región oeste de la zona se tienen aguas salobres que pueden ser consideradas únicamente para uso agrícola.
  4. Se observan las máximas concentraciones de Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> hacia la parte oeste del área de estudio. Las menores concentraciones se localizan al sureste de la zona. Este comportamiento es similar al de los STD.
  5. En la región del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) el tipo de agua predominante es Cl-Na, pero con concentraciones de STD y de iones principales muy por encima de los límites permisibles. Se consideran aguas saladas.
  6. La predominancia de los iones Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> en la región sugiere que el tiempo de residencia del agua en el subsuelo es relativamente largo, debido a que estos iones son los últimos en saturar en la variación natural de las aguas subterráneas.
-

## VII.2 Recomendaciones

1. Se recomienda continuar las campañas de muestreo de agua subterránea en los diversos pozos del área de estudio, de preferencia en los que se encuentren en operación para facilitar el muestreo. La periodicidad del muestreo debe ser al menos dos veces por año para cubrir las variaciones durante la temporada de lluvia y la de estiaje.
  2. Realizar muestreos de agua superficial en sitios cercanos a la frontera con Estados Unidos para tener como referencia el tipo y la calidad del agua que entra al sistema hidrológico del valle de Mexicali. Esto permitiría comparar la composición con el agua que se extrae del acuífero del valle de Mexicali.
-

**LITERATURA CITADA**

- Anderson, M. P. y Woessner, W. W. 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. 437 pp.
- Appelo, C. A. J. y Postma, D. 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. Ed. A. A. Balkema. Netherlands. 536 pp.
- Arellano G., F. J. y Gutiérrez N., L. 1986. Características Geológicas, Geohidrológicas, y Geofísicas en la porción oeste del campo geotérmico de Cerro Prieto, B. C. Reporte GF 1/86.
- Ariel Construcciones, S.A. 1967. Estudio hidrogeológico preliminar de los acuíferos del valle de Mexicali, B. C. y Mesa de San Luis, Sonora. Contrato de Estudios S/N, clave AS-1. 63 pp.
- Ariel Construcciones, S.A. 1970. Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos del valle de Mexicali, B. C. y Mesa de San Luis, Sonora. 53 pp.
- Axen, G. J., Fletcher, J. y Martín-Barajas, A. 1998. Late Miocene-Pleistocene detachment faulting in the northern Gulf of California and its role in evolution of the Pacific-North America plate boundary, In Behl, R. editor, Guidebook to field trip # 6, Cordilleran Section of the Geological Society of America, California State University Long Beach, 29 pp.
- CNA. 1992. Las aguas subterráneas en el distrito de riego 014, río Colorado. Su estado actual, tomo I. 47 pp.
- CNA. 1993. Informe preliminar de las condiciones Geohidrológicas imperantes en el distrito de riego No. 014, Río Colorado al 1ero de Febrero de 1993. 62 pp.
-

- CNA. 1995. Informe geohidrológico preliminar relativo al paro total de pozos agrícolas localizados en el distrito de riego 014, CNA. 38 pp.
- Cohen, M. y Henges-Jeck, C. 2001. El agua perdida, usos y flujos de agua en la región del delta del río Colorado. Reporte del Pacific Institute for studies in development, environment and security. Oakland, USA. 64 pp.
- Cotton, M. L. y Vonder Haar, S. 1981. Microfossils from Cerro Prieto Geothermal wells, Baja California, Mexico. Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico. Proceedings/Actas. San Francisco, California. 162-168 p.
- Crowell, J. C. 1987. Late Cenozoic basins of onshore southern California: complexity is the hallmark of their tectonic history. En: Ingersoll, R. V. y Ernst, W. G. (eds.) Cenozoic basin development of coastal California [Rubey volume VI]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 207-241 p.
- Cruz Hernández, S. 2002. "Proyecto informativo del delta del río Colorado". La bitácora del humedal. 2(1): 1-2 p.
- Custodio, E. y Llamas, R. 1983. Hidrología subterránea. Tomo I y II. Ed. Omega S.A. España. 1157 pp.
- De la Peña, A. y Puente, C., I. 1979. Geología del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California. 17-37 p.
- Drever, J. I. 1982. The Geochemistry of natural Waters. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, N. J. 388 pp.
- Dutcher, L.C., Hardt W.F. y W.R. Moyle, Jr. 1972. Preliminary Appraisal of Ground Water in Storage with Reference to Geothermal Resources in the Imperial valley
-

- Area, California. U.S. Bureau of Reclamation. Geological Survey Circular 649. 75 pp.
- Elders, W. A., Bird, D. K., Williams, A. E. y Schiffman, P. 1984. Hydrothermal Flow Regime and Magmatic Heat Source of the Cerro Prieto Geothermal System. *Geothermics* 13: 27-47 p.
- García, E., 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. Instituto de Geografía, U.N.A.M. 84 pp.
- García, C. O. R., Cruz, M. A., Cervantes, P. A. y Tejeda, M. A. 1996. Evaluación del bioclima humano en Mexicali, B. C. y su comparación con otras ciudades cálidas de la República Mexicana. Reporte interno, Instituto de Ingeniería, U.A.B.C. 32 pp.
- Halfman, S.E., Lippmann, M.J., Zelwer, R. y Howard, J.H. 1984. Geologic interpretation of geothermal fluid movement in Cerro Prieto Field, Baja California, Mexico. *Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull* 68: 18-30 p.
- Humphrey, S. y Weldon, R., 1991. Kinematic constraints on the rifting of Baja California, In Dauphin P. y Simoneit, B., editores. *American Association of Petroleum Geologist memoir* 47: 217-230 p.
- INEGI, 1995. Estudio hidrológico del estado de Baja California. Ed. INEGI. Aguascalientes. 180 pp.
- Lee, J., Miller, M. M., Crippen, R., Hacker, B. y Ledesma-Vázquez, J. 1996. Middle Miocene extension in the Gulf Extensional Province, Baja California: Evidence from the southern Sierra Juárez. *Geological Society of America Bulletin*. 108: 505-525 p.
-

- Lyons D., J. and Van de Kamp, D. C. 1980. Subsurface Geological and Geophysical Study of the Cerro Prieto Field, Baja California, Mexico. Berkeley, California. Lawrence Berkeley Laboratory report LBL-10540.
- López López, A. 1991. Evolución de la calidad del agua del acuífero del valle de Mexicali, Baja California. Tesis de maestría U.A.B.C. (Instituto de Investigaciones en Agricultura y Ganadería). Baja California. 214 pp.
- Mayer Pérez, F. 1968. Estudio fotogeohidrológico del valle de Mexicali, B.C. y de la Mesa de San Luis Río Colorado, Son., Reporte inédito, Ariel Construcciones. 25 pp.
- Nilsen, H. y Silvester, A. G. 1995. Strike-Slip Basins. En: C. J. Busby y R. V. Ingersoll (eds.) Tectonics of sedimentary basins. Blackwell Science, Cambridge. 425-457 p.
- Oskin, M., Stock, J. y Martín-Barajas, A. 2001. Rapid localization of Pacific-North America plate boundary motion in the Gulf of California. *Geology*. 29(5):459-462 p.
- Ramírez Hernández, J. 1997. Estudio de las relaciones geohidrológicas del acuífero superior del valle de Mexicali con aguas geotérmicas superficiales. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá. Departamento de Geología. España. 342 pp.
- Sánchez, R. J. y Terrazas, B. 1981. Hidrología. Evolución geohidrológica y térmica del acuífero alfa. Comisión Federal de Electricidad. México. 69 pp.
- Tien-Chang, L. 1998. "LEEGRAM: A Program for Normalized Stiff Diagrams and Quantification of Grouping Hydrochemical Data". *Computers and Geosciences*. 24(6): 523-529 p.
- Truesdell A., Terrazas B., Hernandez L., Janik C., Quijano L. y Tovar R. 1989. The Response of the Cerro Prieto Reservoir to Explotation as Indicated by Fluid
-

Geochemistry. Proceedings DOE/CFE. Geothermal Resources Council Trans. 10: 405-411 p.

Truesdell, A., Mañon, A., Quijano, L., Coplen, T. y Lippmann, M. 1992. Boling and Condensation Processes in the Cerro Prieto Beta Reservoir under Exploitation. Proceedings Seventeenth Workshop Geothermal Reservoir Engineering. Stanford Univ. Stanford CA. 81 pp.

Vázquez González, R., Ramírez Hernández, J., Martín Barajas, A., Carreón Diazconti, C., García Cueto, O. 1998. Estudio Geohidrológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (Informe Técnico RE-05/98). CICESE (Geofísica Aplicada) – CFE (contrato CFE CICESE RGCP-CLS-002/97). Baja California. 52 pp.

A N E X O A

Mapas

# A N E X O   B

Descripciones sedimentológicas

realizadas en campo

## ANEXO B

### DESCRIPCIONES SEDIMENTOLÓGICAS REALIZADAS EN CAMPO

#### Estación 1 "SW Algodones - Colonia Francisco Santa Ana Peralta (canal Álamo Superior)"

Coordenadas UTM: 711141 E  
3617967 N  
Elevación: 44 m.s.n.m.

En este sitio se observó parte del antiguo río Colorado (aguas abajo) ahora canalizado (canal Álamo Superior). Esto sugiere disminución en la infiltración del agua por el revestimiento del canal.



**Estación 2 “Cauce río Colorado - SE ejido Algodones - Bajo la presa Morelos”**

Coordenadas UTM: 712931 E

3620547 N

Elevación: 41 m.s.n.m.

En este sitio se observaron sobre el lecho del original río Colorado clastos de gravas de 1 a 2 cm promedio en una matriz arenosa. Hacia los flancos del río se exponen depósitos de bancos ("levee deposits"). Este sitio representa facies de canal de alta energía con arenas y gravas.

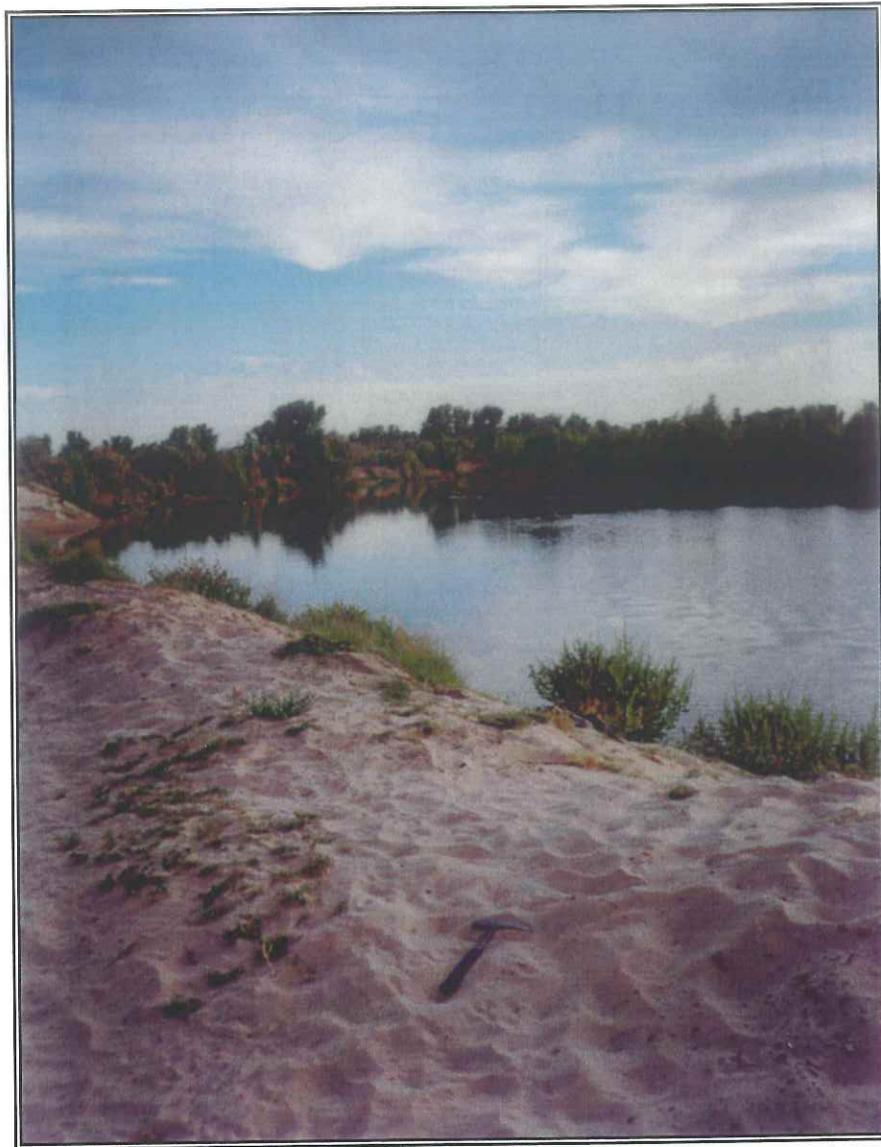


**Estación 3 “Cauce río Colorado - W San Luis Río Colorado”**

Coordenadas UTM: 694147 E  
3593693 N

Elevación: No hay dato

En este sitio se observó que los depósitos de canal consisten en facies arenosas. Esta facies no contiene gravas. Estos depósitos arenosos forman la facies de canal y de banco en la parte intermedia (centro-este de la zona de estudio) del sistema deltaico.



**Estación 4 “Cauce río Colorado - NW ejido Plan de Ayala - SE ejido General Francisco Murguía”**

Coordenadas UTM: 683331 E

3567761 N

Elevación: 5 m.s.n.m.

En este sitio se observó sobre una pared del banco del río Colorado una secuencia de arenas de grano fino a limos color café claro. En la parte superior del depósito se observan estructuras primarias de estratificación cruzada, dunas y antidunas, hacia la parte inferior se observa estratificación planar. Esto sugiere un incremento en el régimen de flujo hacia la cima. Es notable la ausencia de material más grueso (gravas).



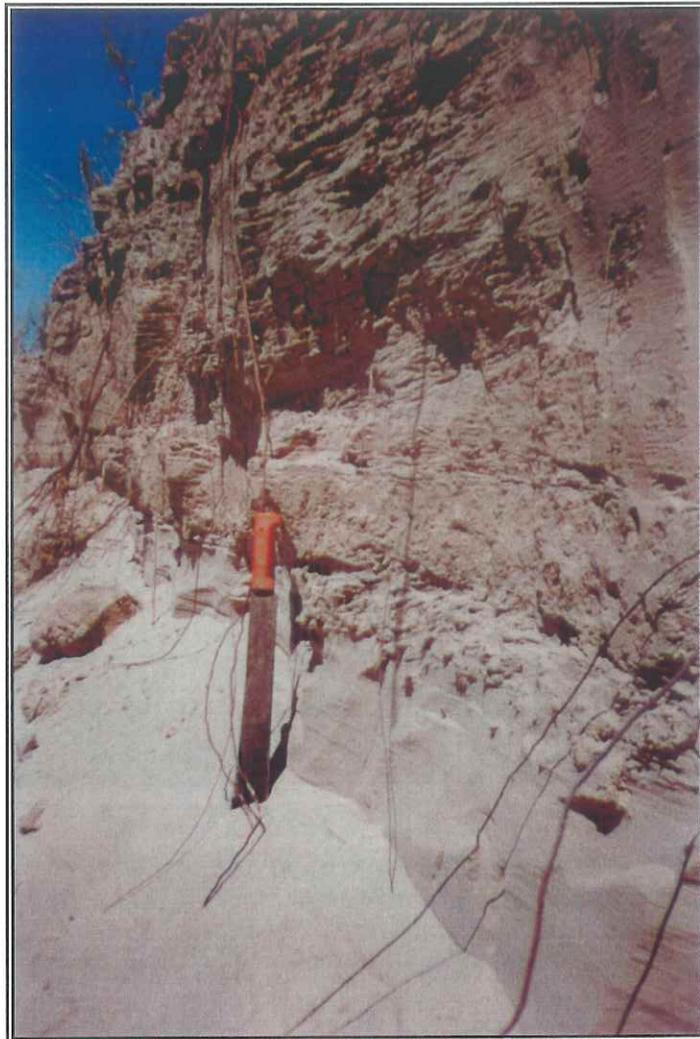
**Estación 5 “Cauce río Colorado - S ejido Dr. Alberto Oviedo Mota”**

Coordenadas UTM: 673254 E

3563406 N

Elevación: 4 m.s.n.m.

En este sitio se observó una secuencia sedimentaria sobre la pared del canal fluvial del río Colorado. En la base se observaron arenas de grano fino color café claro con estratificación planar y laminar gradando a arenas de grano más fino con estratificación cruzada; fueron observables horizontes de minerales pesados color negro. En la cima se observaron limos color café oscuro con estratificación cruzada y planar hasta el contacto con el suelo. Fue notable también la ausencia de material más grueso (gravas) tanto en el canal como en el depósito.



**Estación 6 “Río Ardí - SW ejido Cucapá Indígena - E entronque carretera federal 5 y estatal 4”**

Coordenadas UTM: 659495 E

3571378 N

Elevación: 17 m.s.n.m.

Hacia el río Hardy se observó que los sedimentos deltaicos tienen una granulometría mucho más fina (limos y arcillas) que en otros sitios del delta. Estos depósitos corresponden a facies fluviales de sistemas meándricos y facies lagunares posiblemente originadas durante las avenidas del río Colorado.



**Estación 7 “Río Hardy - Campo Mosqueda”**

Coordenadas UTM: 662569 E

3558597 N

Elevación: 6 m.s.n.m.

En este sitio los flancos del cauce del río Hardy consisten en material limoso color café claro. No se aprecian estructuras sedimentarias primarias, lo que sugiere intensa bioturbación. Nuevamente fue notable la ausencia de material más grueso (gravas) en los flancos del depósito de banco.



