



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**INTRUSIÓN DEL AGUA DE MAR Y LA EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA
DEL ACUÍFERO COSTERO DE MANEADERO, BAJA CALIFORNIA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
O C E A N Ó L O G O
PRESENTA:
EDITH CATALINA SÁNCHEZ RENTERÍA

Ensenada, Baja California, Marzo del 2004

RESUMEN

El acuífero de Maneadero se localiza en la costa occidental de Baja California y es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para la zona urbana de la ciudad de Ensenada, así como para riego de cultivos en el Valle de Maneadero. La comparación de los resultados de análisis hidrogeoquímicos reportados entre 1974 y 1991 por la Comisión Nacional del Agua para el agua subterránea de la región y los datos presentados en esta tesis, indican que la excesiva extracción, en conjunto con períodos prolongados de baja precipitación, han causado un impacto negativo en la calidad del agua subterránea. La concentración de iones disueltos en agua de los pozos ubicados en la zona costera, presentó máximos históricos, con concentraciones de sólidos disueltos totales de hasta 6.06 g/L en septiembre del 2001, aumentando tan sólo en 7 meses a 7.85 g/L para abril del 2002. Dicho aumento se atribuye al avance del agua de mar hacia el interior de acuífero (intrusión salina). Este fenómeno ocurre predominantemente en la porción costera-central del acuífero, zona alejada del escurrimiento de los arroyos San Carlos y San Francisquito-Las Ánimas, pero afecta también parcialmente las regiones costeras al sur y norte del acuífero.

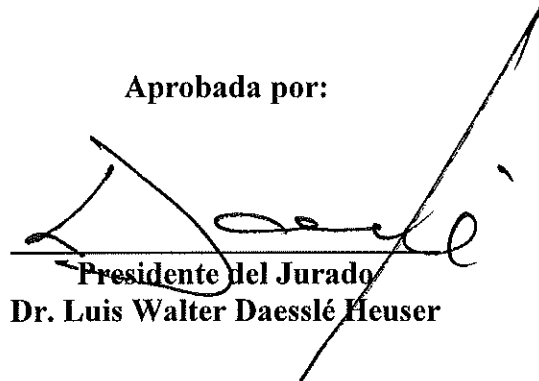
Con base en la concentración (en meq/L) de los iones mayoritarios Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} y HCO_3^- , el agua subterránea del acuífero de Maneadero se clasifica como de tipo intermedio clorurado-cálcico a clorurado-sódico. La distribución regional de las concentraciones de todos los iones analizados, excepto el HCO_3^- , esta controlada por la intrusión del agua de mar.

De los 5 pozos explotados por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) para abastecer de agua a la ciudad de Ensenada, solamente dos cumplen con los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) para uso y consumo humano en cuanto a sus concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT), teniendo concentraciones mayores a 1.0 g/L. Tras un período breve y poco intenso de lluvias, (89.6 mm, de precipitación) entre septiembre 2001 y abril 2002, se observó que existió una recuperación parcial en la calidad del agua en los pozos localizados directamente sobre el cauce del Arroyo San Carlos (donde se ubican los pozos CESPE), donde las concentraciones de SDT decrecieron de 0.94 a 0.54 mg/L. Sin embargo, el agua de lluvia que se infiltró hacia la zona saturada del acuífero no fue suficiente para provocar un retroceso de la intrusión salina, como lo demuestra el incremento en SDT en el 95% de los pozos estudiados.

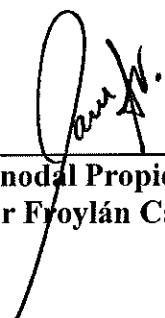
**INTRUSIÓN DEL AGUA DE MAR Y LA EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA
DEL ACUÍFERO COSTERO DE MANEADERO, BAJA CALIFORNIA**

**T E S I S
QUE PRESENTA:
EDITH CATALINA SÁNCHEZ RENTERÍA**

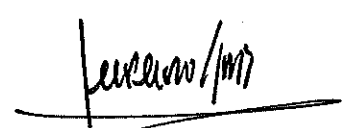
Aprobada por:



**Presidente del Jurado
Dr. Luis Walter Daesslé Heuser**



**Sinodal Propietario
Dr. Victor Froylán Camacho Ibar**



**Sinodal Propietario
Dr. Leopoldo Guillermo Mendoza Espinosa**

Esta tesis esta dedicada a Dios principalmente que me dejó llegar a terminarla. A mis Papás (Guadalupe y Antonio), abuelos (Bardomiano y Beatriz), hermanos (Alicia y Jacobo), a mi novio (Carlos) y a la más pequeña de la familia (Jenny).

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer:

A la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), especialmente a Patricia Silva y Andrés Millán, a la Comisión Nacional del Agua (CNA), y al Instituto de Investigaciones Oceanológicas por el apoyo y ayuda en la realización de esta tesis.

A mi Tutor el Dr. Walter Daesslé y a mis dos sinodales el Dr. Leopoldo Mendoza y el Dr. Victor Camacho por sus comentarios y ayuda.

Al Sistema de Investigación del Mar de Cortés y CONACYT (SIMAC 2000 – Proyecto 6052) y a la Coordinación de Postgrado e Investigación de la UABC (4ta Convocatoria Interna de Apoyo a Proyectos de Investigación) por financiar el presente estudio.

A la Secretaría de Educación Pública y CONACYT por financiar la adquisición y mantenimiento del equipo analítico empleado para la realización de mi tesis de licenciatura.

A todos mis compañeros de generación los Sharkologos, por soportarme y soportarlos durante 4.5 años, en especial a los que más lata les dí.

A mis amigas Nora, Leticia, Diana, Miriam P., Miriam E., Socorro, Gloria G. por su amistad durante mucho tiempo.

A la persona que siempre esta conmigo en las buenas y las malas.

INDICE GENERAL

1	Introducción.....	1
2	Antecedentes.....	6
2.1	Extracción y recarga.....	7
2.2	Lluvias.....	9
2.3	Calidad del agua.....	10
3	Objetivos.....	13
3.1	Objetivo general.....	13
3.2	Objetivos particulares.....	13
4	Hipótesis.....	14
5	Área de Estudio.....	15
5.1	Clima.....	16
5.2	Geología.....	16
5.3	Condiciones hidrogeológicas.....	18
6.	Metodología.....	20
7	Resultados.....	24
7.1	Variables fisicoquímicas.....	24
7.1.1	Variación y distribución regional de la temperatura.....	24
7.1.2	Variación y distrubución regional de pH.....	27
7.1.3	Variación y distribución regional de sólidos totales disueltos.....	27
7.1.4	Variación y distribución regional de oxígeno disuelto.....	28
7.2	Geoquímica de iones mayores.....	32
7.2.1	Clasificación hidrogeoquímica del acuífero.....	32
7.2.2	Distribución regional de iones mayores.....	38
8	Discusión.....	47
8.1	Clasificación del agua subterránea del acuífero de Maneadero.....	47
8.2	La evolución histórica de la intrusion del agua de mar.....	53
8.3	El agua para uso humano en Ensenada y la Norma Oficial.....	60
	Mexicana	
9	Conclusiones.....	63
10	Bibliografía.....	65

Anexo I	Resultados de los análisis para la perimer campaña de muestreo en septiembre 2001 de agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero, Baja California.....	68
Anexo II	Resultados de los análisis para la segunda campaña de muestreo en abril 2002 de agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero, Baja California	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Extracción total y agrícola del agua del acuífero de Maneadero para el período 1948-1998 y balance aproximado entre la descarga y recarga totales para dicho período. Datos cortesía de la CNA.	8
Figura 2	Registro de precipitación pluvial durante el período de 1948 a 2002 en la estación meteorológica de Ensenada. Datos cortesía de la CNA.	10
Figura 3	Diagrama triangular para la representación gráfica de análisis de agua (diagrama Piper), realizado en 1974 por la Secretaría de Recursos Hidráulicos.	11
Figura 4	Ubicación de las principales cuencas hidrológicas en B.C. y detalle específico de la subcuenca que contiene al acuífero costero de Maneadero.	15
Figura 5	Distribución regional de temperatura en °C en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	26
Figura 6	Distribución regional de pH en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	29
Figura 7	Distribución regional de Sólidos Disueltos Totales (g/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	30
Figura 8	Distribución regional de oxígeno disuelto (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	31
Figura 9	Diagrama de Shoeller para la primer campaña de muestreo (septiembre 2001).	34
Figura 10	Diagrama de Shoeller para la segunda campaña de muestreo (abril 2002).	35

Figura 11	Diagrama Piper de la primer campaña de muestreo (septiembre 2001) indicando la clasificación del agua subterránea de Maneadero como intermedia entre $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ y $\text{Cl}^- \text{Ca}^{++}$.	36
Figura 12	Diagrama Piper de la segunda campaña de muestreo (abril 2002) indicando la clasificación del agua subterránea de Maneadero como intermedia entre $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ y $\text{Cl}^- \text{Ca}^{++}$.	37
Figura 13	Distribución regional de Na^+ (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	39
Figura 14	Distribución regional de Mg^{++} (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	40
Figura 15	Distribución regional de Ca^{++} (mg/l) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	41
Figura 16	Distribución regional de HCO_3^- (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	44
Figura 17	Distribución regional de Cl^- (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	45
Figura 18	Distribución regional de SO_4^{--} (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre 2001 y abril 2002.	46
Figura 19	Evolución histórica de las concentraciones de cationes mayores en el agua de pozos selectos de 1974 a 2002.	57
Figura 20	Evolución histórica de las concentraciones de aniones mayores en el agua extraída de pozos selectos de 1974 a 2002.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comparación de las concentraciones de iones mayoritarios en agua de mar, agua superficial y agua subterránea (Carrillo, 2002).	51
Tabla 2	Comparación entre las concentraciones de variables químicas y fisicoquímicas en los pozos para uso y consumo humano en el acuífero de Maneadero y la modificación de la NOM 127-SSA1-1994 para los resultados de la primer campaña de muestreo.	61
Tabla 3	Comparación entre las concentraciones de variables químicas y fisicoquímicas en los pozos para uso y consumo humano en el acuífero de Maneadero y la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 para los resultados de la segunda campaña de muestreo.	62

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas contenidas en los poros, fisuras y rocas del subsuelo son llamadas aguas subterráneas. Existen tres fuentes de agua subterránea: (1) agua meteórica o agua proveniente de la precipitación, la cual es la principal fuente de agua subterránea; (2) el agua conatada, que fue atrapada cuando se formaron los depósitos sedimentarios (generalmente salada ya que la mayoría de las rocas sedimentarias fueron depositadas bajo el mar) y (3) agua magmática (o juvenil), que la actividad volcánica añade a las rocas someras y a la superficie y puede mezclarse con el agua subterránea de otras fuentes (Price, 1998).

Se llama acuífero al material geológico permeable a través del cual pasa el agua subterránea y alimenta a pozos y manantiales. Las capas inclinadas de roca proporcionan una diferencia en presión la cual se conoce como carga. Ésta se establece entre los lugares de entrada y descarga del agua. En algunas formaciones el agua se mueve con un ritmo de lentitud infinitesimal; otras en cambio, la conducen a una velocidad de muchas decenas de metros por día (Walton, 1970). Cuando un acuífero inclinado recibe el agua en sus extremos superiores y se encuentra intercalado entre dos capas impermeables, el agua subterránea confinada puede estar bajo presión considerable a medida que percola a través de la roca. Si alcanzara una abertura natural o artificial que le permitiera escapar hacia arriba, se formaría un manantial fluyente o un pozo artesiano (Price, 1998).

El acuífero se divide en dos zonas principales:

Zona Vadosa: El agua al descender pasa a través de una capa superior de suelo y sedimento en la que los espacios están llenos parcialmente con agua y aire, la cual se conoce como zona vadosa o zona de aireación. La faja de humedad del suelo suministra agua para el crecimiento de las plantas y la de margen inferior (orla de capilaridad), conserva parte del agua que percola hacia el subsuelo. Entre estas capas hay una faja intermedia en la cual las gotas de agua están virtualmente suspendidas por la atracción molecular ejercida entre ellas y la superficie de la roca adyacente, excepto cuando se llena de agua en la época de lluvias o fusión de la nieve.

Zona de Saturación: Debajo de la zona vadosa se encuentra la zona de saturación, la cual se extiende a considerable profundidad en la que las grietas intersticiales y agujeros de las rocas están completamente llenos con agua. El límite entre estas dos principales zonas es una superficie no uniforme que se llama superficie freática. Esta superficie debe ser penetrada para abastecer un pozo o a una corriente permeable. Los cambios de temperatura ambiental no tienen una influencia directa sobre el agua en la zona de saturación de acuíferos no confinados. Estos cambios solo afectan a la zona no saturada situada encima del nivel freático. Las variaciones de temperatura exterior se propagan muy lentamente al interior de los terrenos y en la zona saturada ya no se detectan oscilaciones diurnas, solamente en estudios de larga duración. Asimismo, el efecto de presión no se hace sentir en los acuíferos libres ya que en todos sus puntos se encuentran

influenciados por la presión atmosférica a través de la zona de aireación superficial o zona no saturada (Price, 1998).

En el agua subterránea, la mayor parte de sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Los aniones principales son los cloruros, sulfatos y bicarbonatos, y los cationes principales son el sodio, calcio y magnesio. También se encuentran otros iones en menor concentración, pero estos no son de gran importancia en el balance de cargas de sales disueltas, ya que se encuentran en un porcentaje menor al 1% (Langmuir, 1997).

Algunas especies químicas disueltas en el agua subterránea pueden presentarse por causas naturales o antropogénicas en concentraciones elevadas y considerarse contaminantes. Los contaminantes de los acuíferos son diversos. Éstos pueden ser de variedad muy distinta como por ejemplo los iones inorgánicos como el cloro, nitrato y metales pesados, o compuestos sintéticos como los plaguicidas (Price, 1998). En México existe un alto índice de contaminación de las cuencas hidrológicas y 20 % de ellas tienen problemas muy severos que afectan a la población (Guzmán, 1995). Las principales causas de esta contaminación son la infiltración de aguas residuales de zonas urbanas, la salinización de acuíferos y la contaminación de suelos (Guzmán, 1995).

En Baja California existen 6 cuencas hidrológicas principales, en las cuales los acuíferos de Maneadero, Guadalupe, Ensenada y La Misión son los que abastecen de agua para uso humano a la ciudad de Ensenada. Actualmente el agua del acuífero de

Maneadero, además de abastecer a la zona urbana, se emplea en la agricultura de la zona. Sin embargo, al ser un acuífero costero sobreexplotado, desde hace al menos tres décadas sufre severos problemas de contaminación debido al avance del agua de mar hacia el acuífero (Córdova-Bojórquez, 1996; Comisión Nacional del Agua, 1997b). Este fenómeno conocido como intrusión salina puede definir como el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas en contacto con el mar provocado por la excesiva extracción de agua (Mares-Olmos 1996). Los primeros estudios reportados por la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (hoy en día Comisión Nacional del Agua) datan de 1974. Desde entonces ha habido un incremento significativo en la concentración de sales disueltas en el agua subterránea y actualmente se observa un retroceso de la extensión de las actividades agrícolas cercanas a la costa. Sólo existen estudios de calidad del agua reportados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) hasta 1991, fecha desde la que no se encuentran datos, a pesar de que entre 1996 y 2002 se han registrado al menos cuatro años con precipitaciones por debajo del promedio histórico de lluvias para la región. Asimismo, sin duda el crecimiento urbano ha ocasionado un incremento en la demanda de agua para uso doméstico.

El presente estudio se llevó a cabo en vista de la importancia de conocer la evolución geoquímica y el deterioro del acuífero de Maneadero a largo plazo (años o décadas) y corto plazo (meses). Los conocimientos generados serán de gran utilidad en la toma de decisiones respecto al manejo del acuífero y el manejo sustentable de los recursos de esta región. La interacción directa que existe entre el medio marino con esta cuenca

costera, hace de este tema un tópico de relevancia para especialistas no solo en geohidrología, sino también en ciencias del mar y oceanografía costera.

2. ANTECEDENTES

El acuífero costero de Maneadero se encuentra en contacto con aguas marinas del Océano Pacífico, por lo que se presentan variaciones en la concentración de sales, provocadas por la variación anual del nivel estático del agua durante las temporadas de lluvia y estiaje. La zona costera del acuífero que se encuentra expuesta a estas interacciones entre masas de agua es llamada “interfase salina”. Adicionalmente, en el acuífero de Maneadero existe un abatimiento del nivel estático debido a la extracción del agua a través de pozos para uso urbano y agrícola. Esto ocasiona que la interfase salina se mueva hacia el acuífero mezclándose con el agua de la cuenca (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974).

Actualmente el agua de la cuenca de Maneadero es utilizada principalmente (>70%) para la agricultura en el propio valle (Comisión Nacional del Agua, 1998). El auge del desarrollo agrícola a partir de la década de 1960, se basó en la explotación de grandes volúmenes de agua subterránea. Desde entonces, las zonas de cultivo han crecido y demandan mayor cantidad de agua, lo que trae como consecuencia un desequilibrio entre la descarga y la recarga del acuífero. Lo anterior ocasiona una disminución en el nivel freático y un aumento de la salinidad del agua debido a la intrusión salina (Comisión Nacional del Agua, 1997a).

En general la agricultura se ha desarrollado fuertemente en la zona de Maneadero, obteniendo altos rendimientos en la mayor parte de los cultivos. Sin embargo, el manejo de agua de riego no siempre es el adecuado y de su mejoramiento dependerá el que pueda disminuirse el volumen de agua usado actualmente (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978).

2.1. Extracción y Recarga

La recarga natural es la cantidad de agua que se infiltra al acuífero producto de la lluvia o escurrimientos. La descarga es la cantidad de agua que sale del acuífero por evaporación, extracción y escurrimientos hacia el mar. En acuíferos sobre explotados, como el de Maneadero, la mayor descarga se da por extracción a través de pozos. La extracción del agua subterránea en el Valle de Maneadero inició en 1937, con una media anual de 2.5 millones de metros cúbicos (Mm^3). En el año de 1967 se calculó una extracción de 17.0 Mm^3 y para 1971 la extracción ya era de 20 Mm^3 . A partir de 1974 se registraron extracciones mayores a los 20.0 Mm^3 , reportándose en 1978 una extracción de 24.50 Mm^3 y en 1997 de 25.7 Mm^3 (Comisión Nacional del Agua, 1998).

Así pues, una de las causas principales de la sobreexplotación del acuífero de Maneadero es la agricultura (Figura 1). Del período de cultivo de 1967 a 1968 se calculó una extracción de 10.6 Mm^3 exclusivamente destinada al riego de los cultivos. Para el período de 1974 a 1975 el volumen fue de 17.5 Mm^3 y de 17.01 Mm^3 para el período de 1997 a 1998 (Comisión Nacional del Agua, 1998).

Desde 1974 la extracción de agua en Maneadero ha superado a la recarga del acuífero. En 1974, se estimó una recarga anual del acuífero de 19.1 Mm^3 , con una extracción de 20.0 Mm^3 . Para 1978 se estimó una recarga anual de 19.5 Mm^3 y una extracción de 24.5 Mm^3 . Para 1997 se obtuvo un volumen de recarga anual para la cuenca de Maneadero de 20.67 Mm^3 y una extracción de 25.7 Mm^3 (Comisión Nacional del Agua 1998).

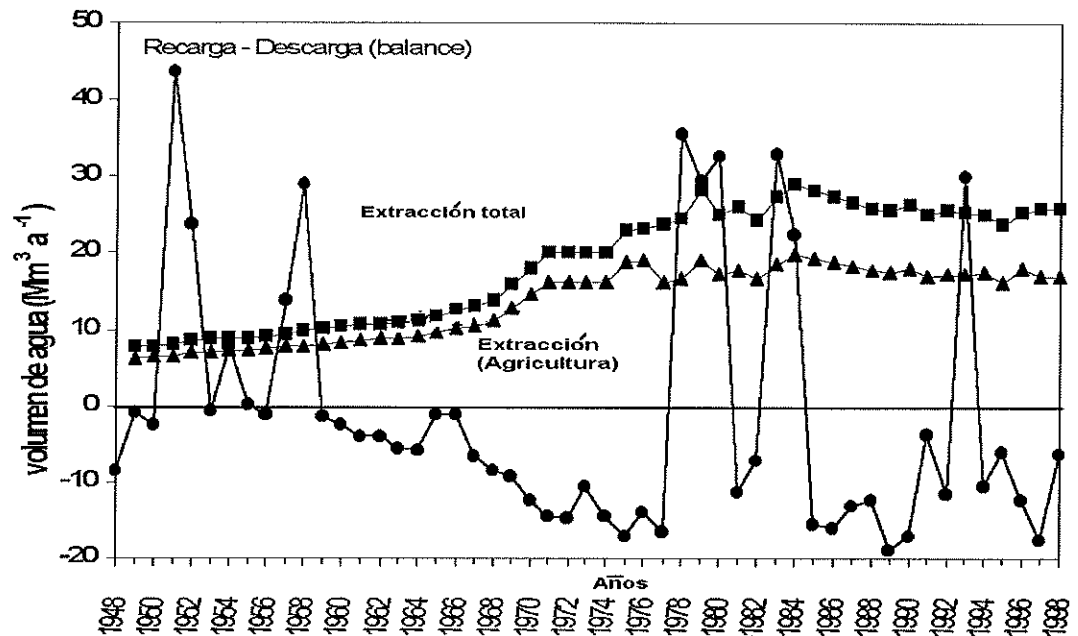


Figura 1: Extracción total y agrícola de agua del acuífero de Maneadero para el periodo 1948-1998 y balance aproximado entre la descarga y recarga totales para dicho periodo. Datos cortesía de la CNA.

2.2 Lluvias

En el período de 1955-1973 se registró una precipitación media anual de 221.8 mm, presentándose las lluvias máximas en la estación meteorológica San Carlos (Fig. 2) la cual fue de 268.5 mm y las mínimas en la estación de Ensenada, con 188.0 mm (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974). En 1974 se registraron 6 períodos de lluvias con duraciones de 1 a 8 días. Éstas se presentaron en los meses de enero a marzo y octubre a diciembre. Un comportamiento similar se dio para los siguientes años hasta 1978, registrándose precipitaciones de 52.5 y 73.0 mm para 1974, y entre 27.3 y 100.0 mm para 1978. Con excepción de septiembre de 1976 y agosto de 1977, las duraciones de las lluvias fueron entre 3 y 9 días en los mismos períodos (Comisión Nacional del Agua, 1998). En 1997 se registraron en la estación de Ensenada para el primer período de lluvia de noviembre-marzo, un volumen de 141 mm y para el segundo período de abril-octubre un volumen de 153 mm (Comisión Nacional del Agua, 1998). El promedio de precipitación pluvial para el período 1948-2002 en la estación meteorológica de Ensenada fue de 245 mm/año. La precipitación de los años recientes (1998-2002), sólo sobrepasó ligeramente este promedio histórico en un año (2001). El período que abarca el presente estudio representa una época de sequía posterior a casi 10 años de precipitaciones por arriba del promedio histórico (Fig. 2).

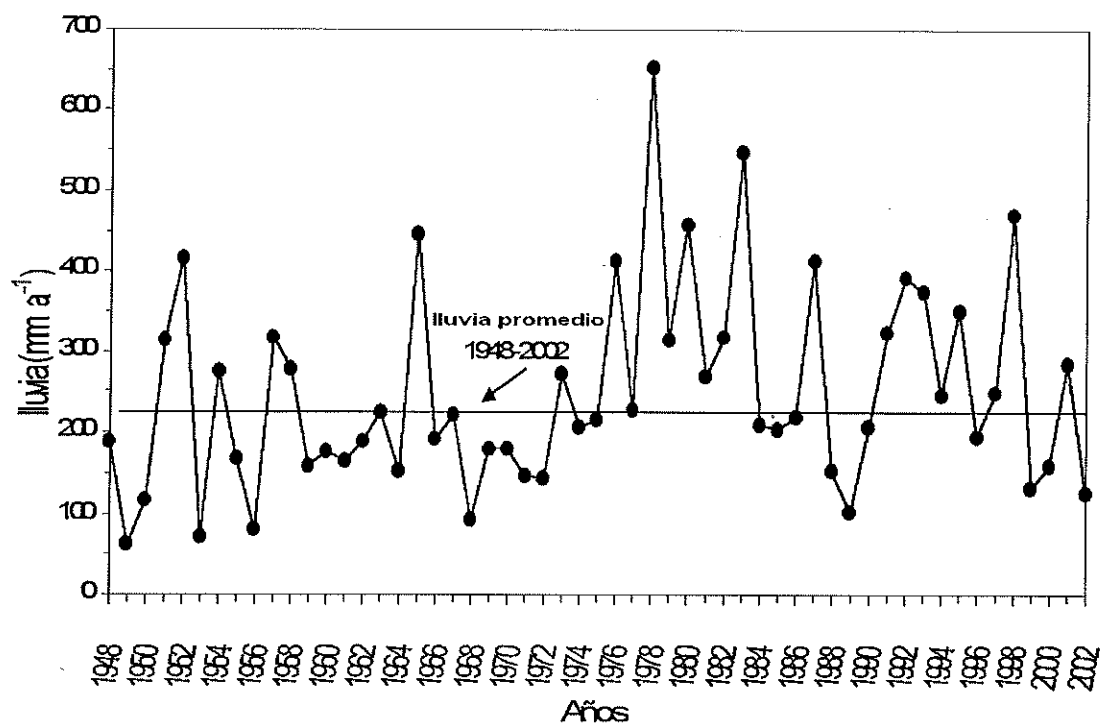


Figura 2: Registro de precipitación pluvial durante el período de 1948 a 2002 en la estación meteorológica de Ensenada. Datos cortesía de la CNA.

2.3 Calidad del agua.

En 1974 la Secretaría de Recursos Hidráulicos reportó por primera vez resultados de análisis físico-químicos para el agua subterránea de la cuenca de Maneadero. A partir de las 101 muestras analizadas y graficadas en diagramas triangulares (Fig. 3), la Comisión Nacional del Agua (1997b) clasificó éstas aguas como sódico-cloradas (Na^+Cl^-). Es decir, de acuerdo a su interpretación del diagrama Piper, el ión sodio predomina entre los cationes principales y el anión predominante fue el cloruro. Como se discutirá posteriormente, esta interpretación del diagrama de Piper presentado en la Figura 3, es imprecisa.

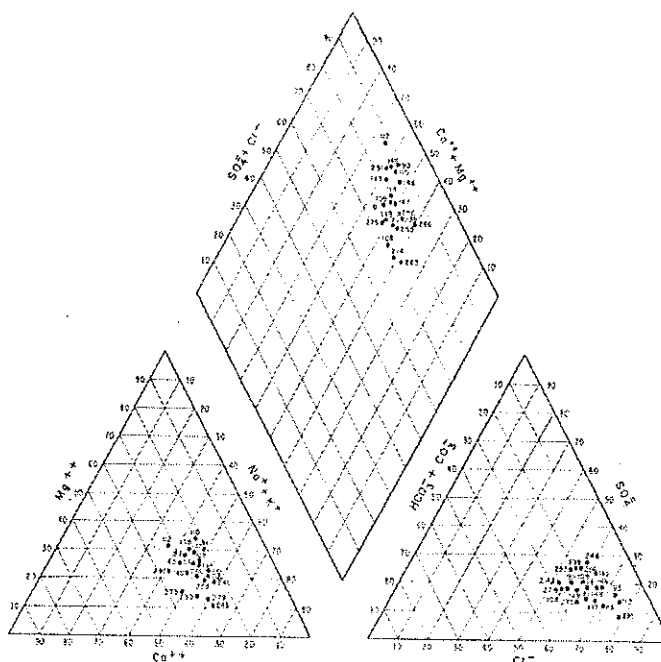


Figura 3: Diagrama triangular para la representación gráfica de análisis de agua (diagrama Piper), realizado en 1974 por la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Uno de los parámetros químicos que indica la intrusión salina es el anión Cl^- . Éste tiende a aumentar cuando el agua de mar se infiltra y se combina con el agua del acuífero. Con base en la revisión de las características químicas analizadas por la Comisión Nacional del Agua para el acuífero de Maneadero en diversos pozos desde 1974 hasta 1991, se ejemplifica a continuación la evolución histórica en las concentraciones del ión Cl^- para la estación 13 del presente estudio (Figura 4), la cual fue la estación que la CNA analizó con mayor frecuencia durante ese período. Para tal estación, en 1974 se registró una concentración de 724 mg/L y en 1976 la concentración de Cl^- aumentó a 1136 mg/L. Sin embargo, en 1977 la concentración de Cl^- disminuyó a 905 mg/L, posteriormente aumentando entre 1978 y 1983 hasta 1534 mg/L en 1983. En

1988 se registró otro decremento en la concentración del cloro decreciendo a 991 mg/L. Finalmente, se alcanzó un máximo histórico en 1991, registrándose una concentración máxima de 1832 mg/L.

En cuanto a la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en este acuífero, de manera más general, en 1971 se obtuvieron valores de 1 g/L para los pozos ubicados a lo largo del cauce de las dos principales fuentes de aporte, el Arroyo San Carlos y el Arroyo Las Animas. Las concentraciones de SDT para 1974 variaron entre 3 y 4 g/L cerca de costa, y 1.5 g/L y 3 g/L para la parte media de la cuenca con concentraciones menores a 1.5 g/L hacia las terrazas (Comisión Nacional del Agua, 1997b). En 1977 se encontraron las mayores concentraciones de SDT en los pozos ubicados cerca de la costa con un valor de 20 g/L frente a la Playa Monalisa al Norte del Estero de Punta Banda, estos pozos actualmente ya están sellados por lo cual no fue posible incorporarlos al muestreo actual (Fig.4). En pozos ubicados cerca del Estero de Punta Banda se encontraron concentraciones máximas de 7 g/L, y en la porción alta de la cuenca se encontraron concentraciones de 1 g/L y 2 g/L. Veinte años después, en 1997 las concentraciones de SDT cerca de la zona costera fueron de 3 a 6 g/L y para el resto de la cuenca las concentraciones variaron entre de 0.8 y 3 g/L. De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (1997b), dicho comportamiento histórico podría sugerir un retroceso en la intrusión salina entre 1977 y 1997, causado por el aumento en el volumen de lluvia reportado para este período (Comisión Nacional del Agua, 1998).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Estudiar la evolución hidrogeoquímica y las características físico-químicas del agua subterránea de la subcuenca de Maneadero, Baja California.

3.2 Objetivos Particulares

- 3.2.1 Determinar la evolución del deterioro del acuífero de Maneadero debido al avance de la intrusión salina, provocado por la extracción excesiva de agua de la cuenca, utilizando datos históricos y análisis actuales de sólidos disueltos totales, temperatura, oxígeno disuelto, pH, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$ y HCO_3^- .
- 3.2.2 Cuantificar diversos parámetros que indiquen si el agua del acuífero se encuentra dentro de los límites permisibles para clasificarla como agua apta para el uso y consumo humano de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (Modificación a la NOM-127-SSA-1994; Diario Oficial de la Federación, 2000).

4. HIPÓTESIS

El acuífero de Maneadero ha sido explotado en forma excesiva y la extracción supera a la recarga de la cuenca. Esto provoca que el nivel de la zona saturada disminuya y tenga como consecuencia el avance del agua de mar hacia el acuífero, afectando principalmente a los pozos cercanos a la costa. Debido a la alta explotación y baja recarga del acuífero durante los últimos años y, tomando en cuenta las fluctuaciones históricas de la calidad del agua en la zona, el avance de la intrusión puede detectarse incluso durante periodos semestrales.

5. AREA DE ESTUDIO

El Valle de Manadero se encuentra en el Municipio de Ensenada, B. C., ubicado entre los $31^{\circ}38'65''$ y $31^{\circ}49'37''$ de latitud N y los $116^{\circ}30'26''$ y $116^{\circ}38'80''$ de longitud W, a 15 km al sur de la ciudad de Ensenada. Es una subcuenca hidrológica que tiene una extensión de 1975 km^2 , de los cuales 64 km^2 pertenecen a la planicie costera (Fig. 4). El Valle de Maneadero se encuentra delimitado al norte por una amplia terraza fluvial que lo separa de Ensenada, al sur por la Falla de Agua Blanca, al este por la Sierra de Juárez y al oeste por el Estero de Punta Banda y el Océano Pacífico (Fabriol *et al.*, 1982).

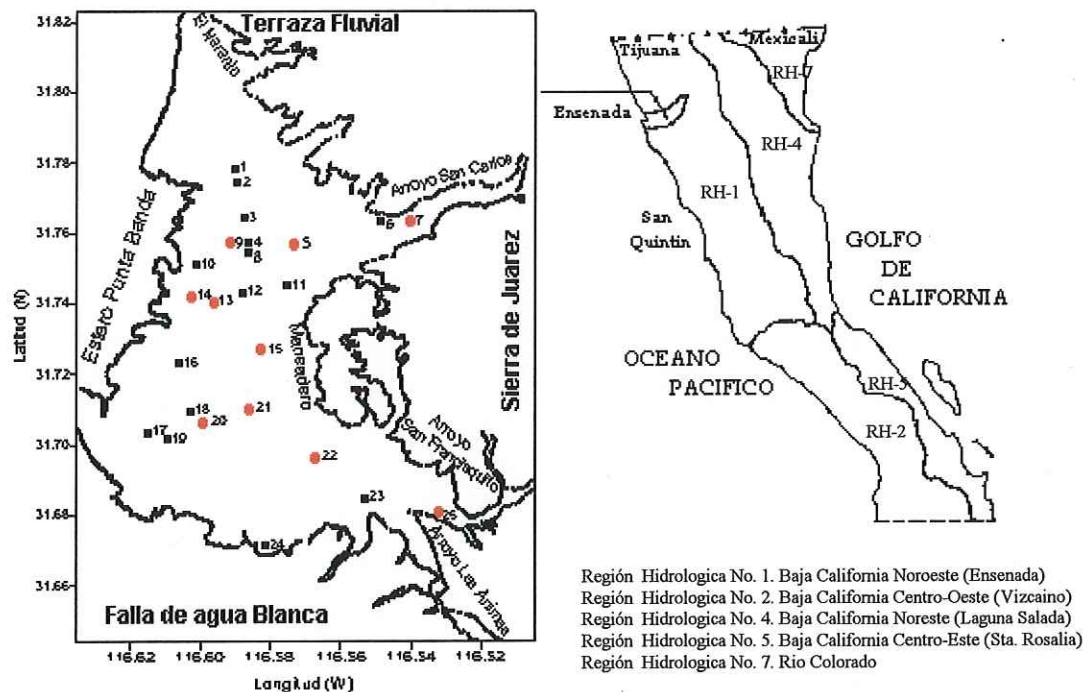


Figura 4: Ubicación de las principales regiones hidrológicas en B.C. y detalle específico de la subcuenca que contiene al acuífero costero de Maneadero. Las estaciones en rojo son aquellas que fueron comparadas con los datos geoquímicos históricos de la Comisión Nacional del Agua (ver Discusiones).

5.1 Clima

La región de Maneadero presenta un clima Mediterráneo y desértico, registrando lluvias en invierno. En enero se presentan las temperaturas más bajas y en agosto las temperaturas más altas. Para verano las temperaturas máximas varían entre 20 y 30°C, con mínimas de 15°C. En invierno las temperaturas máximas varían entre 15 y 25°C, con mínimas de 5°C. Los vientos predominantes provienen del Noroeste. Las precipitaciones pluviales son muy escasas y solo se presentan en periodos cortos. El promedio de precipitación pluvial para el período de 1948-2002 fue de 245 mm/año.

5.2 Geología

La cuenca de Maneadero está formada por materiales del Cuaternario, principalmente de sedimentos fluviales y marinos como gravas, arenas, limos y arcillas. Los materiales fluviales fueron originados por la erosión de formaciones geológicas preexistentes, transportadas de las partes altas de la cuenca por escurrimientos a las zonas más bajas en las cuales se localiza el acuífero. La base del acuífero está formada por rocas ígneas intrusivas, extrusivas, metamórficas (de bajo grado), complejos volcánicos no diferenciados, rocas sedimentarias de origen marino del Cretácico correspondiente al grupo Rosario, las cuales no son permeables y permiten la acumulación de agua (Comisión Nacional del Agua, 1997a).

En general, los espesores de la cuenca formada por materiales del Cuaternario son variables y dependen de los procesos de erosión, transporte y sedimentación. En base a los estudios de factibilidad hidrológica y diagnósticos del Valle de Maneadero, realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos, se calculó que los depósitos aluviales no superan los 150 m de profundidad, de los cuales los primeros 60 a 80 metros presentan las condiciones de porosidad y permeabilidad más altas, generando condiciones idóneas para el flujo y acumulación de las aguas subterráneas (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978; Mares-Olmos, 1996).

La unidad semipermeable está formada por depósitos de conglomerados y rocas metamórficas con metamorfismo intenso, las cuales tienen poca importancia en cuanto al funcionamiento del sistema hidráulico del acuífero (Comisión Nacional del Agua, 1997). El Valle de Maneadero se encuentra rodeado de una zona montañosa de la ladera occidental de la Sierra Juárez formada por rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas. Hacia la ladera sur existen pendientes abruptas, formadas por rocas sedimentarias, incluyendo la Falla de Agua Blanca. Al inicio del Pleistoceno, se inició la emersión de la Península, trayendo como consecuencia la elevación de la terraza marina donde se encuentra la cuenca de Maneadero. Después de la emersión de la terraza marina se presentaron ciertos procesos erosivos que propiciaron la formación de profundos cañones, como son San Carlos y Las Ánimas. Los sedimentos marinos de las zonas emergidas se fueron erosionando y fueron transportados y depositados sobre la terraza.

De esta manera se formó la antigua terraza marina, un depósito de materiales granulares Cuaternarios, que forman el acuífero estudiado (Comisión Nacional del Agua, 1997a).

5.3 Condiciones Hidrogeológicas.

El agua subterránea encontrada en la cuenca de Maneadero proviene de la lluvia. Esta al infiltrarse y empezar a circular en el subsuelo pasa por diferentes formaciones geológicas. En este movimiento las aguas disuelven sales que se encuentran en las rocas y lixivian otros minerales los cuales arrastran en su paso y algunos se depositan cuando llegan al final de su circulación en el acuífero (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974).

El acuífero de Maneadero es una formación de materiales de alta porosidad y permeabilidad capaz de almacenar y transmitir grandes cantidades de agua. Esto lo convierte en un acuífero de tipo libre, con una altura media de 13 m sobre el nivel medio del mar. Tiene una profundidad media de 105 m y una capacidad efectiva de almacenamiento de 637.5 millones de metros cúbicos (Mm^3), medida con base en el volumen de estratos de material de alta permeabilidad desde la superficie hasta la base impermeable del acuífero y la cual fue utilizada en este estudio (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978). Sin embargo la capacidad total de almacenamiento podría ser de hasta 2940 Mm^3 (Cruz-Falcon y Vázquez-González, 1989). La mayoría de los acuíferos no confinados se recargan debido a la infiltración

vertical a través de la zona no saturada y a través del flujo subterráneo lateral o desde estratos inferiores.

La cuenca de Maneadero tiene una extensión total de 1975 km² de los cuales sólo 64 km² pertenecen a la zona acuífera. La profundidad de los pozos del Valle de Maneadero varía entre 25 y 200 metros predominando las perforaciones entre 25 y 50 metros. Las norias son poco profundas y en general varían de 5 a 20 metros (Comisión Nacional del Agua, 1997a).

Uno de los principales aportes de agua al acuífero de Maneadero es el Arroyo San Carlos, originado en la Sierra de Juárez y con una superficie de 865.2 km². La trayectoria seguida por este arroyo es de este a oeste, a lo largo de una subcuenca alargada de aproximadamente 12 km que se encuentra al norte de la cuenca de Maneadero. La otra fuente principal de agua es el Arroyo Las Ánimas, con una superficie de 1,021 km², localizado en la parte sur de la cuenca de Maneadero. Este arroyo tiene una trayectoria paralela a la del arroyo San Carlos y sigue un recorrido de aproximadamente 75 km a lo largo del cauce principal. Ambos arroyos aportan agua a la cuenca solo en periodos de lluvias continuas (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974).

6. METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo dos muestreos (septiembre 2001 y abril 2002) de agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero, con el objeto de contar con información sobre la calidad del agua durante época de estiaje y tras época de lluvias. Sin embargo, como se describe posteriormente, las lluvias durante la temporada de invierno 2001-2002 fueron mínimas. Los pozos para los muestreos se seleccionaron procurando obtener una distribución que representara la composición de toda la extensión del acuífero.

Antes de tomar la muestra directamente de la toma de agua de las estaciones de bombeo, ésta se dejó correr por 5 a 10 minutos. En el campo se llevó a cabo la determinación de alcalinidad (como CaCO_3) mediante el método de titulación. Este método consiste en tomar 20 ml de muestra que se encuentra a temperatura ambiente, titulando potenciométricamente con 0.01 N HCl estandarizado con 0.05 N Na_2CO_3 marca Sigma al 99.5% (Rodier, 1989). Las concentraciones de CaCO_3 fueron recalculadas a HCO_3 (ión bicarbonato) mediante la siguiente ecuación (Deutsch, 1997):

$$\text{HCO}_3 \text{ (mg/L)} = \left[\frac{\text{CaCO}_3}{\left[1 + \frac{2 * 10^{-10.3}}{10^{-\text{pH}}} \right] * 50} \right] * 61$$

Donde CaCO_3 = alcalinidad como carbonato de calcio (mg/L)

pH = pH de la muestra

Para la medición de salinidad, pH, temperatura y oxígeno disuelto, se utilizó una sonda multiparámetros YSI6600, la cual se sumergió en una cubeta llena con agua del pozo, y reposada por 2 minutos antes de la medición.

La sonda fue calibrada y probada antes del muestreo mediante los procedimientos recomendados por el fabricante y usando estándares certificados.

La determinación de cloruros se llevó a cabo por el método argentométrico (Clesceri *et al.*, 1998) que consiste en agregar a la muestra cromato de potasio (K_2CrO_4) y posteriormente titulada con una solución de nitrato de plata ($AgNO_3$). El cloruro de plata se precipita cuantitativamente antes de formarse cromato de plata. El vire de la solución es de amarillo canario a rojo-rosa.

La determinación de SO_4 se llevó a cabo por el método turbidimétrico (Clesceri *et al.*, 1998) que consiste en la precipitación del ion sulfato en un medio con ácido acético y cloruro de bario para formar sulfato de bario. Se tomó una parte de la muestra y se diluyó a 100 ml. Se le agregaron 20 ml de solución buffer, se puso bajo agitación constante y se le agregó una porción pequeña de $BaCl_2$, dejando agitar por $60 \pm 2s$. Después se colocó rápidamente la muestra en la celda del fotómetro marca HACH 2010 y se dejó 5 ± 0.5 minutos midiendo posteriormente la absorbancia a 420 nm. La concentración de $SO_4^{=}$ se determinó comparando la lectura de las muestras contra una

curva de calibración, para la determinación de sulfatos se llevó acabo el análisis de las muestras por triplicado.

Las muestras para el análisis de cationes fueron colectadas en recipientes de polietileno de 0.5 L, anteriormente sometidos a un proceso de ultra limpieza con HNO_3 grado metal traza marca Fisher. Para el análisis las muestras fueron filtradas inmediatamente tras colecta con filtros de nitrato de celulosa de $0.47 \mu\text{m}$ previamente descontaminados. La muestra filtrada fue acidificada al 1% con HNO_3 grado metal traza para su estabilización (Walsh, 1997). Los cationes Ca^{++} , Mg^{++} y Na^+ fueron analizados mediante la inyección de la muestra en un espectrómetro de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (ICP-AES) marca Termo Jarrel Ash modelo Iris.

Para todos los procedimientos se verificó la calidad analítica (precisión y sesgo) mediante duplicados y estándares elaborados en el IIO-UABC y agua embotellada con valores composicionales de referencia como control adicional. Ambos, precisión y sesgo, fueron $< \pm 8\%$. El balance de cargas entre aniones y cationes fue determinado mediante el programa AquaChem de Waterloo Hydrogeologic y utilizado como un control de calidad analítica adicional. El programa calcula las concentraciones en miliequivalentes por litro mediante la ecuación:

$$\text{Concentración en meq/L} = \text{Concentración en mmol/L} * \text{Carga iónica.}$$

Por ejemplo, para una concentración de 829 mg/L de Cl^- en agua, se emplea para el cálculo el peso molecular de este elemento que es de 35.45 y una carga iónica de 1. Teniendo así el siguiente cálculo:

$$\text{Cl}^- (\text{meq/L}) = [(829 \text{ mg/L}) / 35.45] * 1$$

$$\text{Cl}^- = 23.38 \text{ meq/L}$$

El balance de cargas describe el hecho de que el total de miliequivalentes de cationes en un volumen o peso dado de agua debe ser igual a los miliequivalentes de aniones. Para determinar el error en el método mediante el balance de cargas, se aplica la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de error en balance de cargas iónicas} = \frac{\sum \text{meq. cationes} - \sum \text{meq. aniones}}{\sum \text{meq. cationes} + \sum \text{meq. aniones}} * 100$$

El resultado se expresa entonces en porcentaje de error (%).

7. RESULTADOS

Los resultados para las variables fisicoquímicas y concentraciones de iones mayores se presentan en los anexos I y II. Durante la primer campaña de muestreo en septiembre del 2001 se muestrearon un total de 24 pozos. Durante la segunda campaña de muestreo en abril del 2002, de entre los pozos anteriormente muestreados, los pozos 10, 22 y 23 estuvieron inactivos y no se muestrearon, sin embargo se agregó un nuevo pozo (pozo 25), cercano al Arroyo las Ánimas (Fig. 4).

7.1 Variables fisicoquímicas

Se llevó a cabo una representación gráfica para las variables fisicoquímicas de cada pozo, donde es posible observar la distribución regional de cada variable en el acuífero de Maneadero.

7.1.1 Variación y distribución regional de la temperatura.

Durante los dos muestreos realizados en septiembre del 2001 y abril del 2002, se observó un rango de temperatura de 18.9-25°C (anexo I y II). La temperatura más baja durante la primera salida se observó sólo en el pozo 18 (Zorrillo 1; 18.9°C). Existieron otras estaciones con temperaturas bajas: la estación 6 (San Carlos Mina) presentó una temperatura de 19.5°C y se encuentra localizada cerca del Arroyo San Carlos al noroeste de la cuenca de Maneadero. Otra estación con baja temperatura fue la estación 25 (Hnos. Aguirre) con un valor de 19.4°C, ubicada en el Arroyo Las Ánimas. Este pozo se localiza en la parte sureste de la cuenca y no fue muestreado en Septiembre del 2001.

Las temperaturas más altas se localizaron consistentemente al sur de la cuenca (Fig. 5). En esta región, las temperaturas fueron $>22^{\circ}\text{C}$ (anexo I y II), encontrándose la temperatura más alta durante la primer campaña de muestreo, la estación 24, (25°C). Dicho pozo no fue muestreado en la segunda campaña de muestreo.

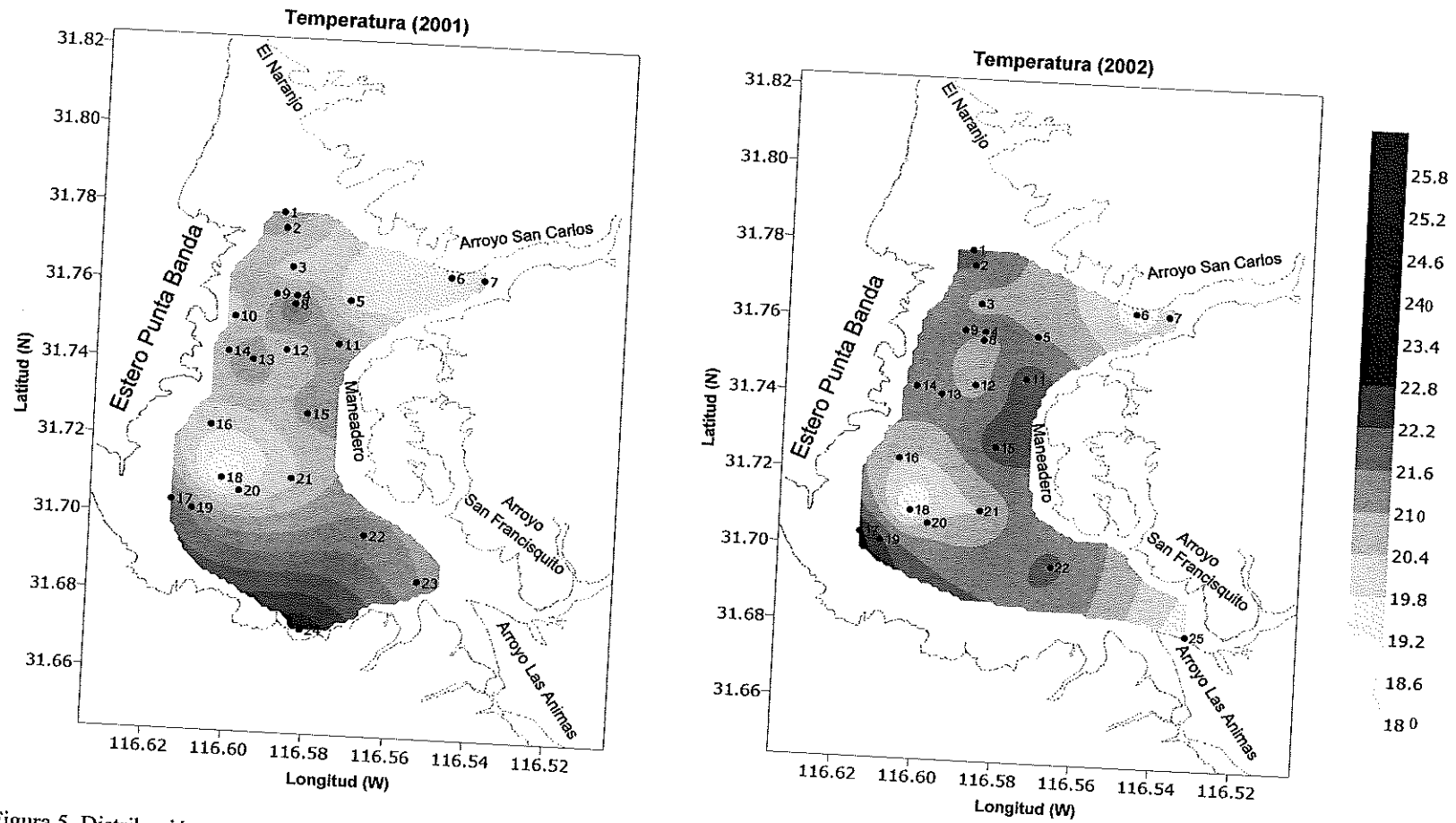


Figura 5. Distribución regional de temperatura en °C en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

7.1.2 Variación y distribución regional de pH

En los dos muestreos se encontró un rango de pH de 6.97-7.67 para ambas salidas (Anexo I y II). El pH más alto fue encontrado en los pozos ubicados al noreste y sureste de la cuenca, en los pozos cercanos a los arroyos San Carlos, Las Ánimas y San Francisquito (Fig. 6), con valores superiores a 7.49 (Anexo I y II) en ambas campañas de muestreo; en la segunda campaña de muestreo, el pH mayor (7.56) fue detectado en el pozo 25. Por otro lado, el pH más bajo (neutro) lo encontramos en los pozos ubicados en el centro de la cuenca (Fig. 6), con valores menores a 7.1 (Anexo I y II).

7.1.3 Variación y distribución regional de sólidos disueltos totales (SDT)

En los muestreos realizados en septiembre del 2001 y abril del 2002 se encontró un rango de SDT de 0.94-6.3 g/L para la primer campaña de muestreo y de 0.54-7.85 g/L en la segunda campaña de muestreo (anexo I y II). Las concentraciones más bajas de SDT fueron encontradas consistentemente en los pozos sobre el cauce del Arroyo San Carlos (Fig. 7), con concentraciones menores de 1.0 g/L. Durante la primer campaña de muestreo el pozo 5 tuvo una concentración de SDT de 0.94 g/L, disminuyendo hasta 0.54 g/L en la segunda campaña de muestreo.

En contraste con los pozos localizados sobre el cauce del Arroyo San Carlos, el pozo 16 que se encuentra cercano a la costa, mostró un comportamiento inverso al pozo 5. Presentó un aumento en su concentración de SDT de 6.06 g/L durante la primer campaña de muestreo a 7.85 g/L durante la segunda campaña de muestreo.

En general, las concentraciones más altas de SDT se encontraron en los pozos cercanos a la costa (Fig. 7), con concentraciones mayores a 6.0 g/L (anexo I y II). En la segunda campaña de muestreo se tomaron muestras del pozo 25 sobre el cauce del Arroyo la Ánimas, encontrándose valores de SDT de 2.79 g/L.

7.1.4 Variación y distribución regional de Oxígeno Disuelto (OD)

De los muestreos realizados en septiembre del 2001 y abril del 2002 se encontró un rango en las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) de 3.41 - 10.41 mg/L. Las concentraciones más altas de OD se encontraron en los pozos cercanos a los Arroyos San Carlos, San Francisquito - Las Ánimas con aproximadamente 7 - 10 mg/L en ambas salidas (Anexo I y II). Las concentraciones más bajas se encontraron en los pozos cercanos a la costa en la región central del acuífero con concentraciones menores a 5.5 mg/L (Fig. 8). Como se discute posteriormente, las mediciones de OD en agua son susceptibles al contacto con aire, por lo que el método de muestreo empleado (medición en toma de agua), puede presentar aportes significativos de O₂ atmosférico. Sin embargo, con las reservas obvias, los resultados obtenidos en esta etapa de la investigación, permiten observar gradientes regionales que serán útiles para la comprensión del sistema hidrológico y por lo tanto se discuten en la presente tesis.

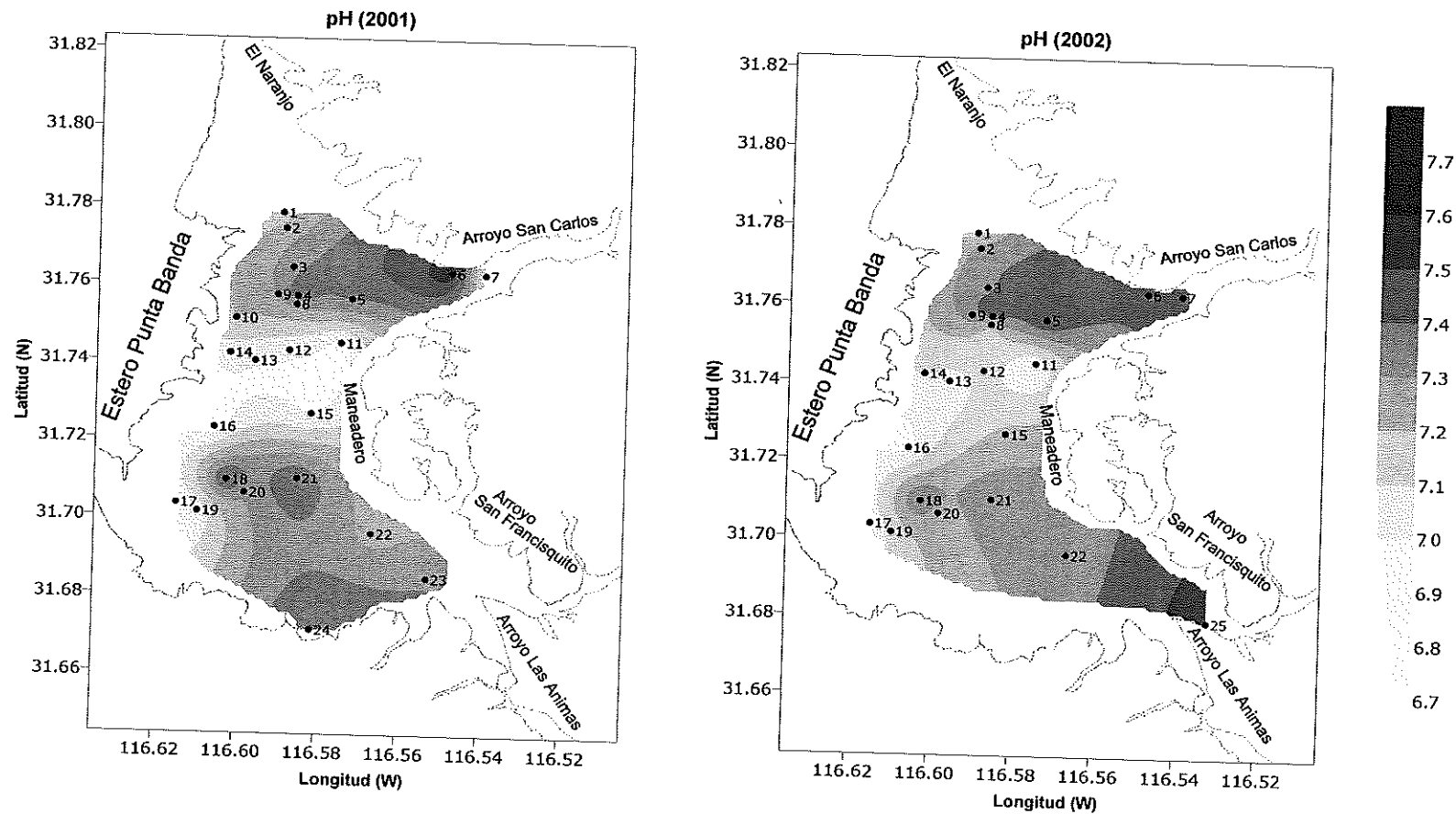


Figura 6: Distribución regional de pH en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

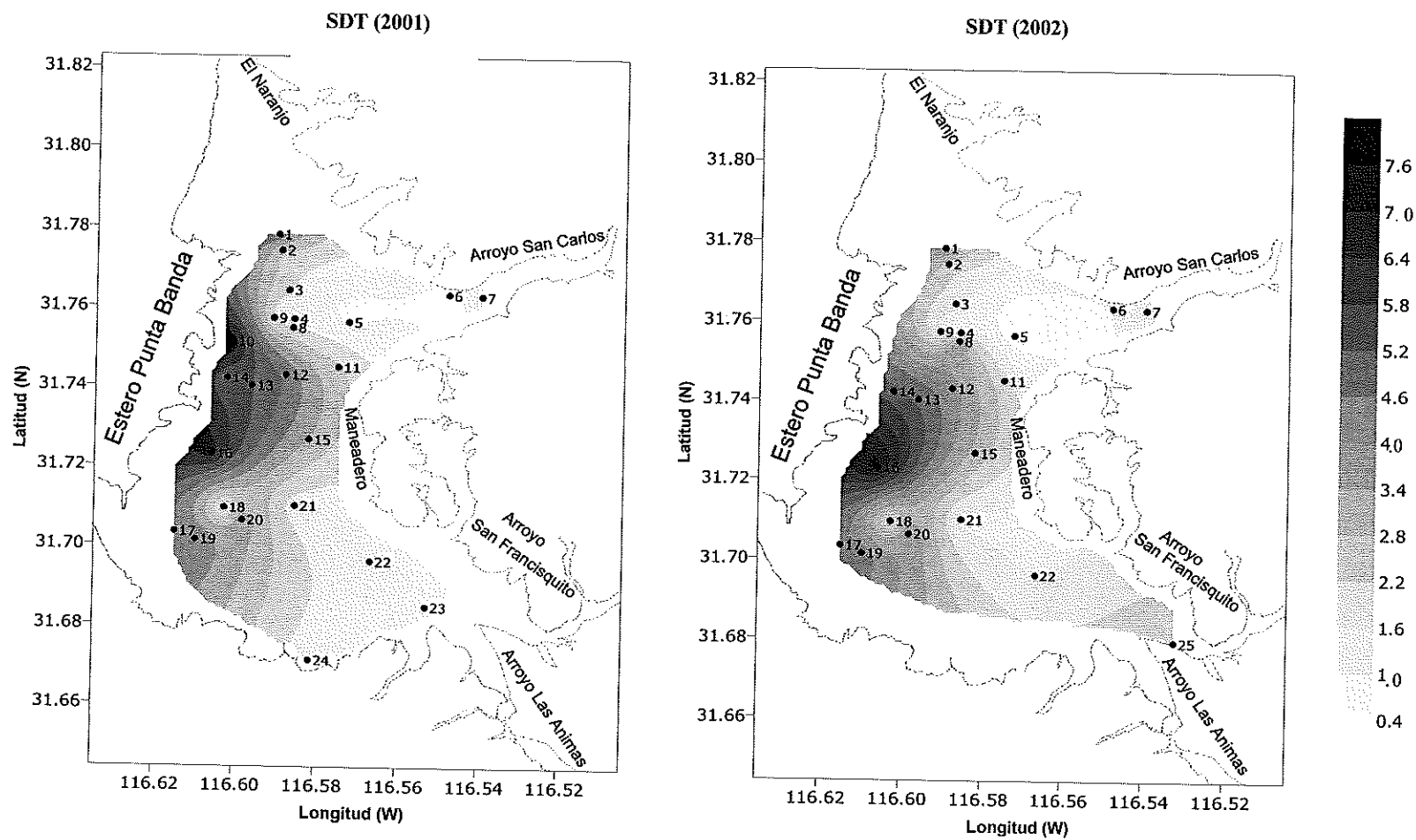


Figura 7: Distribución regional de Sólidos Disueltos Totales (g/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

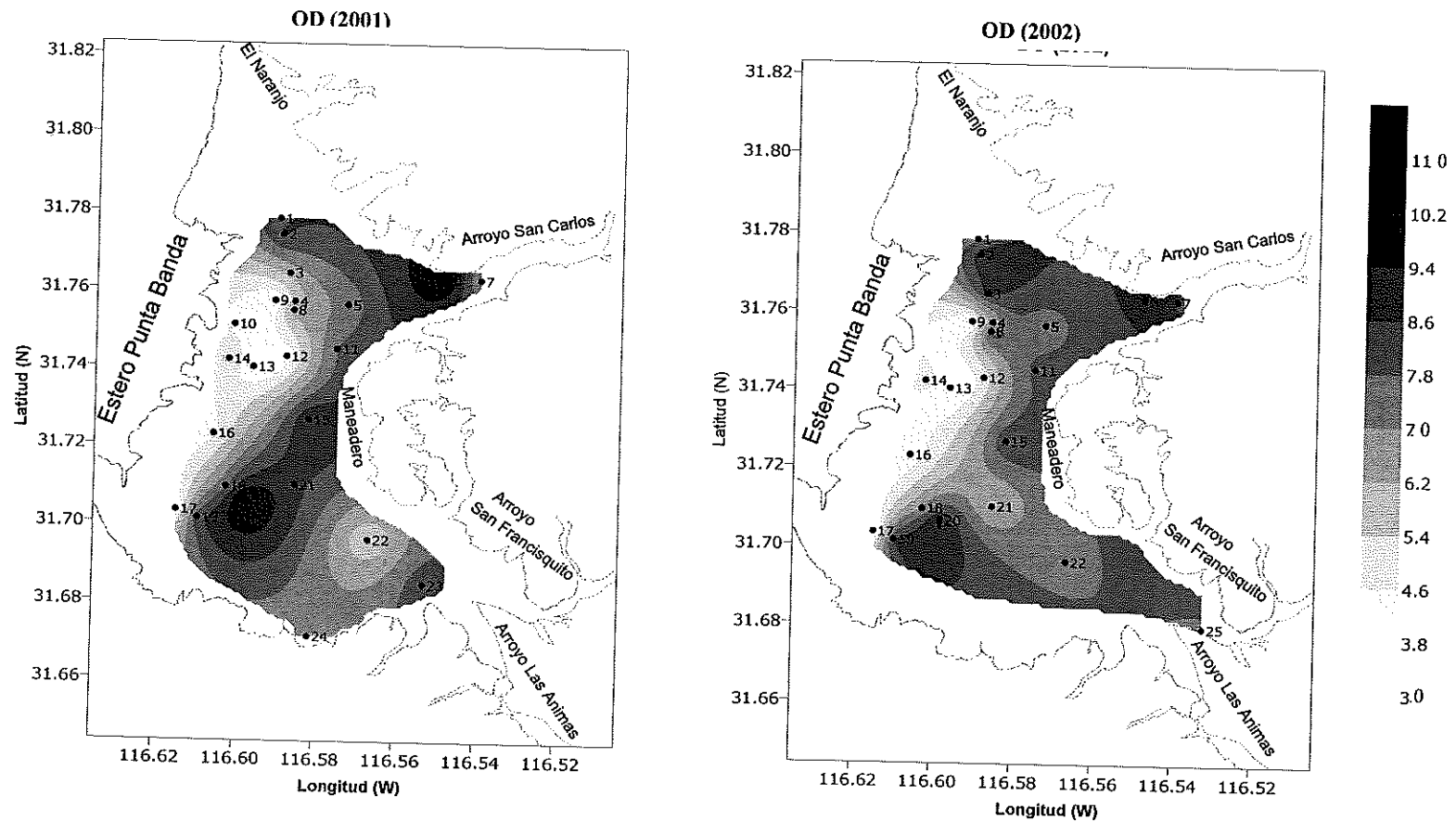


Figura 8: Distribución regional de oxígeno disuelto (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

7.2 Geoquímica de iones mayores

7.2.1 Clasificación hidrogeoquímica del acuífero

Con el objeto de clasificar la composición del agua subterránea del acuífero de Maneadero se generaron diagramas triangulares de Piper y de Schoeller, utilizando las concentraciones de iones expresadas en miliequivalentes en un litro (meq/L). Los datos expresados de esta manera permiten observar la relación existente entre el balance de cargas entre los diversos aniones y cationes para los diversos pozos de la región, y es una unidad que toma en cuenta como variables la concentración, la masa atómica y la valencia de cada ión.

En el diagrama de Schoeller en la Figura 9, se observa el balance entre las cargas de los aniones y cationes para la primer campaña de muestreo. Dicho diagrama indica la existencia de dos tipos de aguas: (1) aquellas con bajo contenido de Cl^- y que no presentan diferencias marcadas entre los meq/L del ion Cl^- en comparación con el ión Na^+ , y (2) aquellas con valores altos de Cl^- en comparación con el Na^+ . Las muestras clasificadas como del tipo 1, se indican en rojo en la Figura 9. En el diagrama de Schoeller para la segunda campaña de muestreo, se observó un comportamiento similar al de la Figura 9. Sin embargo existió un pequeño aumento en la concentración de los iones analizados (Fig. 10).

Mediante el uso del diagrama de Piper, se puede visualizar de manera gráfica la relación existente entre las concentraciones en meq/L de cationes y aniones, y clasificar el agua con base en su composición dominante. En el diagrama de Piper de la Figura 11 encontramos que las aguas extraídas del acuífero de Maneadero son clasificadas como de tipo intermedio entre clorurada-cálcica y clorurada-sódica. Los pozos que tienen una composición clorurada cálcica son 17, 1, 2, 19 y 20 (Fig. 11), los cuales se encuentran al suroeste de la cuenca. En el diagrama de Piper para abril del 2002 se observó un comportamiento similar al de la Figura 11. Sin embargo, existió una diferencia en el pozo CESPE 2, el cual en esta ocasión se ubicó como de tipo de agua clorurada sódica (Fig. 12).

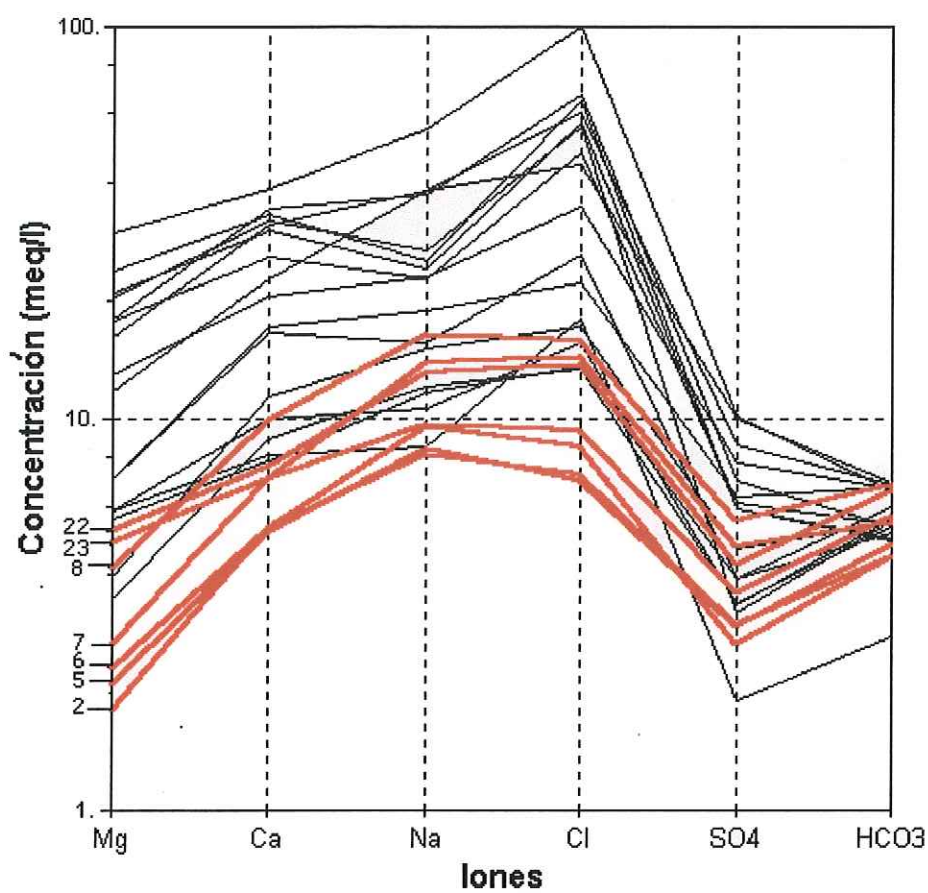


Figura 9: Diagrama de Shoeller para la primera campaña de muestreo (septiembre del 2001), indicando en rojo aquellos pozos que no presentan enriquecimientos de Cl^- . En el margen izquierdo se indican los pozos que presentan bajas concentraciones de Cl^- con respecto al Na^+ .

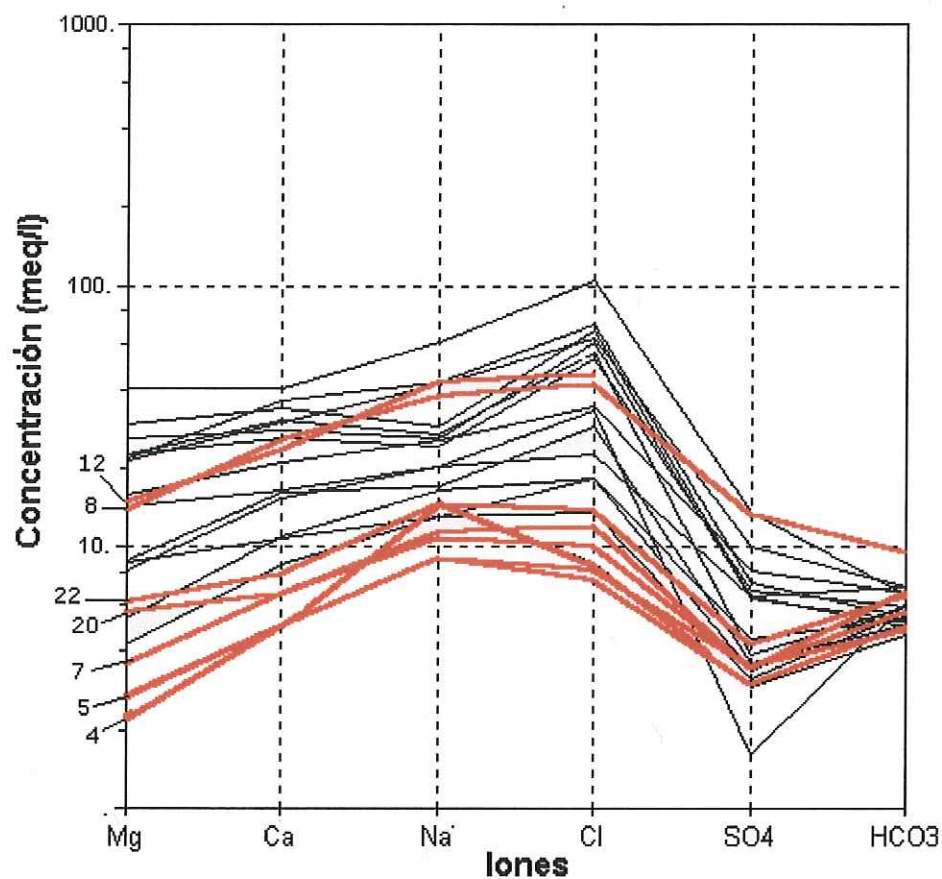


Figura 10: Diagrama de Shoeller para la segunda campaña de muestreo (abril del 2002), indicando en rojo aquellos pozos que no presentan enriquecimientos de Cl⁻. En el margen izquierdo se indican los pozos que presentan bajas concentraciones de Cl⁻ con respecto al Na⁺.

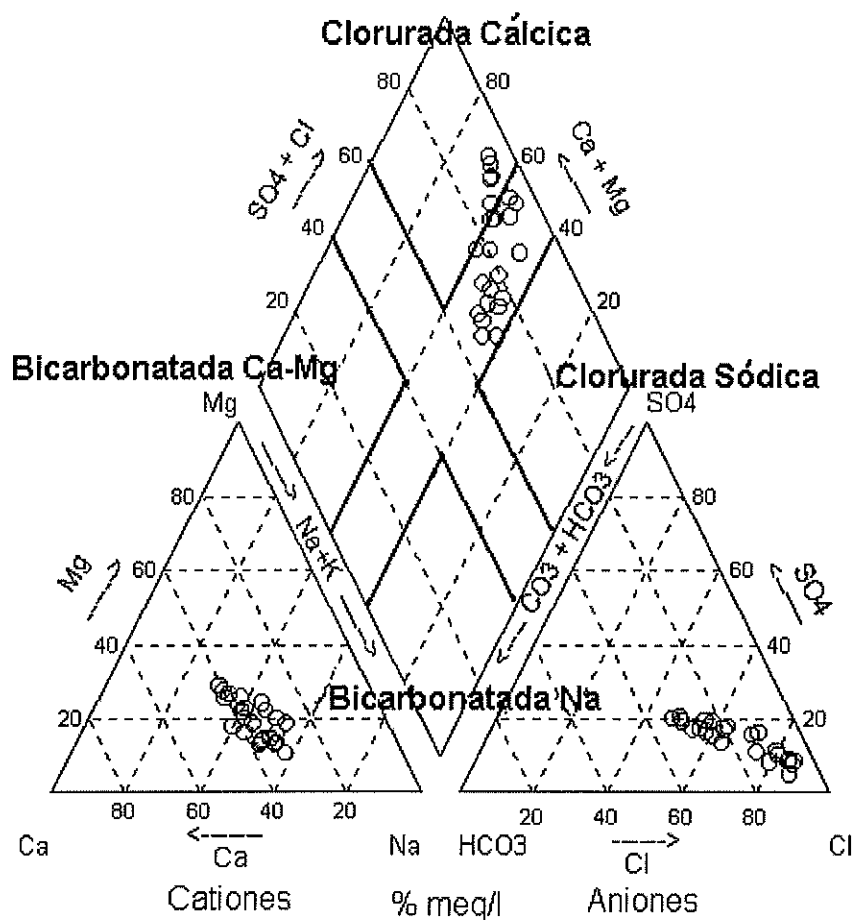


Figura 11: Diagrama Piper de la primera campaña de muestreo (septiembre del 2001) indicando la clasificación del agua subterránea de Maneadero como intermedia entre $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ y $\text{Cl}^- \text{Ca}^{++}$.

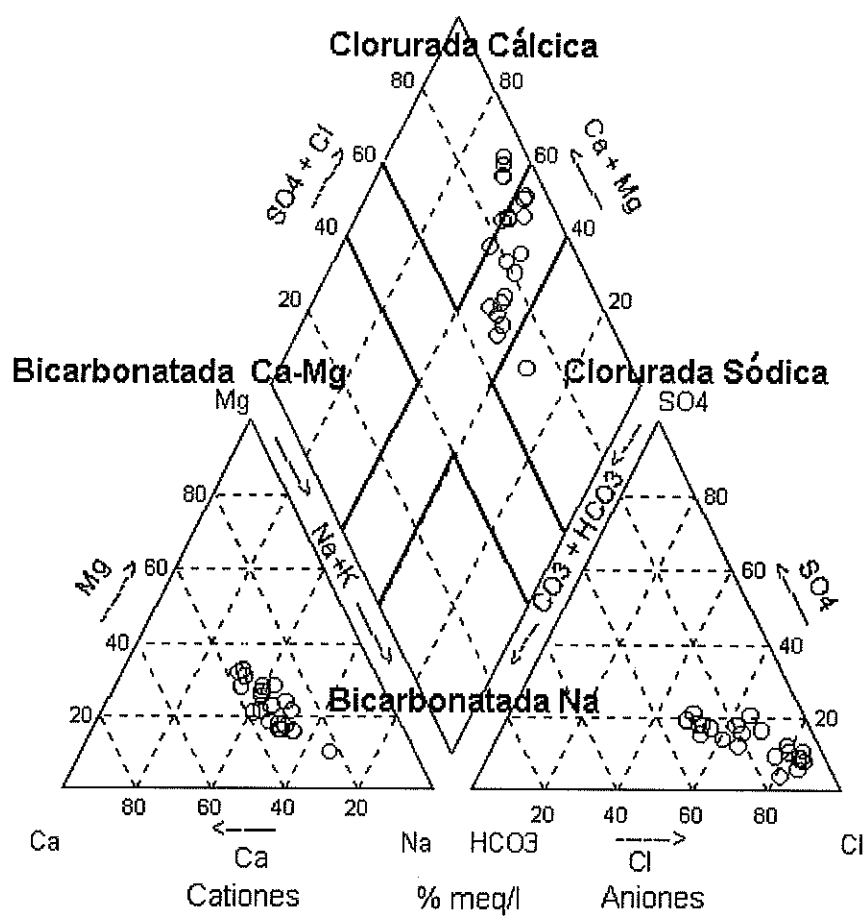


Figura 12: Diagrama Piper de la segunda campaña de muestreo (abril del 2002) indicando la clasificación del agua subterránea de Maneadero como intermedia entre $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ y $\text{Cl}^- \text{Ca}^{++}$.

7.2.2 Distribución regional de iones mayores.

Con base en los diagramas de distribución regional del anión Na^+ en el acuífero de Maneadero, se observaron las concentraciones más altas en los pozos cercanos a la costa (Fig. 13), con concentraciones > 1200 mg/L para ambas campañas de muestreo (anexo I y II). En el pozo 16 se encontraron las máximas concentraciones para ambas campañas de muestreo. Este pozo se encuentra ubicado adyacente a la costa. Durante la primer campaña de muestreo se encontró una concentración de 1253 mg/L aumentando hasta 1382 mg/L en la segunda campaña de muestreo.

La distribución regional del catión Mg^{++} tiene un comportamiento similar a la del Na^+ . Se encontraron concentraciones mayores en los pozos cercanos a la costa (Fig. 14), con concentraciones máximas de 490 mg/L para ambas campañas de muestreo (Anexo I y II). Las concentraciones más bajas de Mg^{++} se localizaron en los pozos ubicados cerca del arroyo San Carlos (Fig. 14), con concentraciones < 20 mg/L.

Las concentraciones de Ca^{++} muestran una distribución regional similar al Mg^{++} y Na^+ (Fig. 15), con concentraciones > 770 mg/L para los pozos cercanos a la costa y concentraciones alrededor de 20 mg/L para los pozos de menor concentración de SDT, ubicados sobre el cauce del Arroyo San Carlos, para ambas campañas de muestreo (Anexo I y II).

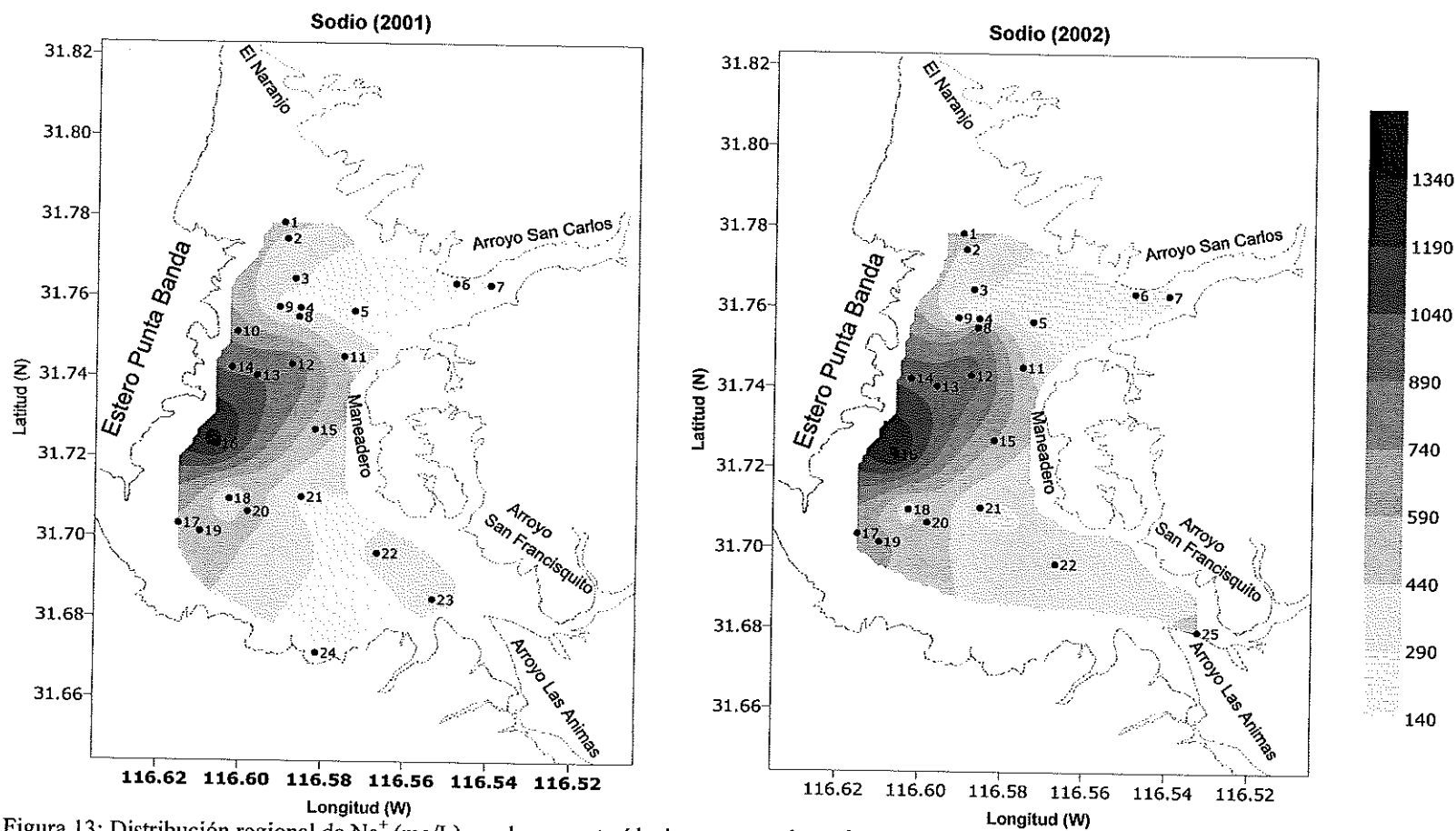


Figura 13: Distribución regional de Na^+ (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

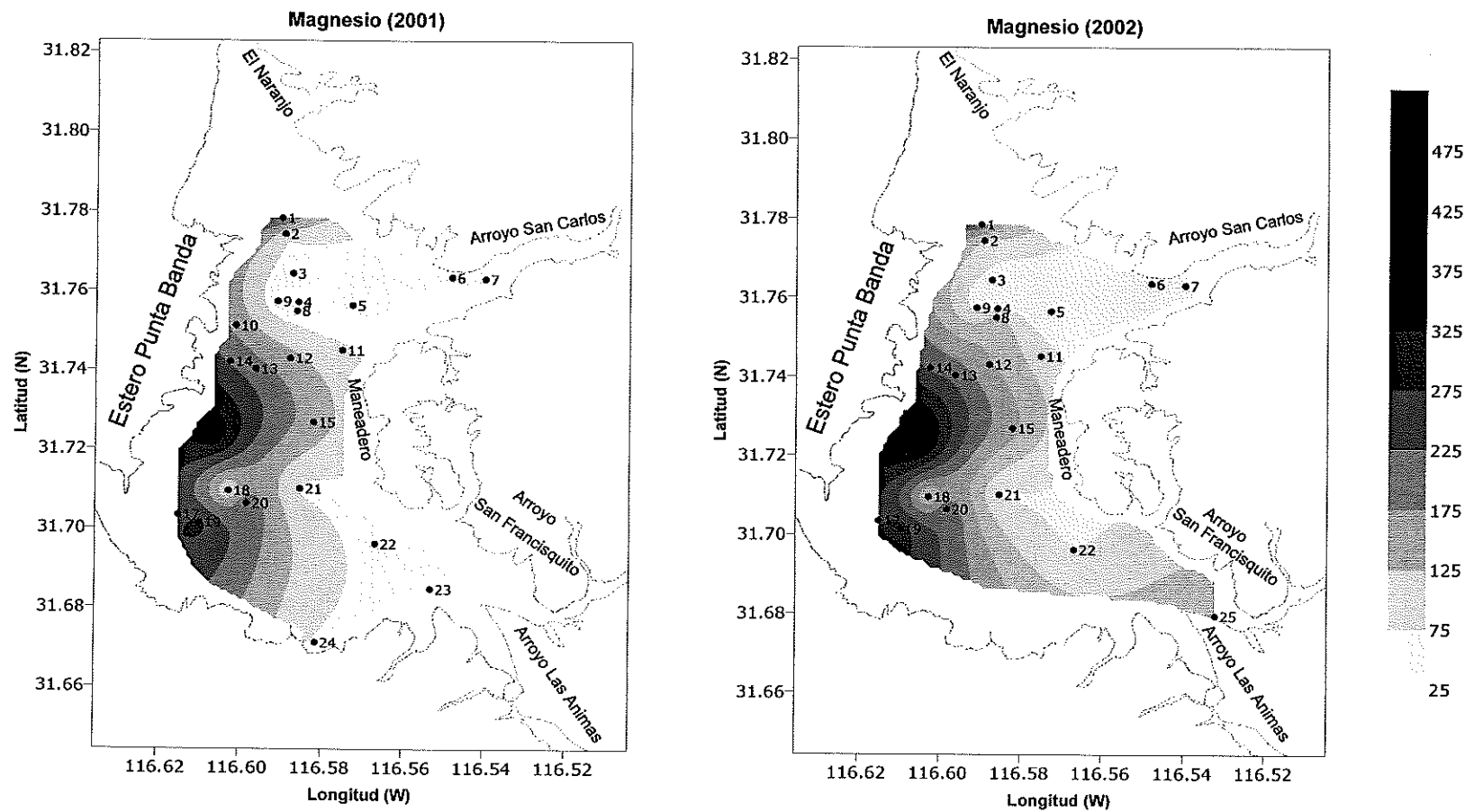


Figura14. Distribución regional de Mg^{++} (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

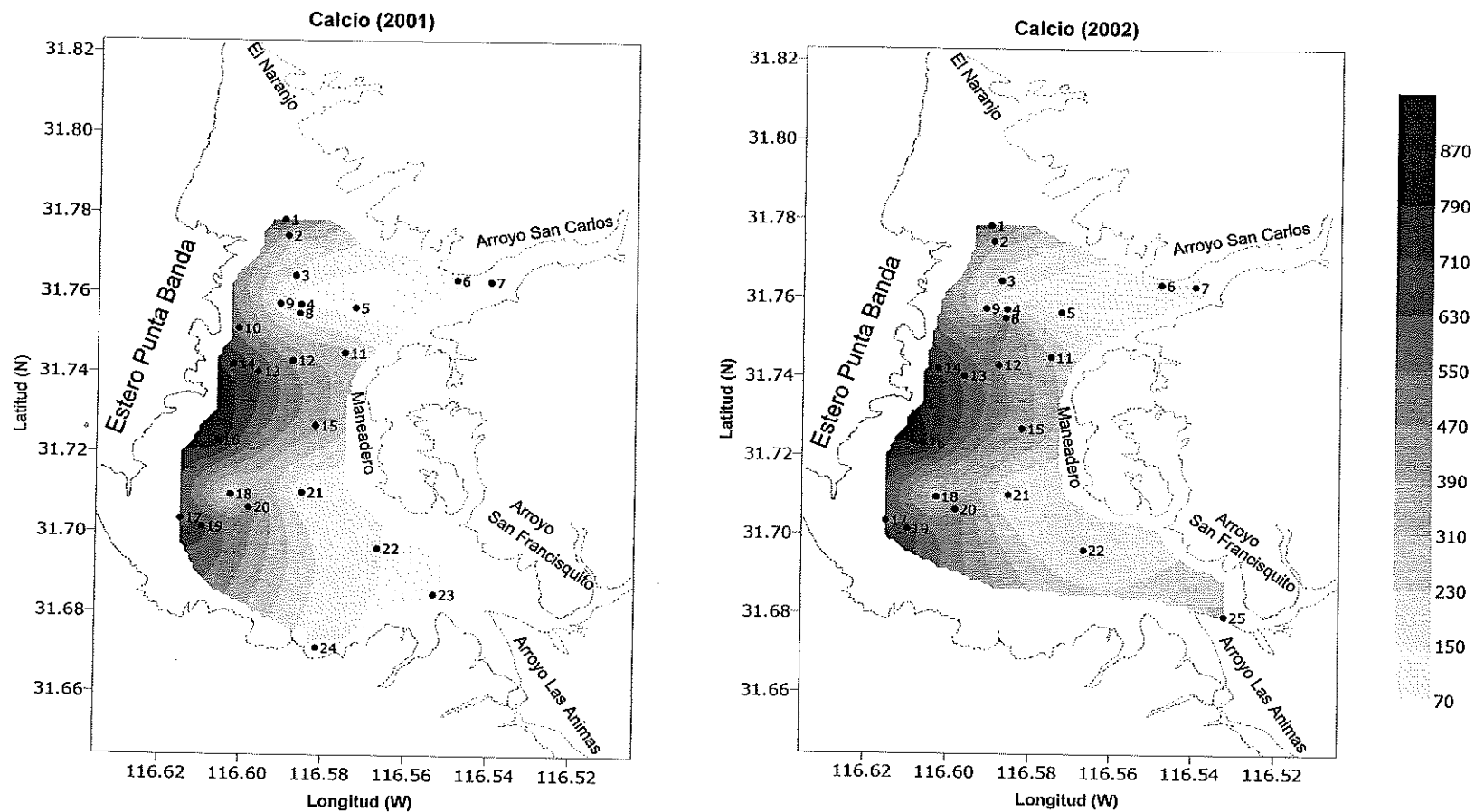


Figura 15: Distribución regional de Ca^{++} (mg/l) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

La distribución regional de HCO_3^- indica que las mayores concentraciones de este anión (y por lo tanto de alcalinidad) se localizan en el centro de la cuenca (Fig. 16), con concentraciones en esta región mayores a 400 mg/l, para ambas campañas de muestreo (Anexo I y II). El pozo con mayor concentración en primer campaña de muestreo fue el pozo 8, con 413 mg/L de HCO_3^- , aumentando hasta 581 mg/L durante la segunda salida. Las concentraciones más bajas de HCO_3^- se observaron en los pozos 4, 5 y 6, cercanos al Arroyo San Carlos (Fig. 16) con concentraciones menores a 304 mg/L de HCO_3^- para ambas campañas de muestreo (Anexo I y II).

El anión Cl^- mostró un comportamiento similar al de los cationes descritos anteriormente (Fig. 17), con concentraciones > 3500 mg/L en los pozos cercanos a la costa (anexo I y II). El pozo con mayor concentración fue el 16, registrando una concentración para la primer campaña de muestreo de 3544 mg/L, aumentando hasta 3730 mg/L en la segunda campaña de muestreo. Las concentraciones menores fueron encontradas en los pozos cercanos al Arroyo San Carlos con un valor aproximado de 250 mg/L (anexo I y II) para ambas salidas.

La mayor concentración de $\text{SO}_4^{=}$ se observó también en el agua del pozo 16 (Fig. 18), el cual se encuentra ubicado cerca de la costa y tiene una concentración de $\text{SO}_4^{=}$ de 483 mg/L para la primer campaña de muestreo aumentando hasta 653 mg/L durante la segunda campaña de muestreo. Al igual que para otros iones mayores, las menores

concentraciones de $\text{SO}_4^{=}$ se encuentran ubicadas cerca del Arroyo San Carlos (Fig.18) con concentraciones de 120-140 mg/L (Anexo I y II).

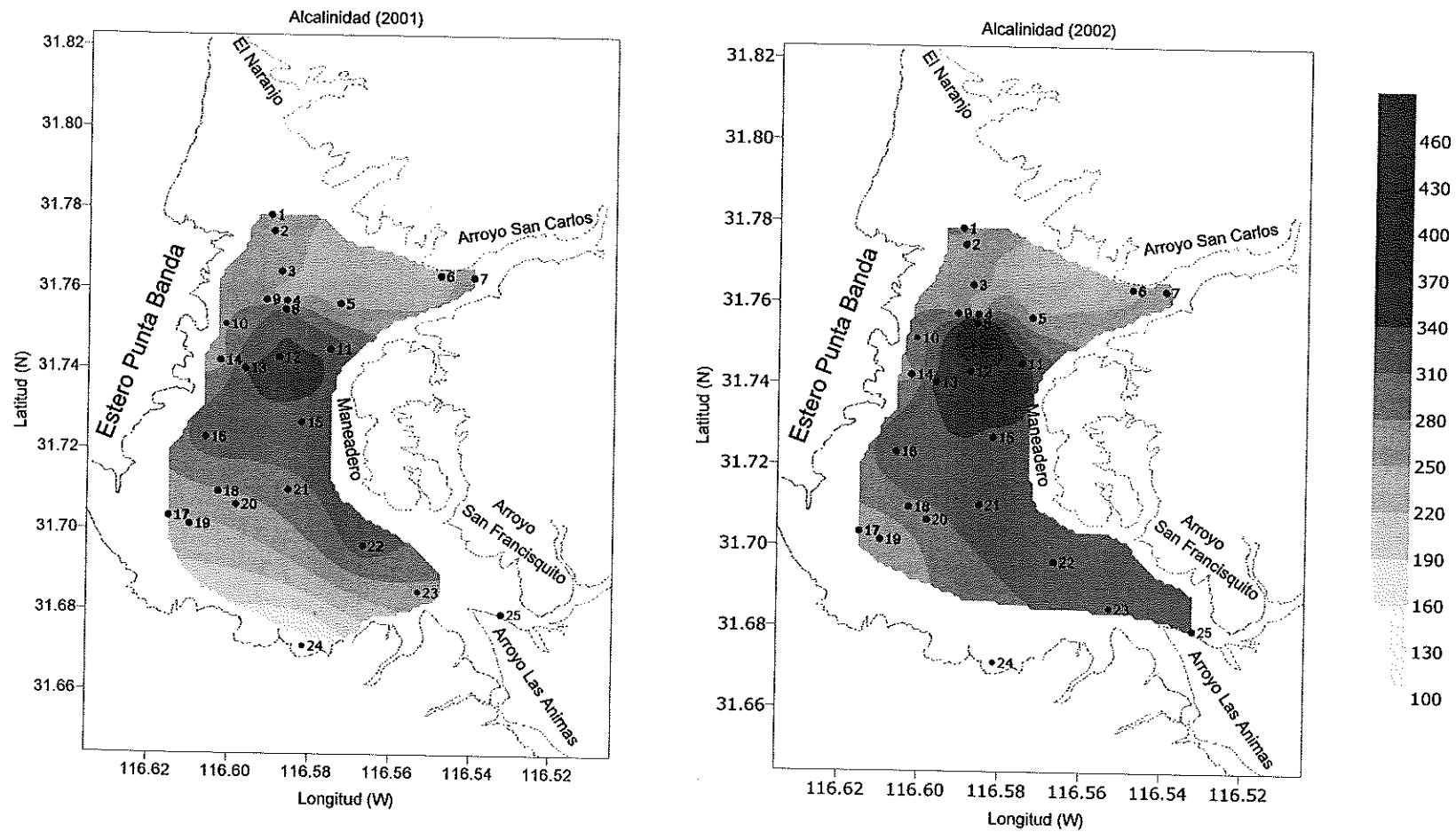


Figura 16: Distribución regional de HCO_3^- (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

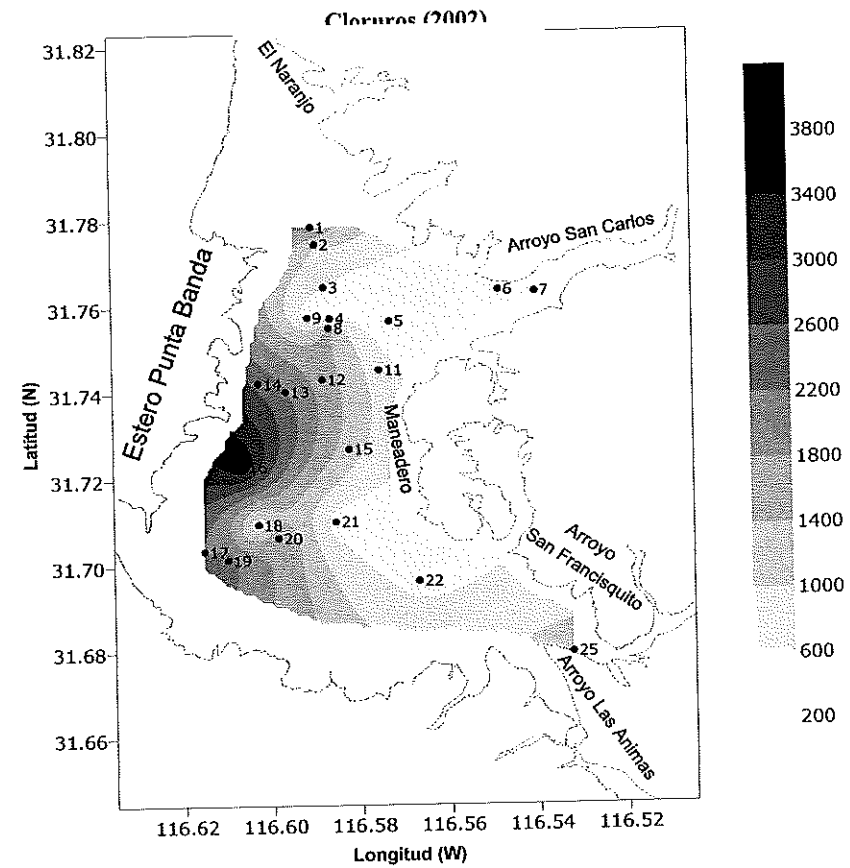
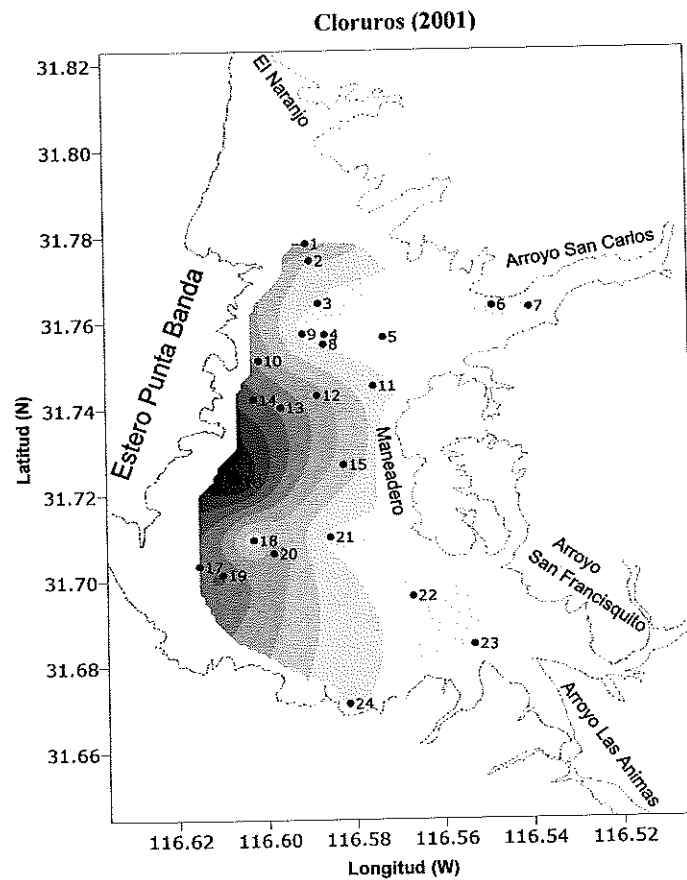


Figura 17: Distribución regional de Cl^- (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

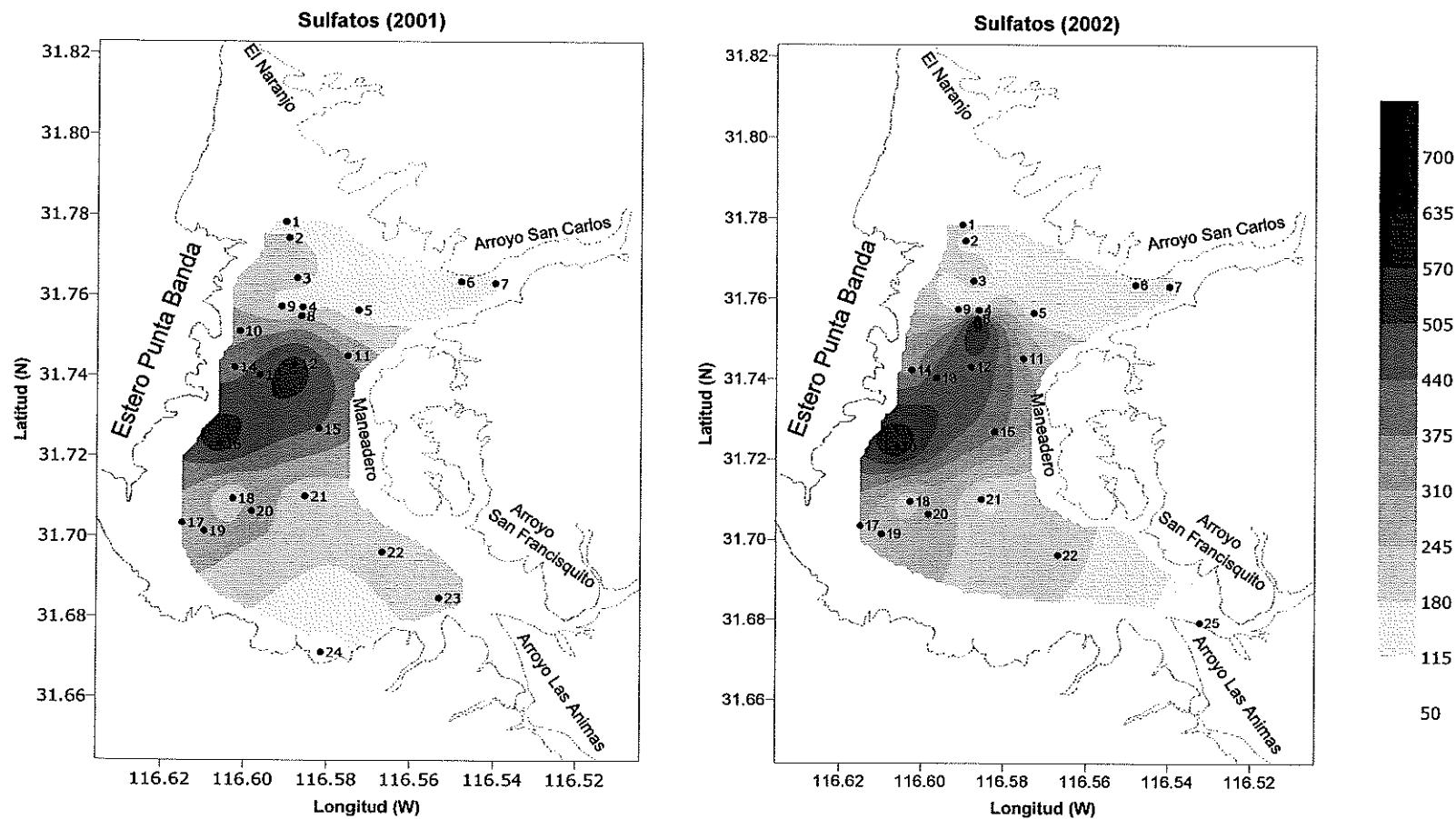


Figura 18: Distribución regional de SO_4^{2-} (mg/L) en el agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero Baja California, durante septiembre del 2001 y abril del 2002.

8. DISCUSIÓN

8.1 Clasificación del agua subterránea del acuífero de Maneadero

El agua subterránea del acuífero de Maneadero puede clasificarse en dos grupos hidrogeoquímicos distintos con base en su composición. En las Figuras 9 y 10, se observa claramente que las aguas marcadas en rojo no tienen un enriquecimiento de Cl^- con respecto al Na^+ , probablemente por encontrarse cerca de las fuentes de recarga del acuífero y estar más alejadas de la influencia del agua marina. El segundo tipo de agua es el que presenta concentraciones marcadamente altas de Cl^- , el cual predomina con respecto a los otros iones mayores. Lo anterior es debido a que las aguas con esta característica se encuentran cercanas a la costa, donde hay más mezcla con el agua de mar, rica en Cl^- .

Las agua subterráneas son de composición CaHCO_3 en el área de recarga, haciéndose NaHCO_3 hacia las zonas de descarga. En el proceso de desalinización por intrusión marina se produce un incremento general en la concentración de iones y una tendencia a aumentar la concentración de calcio y a disminuir la de sodio con respecto a la mezcla conservativa (Martínez y Bocanegra, 2002).

Así mismo, se observan en los diagramas de Sholler (Fig. 9) concentraciones altas para el ión Ca^{++} con respecto al ión Na^+ que corresponden a los pozos 17, 1, 2, 19 y 20. Estos pozos se localizan en la zona SW del acuífero. Únicamente uno de estos pozos (1) se encuentra en la porción norte del acuífero, siendo uno de los pozos de CESPE más

antiguos y de menor calidad en su composición. Dicho enriquecimiento de Ca^{++} en aguas subterráneas influenciadas por la intrusión del agua de mar, probablemente se deba a un proceso de intercambio iónico asociado a la mezcla del agua dulce con el agua marina. El Na^+ disuelto enriquecido en el agua de mar al entrar en contacto con el acuífero se intercambia con el Ca^{++} presente en la fase mineral, precipitando y provocando la liberación de Ca^{++} . El Ca^{++} disuelto entonces, se asocia al anión Cl^- formando cloruro de calcio y provocando un aumento en la concentración de Ca^{++} con respecto al ión Na^+ en la fase disuelta. El proceso de intercambio iónico anteriormente descrito se lleva a cabo en la zona de mezcla, cercana a la costa, en donde existe una mayor infiltración de agua de mar. En acuíferos costeros, la concentración de Na^+ se enriquece en soluciones que contienen agua de mar menor a 20% y decrece rápidamente en soluciones que contienen porcentajes más altos de agua de mar (Margaritz y Luzier, 1985). El comportamiento de Ca^{++} es la imagen de espejo del Na^{++} , se enriquece en soluciones con mas del 20% de agua de mar y disminuye en soluciones con menos del 20% de agua de mar (Margaritz y Luzier, 1985; Appelo and Potsma, 1994; Al-Ruwaih, 1995; Deutsch, 1997).

En la segunda campaña de muestreo (Fig. 10), el comportamiento de los iones fue similar a la primer salida, excepto que se dio un aumento en la concentración de todos los iones. Lo anterior probablemente se deba a que las condiciones climáticas no favorecieron la recarga general del acuífero, al haber escasas lluvias y una mayor infiltración de agua de mar hacia el interior del acuífero.

De acuerdo con el diagrama de Piper (Fig. 11) la mayoría de los pozos analizados se encuentran entre las regiones clasificadas como clorurada-cálcica y clorurada-sódica. La Secretaría de Recursos Hidráulicos en su informe final del estudio geohidrológico del Valle de Maneadero en 1974, elaboró un diagrama de Piper para clasificar las aguas del acuífero (Fig. 3). Con base en este diagrama concluye que las aguas del acuífero se clasifican como cloruradas-sódicas en su totalidad. Sin embargo en nuestros estudios (Fig. 11 y 12) observamos que las aguas tienen una composición intermedia entre las regiones clorurada-cálcica y clorurada-sódica. Comparando los análisis químicos de 1974 con los realizados en el 2001 y 2002, se observa que la clasificación general del acuífero con base en su composición no ha variado desde 1974 y que la Comisión Nacional del Agua clasificó de manera imprecisa el tipo de agua.

Las aguas subterráneas tienen concentraciones más altas de constituyentes mayores que las aguas superficiales ya que éstas están en contacto directo con los minerales que conforman el acuífero y están sujetas a procesos de intercambio o disolución de iones a partir de la fase mineral (Carrillo, 2002). En las Figuras 13,14 y 15 se puede observar que las concentraciones mayores de cationes las encontramos en los pozos cercanos a la costa debido a la influencia del agua de mar, la cual presenta su mayor intrusión al interior del acuífero en los pozos del centro de la cuenca. Comparando los resultados de la primera con la segunda campaña de muestreo, con respecto al tiempo, se observó un aumento en la concentración de los cationes. Lo anterior se debe probablemente a que la

baja precipitación pluvial no contribuyó al aporte de agua dulce al acuífero y la ubicación del centro de la cuenca, alejada del cauce de los principales arroyos que abastecen el acuífero. Es probable que la recarga del agua en la región central del acuífero ocurra principalmente por escurrimientos locales.

La distribución regional de Cl^- y SO_4^{2-} es, en lo general, similar a la de los cationes mayores (Figuras 17 y 18). Sin embargo, las concentraciones de bicarbonato (alcalinidad) presentan una distribución peculiar (Fig. 16). La distribución regional de las concentraciones de todos los iones analizados, excepto el HCO_3^- , está controlada por la intrusión del agua de mar. El agua marina tiene concentraciones de iones mayores de 8–950 veces superiores a las aguas subterráneas en general. Sin embargo, las concentraciones HCO_3^- son comúnmente más elevadas en aguas subterráneas que en agua marinas (Tabla 1). Las concentraciones más altas de bicarbonato se localizan en la región central del acuífero, alejada de la zona costera y el cauce de los arroyos. Dado que el agua de mar tiene una alcalinidad inferior al agua subterránea, se esperaba encontrar altas concentraciones en los pozos lejanos a la zona costera. Esta distribución característica de HCO_3^- se debe probablemente que los tiempos de residencia del agua en esta zona central (distal del agua de mar y arroyos) son relativamente altos y los flujos de agua son más lentos que en otras zonas del acuífero. La alta razón roca / agua permite que se lleve a cabo una mayor disolución de minerales de carbonato de calcio y por eso la concentración de carbonatos disueltos en esta zona aumenta. También existe la posibilidad de que la roca en la zona central del acuífero sea un parche carbonatado y

eso se refleja en el agua circundante. En contraste, las concentraciones más bajas de HCO_3^- en el acuífero, las encontramos en los pozos cercanos al Arroyo San Carlos.

Tabla 1: Comparación de las concentraciones de iones mayoritarios en agua de mar, agua superficial y agua subterránea y promedio de los pozos muestreados en el Valle de Maneadero, B. C. (Carrillo, 2002). El promedio de error del balance de cargas calculado para los pozos cespe fue igual al 7.22%

Constituyente	Agua de mar		Agua superficial		Agua Subterránea		promedio de los pozos de CESPE	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
Sodio (Na^+)	10500	456.72	6.3	0.27	30	1.3	357.3	15.54
Magnesio (Mg^{2+})	1350	111.06	4.1	0.33	7.0	0.57	93.4	7.68
Calcio (Ca^{2+})	400	19.96	15	0.74	50	2.49	276.4	13.79
Cloro (Cl^-)	19000	535.96	7.8	0.22	20	0.56	829	23.38
Sulfato (SO_4^{2-})	2700	56.21	3.7	0.07	30	0.62	169.7	3.53
Bicarbonato (HCO_3^-)	142	2.32	58	0.95	200	3.27	312.3	5.11
SDT	34500		20		350		2006	

Al comparar la distribución de HCO_3^- (Fig. 16) con la distribución de pH (Fig. 6) se observa que los valores más altos de pH (aguas básicas) se encontraron en las aguas cercanas a los aportes de los arroyos, con $\text{pH} > 7.5$. En el centro de la cuenca se encontraron las aguas más ácidas con $\text{pH} \leq 7.01$. Por lo tanto se puede observar un comportamiento de pH inverso al de la distribución de HCO_3^- . Muchos de los procesos de solubilización de minerales, las propiedades de adsorción y las reacciones bioquímicas en aguas subterráneas, son sensitivos al pH.

Una de las variables que se encuentra afectada directamente por el clima es la temperatura. Sin embargo, como se explicó en la sección introductoria de la presente tesis, los cambios ambientales de temperatura no afectan las condiciones del agua una vez dentro de la zona saturada. Al comparar los datos de temperatura para ambas salidas

(Fig. 5), se observa que las aguas más frías se encuentran sobre el cauce del Arroyo San Carlos y en una muestra aislada al sur del acuífero. Dicho comportamiento probablemente se debe a factores como una mayor profundidad de los pozos y/o la reciente incorporación de aguas frías a partir de los escurrimientos y deshielo. Al sur de la cuenca durante las dos salidas se localizó un pozo (18) en la región cercana a la costa, que se caracteriza por sus aguas frías (aprox. 18°C) y concentraciones de SDT inferiores a los pozos circundantes. Dichas características probablemente sean el resultado del análisis de aguas más profundas justo sobre el cauce del arroyo o un sitio de flujo peculiar a lo largo del Arroyo El Zorrillo (conjunción de Las Ánimas y San Francisquito).

Al igual que la distribución regional de la temperatura, las concentraciones de oxígeno disuelto pueden dar información de las razones de flujo y procesos de oxidación-reducción del agua estudiada. Debido a la alta concentración de oxígeno en el aire, es necesario determinar este gas en aguas subterráneas con el mínimo contacto entre el agua y el aire ambiental en la perforación del pozo o en superficie (Deutsch, 1997). Si bien, la determinación de oxígeno disuelto en este estudio puede ser afectada por la aereación del agua durante su extracción, se observan ciertas características regionales que pueden ser discutidas en el contexto de la hidrogeoquímica local.

Los pozos con mayor concentración de OD se encontraron cercanos a los arroyos, probablemente por tratarse de agua joven recientemente infiltrada al subsuelo,

acarreando oxígeno a partir del contacto con aire durante la lluvia y el escurrimiento superficial. Las concentraciones de OD en aguas que se encuentran en contacto prolongado con oxígeno atmosférico varían generalmente entre 7 y 14.7 mg/L (Deutsch, 1997). La mayoría de las muestras analizadas en este acuífero presentan valores cercanos o por debajo de 7 mg/L (ver anexos I y II). Aquellos pozos cuya agua tiene concentraciones de OD ≤ 6 mg/L, probablemente representen sitios donde los flujos restringidos de agua hayan permitido reacciones de óxido-reducción durante la interacción más prolongada entre agua/roca, o en los que exista actividad bioquímica (aunque no existen evidencias de esto último). Finalmente, la relativamente alta concentración de OD en el pozo 18, localizado cercano a la costa SW del acuífero, indica para ambas salidas un proceso de enriquecimiento distintivo para esta sección específica de acuífero. Por lo que es probable que exista un flujo relativamente activo de agua dulce en una zona altamente afectada por la intrusión salina. La muestra 18 se encuentra localizada directamente sobre el cause del Arroyo San Francisquito-Las Ánimas (Zorrillo).

8.2 La evolución histórica de la intrusión del agua de mar

En el acuífero de Maneadero, uno de los parámetros que indica el avance de la intrusión salina hacia el acuífero, es la concentración de SDT. A diferencia del análisis de iones mayores como el Cl o el Na, el análisis de rutina de SDT ofrece ventajas económicas y de ahorro de tiempo. El valor máximo permisible de SDT por la modificación a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA-1994) para agua de uso y

consumo humano es de 1.0 g/L. En el acuífero de Maneadero solamente los pozos 5 y 6 tuvieron concentraciones de SDT inferiores a lo establecido por la norma, con concentraciones durante la salida 1 de 0.95 y 0.94 g/L respectivamente. En la segunda salida, el agua del pozo 5 disminuyó sus concentraciones de SDT hasta 0.54 g/L mientras el pozo 6 quedó prácticamente igual con 1.01 g/L. Estos pozos se encuentran ubicados en la zona del cauce del Arroyo San Carlos donde encontramos las menores concentraciones de SDT. El pozo 5 es propiedad de CESPE, y es el único de los cinco pozos que abastecen de agua a la ciudad de Ensenada que presenta SDT por debajo de los valores establecidos en la modificación de la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA-1994).

En 1997, la Comisión Nacional del Agua llevó a cabo una recopilación de sus datos sobre parámetros fisicoquímicos y de concentraciones de iones, en el acuífero de Maneadero, para determinar el deterioro de éste. La ubicación de los pozos analizados por la Comisión Nacional del Agua desde 1974 hasta 1991, mismos que se estudiaron en esta tesis, se indica en rojo en la Figura 4. Los datos reportados en las Figuras 19 y 20 abarcan de 1974 a 2002 una frecuencia mayor en el período de 1974 a 1991. En estas Figuras se presenta la serie de tiempo de concentraciones de cationes y aniones mayoritarios respectivamente.

En la serie de tiempo para el Na^+ (Fig. 19), observamos los pozos 5, 7, 9 y 21, los cuales no han variado significativamente las concentraciones de este elemento,

manteniéndose constantes desde 1974 hasta 2002. Todos ellos presentan concentraciones menores a los 400 mg/L de Na^+ . Para el resto de los pozos (13, 14, 15 y 20) el Na^+ presenta variaciones en su concentración a lo largo del tiempo.

Las concentraciones de Na^+ aumentan entre 1974 y 1980, probablemente debido al incremento en la extracción de agua del acuífero para el riego de los cultivos, al igual que a la apertura de más pozos de agua (Comisión Nacional del Agua, 1997). De 1980 a 1991 decreció ligeramente la concentración de Na^+ , probablemente debido a la abundante precipitación ocurrida en 1978 (> 600 mm; Fig. 2). Debido a este período de lluvias es posible que el agua dulce fluyera hacia el acuífero recargándolo principalmente a través del Arroyo San Carlos, San Francisquito y Las Ánimas, al igual que por escurrimientos locales e infiltración directa. La recarga del acuífero disminuyó la concentración de Na^+ y, durante ese período, se mantuvo constante en la mayoría de los pozos. Solamente aquellos pozos más cercanos a la línea de costa (13 y probablemente 14), los cuales están influenciados fuertemente por el agua de mar, continuaron presentando concentraciones altas de Na^+ a pesar de la recarga.

En la serie de tiempo para el Mg^{++} (Fig. 19) se observan variaciones históricas similares al del Na^+ . Al igual que para el Na^+ , los pozos que presentan aumentos marcados en la concentración marcados de Mg^{++} son los cercanos a la costa, y los pozos con concentraciones más constantes son los cercanos al arroyo.

En la serie de tiempo realizada para el Ca^{++} (Fig. 19), se observa el mismo comportamiento que los cationes anteriores pero los aumentos y decrementos en las concentraciones entre periodos de lluvia y sequía al inicio de la serie fueron menos notorios, teniendo un comportamiento casi constante en la mayoría de los pozos. Sin embargo de 1991 al 2002 los pozos 13 y 14 cercanos a la costa y los pozos 15 y 20 (Sección sur del acuífero), aumentaron más del doble en su concentración de Ca. Esto se debe probablemente a un intercambio iónico, donde el Na^+ sustituye al Ca^{++} en la estructura de los minerales, incorporándose el Ca^{++} a la fase acuosa, como se describe en el párrafo de la clasificación del agua.

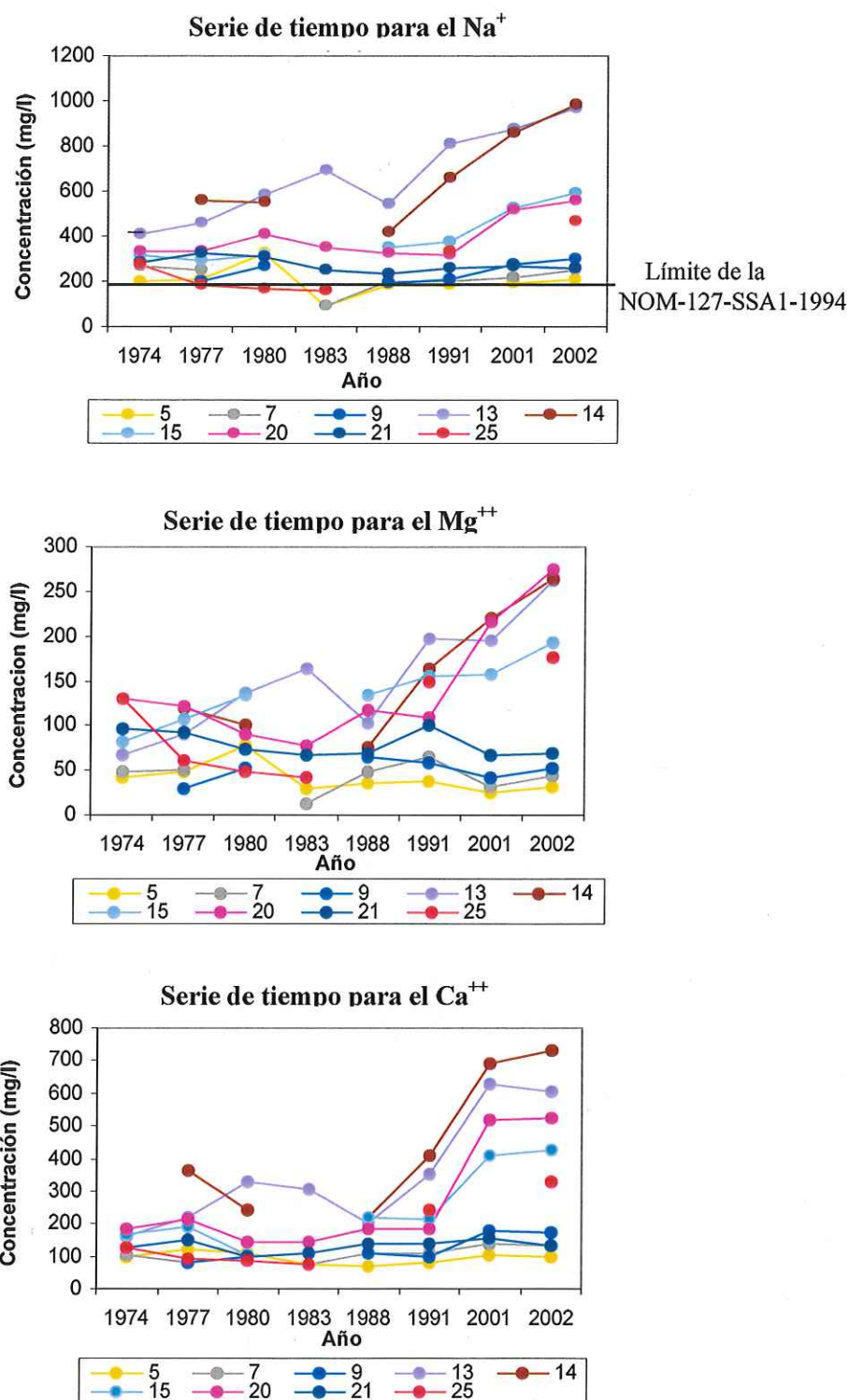


Figura 19: Evolución histórica de las concentraciones de cationes mayores en el agua de pozos selectos de 1974 a 2002. Datos de la Comisión Nacional del Agua y el presente estudio. La ubicación de los pozos se indica en la Figura 4.

En la Figura 20, se observa un aumento en la concentración de HCO_3^- para la mayoría de los pozos entre 1974 y 1977, disminuyendo su concentración de 1977 a 1980. El pozo 21, el cual se encuentra en la región sureste de la cuenca, tuvo un fuerte incremento en la concentración de HCO_3^- y después un decremento drástico para estas mismas fechas dando un pico pronunciado en la gráfica. De 1983 a 1991 incrementó la concentración para los pozos 13, 20 y 21 disminuyendo nuevamente de 1991 hasta el 2001. El pozo 5 fue el único que no presentó variaciones significativas en la concentración de HCO_3^- de su agua, probablemente por ser un pozo sobre el cauce del Arroyo San Carlos y estar sujeto a una renovación más o menos constante durante el período descrito. En los pozos 7, 14 y 21 no se pudo observar su evolución histórica ya que no se encontraron los datos suficientes. En los pozos cercanos al centro de la cuenca (13, 15, 20 y 21), encontramos concentraciones altas de HCO_3^- debido a que en el centro de la cuenca posiblemente el flujo de agua es restringido. El pozo 21, el cual se encuentra en el centro de la cuenca, fue uno de los pozos que más variaciones tuvo, al igual que el pozo 13 el cual se encuentra cerca de la costa. En los muestreos realizados en el 2001 y 2002, se observó un ligero aumento en la concentración de HCO_3^- para todos los pozos.

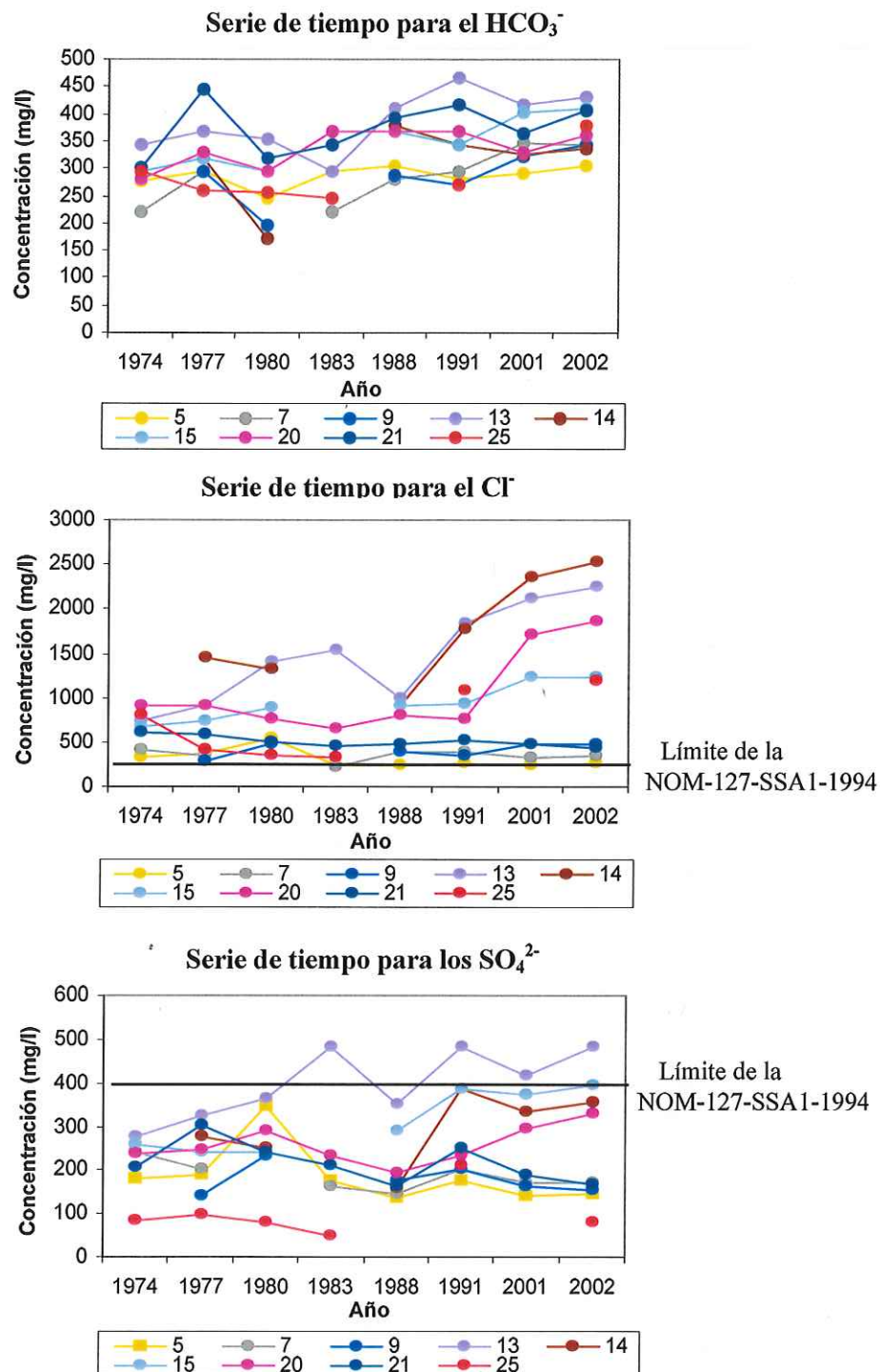


Figura 20: Evolución histórica de las concentraciones de aniones mayores en el agua extraída de pozos selectos de 1974 a 2002. Datos de la Comisión Nacional del Agua y el presente estudio. La ubicación de los pozos se indica en la Figura 4.

El ión más abundante en el agua de mar es el Cl^- . Analizando los datos de 1974 hasta el 2002 (Fig. 20), se observa que el Cl^- tiene un comportamiento similar al del Na^+ . A partir de 1988, aumentan las concentraciones del Cl^- para los pozos 13 y 14, los cuales se encuentran cercanos a la costa, teniendo concentraciones mayores a los 2000 mg/L, los pozos 5, 7, 9 y 21 no presentan variaciones. Los sulfatos tienen un comportamiento similar al ión Cl^- en la mayoría de los pozos excepto en los pozos 13 y 14 los cuales disminuyen su concentración de 1991 al 2002. Analizando las series de tiempo para los iones principales se observó que a partir de 1988 hasta el 2002, las concentraciones de los iones mayores en los pozos cercanos a la costa aumentaron drásticamente, clasificando a estas aguas como de mala calidad para consumo humano. Los pozos menos afectados son los cercanos a los arroyos San Carlos, Las Ánimas y San Francisquito.

8.3 El Agua para uso Humano en Ensenada y la Norma Oficial Mexicana

La modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, es una norma establecida de los límites permisibles para el agua destinada al uso y consumo humano en nuestro país. En las tablas 2 y 3 se muestra la comparación entre los pozos explotados actualmente por CESPE en Maneadero para uso y consumo en la ciudad de Ensenada así como los límites permisibles por la modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 2: Comparación entre las concentraciones de variables químicas y fisicoquímicas en los pozos para uso y consumo humano en el acuífero de Maneadero y la modificación de la NOM 127-SSA1-1994 para los resultados de la salida 1. En negritas se indican las variables que rebasan el límite de la modificación de la NOM 127-SSA1-1994.

Estación	Pozo	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	SO ₄ ⁼ (mg/L)	SDT (g/L)
1	Cespe 4	1961	617	153	3.995
2	Cespe 4R	931	358	188	2.168
3	Cespe 3	605	345	224	1.715
4	Cespe 2	300	219	127	1.000
5	Cespe 1	245	192	141	0.949
	NOM 127	250	200	400	1.0

La tabla 2 indica las concentraciones de iones mayores y SDT para las muestras colectadas en Septiembre del 2001. En ella se puede observar que el único pozo con agua de buena calidad de acuerdo a la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 es el pozo CESPE 1. La tabla 3 muestra los resultados del muestreo realizado en Abril del 2002, donde las concentraciones para los pozos de CESPE han aumentado. En este caso solamente los pozos CESPE 1 y CESPE 2 cumplen con los límites permisibles por la modificación de la NOM-127-SSA1-1994, para SDT. Para ambos períodos el SO₄⁼ es el único parámetro que se encuentra por debajo de los límites de la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 en todos los pozos.

Tabla 3: Comparación entre las concentraciones de variables químicas y fisicoquímicas en los pozos para uso y consumo humano en el acuífero de Maneadero y la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 para los resultados de la salida 2. En negritas se indican las variable que rebasan el límite de la modificación de la NOM-127-SSA1-1994.

Estación	Pozo	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	SO ₄ ⁼ (mg/L)	SDT (g/L)
1	Cespe 4	1981	394	189	4.26
2	Cespe 4R	1035	624	174	2.44
3	Cespe 3	655	377	217	1.89
4	Cespe 2	310	240	141	1.00
5	Cespe 1	267	207	143	0.54
	NOM 127	250	200	400	1.0

Con base en los resultados anteriormente descritos, se infiere que si no hay un periodo de lluvias significativas que proporcionen una recarga significativa en el acuífero, estos pozos ya no serán explotables para el uso al no cumplir con las normas oficiales. Sin embargo, debe considerarse la pertinencia de algunos de los límites que establece dicha norma, en especial para regiones donde las fuentes de agua son limitadas. Asimismo, debe considerarse la posibilidad de someter a desalinización o dilución con agua de otras fuentes, el agua proveniente de los pozos CESPE en este acuífero. Una medida preventiva adicional sería aumentar el grado de tecnificación del riego en el Valle de Maneadero y el uso de las aguas residuales tratadas para fines agrícolas.

9. CONCLUSIONES

En el período de 1991 hasta nuestros análisis en el 2001 y 2002 las concentraciones de iones mayores aumentaron más del doble para los pozos cercanos a la costa, en el acuífero de Maneadero.

El agua subterránea de Maneadero se clasifica como tipo intermedio entre Clorurada-Cálcica y Clorurada-Sódica. Las zonas tendientes a una composición de tipo Cl-Ca son aquellas encontradas al Sureste de la cuenca. La intrusión del agua de mar tiene un efecto que favorece el incremento en las concentraciones de Ca^{++} en solución en el agua subterránea. El Na^+ disuelto enriquecido en el agua de mar, al entrar en contacto con el acuífero se intercambia con el Ca^{++} en la fase mineral, precipita y provoca la disminución de su concentración en la fase disuelta.

La distribución regional de las concentraciones de todos los iones analizados, excepto el HCO_3^- , está principalmente controlada por la intrusión del agua de mar. En el caso de Maneadero, las aguas enriquecidas en HCO_3^- se localizan en una zona distante al cauce de arroyos y el agua de mar, lo cual indica una mayor razón roca/agua en esta zona y/o un flujo más restringido del agua subterránea.

La presencia de agua fría (18°C), oxigenada (7.55 mg/L) y baja en SDT (1.40 g/L) en el suroeste del acuífero, sugiere la probabilidad de que exista un flujo subterráneo aislado de agua de buena calidad en una zona fuertemente contaminada por agua de mar.

Las concentraciones de SDT para la mayoría del agua colectada en esta región son >4 mg/L, por lo que no es apta para uso o consumo humano de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. El agua de 4 de los 5 pozos que son explotados para uso y consumo humano por CESPE, no cumplió con los límites permisibles por la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 para 2001-2002 en cuanto a sus concentraciones de SDT, así como de cloro y sodio. Solo dos de los pozos de CESPE cumplieron con los límites permisibles de SDT.

10. BIBLIOGRAFIA

- Al-Ruwaih, F. (1995) Chemistry of groundwater in the Dammam Aquifer, Kuwait. *Hydrogeology Journal*, 3:42-55.
- Appelo, C. y Postma, D. (1994) *Geochemistry, Groundwater and Pollution*: Rotterdam, Balkema, 536 pp.
- Carrillo, A. (2002) Notas del curso-taller corto sobre hidrogeoquímica ambiental. Centro de Geociencias UNAM., Juriquilla, Queretaro.
- Comisión Nacional del Agua (1997a) Actualización Piezométrica del Acuífero Baja California-12 Valle de Maneadero, Baja California. Departamento de Control de Sistemas Hidrológicos, Unidad de Aguas Subterráneas, 8 pp .
- Comisión Nacional del Agua (1997b) Estudio Técnico Justificativo de la Zona Geohidrológica del Valle de Maneadero, Gerencia Regional de la Península de Baja California, Subgerencia Regional Técnica, 14 pp.
- Comisión Nacional del Agua (1998) Anexos de Registros de Hidrogeoquímica y Balances de Agua Subterránea, Maneadero, Baja California.
- Córdova-Bojórquez, G. (1996) Riesgo de Contaminación del Acuífero de la Planicie Costera del Valle de Maneadero, Municipio de Ensenada, B.C., Tesis de Maestría en Administración Integral del Ambiente, CICESE-COLEF, Tijuana B.C., 173 pp.

- Clesceri, L., Greenberg y Eaton, A. (1998) Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, 20th edition, Water Enviroment Federation / American Water Works Association, Washington, EEUU., 1134 pp.
- Cruz-Falcón, A. y Vázquez-González, R. (1989) Gravimetria del Valle de Maneadero-Chapultepec, Ensenada, B. C., con aplicación a la geohidrologia. Ciencias Marinas 15:21-38.
- Deutsch, W. (1997) Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination, Lewis Publishers, New York, 221 pp.
- Diario Oficial de la Federación (2000) Modificación a la Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – limites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, p. 41-49.
- Fabriol, H., Martínez, M. y Vázquez, R. (1982) Mediciones gravimétricas y telúricas en el Valle de Maneadero, Ensenada, Baja California. Geofísica Internacional 21:41-55.
- Guzmán, G. (1995) Elementos para la elaboración de un diagnóstico de la efectividad de la legislación ambiental en México, tema V: Contaminación del Agua, Facultad de Derecho, Universidad Autónoma de Baja California, México, 233 pp.
- Langmuir D. (1997) Aqueous Enviromental Geochemistry, Prentice-Hall, Inc. New Yersey, 600 pp.
- Mares Olmos, M.A. (1996) Propuesta Preliminar del Manejo del acuífero costero del Valle agrícola de Maneadero, Baja California., Tesis de Maestría en

- Administración Integral de Medio Ambiente, CICESE-COLEF, Tijuana B.C. México, 61pp.
- Margaritz, M. y Luzier, J.E. (1985) Water-rock interactions and seawater-freshwater mixing effects in the coastal dune aquifer, Coos Bay, Oregon. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49:2515-2525.
- Martínez, D. Bocanegra E.M. (2002) Hydrogeochemistry and cation-exchange processes in the coastal aquifer of Mar del Plata, Tucumán Argentina, *Hydrogeology Journal Acta* 10:393-408.
- Price, M. (1998) *Introducing Groundwater*, Second. Edition, Chapman & Hall, Great Britain., 278.
- Rodier, J. (1989) *Análisis de las Aguas*, Ediciones Omega, S. A., Barcelona, p.103-104 .
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1978) *Estudio de Factibilidad Hidrológica en San Quintin y Maneadero B.C.N., Diagnostico del Valle de Maneadero*, Subdirección de Promoción y Programas, p. 1.1-5.27.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (1974) *Informe Final del Estudio Geohidrologico del Valle de Maneadero, Estado de Baja California Norte, Dirección de Geohidrologia y Zonas Aridas* p. I.I-V.9
- Walsh, J. N. (1997) *Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry*, Longman, R. V. 42-66 pp.
- Walton, W. (1970). *Ground Water Resource Evaluation*, Mc. Graw-Hill Book Company, Minnesota, 664 pp.

ANEXO I: Resultados de los análisis para la primer campaña de muestreo (septiembre 2001) de agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero, Baja California

Est	Nombre	CNA	Longitud W	Latitud N	Temp °C	pH	STD g/L	DO mg/L	Na mg/L	Mg g/L	Ca mg/L	HCO ₃ mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L
1	Cespe 4	293	116.590133	31.778400	22.1	7.13	4.00	8.34	617	247	644	336	1961	153
2	Cespe 4R	281	116.589350	31.774400	21.8	7.24	2.17	8.71	358	85	331	313	931	188
3	Cespe 3	275	116.587433	31.764433	20.8	7.36	1.72	6.52	345	48	228	331	605	224
4	Cespe 2	249	116.586083	31.757183	21.6	7.48	1.00	5.60	219	22	105	271	300	127
5	Cespe 1	235	116.572833	31.756450	20.0	7.41	0.95	7.19	192	26	103	291	245	141
6	San Carlos (Cantera)	244	116.548200	31.763550	19.9	7.67	0.94	10.28	184	28	105	271	255	144
7	San Carlos	246	116.539917	31.763133	21.0	7.01	1.16	6.84	219	32	141	345	330	172
8	Luna	43	116.586383	31.754950	23.4	7.33	1.75	6.61	377	50	199	413	559	265
9	Marrón	211	116.591117	31.757383	21.3	7.29	1.40	3.87	278	42	178	323	475	163
10	Noria	468	116.601200	31.751200	20.8	7.20	6.35	-	-	-	-	-	-	-
11	Eliazar	75	116.575267	31.745117	21.9	6.97	2.32	7.84	431	86	342	408	792	305
12	Parcel 71 (Carrillo)	201	116.587967	31.743050	20.8	7.03	3.90	4.12	870	143	456	419	1575	480
13	Romero	194	116.596300	31.740283	22.3	7.01	4.65	3.67	878	196	625	415	2124	415
14	BMP de México	195	116.602450	31.742200	21.5	7.06	4.71	5.60	858	220	690	325	2354	333
15	Bufadora El	146	116.582200	31.726883	21.8	6.99	2.79	9.42	525	157	411	403	1230	372
16	Carpio	161	116.606017	31.723050	20.6	6.94	6.06	4.38	1253	364	771	399	3544	483
17	Parcela 139 (Pescadería)	349	116.615017	31.703417	22.9	7.02	3.75	3.99	555	254	604	301	2024	283
18	Zorrillo 1	443	116.602750	31.709500	18.9	7.55	1.40	7.55	242	71	199	338	555	162
19	Parcela 151 (El Salado)	104	116.609783	31.701383	22.7	7.01	4.09	8.28	577	291	665	298	2284	283
20	Parcela 142	100	116.598283	31.706333	20.4	7.30	3.20	10.41	519	216	516	328	1697	295
21	A. Fierro	91-R	116.585383	31.710067	20.9	7.50	1.29	8.82	266	68	157	363	481	189
22	Parcela 196	196	116.566870	31.696183	22.5	7.26	1.32	5.40	299	63	152	399	486	205
23	Mendoza	n/a	116.553111	31.684800	22.2	7.39	1.39	8.42	316	59	140	331	510	228
24	Solorio	327	116.581500	31.671190	25.0	7.51	1.29	7.27	194	71	162	170	636	91

ANEXO II: Resultados de los análisis para la segunda campaña de muestreo (abril 2002) de agua extraída de pozos en el acuífero de Maneadero, Baja California

Est	Nombre	CNA	Longitud W	Latitud N	Tem p °C	pH	STD g/L	DO mg/L	Na mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L	HCO ₃ mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L
1	Cespe 4	293	116.590133	31.778400	21.8	7.16	4.26	7.57	394	273	608	361	1981	189
2	Cespe 4R	281	116.589350	31.774400	21.7	7.34	2.44	9.09	624	108	325	307	1035	174
3	Cespe 3	275	116.587433	31.764433	20.7	7.37	1.89	8.88	377	65	221	327	655	217
4	Cespe 2	249	116.586083	31.757183	21.5	7.50	1.00	6.30	240	27	99	283	310	141
5	Cespe 1	235	116.572833	31.756450	21.0	7.50	0.54	7.24	207	33	100	303	267	143
6	San Carlos (Cantera)	244	116.548200	31.763550	19.5	7.41	1.01	8.83	207	32	101	293	290	169
7	San Carlos	246	116.539917	31.763133	19.9	7.49	1.23	8.58	247	43	132	342	355	169
8	Luna	43	116.586383	31.754950	20.6	7.19	3.91	8.36	872	168	511	581	1490	645
9	Marrón	211	116.591117	31.757383	21.2	7.36	1.51	3.81	304	52	172	342	485	153
11	Eleazar	75	116.575267	31.745117	22.0	7.01	2.42	7.99	469	99	308	429	797	311
12	Parcel 71 (Carrillo)	201	116.587967	31.743050	20.7	7.14	4.18	4.87	976	180	471	429	1624	
13	Romero	194	116.596300	31.740283	21.3	7.06	5.07	3.41	966	261	606	429	2239	483
14	BMP de México	195	116.602450	31.742200	21.4	7.11	5.42	5.11	985	264	728	334	2524	354
15	Bufadora E1	146	116.582200	31.726883	22.0	7.23	3.26	8.47	588	193	424	410	1225	394
16	Carpio	161	116.606017	31.723050	20.4	6.97	7.85	4.03	1382	488	813	403	3730	653
17	Parcela 139 (Pescaderia)	349	116.615017	31.703417	22.9	7.03	4.65	3.55	593	315	595	322	2154	307
18	Zorrillo 1	443	116.602750	31.709500	19.0	7.43	1.85	6.95	301	107	217	371	645	163
19	Parcela 151 (El Salado)	104	116.609783	31.701383	22.4	7.12	5.06	8.70	660	359	682	305	2409	312
20	Parcela 142	100	116.598283	31.706333	20.6	7.24	4.07	9.54	562	276	521	361	1857	326
21	A. Fierro	91-R	116.585383	31.710067	20.4	7.37	1.45	5.94	260	69	132	407	424	166
22	Parcela 196	196	116.566870	31.696183	21.8	7.34	1.57	7.66	335	75	159	395	486	203
25	Hnos Aguirre	141	116.532267	31.679417	19.4	7.56	2.79	7.76	465	176	329	378	1187	77