

# Aplicación del diagrama de Stiff como herramienta geoquímica en la exploración geotérmica del valle de Mexicali, Baja California

Concepción Carreón  
Jorge Ramírez  
Mario Vega

Universidad Autónoma de Baja California

*Se iniciará un proyecto de determinación del origen y evolución geoquímica de las aguas subterráneas del valle de Mexicali, B.C., México. En esta fase de compilación y análisis de la información geoquímica se pretende utilizar los datos químicos de una sola muestra de cada sitio seleccionado, para conocer de manera preliminar los diversos tipos de aguas subterráneas a lo largo del valle de Mexicali. Con este fin se utilizaron datos químicos generados por los autores e información obtenida de la literatura, así como el diagrama de concentraciones de Stiff, útil para plasmarse en un plano y hacer una rápida comparación entre los diferentes tipos de agua analizados. El presente documento muestra las representaciones gráficas de concentración química de las aguas subterráneas, las temperaturas de muestreo en pozos y su relación espacial en el valle de Mexicali. Se concluye que las aguas del subsuelo del valle de Mexicali se agrupan en dos comportamientos predominantes: los diagramas que representan a las aguas geotérmicas localizadas en las regiones de Riito, Tulechek, Cerro Prieto Oeste y Aeropuerto Oeste, y los esquemas que representan a las mezclas. Estos últimos se localizan por todo el Valle de manera indiferenciada e incluso llegan a presentarse en zonas evidentemente geotérmicas, como es el caso de Cerro Prieto Oeste, sin embargo, son predominantes en la porción NE y central del valle. Para determinar el origen y evolución del agua, así como las relaciones de mezcla, temperatura y profundidad se necesitan combinar otras técnicas de exploración.*

**Palabras clave:** geoquímica, diagrama de Stiff, exploración geotérmica, valle de Mexicali, agua subterránea, origen geotérmico, origen meteórico.

## Introducción

La zona del delta del río Colorado tiene una precipitación promedio anual de 7 cm y un clima extremoso, que en julio y agosto alcanza 48°C, provocado por abundante radiación solar y vientos secos, lo que la convierte en una de las regiones más áridas del planeta (Valdés *et al.*, 1986).

En la década de los años 20 se inició el desarrollo de un sistema de irrigación que convirtió a esta región en un importante valle de cultivo (González, 1989) separado por la línea divisoria internacional en dos grandes sectores: el valle Imperial, en los EUA, y el valle de Mexicali, al noroeste de México.

El valle de Mexicali, en el estado de Baja California, ha sido ampliamente estudiado durante los últimos treinta años a raíz de la atención que las abundantes manifestaciones geotérmicas despertaron en el área de la generación de energía eléctrica (Alonso, 1966).

Al valle de Mexicali, se le ha reconocido como una de las zonas térmicamente anómalas de más interés en el país y al campo geotérmico de Cerro Prieto, CGCP, como la más evidente de las manifestaciones del potencial geotérmico de la región.

El exitoso desarrollo del CGCP alentó la realización de múltiples programas de exploración en el resto del Valle, con el fin de estimar el potencial térmico factible de anexarse a las reservas de la Comisión Federal de Electricidad, CFE, (Fonseca, 1981).

Tomando como base las manifestaciones de temperaturas anómalas detectadas en los pozos construidos para riego y la información geológica y geofísica conocida, Fonseca (1981) sugiere cinco zonas de interés geotérmico fuera del CGCP: Cerro Prieto Oeste, Tulechek, Riíto, Aeropuerto-Algodones y San Luis Río Colorado. Álvarez (1992) indica que en la zona de Tulechek existe un reservorio geotérmico de baja entalpia cuyo sistema estructural parece ser el conducto de aportación de los fluidos en las manifestaciones, tal como sucede en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

A partir de 1990, investigadores del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, UABC, se han preocupado por estudiar el aprovechamiento del potencial geotérmico de la región con fines de uso directo, por lo que sus investigaciones se han enfocado a la evaluación de yacimientos de baja temperatura y entalpia, ideales para su aprovechamiento entre otras actividades (Campbell et al., 1993): refrigeración, secado de hortalizas, invernaderos y lavanderías.

La primera etapa de dicha evaluación se enfocó a la zona de Aeropuerto Oeste, un yacimiento de baja entalpia que también se encuentra controlado estructuralmente y cuyos fluidos geotérmicos provienen de zonas más profundas o alejadas (UCR-UABC, 1993).

El valle de Mexicali constituye el 93% del área irrigada en el estado de Baja California, gracias a la naturaleza de su suelo, calidad de agua y abundancia de sol, lo que lo convierte en una de las más grandes regiones desérticas de irrigación en el hemisferio occidental.

Los recursos hidráulicos del Valle, con un potencial superior a los 19 000 millones de metros cúbico, provienen del sistema de irrigación superficial, de fuentes subterráneas y de los exedentes del río Colorado.

El acuífero de la región es constantemente recargado por las infiltraciones propias del sistema de riego; por la percolación profunda en la cuenca, y por las corrientes afluentes del río Colorado, su principal fuente de recarga. Para su explotación se construyeron 725 pozos, de los cuales 236 corresponden a particulares y 489 son pozos oficiales manejados por la SARH, de los cuales se extrae un volumen de 1100 millones de m<sup>3</sup>/año (González, 1989).

El río Colorado acarrea un volumen promedio de agua de 18 248.4 MMm<sup>3</sup> con unos 9 millones de toneladas de sales disueltas. El manejo y control de las aguas de riego se hace por medio de grandes presas de almacenamiento, lo que soluciona el problema de las grandes avenidas y han ido modificando el ciclo hidrológico, sobre todo en las zonas bajas del río, como son el valle Imperial y el valle de Mexicali, redu-

ciendo el volumen de agua y aumentando la concentración de sales (González Casillas, 1982).

Las dos principales actividades económicas de la región, la agricultura y la geotermia, causan modificaciones en el régimen de aguas subterráneas del valle de Mexicali. En el interés de ambas actividades por optimizar el uso del recurso, se han realizado estudios que permitan un mejor entendimiento y control del sistema (Makdisi *et al.*, 1982). La mayor dificultad se presenta al tratar de diferenciar los orígenes heterogéneos de las aguas subterráneas (marinas, geotérmicas, meteóricas, etc.) y su interacción con el medio rocoso. Makdisi (1982) realizó una interpretación del origen y la historia de las aguas subterráneas del valle de Mexicali y presentó información completa y bien distribuida que incluye las márgenes del río Colorado, la porción central del Valle y la zona Palaco.

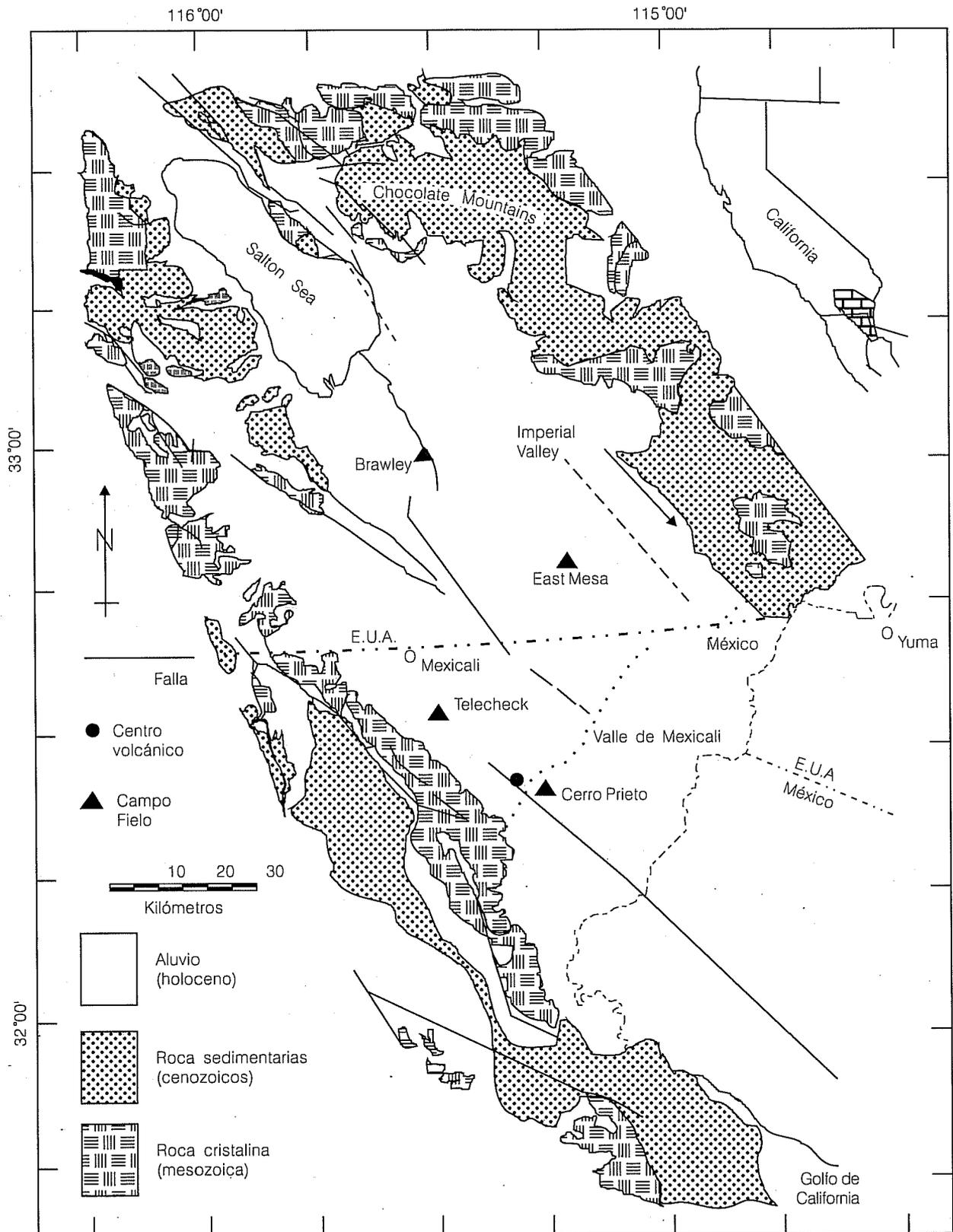
La gran importancia agrícola y geotérmica del valle de Mexicali, del que dependen unos 600 000 habitantes, hace que el tratar de caracterizar las diversas tendencias de las aguas subterráneas presentes en el valle de Mexicali, fuera del CGCP, resulte un asunto de primer orden. Los propósitos de este trabajo son:

- Actuar como la fase inicial de un proyecto de determinación del origen y evolución geoquímica de las aguas subterráneas del valle de Mexicali, iniciando la compilación y análisis de los datos químicos
- Con los datos químicos obtenidos de una sola muestra de agua de cada sitio, conocer y comparar, de manera preliminar, los diversos tipos de aguas subterráneas a lo largo del Valle, utilizando para ello un método gráfico aplicable a un plano del área, como lo es el diagrama de Stiff.

Los métodos tradicionales aplicados para la caracterización de aguas subterráneas incluyen diversos tipos de gráficos de composiciones químicas, tales como los diagramas de Piper, de Schoeller y de Stiff, que generalmente se aplican combinando al menos dos de ellos con mapas de isoconcentraciones de distintos componentes. De los tres, el diagrama de Stiff tiene la ventaja de poder plasmarse fácilmente en un plano, lo que resulta sumamente útil para hacer rápidas comparaciones cualitativas (Davis and De Wiest, 1966).

En este trabajo se graficaron en el diagrama de Stiff las concentraciones químicas de las aguas subterráneas y se observó su relación con la temperatura, la profundidad de los pozos muestreados y la ubicación de los mismos dentro del valle de Mexicali.

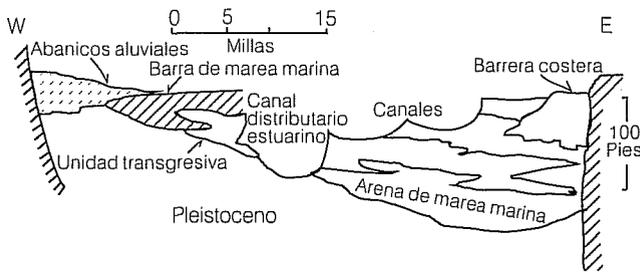
1. Cuenca Saltón con la geología y la ubicación de los campos geotérmicos. Modificado de Elders y Sass (1988)



## Marco geológico regional

El valle de Mexicali se localiza en la porción sur de la gran depresión estructural conocida como cuenca Salton, en el estado de Baja California, ilustración 1. Se trata de una zona de transición entre el límite divergente de la Placa Pacífica y el límite del sistema de fallas transcurrentes San Andrés, cuyas principales representantes en el Valle son Imperial, Algodones y Cerro Prieto. La combinación de los desplazamientos provoca una serie de cuencas de dispersión en donde se origina el calor anómalo del subsuelo de la región (Elders y Sass, 1988). Debido al constante movimiento de apertura, que da origen al golfo de California, la actividad sísmica es sumamente alta, determinando una deformación muy elevada (Lomnitz *et al.*, 1971).

### 2. Sección transversal y modelo geológico del valle de Mexicali (Mikdisi *et al.*, 1982; de la Peña, 1979)



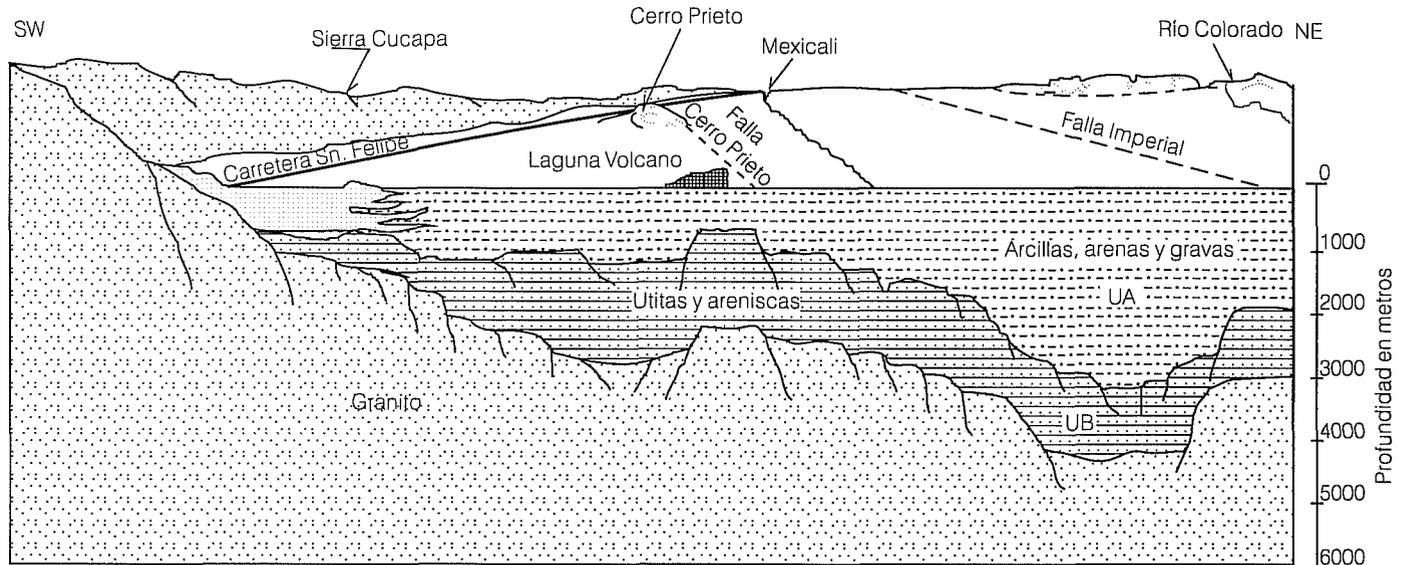
a) Sección transversal idealizada del valle de Mexicali mostrando las relaciones estratigráficas. (Meckel, 1975 en Mikdisi, 1982)

Los sedimentos que cubren a la cuenca se depositaron en ambientes deltáicos, aluviales, estuarinos y marinos someros durante el Plioceno y el Pleistoceno (Ingle, 1982 en Halfman *et al.*, 1984). Makdisi (1982) presenta una sección transversal idealizada tomada de Meckel en donde muestra las relaciones estratigráficas (ilustración 2a).

En base a recortes obtenidos de las perforaciones en el CGCP, de la Peña (1979) clasificó los sedimentos del valle de Mexicali en dos unidades que cubren al basamento granodiorítico que aflora en la sierra Cucapa, al oeste del Campo. La unidad A consiste de horizontes de arcillas, arenas y gravas, mientras que la unidad B, que subyace a la primera, está compuesta de horizontes de lutita y lentes de arenisca, como se muestra en el modelo geológico preliminar del CGCP (ilustración 2b).

El contacto entre las dos unidades se localiza en la primera zona de mineralización hidrotermal lo que implica que los sedimentos de la unidad B han sido modificados por el sistema geotérmico (Halfman *et al.*, 1984). Ambas unidades presentan el comportamiento errático y discontinuo de las interdigitaciones propias de los ambientes deltáicos y están afectadas por metasomatismo; a su vez, actúan como contenedores de los dos grandes acuíferos determinados en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

El modelo geohidrológico propuesto por Halfman (1984) y elaborado para el CGCP expone que los fluidos, calentados por los intrusivos propios de las zonas de dispersión, entran al campo por el flanco este a



b) Modelo geológico preliminar del campo geotérmico de Cerro Prieto (de la Peña, 1979). Se considera como el modelo tipo del valle de Mexicali

**1. Composición química elemental de las aguas subterráneas del valle de Mexicali**

|                       | Pozo    | Temp. | Ca     | Mg     | Na      | K      | HCO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Cl      | Prof.  |
|-----------------------|---------|-------|--------|--------|---------|--------|------------------|-----------------|---------|--------|
| Zona Aeropuerto Este  |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 1                     | G-1-16  | 26    | 68.00  | 45.00  | 580.00  | 6.90   | 38.00            | 430.00          | 790.00  | 150.00 |
| 2                     | G-3-1   | 28    | 42.00  | 15.00  | 200.00  | 3.00   | 190.00           | 180.00          | 200.00  | 150.00 |
| 3                     | 2-P     | 23    | 240.00 | 86.00  | 440.00  | 7.00   | 300.00           | 800.00          | 660.00  | 78.00  |
| 4                     | 7-3-1-3 | 23    | 270.00 | 88.00  | 350.00  | 4.00   | 250.00           | 600.00          | 640.00  | 73.00  |
| 5                     | 160-C   | 32    | 220.00 | 68.00  | 300.00  | 4.50   | 300.00           | 630.00          | 430.00  | 200.00 |
| Zona Aeropuerto Oeste |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 6                     | G-1-9   | 25    | 42.00  | 43.00  | 340.00  | 8.00   | 150.00           | 420.00          | 890.00  | 140.00 |
| 7                     | G-1-12  | 36    | 27.00  | 4.10   | 570.00  | 4.40   | 140.00           | 220.00          | 640.00  | 300.00 |
| 8                     | G-1-23  | 28    | 16.10  | 2.40   | 498.20  | 5.14   | 265.60           | 119.30          | 569.70  | 150.00 |
| 9                     | G-1-13  | 29    | 27.20  | 8.50   | 592.00  | 5.80   | 151.00           | 68.10           | 1479.00 | 200.00 |
| 10                    | G-4-18  | 38    | 29.40  | 6.40   | 622.40  | 5.76   | 197.40           | 72.60           | 1511.00 | 200.00 |
| 11                    | A-1     | 36    | 64.00  | 10.00  | 570.00  | 4.70   | 110.00           | 85.00           | 930.00  | 900.00 |
| Zona Centro           |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 12                    | G-1-22  | 24    | 34.00  | 9.60   | 430.00  | 14.00  | 350.00           | 330.00          | 380.00  | 150.00 |
| 13                    | R-84    | 22    | 200.00 | 70.00  | 410.00  | 5.30   | 330.00           | 710.00          | 450.00  | 87.00  |
| 14                    | R-36    | 24    | 360.00 | 90.00  | 400.00  | 6.50   | 290.00           | 630.00          | 790.00  | 120.00 |
| 15                    | R-27    | 23    | 190.00 | 57.00  | 150.00  | 7.50   | 370.00           | 350.00          | 270.00  | 90.00  |
| 16                    | 32-CH   | 24    | 176.00 | 72.00  | 253.00  | 0.00   | 390.00           | 365.00          | 433.00  | 122.00 |
| 17                    | 31-CH   | n.p.  | 200.00 | 91.00  | 230.00  | 0.00   | 439.00           | 365.00          | 454.00  | 150.00 |
| 18                    | R-32    | n.p.  | 216.00 | 91.00  | 391.00  | 0.00   | 488.00           | 595.00          | 540.00  | 125.00 |
| 19                    | 27-CH   | n.p.  | 208.00 | 91.00  | 317.00  | 0.00   | 561.00           | 509.00          | 440.00  | 130.00 |
| Zona Cerro Prieto     |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 20                    | C-5     | 47    | 520.00 | 79.00  | 3810.00 | 230.00 | 609.00           | 6.00            | 7900.00 | 230.00 |
| 21                    | G-1-11  | 24    | 130.00 | 320.00 | 1700.00 | 46.00  | 510.00           | 2500.00         | 2000.00 | 120.00 |
| Zona Palaco           |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 22                    | G-1-6   | 24    | 280.00 | 140.00 | 520.00  | 7.90   | 290.00           | 780.00          | 840.00  | 73.00  |
| 23                    | VM-1    | 32    | 240.00 | 100.00 | 3200.00 | 250.00 | 280.00           | 470.00          | 5000.00 | 460.00 |
| 24                    | G-1-10  | 27    | 130.00 | 48.00  | 330.00  | 7.90   | 250.00           | 620.00          | 240.00  | 150.00 |
| Zona Riñto            |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 25                    | VM-14   | 45    | 21.00  | 3.20   | 450.00  | 130.00 | 110.00           | 200.00          | 770.00  | 600.00 |
| 26                    | 2-N-MI  | 32    | 56.00  | 9.30   | 390.00  | 3.30   | 150.00           | 230.00          | 480.00  | 91.00  |
| 27                    | 3-N-MI  | 40    | 98.00  | 22.00  | 530.00  | 4.80   | 180.00           | 310.00          | 780.00  | 83.00  |
| 28                    | 4-N-MI  | 47    | 71.00  | 8.80   | 540.00  | 4.70   | 110.00           | 200.00          | 820.00  | 89.00  |
| 29                    | MA-4    | 44    | 41.00  | 5.40   | 380.00  | 170.00 | 67.00            | 230.00          | 650.00  | 280.00 |
| Zona Río Colorado     |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 30                    | 5-E     | 22    | 130.00 | 36.00  | 190.00  | 52.00  | 210.00           | 420.00          | 200.00  | 45.00  |
| 31                    | 5-R-M   | 22    | 190.00 | 50.00  | 230.00  | 4.30   | 270.00           | 490.00          | 330.00  | 54.00  |
| 32                    | R-73    | 24    | 120.00 | 31.00  | 130.00  | 2.90   | 180.00           | 22.00           | 270.00  | 100.00 |
| 33                    | 120-C   | 22    | 320.00 | 87.00  | 390.00  | 7.00   | 310.00           | 650.00          | 860.00  | 120.00 |
| 34                    | 5-C     | 21    | 190.00 | 58.00  | 170.00  | 5.60   | 310.00           | 420.00          | 280.00  | 60.00  |
| 35                    | G-3-5   | 26    | 160.00 | 46.00  | 220.00  | 4.50   | 350.00           | 320.00          | 320.00  | 200.00 |
| 36                    | R-80    | 26    | 83.00  | 24.00  | 140.00  | 3.50   | 220.00           | 200.00          | 190.00  | 89.00  |
| 37                    | 27-V    | 28    | 140.00 | 34.00  | 400.00  | 5.20   | 260.00           | 420.00          | 490.00  | 110.00 |
| 38                    | 49-C    | 33    | 20.00  | 2.30   | 210.00  | 3.70   | 174.00           | 135.00          | 197.00  | 108.00 |
| Zona Tulechek         |         |       |        |        |         |        |                  |                 |         |        |
| 39                    | G-1-4   | 23    | 10.00  | 29.00  | 500.00  | 11.00  | 310.00           | 670.00          | 290.00  | 150.00 |
| 40                    | BT-19   | 87    | 500.00 | 37.00  | 3300.00 | 320.00 | 140.00           | 130.00          | 6200.00 | 100.00 |
| 41                    | BT-14   | 34    | 901.80 | 182.00 | 3398.00 | 300.00 | 291.00           | 399.60          | 7788.00 | 100.00 |

grandes profundidades. Valiéndose de los horizontes permeables del acuífero profundo continúan su viaje hacia el oeste y terminan ascendiendo a través de los horizontes del acuífero somero, utilizando el sistema de fallas, hasta manifestarse en superficie. Trudell, *et al.*, (1981) consideran que la salmuera geotérmica se origina de la combinación de aguas provenientes del río Colorado y aguas marinas con alto grado de evaporación.

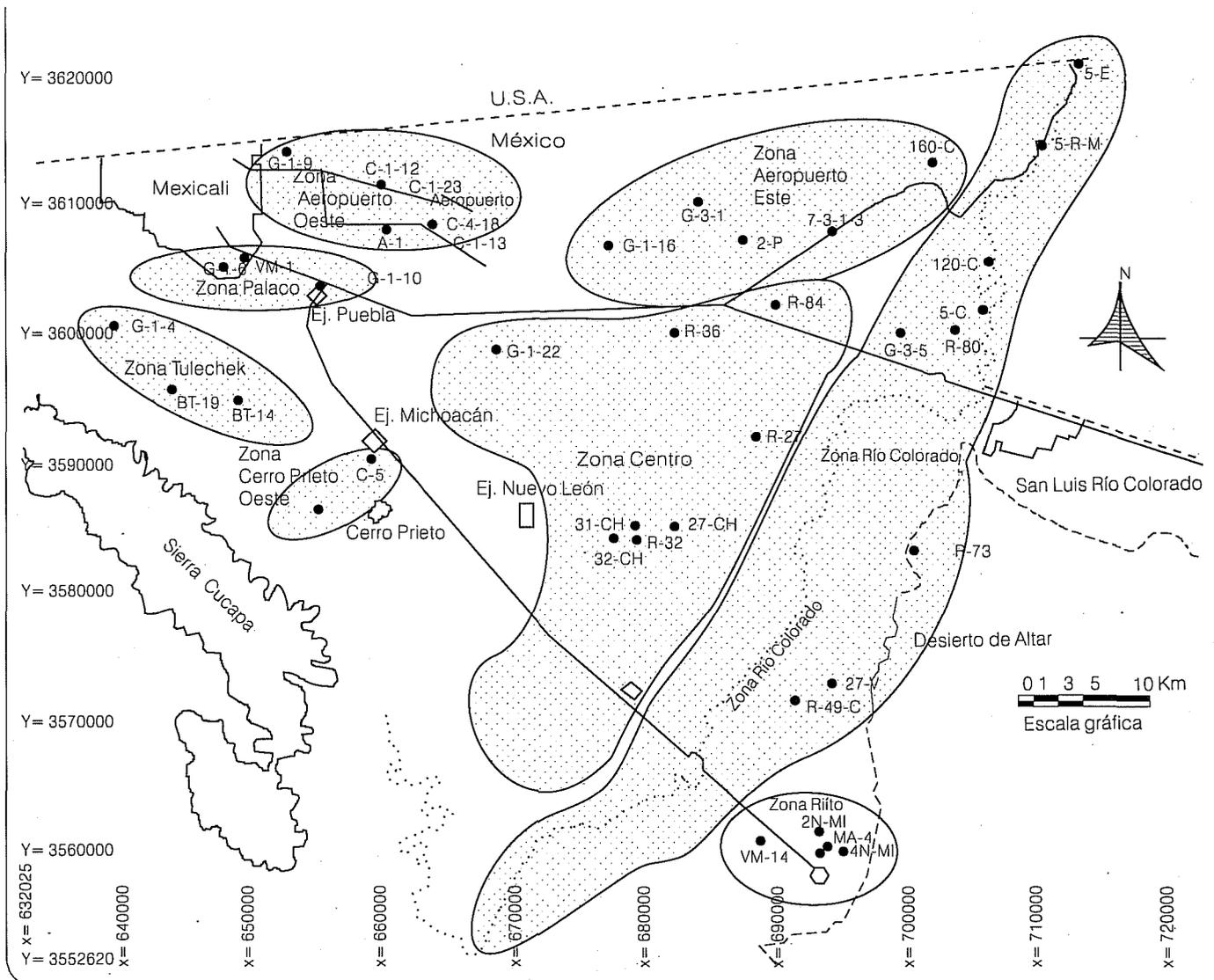
Makdisi (1982) describe a la provincia hidrológica somera como un acuífero sin confinamiento, anisotrópico y no isotérmico. La dirección de flujo regional corre de noreste a suroeste con un gradiente hidráulico de alrededor de 0.042 m/km (Arreguín, 1968).

Un rasgo fisiográfico único de la zona es el volcán Cerro Prieto, constituido por rocas de composición intermedia de edad cuaternaria (Fonseca, *et al.*, 1981).

### Metodología

Para los objetivos planteados en este trabajo será necesario suponer que los conceptos geológicos desarrollados en el CGCP son aplicables a todo el valle de Mexicali. Una buena base de apoyo la brinda el desarrollo de otros campos geotérmicos dentro de la cuenca Salton, tales como East Mesa (Riney, *et al.*, 1980; Lohse e Icerman, 1882) y Salton Sea (Elders y Sass,

### 3. Plano del valle de Mexicali mostrando la localización de los pozos muestreados y la división por zonas utilizada para el desarrollo del trabajo



1988), los que confirman que el modelo geológico-geohidrológico se conserva relativamente estable a lo largo de la cuenca.

La información química de las aguas del subsuelo del valle, utilizada en este artículo, se generó en los trabajos de la CFE y en el monitoreo continuo que sostiene la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH; en este último sólo se reportan los parámetros útiles para la determinación de aguas de uso agrícola.

Entre la información más completa a la que se tiene acceso está la publicada por Makdisi *et al.*, (1982), Payne *et al.*, (1979) y algunos muestreos realizados por la UABC. El cuadro 1 presenta la composición química elemental y la profundidad de cada uno de los pozos seleccionados.

Para fines prácticos se utilizaron las ya mencionadas divisiones del valle de Mexicali, Aeropuerto Oeste, Aeropuerto Este - Algodones, Río Colorado, Cerro Prieto, Tulechek, Palaco, Riño y Centro (ilustración 3). En dichas zonas se seleccionaron 41 pozos considerando principalmente la disponibilidad y cantidad de información. Cabe aclarar que, debido a que los muestreos se realizaron en diversas etapas, algunos de ellos de relativa antigüedad, es posible el efecto de una ligera variación de las concentraciones en el tiempo, sin embargo, el análisis de la variación temporal de los datos obtenidos cae fuera del objetivo del presente artículo.

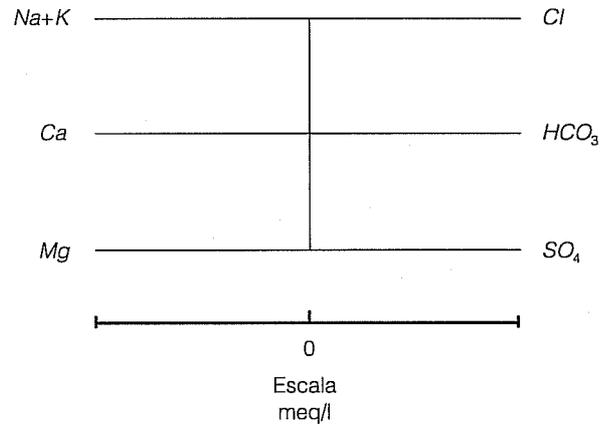
El diagrama propuesto por Stiff en 1951 (Davis y De Wiest, 1966) para la caracterización de aguas, permite apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y a las variaciones de las relaciones entre cationes o entre aniones; el hecho de trabajarlos en por ciento de meq/l no hace posible apreciar concentraciones absolutas. La ilustración 4a muestra la construcción del diagrama con la escala abierta ya que, para fines prácticos, se acostumbra ajustar la escala de la forma más adecuada para las concentraciones de las muestras y el tamaño del plano.

Se debe aclarar que en este caso el diagrama de Stiff se utiliza también de manera esquemática y comparativa, es decir, en base a la forma que resulta del graficado de la concentración química de una muestra patrón, se comparan las demás gráficas para determinar sus tendencias.

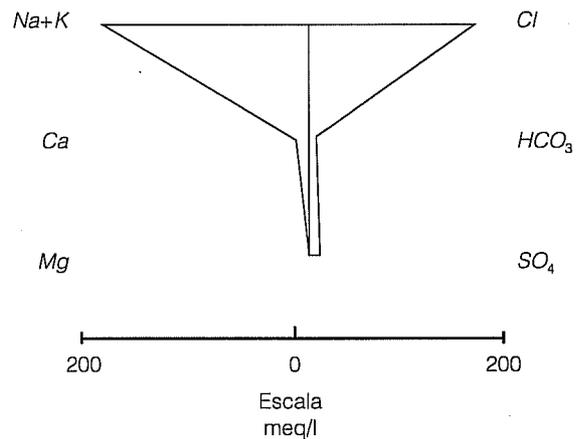
En la ilustración 4b se observa el diagrama tipo que se obtiene al graficar la composición química del agua del CGCP, la que proviene de pozos de más de 1500 m de profundidad, con temperaturas generalmente mayores de 300°C y más de 20 000 ppm de sólidos totales disueltos. En la ilustración 4c se presenta el diagrama correspondiente al agua del río Colorado, graficado con información tomada de Payne *et al.*, (1979). Di-

#### 4. Diagrama de Stiff (Davies and De Wiest, 1966)

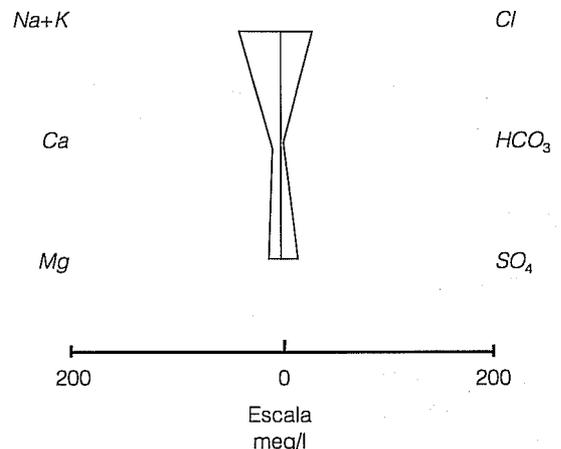
##### a) Construcción del diagrama general



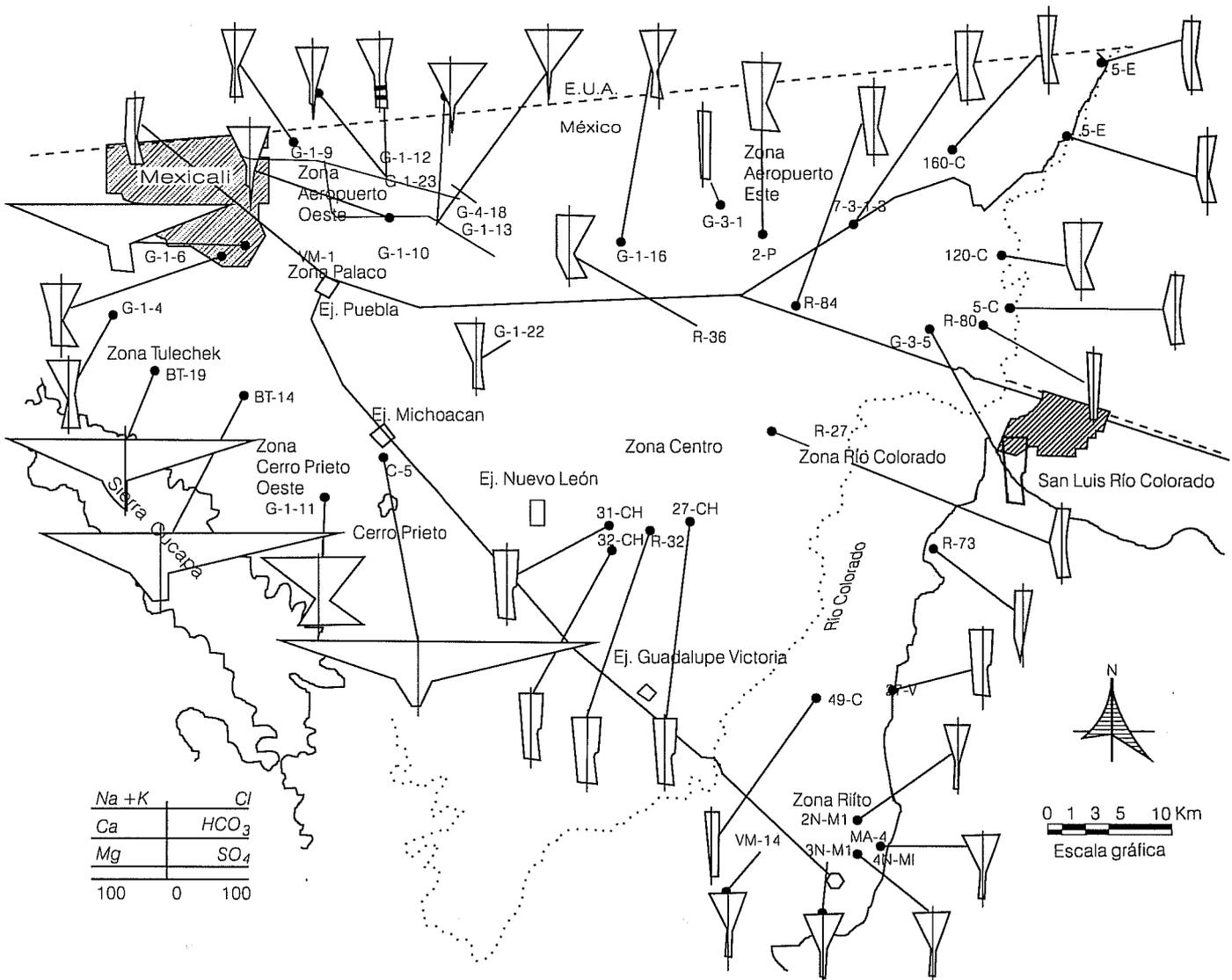
##### b) Forma típica de aguas geotérmicas obtenidas al graficar las concentraciones químicas de una muestra de agua subterránea obtenida en el campo geotérmico de Cerro Prieto



##### c) Forma típica obtenida al graficar las concentraciones químicas de muestras de agua provenientes del río Colorado



**5. Plano del valle de Mexicali que muestra los diagramas de Stiff obtenidos al graficar las concentraciones químicas de las aguas subterráneas de cada pozo**



chos esquemas serán utilizados en este estudio como diagramas patrón de las aguas geotérmicas y superficiales, respectivamente.

**Resultados**

La ilustración 5 presenta al valle de Mexicali con los respectivos diagramas de Stiff generados para las concentraciones químicas de las aguas subterráneas muestreadas en cada pozo. Tomando en consideración la profundidad de los pozos y la temperatura de muestreo se obtienen los siguientes resultados:

- En la zona Aeropuerto Oeste se ubican cuatro pozos artesianos de no más de 300 m de profundidad y un pozo exploratorio profundo (>900 m) con una temperatura de muestreo de 32°C en promedio. Los diagramas obtenidos indican tendencia hacia las aguas de origen geotérmico. El pozo G-1-19, en las proximidades con la ciudad de Mexicali advierte la influencia de una ligera mezcla
- La zona Aeropuerto Este-Algodones, cuyos pozos tienen profundidades de entre 150 y 200 m, indica temperaturas de muestreo de aproximadamente 26°C. La forma de los diagramas gradúa desde lige-

ramente geotérmico, en el pozo G-1-16 (cercano a la zona Aeropuerto Oeste), hasta francamente superficiales, en las inmediaciones del río Colorado

- Las áreas de Cerro Prieto y Tulechek muestran altas concentraciones de tendencias geotérmicas. Las aguas subterráneas cuyas concentraciones se graficaron provienen de pozos con profundidades comprendidas entre 100 y 230 m, y algunas de sus temperaturas de muestreo son mayores a los 40°C. Las excepciones corresponden a los pozos G1-11 y G1-4 de 150 m de profundidad, cuyas muestras presentaron temperaturas de 24°C. En este caso se trata de los pozos ubicados en el extremo oeste del Valle, más próximos a la sierra Cucapa
- En la zona Rífto se muestrearon aguas subterráneas con temperaturas mayores de 40°C provenientes de pozos con profundidades muy variadas (83 a 600 m). Las gráficas resultantes manifiestan tendencia hacia las formas de las aguas geotérmicas, sin embargo, las bajas concentraciones parecen indicar cierto grado de dilución
- Las aguas subterráneas de la zona Palaco se muestrearon en pozos de 150 m, con una temperatura promedio de 27°C y se comportan como mezclas. La excepción la constituye el agua subterránea proveniente de la muestra del pozo exploratorio VM-1, de 460 m de profundidad, la que relacionada con una temperatura de muestreo de 32°C produce un diagrama evidentemente geotérmico
- El graficado de las concentraciones de las aguas subterráneas de la porción central del valle arrojó diagramas de mezcla con gran disposición hacia las aguas superficiales. Los pozos muestreados tienen menos de 150 m de profundidad y una temperatura de alrededor de 27 grados centígrados
- Las aguas subterráneas de la zona aladaña al río Colorado, cuyos pozos tienen una profundidad que varía de 45 a 200 m, muestran algunos esquemas con tendencias geotérmicas, como es el caso del pozo 49-C, situado en la margen izquierda del río. Sin embargo, las tendencias de aguas superficiales predominan sobre las mezclas en esa área con alrededor de los 28°C de temperatura de muestreo

## Discusión y conclusiones

Al observar el plano de los diagramas de Stiff se pueden determinar algunas de las influencias predominantes de las aguas subterráneas del valle de Mexicali:

- De las regiones con disposición claramente geotérmica, Tulechek y Cerro Prieto Oeste son las dos cuyas aguas presentan el diagrama correspondiente a las aguas de origen geotérmico. Las zonas de Aeropuerto Oeste y Rífto también muestran condiciones de aguas geotérmicas, sin embargo, las bajas concentraciones en general y, particularmente de  $Cl$  y  $Na+K$ , parecen indicar que durante su curso han interactuado con aguas de menor concentración
- El segundo grupo se correlaciona directamente con los esquemas que representan a las mezclas. Estos se localizan indistintamente por todo el valle de Mexicali predominando en las porciones noroeste y central, hasta los límites con el río Colorado. Llegan a presentarse en zonas evidentemente geotérmicas, como el extremo oeste del CGCP, en relación con aguas muestreadas en pozos someros y de bajas temperaturas, en donde podemos considerar la influencia de las aguas del acuífero superficial
- El predominio de los diagramas que evidencian un contenido dominante de aguas superficiales resulta un comportamiento normal para la zona de influencia del río Colorado

Del análisis del comportamiento del diagrama de Stiff a lo largo del valle de Mexicali concluimos que las aguas subterráneas del acuífero superficial del valle de Mexicali presentan dos agrupaciones bien determinadas:

- Aguas preferentemente geotérmicas, a las que pertenecen las zonas de Rífto, Tulechek, Aeropuerto Oeste y Cerro Prieto Oeste
- Aguas de mezcla producidas por la combinación, en mayor o menor grado, entre las aguas geotérmicas que ascienden a lo largo del Valle, a través del sistema de fallas, y la infiltración de aguas superficiales provenientes de la cuenca del río Colorado

El diagrama de Stiff permitió hacer rápidas comparaciones de las muestras de agua subterránea, lo que resultó útil para identificar algunos de los diversos tipos de fluidos presentes en las aguas subterráneas a lo largo del valle de Mexicali. Sin embargo, para determinar el origen y evolución del agua, la relación profundidad-temperatura de la misma, el grado de mezcla y las zonas de aporte es necesario combinar otras técnicas de exploración y algunos mapas de distribución de parámetros.

Recibido: mayo, 1994  
Aprobado: diciembre, 1994

## Referencias

- Alvarez-R., J. *Exploración geotérmica en Tulechek*, tesina inédita de Especialidad en Geotermia, Universidad Autónoma de Baja California, p.15, 1992.
- Alonso, E.H. *La zona geotérmica de Cerro prieto, Baja California*, Boletín Soc. Geol. Mex., (v.29, p.p. 17-47), 1966.
- Arreguín, J.M.; G.E.V. Figueroa; A.J. Caraveo. *Estudio geohidrológico completo de los acuíferos del valle de Mexicali, B.C. y Mesa Arenosa de San Luis*, Ariel Construcciones, S.A., (p.p. 158), 1968.
- Campbell-Ramírez, H.; W.A. Elders; J. Reyes-López; J. Ramírez-Hernández; M. Vega-Aguilar; C. Carreón-Díazconti. *Potential for Direct-Use of Geothermal Energy for the Mexicali Valley, Baja California, México*, Trans. Geotherm. Resour. Coun., (vol. 17, Oct. 1993, p.p. 3-9), 1993.
- Davis, S.N. y R.J.M. DeWiest. *Hydrogeology*, John Wiley & Sons Inc., (p.p. 463), 1966.
- de la Peña-L., A.; J. Puente-C.; E. Díaz-C. *Modelo geológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto*, Segundo Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México., (p.p. 29-56, Oct. 1979), Mexicali, Baja California, 1979.
- Elders, W. and J. Sass. *The Salton Sea Scientific Drilling Project*, Journal of Geophysical Research, (v. 93, No. B11, p. 12953-12968), 1988.
- Fonseca, H.L.; A. de la Peña; I. Puente; E. Díaz. *Extensión del campo de Cerro Prieto y futuras zonas con probabilidades geotérmicas en el valle de Mexicali*, Tercer Simposio Sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México, (p.p. 384-421), San Francisco, Cal., 1981.
- González-C., A. *El Agua en la agricultura*, Agua y Desarrollo Regional, Colegio de Economistas de Baja California., (P.P. 71-80), 1989.
- Halfman, S.E.; M.J. Lippman; R. Zelwer; J.H. Howard, *Geologic Interpretation of Geothermal Fluid Movement in Cerro Prieto Field, Baja California, México* Am. As. Petroleum Geol. Bull, (v. 68, p.p. 18-30), 1984.
- Lohse, R. and L. Icerman. *Temperature Gradient Drilling in the Las Cruces East Mesa Geothermal Field*, Trans. Geotherm. Resour. Coun., (vol. 6, Oct. 1982, p.p. 141-144), 1982.
- Lomnitz, C.; C. Allen; J.N. Brune; W. Thatcher. *Preliminary Results of a Study of Seismicity of the Northern Gulf of California Region, México*, Geol. Soc. of Am. Abs. with Programs, (v. 3, p. 151), 1971.
- Makdisi, R.S.; A.H. Trusdell; J.M. Thompson; T.B. Coplen; J. Sánchez-R. *Geochemical Evolution of Mexicali Valley Groundwaters*, Cuarto Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, (p.p. 551-570), Guadalajara, Jal., México, 1982.
- Payne, B.R.; L. Quijano; D.C. Latorre. *Environmental Isotopes in a Study of the Origin of Salinity of Groundwater in the Mexicali Valley*, Journal of Hydrology, (v. 41, p.p. 201-215), 1979.
- Riney, T.D.; J.W. Pritchett; L.F. Rice. *Three-Dimensional Model of east Mesa Hydrothermal System*, Trans. Geotherm. Resour. Coun., (vol. 4, Sept. 1980, p.p. 467-470), 1980.
- Universidad de California en Riverside y Universidad Autónoma de Baja California. *Evaluación preliminar del recurso geotérmico en la zona del Aeropuerto, Mexicali, Baja California, Mexico*, UABC, Informe interno, 1993.
- Valdés, A.; R. Saldaña; O.R. Cueto; O. Reyes. *Evaluación preliminar del potencial heliográfico en el valle de Mexicali*. X Reunión Anual de la Asociación Nacional de Energía Solar, Guanajuato, Guanajuato, México, 1986.

## Abstract

Carreón, C. et al. "Stiff Diagram as a Geochemical Tool in the Geothermic Exploration of the Mexicali Valley, Baja California". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol X. Num. 3, pages 37-46, September-December, 1995.

A survey to determine the source and geochemical evolution of the Mexicali Valley's groundwater is the major proposal of our work. An initial stage for compilation and analysis of geochemical information is intended. We will use chemical data of only one sample from each selected well. With these data we will know, as a preliminary step, the different pattern of groundwater along the Mexicali Valley.

Chemical data were measured by the authors and geothermal information was taken up from literature. In addition, the concentration Stiff's diagram was used to draw a map which permits to compare readily the different kinds of groundwater. Plots of groundwater chemical concentration, well sample temperatures, and the spatial localization in the Valley are shown.

We conclude that there are two major behaviors of the Mexicali Valley's groundwater: The former is related to Stiff's plot geothermal waters located at Riito, Tulechek, West Cerro Prieto and West Aeropuerto. The last one is related to mixed Stiff plots and these waters are located indistinctly throughout the Valley even in regions exhibiting markedly geothermal characteristics.

We need to combine another kind of exploration tecnics to determine the source and evolution of the water, the mixes rates, and the temperatures and deep links.

**Key Words:** Geochemistry, Stiff Plot, Geothermal Exploration, Mexicali Valley, Groundwater, Geothermal Source, Meteoric Source.