

7. HIDROQUÍMICA E ISÓTOPOS

7.1. Caracterización hidroquímica

En un agua subterránea natural la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico, siendo los aniones mayoritarios Cl^- , SO_4^{2-} , y CO_3H^- . Los cationes por su parte son el Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} . Las determinaciones realizadas incluyeron a dichos elementos mayoritarios y NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , K^+ , F^- , As, Fe total y Mn^{++} .

Los datos correspondientes a los muestreos de 2006 y 2008 permitieron la caracterización general de las condiciones hidroquímicas. En el primer caso la recolección se realizó en pozos domiciliarios y en el segundo en la red de monitoreo. Los valores medios, máximos y mínimos para cada caso pueden verse en la Tabla 7.1.

Analito	Unidad	Media		Máximo		Mínimo	
		2006	2008	2006	2008	2006	2008
pH	U de pH	7,3	7,5	7,9	8,4	6,7	6,9
Conductividad a 25 °C	uS/cm	2022	1842	7000	11390	644	218
Dureza total	mg/L	436	233	900	1400	150	42
TSD	mg/L	1204	1230	4190	7599	310	149
Alcalinidad	mg/L	504	482	1380	1403	250	99
Calcio	mg/L	110	40	264	220	20	12
Magnesio	mg/L	40	32	124	206	3	3
Sodio	mg/L	255	229	1220	1995	39	13
Potasio	mg/L	25	18	47	65	10	4
Hierro	mg/L	0,33		3,50		0,03	
Manganeso	mg/L	0,24		1,20		0,03	
Bicarbonatos	mg/L	615	588	1684	1712	305	121
Cloruros	mg/L	349	306	1633	3182	28	12
Sulfatos	mg/L	35	57	148	593	6	1
Fluoruros	mg/L	0,45	0,44	1,40	1,70	0,20	0,20
Amonio	mg/L	0,21	<0,03	1,50	<0,03	0,03	<0,03
Nitratos	mg/L	21	9	180	54	3	3
Nitritos	mg/L	0,13	0,03	0,3	0,05	0,01	0,01
Arsénico	mg/L	0,02	0,02	0,08	0,03	0,01	0,01

Tabla 7.1. Valores medios, máximos y mínimos para los muestreos obtenidos

Si bien los valores aparentan una marcada variación, se diferencian las características del agua en el cordón costero con tenores relativamente homogéneos de baja salinidad (< 1500 mg/L) y la llanura deprimida de alta salinidad con una fuerte heterogeneidad areal. En general existe una fuerte concordancia entre los valores obtenidos en 2006 y 2008.

En el cordón costero la conductividad eléctrica es menor a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los sólidos totales disueltos (TSD) no exceden los 1500 mg/L. La alcalinidad y el bicarbonato son menores a 600 mg/L y 750 mg/L respectivamente. La dureza total varía entre 100 y 400 mg/L. El contenido de sulfato es inferior a 100 mg/L. La concentración de fluoruro varía entre 0,2 y 1,7 mg/L, con un valor medio del orden de 0,40 mg/L. Los valores de sodio son menores a 500 mg/L y el potasio a 20 mg/L. El magnesio presenta una distribución algo más heterogénea con valores menores a 50 mg/L en la mayoría del área y sectores restringidos con un rango entre 50 y 100 mg/L. La concentración de calcio varía entre 100 y 200 mg/L en 2006, mientras que en 2008 es menor que 50 mg/L. Los tenores de cloruro se encuentran por debajo de los 400 mg/L.

La llanura deprimida se caracteriza por presentar sólidos totales disueltos mayores a 1500 mg/L con extremos en 7600 mg/L. La alcalinidad es superior a 800 mg/L alcanzando los 1400 mg/L. En cuanto a los bicarbonatos predominan tenores entre 400 y 800 mg/L. En algunos sectores más reducidos hay valores por encima de este límite, alcanzando un máximo de 1700 mg/L. La dureza total supera los 400 mg/L y puede alcanzar valores de 1400 mg/L. Los sulfatos en 2006 presentan tenores menores a 200 mg/L, mientras que en 2008 hay sectores con concentraciones mayores, llegando al máximo alrededor de 600 mg/L. Los fluoruros son menores a 0,5 mg/L en las determinaciones de 2006 pasando a una distribución entre los 0,5 y 1 mg/L para 2008. Los valores de sodio en general presentan tenores entre 500 y 1000 mg/L y alcanzan máximos de 2000 mg/L. El potasio se caracteriza por un máximo de 65 mg/L, con una distribución predominante entre 20 y 40 mg/L. En magnesio se encuentra entre 50 y 100 mg/L, con algunos sectores por encima de este valor y un máximo de 200 mg/L. El calcio, muestra tenores entre 50 y 200 mg/L con algunos sectores de concentraciones mayores en 2006, mientras que en 2008 el área se distribuye entre valores por debajo de los 50 mg/L y 200 mg/L. Los tenores de cloruros oscilan entre 400 y 3200 mg/L.

Los mapas de isocontenidos (Anexo 9) correspondientes a los relevamientos de 2006 y 2008 permiten reconocer las variaciones areales de los compuestos químicos descriptos. El cordón costero presenta una baja salinidad, con alcalinidad,

bicarbonatos, dureza, sulfatos, sodio, potasio, magnesio, calcio y cloruros en concentraciones menores que la llanura deprimida.

En algunos elementos químicos no se evidencia una concordancia con los ambientes geomorfológicos, tal es el caso del hierro y manganeso. Los máximos valores para ambos se localizan en el sector sur de la localidad. Para el manganeso a su vez se observan tenores más altos en el centro del médano que disminuyen en general en sentido del escurrimiento al este y oeste. No parece ser el mismo caso para el hierro. El hierro oscila entre 0,02 y 3,5 mg/L y el manganeso entre 0,02 y 1,2 mg/L (Figura 10 en Anexo 9). Sala et al. (1979) reconoce valores de hierro entre 0,01 y 4,35 mg/L. Girardi (1994) recolectó muestras a diferentes profundidades en los pozos para obtener una zonación, determinando tenores de hierro de 0,05 a 10 mg/L. El manganeso oscila entre 0,3 y 9 mg/L. Se observó que en niveles más someros hay menores tenores de hierro y más de manganeso. En el estudio del MOSP (DIGMAS, 1985) también se mencionan los altos contenidos de estos elementos en los análisis químicos.

En cuanto a los nitratos, los valores medios varían entre 9 y 21 mg/L. Existen casos puntuales, en la zona semi urbanizada, donde se han detectado concentraciones superiores a los 50 mg/L: 97 y 180 mg/L en el muestreo de 2006 y 54 mg/L en 2008.

Los nitritos presentan valores menores a 0,10 mg/L, predominando tenores entre 0,03 y menos de 0,01 mg/L. El amonio también se detecta en bajos contenidos, menores a 0,03 mg/L salvo para un caso aislado en 2006 con 1,5 mg/L. El arsénico presenta tenores por debajo de 0,01 mg/L. En 2006 tres pozos obtuvieron valores superiores, dos con 0,04 y uno con 0,08 mg/L.

En 2009 se muestrearon 16 pozos de la red de monitoreo y los datos confirman el patrón general descrito para 2006 y 2008, con el agua de menor salinidad en el cordón costero, que se incrementa hacia el oeste en la transición con la llanura deprimida. En algunos casos (cloruros, sulfatos, bicarbonatos, sodio, potasio, dureza total) se reconoce un incremento relativo de los contenidos que podría relacionarse con el estado de los niveles freáticos que en 2009 se sitúan a mayor profundidad.

7.1.1. Variaciones químicas temporales

La caracterización hidroquímica general descrita para el período de relevamiento presenta una similitud con los resultados indicados por Sala et al., (1979). Estos autores indican para el cordón costero una salinidad menor a 2000 mg/L, con concentraciones de cloruros por debajo de 355 mg/L. Los sulfatos presentan tenores menores de 95 mg/L, la dureza total oscila entre 118 y 632 mg/L. Los fluoruros en el área no superan los 2 mg/L.

A su vez, se caracteriza hidroquímicamente a la llanura deprimida por una salinidad superior a 2000 mg/L con extremos en 8000 mg/L. Los cloruros superan los 700 mg /L, los sulfatos en general exceden los 100 mg/L. Los valores de dureza total son superiores a 500 mg/L, registrándose un máximo de 1787 mg/L.

Para corroborar la relación existente entre la caracterización química y los ambientes geomorfológicos y su evolución temporal, se evaluaron diferentes tipos de diagramas a partir de los datos de los relevamientos de 2006 y 2008, conjuntamente con los de 1987 (CFI, 1990b). En el diagrama de Piper (Figura 7.1) puede observarse dos grupos de muestras que se corresponden con los pozos ubicados en la zona del médano, al este, y la llanura deprimida en el sector oeste. Las aguas subterráneas del cordón costero son, en su mayoría, bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, mientras que en la llanura deprimida, se clasifican como cloruradas y/o sulfatadas magnésicas.

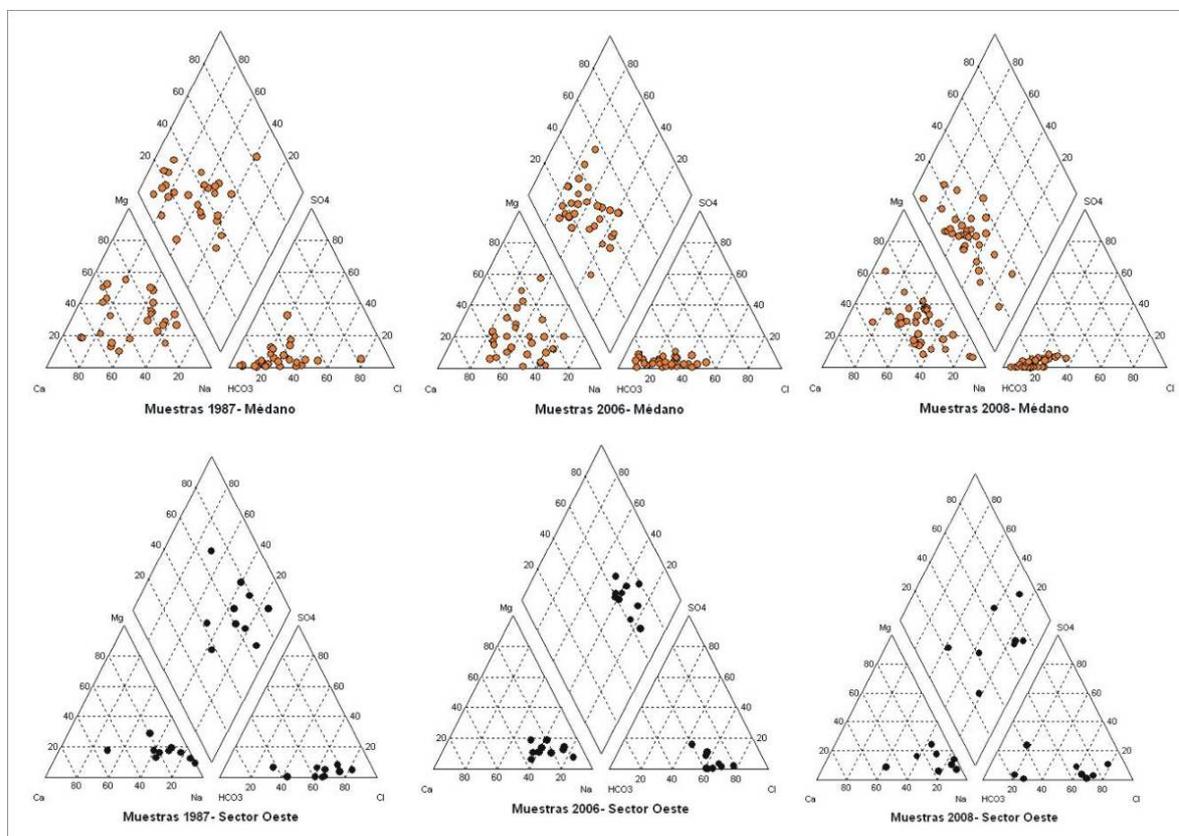


Figura 7.1. Diagramas Piper para los muestreos de 1987, 2006 y 2008 según el ambiente

En el diagrama de Shoeller-Berkaloff (Figura 7.2) tomado como ejemplo para el relevamiento de 2008, también se observa una separación de las muestras, así como en los diagramas radiales donde se ha elegido un pozo de cada ambiente (Figura 7.3)

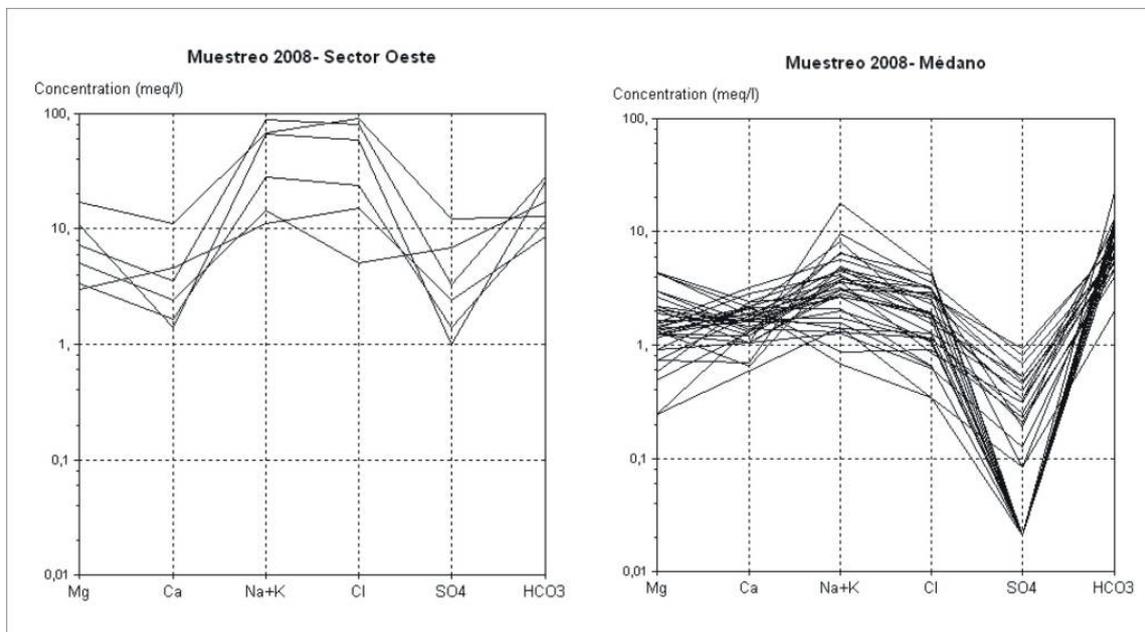


Figura 7.2. Diagramas Schoeller-Berkaloff para el censo 2008 según el ambiente

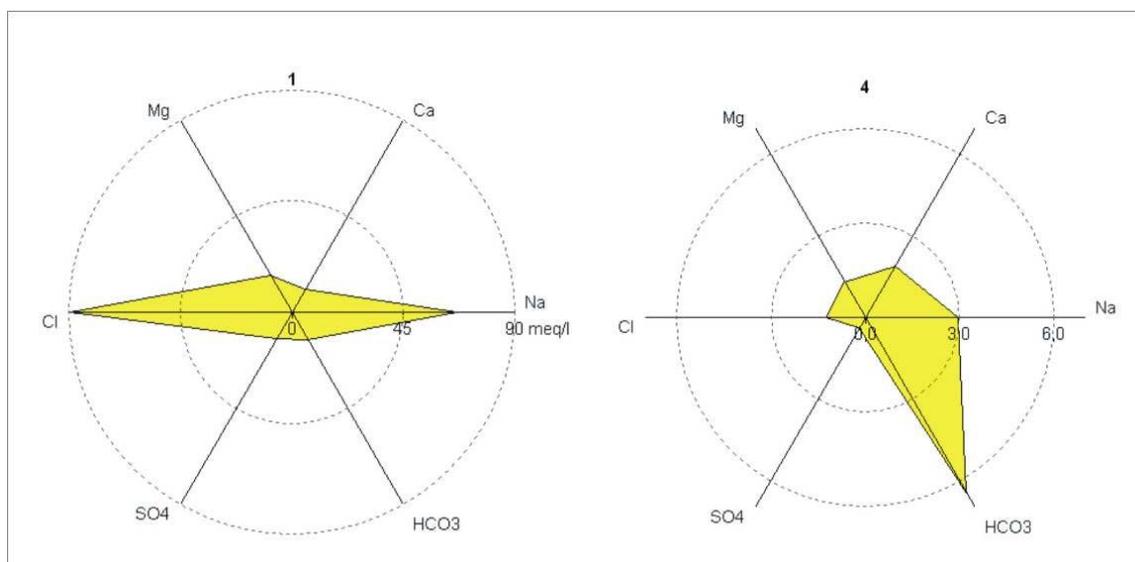


Figura 7.3. Diagramas radiales en el pozo 1 del sector oeste y el pozo 4 ubicado en el médano (censo 2008)

En las Figuras 7.4 y 7.5 se observan los mapas de isocontenidos de TSD y cloruro, seleccionados como ejemplo para efectuar una comparación entre los resultados químicos de 1976, 1987, 2006 y 2008.

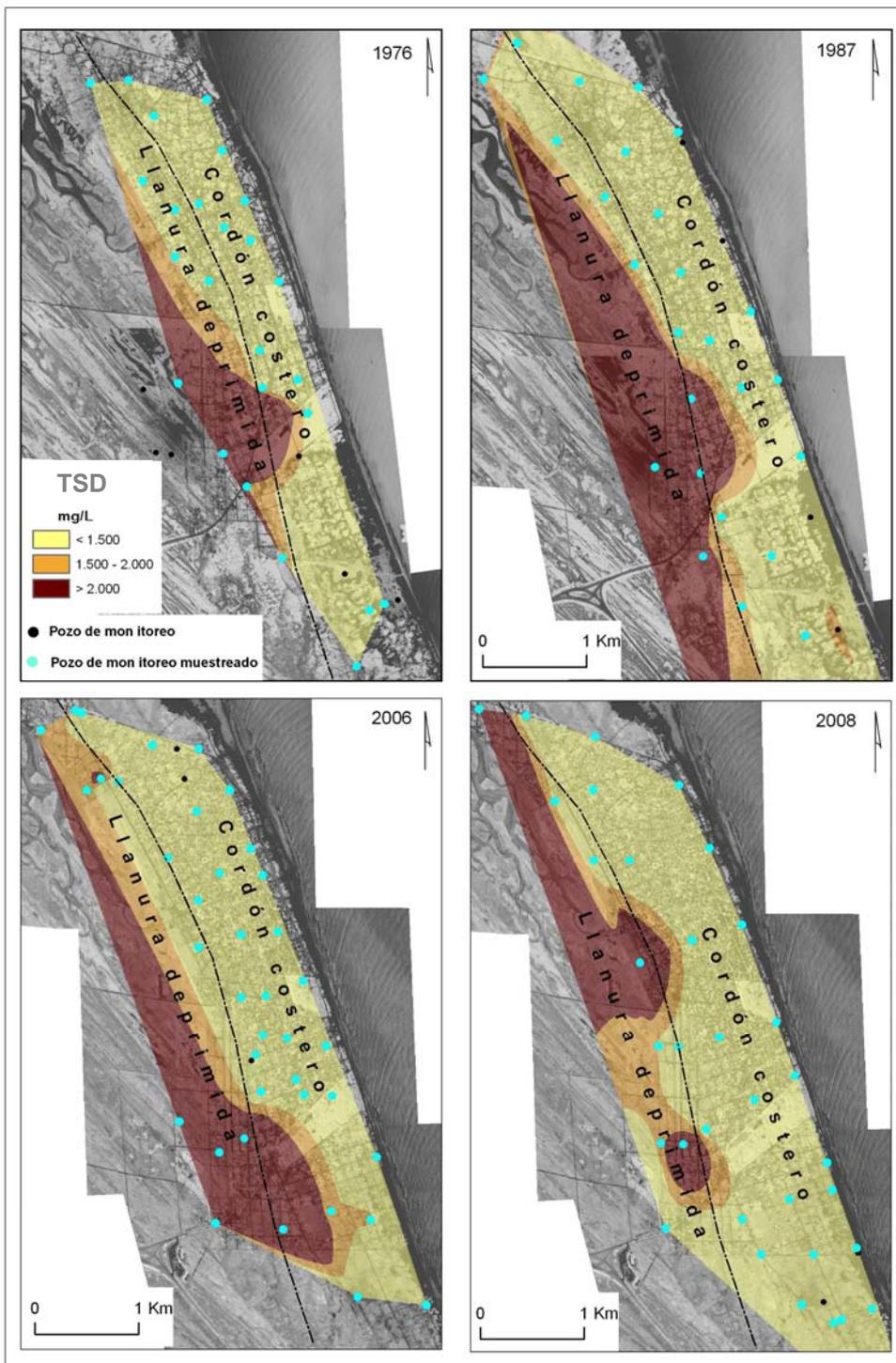


Figura 7.4. Mapa de isocontenidos de total de sólidos disueltos (TSD) para los censos analizados

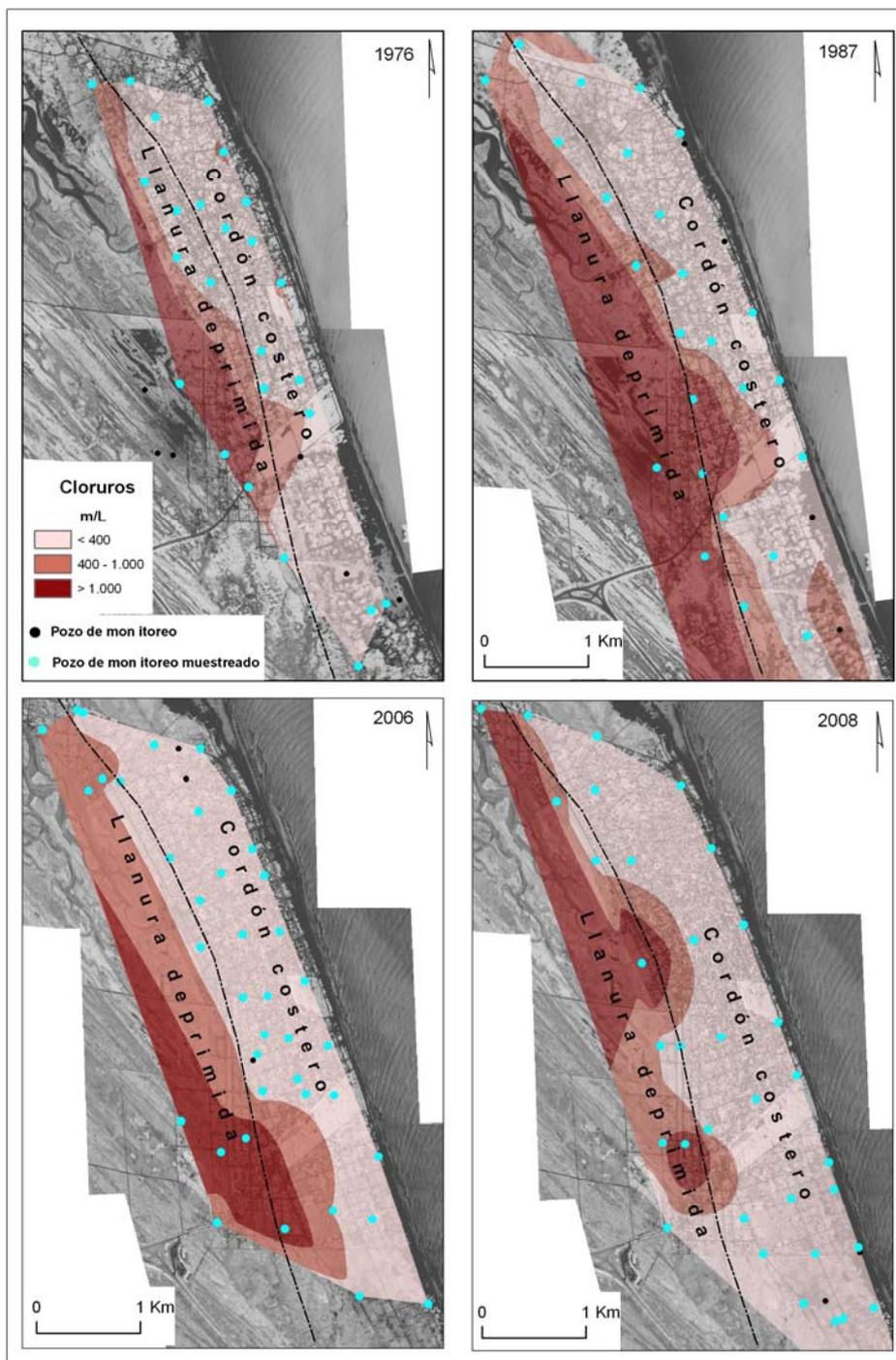


Figura 7.5. Mapa de isocontenidos de cloruros para los censos analizados

De acuerdo a estos mapas existen diferencias vinculadas a la distribución de los pozos que hacen que el trazado de las curvas no sea exactamente el mismo. De todas maneras se manifiesta una zona de mayor y menor salinidad según los ambientes reconocidos. El esquema general se ha conservado en el tiempo, manteniendo las concentraciones de TSD mayores a 1500 mg/L y cloruros a 350 mg/L

para el sector de la llanura deprimida, mientras que son menores a estos tenores en el cordón costero.

Los datos químicos elaborados permiten reconocer que la calidad del agua en los dos ambientes geomorfológicos descriptos está influenciada por distintos procesos hidrológicos. Las aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas de bajo contenido salino existentes en el cordón costero responden a una rápida infiltración de los excesos de agua de las precipitaciones a través de los sedimentos arenosos que carecen de evaporitas. Las aguas cloruradas y/o sulfatadas magnésicas de alta salinidad de la llanura deprimida se encuentran con suelos de carácter más limo-arcilloso de menor permeabilidad, que permiten un tiempo de contacto mayor favoreciendo a la disolución de compuestos químicos. Además una mayor concentración de sales se asocia a procesos de evaporación desde el nivel freático dada la posición somera en que se localiza. Por otra parte se trata de una zona frecuentemente anegada por canales de marea que pueden aportar aguas salobres al agua freática.

7.1.2. Influencia en la salinidad de agua de un evento de tormenta

Los relevamientos de campo han permitido reconocer fuertes variaciones en la salinidad de algunos pozos, en particular en dos ubicados próximos a la costa (pozos 9 y 33) y uno en el sector oeste (pozo 6) (Figura 5.4).

El 2 de marzo de 2010 se realizaron mediciones de conductividad eléctrica del agua en la red de monitoreo para detectar la existencia de variaciones luego de la sudestada del 26 de febrero. En la Tabla 7.2 se observan los valores de conductividad para distintas fechas en los pozos 9, 6 y 33.

POZO	14/07/2008	28/07/2008	02/03/2010	17/03/2010	07/04/2010	30/09/2010
9	218		18400	9995	851	2166
6	2620	2550	9800		3030	
33	687	652	5250	698	716	628

Tabla 7.2. Evolución de la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para los pozos 9, 6 y 33.

El significativo incremento producido en el evento mencionado, se relaciona con el ascenso en los niveles de agua de mar y de la ría producidos durante la

tormenta. En el caso del pozo 6 (oeste) se puede vincular a un aporte del agua por la ría cuya salinidad está en el orden de los 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el pozo 33 se evidencia el ingreso del mar por un corte en el médano, que anega la zona y favorece la infiltración del agua salada desde la superficie hacia el acuífero. Frente al pozo 9 se encuentra localizado un desagüe pluvial que descarga el agua hacia el mar en caso de inundaciones sobre la Avenida Costanera. Esta obra no posee una compuerta que, en caso de tormenta y aumento del nivel del mar, impida el ingreso del agua salada hacia el continente.

El valor del 30 de septiembre de 2010 se relaciona con una sudestada ocurrida el día anterior. El pozo 9 presenta tenores elevados mientras que no ocurre lo mismo con el pozo 33, debido a que en esta oportunidad no se produjo el ingreso del mar por sobre el médano.

De acuerdo a lo expuesto, si bien no se han detectado evidencias de procesos de intrusión marina en condiciones climáticas estables, se ha advertido la salinización de algunos pozos luego de eventos de tormenta. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático se estima que el promedio global de aumento del nivel del mar para el siguiente siglo estaría entre 0,18 y 0,59 metros (IPCC, 2007). Para Argentina se han calculado tasas de aumento del nivel del mar entre $+1,6 \pm 0,1$ mm/año para el estuario del Río de La Plata y $+1,4 \pm 0,5$ mm/año para Mar del Plata (Lanfredi et al., 1998). De acuerdo a Pousa et, al. (2007) la costa de la provincia de Buenos Aires resulta vulnerable a la erosión costera e intrusión salina especialmente relacionado a olas de tormenta de alta energía asociadas a fuertes vientos (sudestadas). En base al fenómeno de salinización detectado y los pronósticos para la región ante el cambio climático se advierte la necesidad de un seguimiento de las condiciones de la interfase agua dulce-agua salada con especial énfasis en los eventos de tormenta.

7.2. Uso del agua

La calidad del agua subterránea influye de una manera decisiva, no sólo en la expansión y desarrollo de las actividades humanas sino que constituye uno de los factores más importantes en la salud de la población.

Se presentan los resultados que se consideran más importantes de acuerdo a las determinaciones químicas realizadas y sobre la base de los valores

proporcionados por el Código Alimentario Argentino (A.N.M.A.T., 2007) como norma establecida para la potabilidad del agua.

Se evaluaron los mapas de isocontenidos teniendo en cuenta los límites aceptables para el agua de bebida según la normativa nacional, de acuerdo a los resultados de los muestreos realizados en 2006, 2008 y a los datos históricos de enero de 1976 (Sala et al., 1976) y de agosto de 1987 (CFI, 1990b).

Para el caso de cloruro, sodio, TSD, dureza y conductividad existe una coincidencia en tenores elevados en los pozos del sector al oeste de la localidad (llanura deprimida), que superan el límite de potabilidad. El resto de las muestras presentan valores aptos (Figura 7.6).

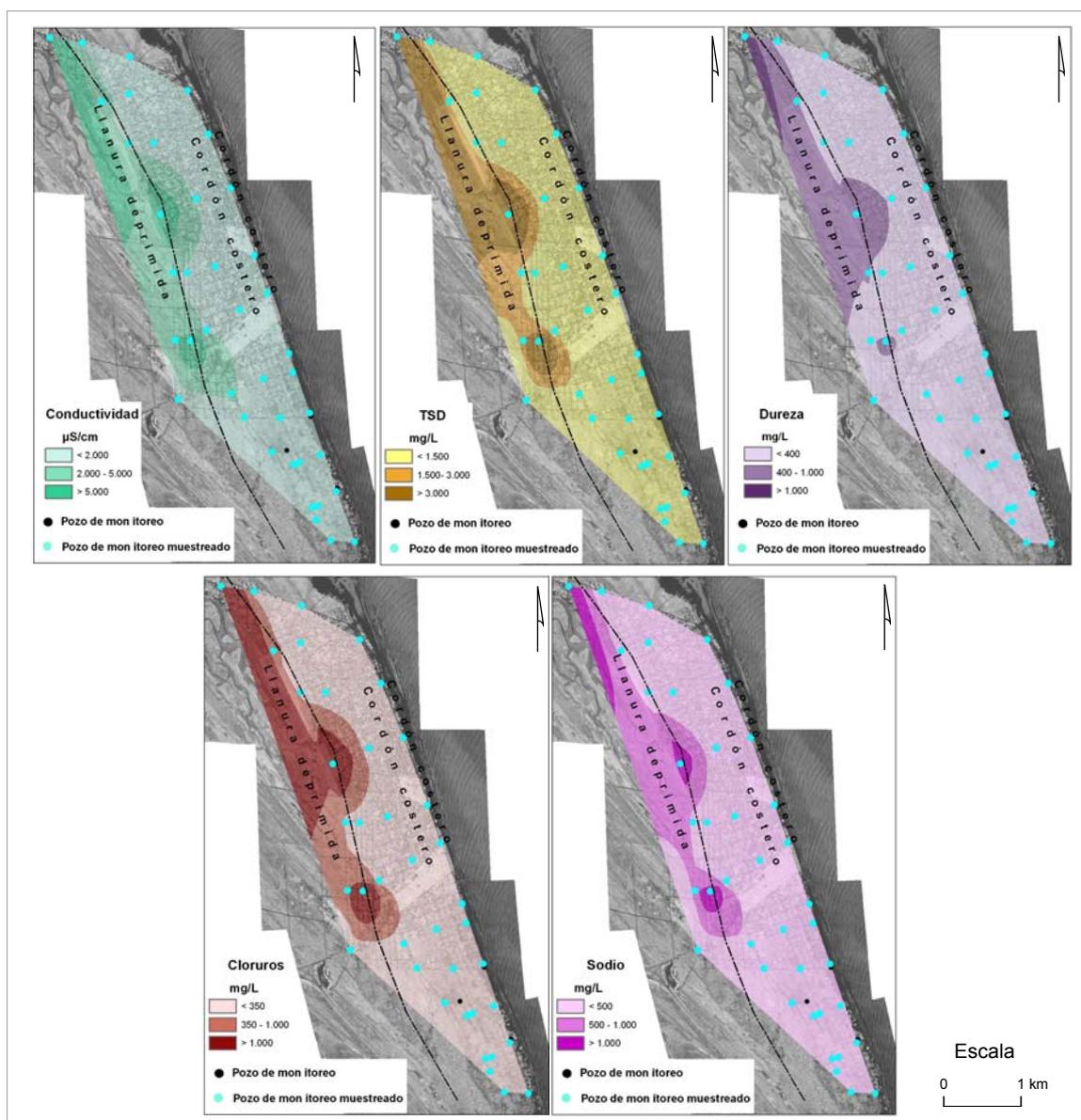


Figura 7. 6. Mapas de isocontenidos de conductividad, TSD, dureza, cloruro y sodio.

Para el relevamiento 2006 tres pozos superaron el límite aceptable de arsénico (0,01 mg/L), dos con 0,04 y uno con 0,08 mg/L. En los relevamientos (2006 y 2008), casi la totalidad de las muestras presentan un déficit en el contenido de fluoruro, con valores inferiores a 0,80 mg/L. Un solo un pozo en 2008 supera el límite superior de 1,5 mg/L.

Los valores de nitratos, cuyos datos de análisis estaban disponibles para 1987, 2006 y 2008 sólo presentan valores por encima de los 45 mg/L, en posiciones aisladas y puntuales. (2, 3 y 2 pozos respectivamente). Una situación similar se presenta para el caso de los tenores de nitritos y amonio, que fueron determinados en 2006.

Al evaluar en conjunto las concentraciones de cloruros, dureza y TSD, se logró establecer un sector al oeste incluido en la llanura deprimida, donde a lo largo de treinta años se mantienen tenores de estos tres elementos por encima del límite aceptable de potabilidad a lo cual se le suma, según el censo 2006, altos valores de hierro y manganeso en algunos sectores dentro de esta área (Figura 7.7). La moda de los valores excedidos van desde el límite aceptable hasta 900, 700 y 3400 mg/L, para cloruro, dureza y TSD respectivamente.

El cordón costero se caracteriza por presentar valores por debajo de los límites aceptables para cloruros, dureza y TSD.

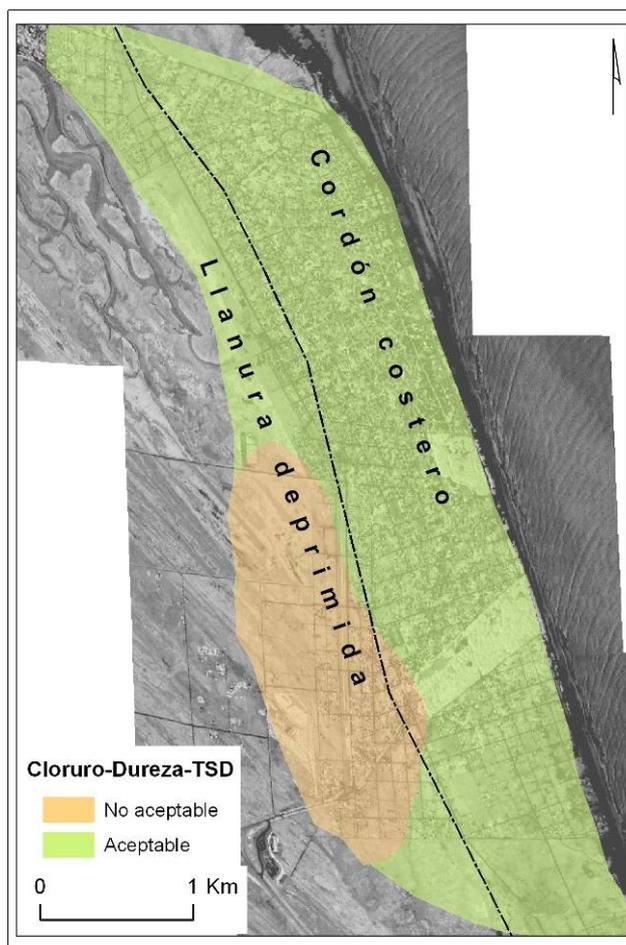


Figura 7.7. Sector al oeste no apto para consumo

Existen ocasiones en donde el agua subterránea posee valores elevados de hierro y manganeso, lo cual ocurre en el área estudiada.

El ión ferroso se puede originar por oxidación parcial de la pirita, la disolución del Fe contenido en los minerales o la disolución reductiva de los óxidos de hierro. En los acuíferos arenosos, los óxidos de Fe y oxihidróxidos encontrados son ferrihidrita, goethita, lepidocrocita y hematita (Apello y Postma, 2007). Puede originar incrustaciones duras y con más de 0,5 mg/L son nocivas o molestas en general (Custodio y Llamas, 1996).

El manganeso tiene un comportamiento similar al Fe, en general está en forma de Mn^{++} que se oxida fácilmente a MnO_2 . En cuanto a la nocividad, al oxidarse forma manchas negruzcas que favorecen el crecimiento de ciertas bacterias que producen la formación de depósitos insolubles de estas sales. Esta acción es realizada igualmente por el hierro. Cuando existe en cantidades apreciables produce en el agua un sabor

desagradable, lo que hace que su presencia sea notada al beber y su acción tóxica más fácilmente evitada (Catalán Lafuente, 1969).

El hierro que está en el agua no se encuentra en la forma en la cual pueda ser absorbida rápidamente por el cuerpo humano, sin embargo, si un suministro local contiene concentraciones muy elevadas podría contribuir en proporción considerable. La ingestión en exceso de Fe puede producir hemosiderosis y hemocromatosis (Jiménez Serrano e Idal Marin, 1994).

El manganeso, al igual que el anterior, es un elemento esencial para los mamíferos. Sólo se absorbe un 3% del ingerido. No obstante, algunos tipos de agua, de forma aislada, pueden contener niveles muy superiores de este elemento, con lo cual contribuyen en la misma proporción que los restantes alimentos a la ingestión de manganeso (A.T.S.D.R., 2000). El aporte de manganeso a partir del agua es sustancialmente menor que a partir de la ingesta de comida (US EPA, 2004).

La Environmental Protection Agency (EPA) a través de Safe Drinking Water Act, ha establecido un nivel de 0,3 mg/L de hierro dentro de los estándares (US EPA, 2003). En este nivel ocurre la decoloración del agua siendo solo un impacto estético, y no teniendo efectos sobre la salud. La EPA propone que la concentración de Mn para el agua potable no debe exceder los 0,05 mg/L. La Food and Drug Administration (FDA) también recomienda 0,05 mg/L de manganeso en agua. EPA ha establecido, además, reglamentaciones para los límites de este elemento que las industrias pueden descargar en los cursos de agua. Por su parte, la Unión Europea (EU) ha establecido para el hierro un valor límite de 0,2 mg/L y el mismo que la EPA para el manganeso.

La Organización Mundial para la Salud (OMS, 2006) considera un valor límite provisional para el manganeso de 0,5 mg/L. Esta guía es provisional ya que existe alguna evidencia de riesgo potencial, pero la información sobre los efectos en la salud son limitados. No contempla valores límites para el contenido de hierro.

En Código Alimentario Argentino (CAA) mantiene sus estándares en 0,3 mg/L para hierro y 0,10 mg/L para manganeso. El contenido de hierro que se maneja es el mismo que la EPA, pero el manganeso tolera el doble que las reglamentaciones internacionales. (Tabla 7.4).

	OMS	US EPA	EU	CAA
Hierro	No contempla	0,30 mg/L	0,20 mg/L	0,30 mg/L
Manganeso	0,50 mg/L	0,05 mg/L	0,05 mg/L	0,10 mg/L

Tabla 7.4. Valores comparativos de hierro y manganeso según diferentes normativas

El hierro, que fue analizado en 1976 y 2006, presenta en ambos casos tenores elevados. El manganeso, determinado en 2006, muestra sectores importantes que sobrepasan los límites aceptables. En los mapas de isocontenidos, se consideraron los límites establecidos por el Código Alimentario Argentino (CAA).

En la Figura 7.7 se observa que una parte del área de estudio presenta tenores de hierro y manganeso superiores a los valores aceptables. Si se consideran los standards internacionales, especialmente para el manganeso, el área que excede los límites admisibles sería mayor.

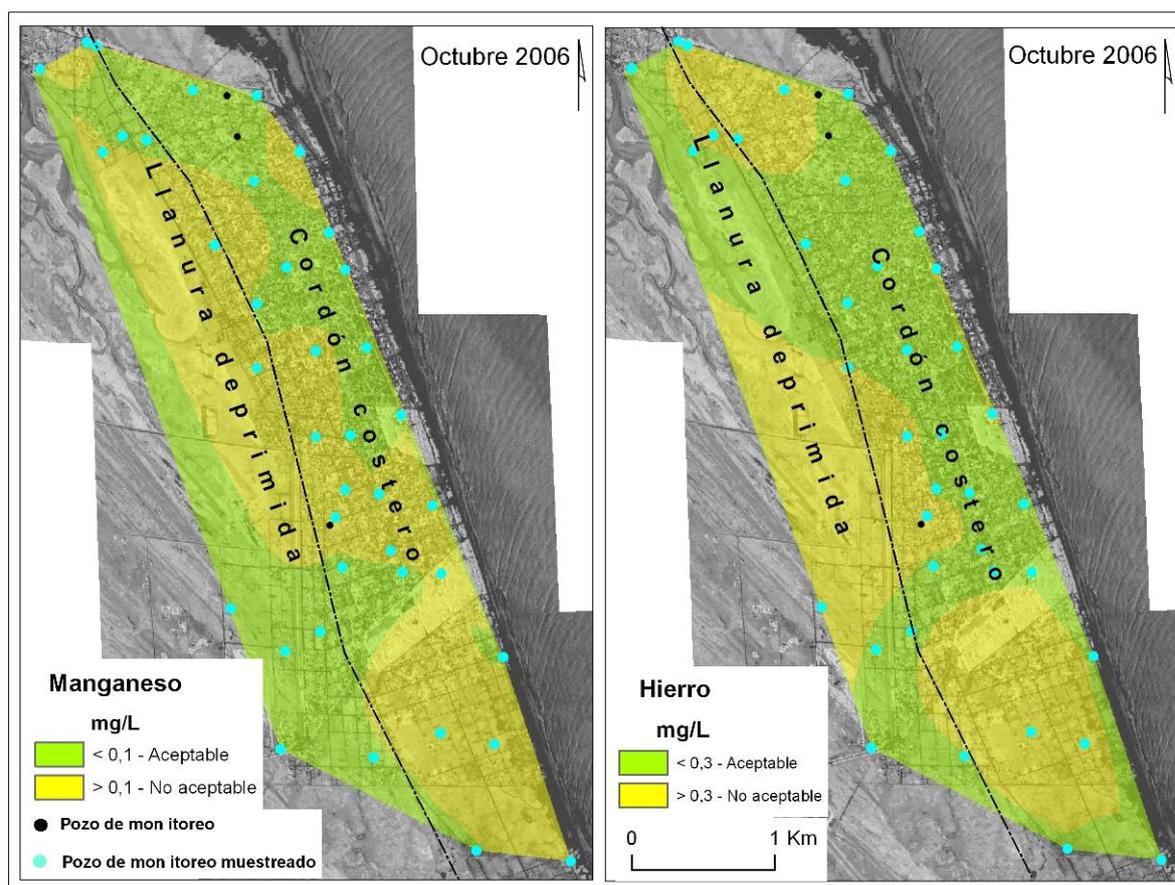


Figura 7.7. Mapa de isocontenidos de hierro y manganeso según el CAA.

Los valores altos de manganeso poseen una distribución areal mayor que el hierro sobre el cordón costero. En el sector de la llanura deprimida, las zonas con un alto valor en hierro son mayores que los sectores con manganeso elevado.

7.3. Caracterización isotópica

A continuación se describirán algunos aspectos teóricos referentes a los isótopos de oxígeno e hidrógeno que ayudaron a una mejor interpretación de los datos.

7.3.1. Isótopos estables Oxígeno y Deuterio, generalidades.

Tanto el hidrógeno como el oxígeno representan un conjunto de isótopos, cuyas variaciones en el agua natural son la base para su aplicación metodológica en hidrología y son utilizados ampliamente en esta disciplina. (Levin et al., 1988; Panarello et al., 1993; Gat, 1995; Dapeña y Panarello, 2004; Lavrushin et al., 2005; Vitòria et al., 2005; Sukhija, 2006; Grassa et al., 2006; Lu et al., 2006; Mayo et al., 2007; Lu et al., 2008; Quiroz Londoño et al., 2008; Azzaz et al., 2008; Carol et al., 2009a; Trabelsi et al., 2009)

El hidrógeno, cuyo isótopo de masa 1 es el protio (^1H), aparece en la hidrosfera con una masa de 99,985%, y está acompañado del 0,015% del isótopo pesado ^2H o deuterio. Incluso existe un isótopo más pesado, de masa 3, denominado tritio ^3H , es inestable y presenta un decaimiento β con una vida media de 12,32 años. Debido a que ese valor es compatible con el tiempo de permanencia de muchos reservorios subterráneos, es ampliamente utilizado en estudios hidrogeológicos.

Los isótopos radiactivos ^{14}O , ^{15}O , ^{19}O y ^{20}O tienen vidas medias de segundos, por lo tanto no son significativos en este tipo de análisis. Sin embargo tres de los isótopos estables del oxígeno ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O cuya abundancia es de 99,7590 % 0,037% y 0,20 % respectivamente, son importantes en isotopía aplicada a la hidrogeología (Gat, 2005).

La especie molecular más abundante del agua está formada por dos átomos de protio y un átomo de oxígeno de masa 16 ($^1\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$). Además existen otras especies más pesadas que incorporan un átomo de deuterio (^2H) o de oxígeno 18 (^{18}O).

La abundancia absoluta de los isótopos estables no se mide en agua u otros compuestos naturales. Solamente se determina la diferencia relativa en la relación entre el isótopo pesado (generalmente el menos abundante) respecto del liviano (generalmente el mas abundante) de la muestra respecto a una referencia. Esa diferencia se designa con la letra δ y se expresa en ‰, definiéndose como:

$$\delta\text{‰} = \frac{R_M - R_R}{R_R} \cdot 1000$$

Donde δ , es la desviación isotópica en partes por mil; R , es la relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$); M , muestra; R , referencia internacional.

De esta manera se desprende que un valor positivo de $\delta^{18}\text{O}$ ó de $\delta^2\text{H}$ significa que en contenido de ^{18}O o ^2H de la muestra es mayor que el del patrón resultando una muestra enriquecida en isótopos pesados, y un valor negativo indica lo contrario, siendo una muestra empobrecida.

El valor standard aceptado para los isótopos en el agua es el VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), el cual es similar al valor standard original SMOW definido por Craig (1961). Siendo R la abundancia para las especies isotópicas, por ejemplo. $^2\text{H}/^1\text{H}$ o $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, se tiene que $^2R_{\text{VSMOW}} = (155.75 \pm 0.05) \times 10^{-6}$

Aplicado al sistema deuterio-hidrógeno, ($^2\text{H}-^1\text{H}$), la notación puede ser $^2\delta$, $\delta^2\text{H}$ ó D ; y para el ^{18}O la notación es $^{18}\delta$, $\delta^{18}\text{O}$ u oxígeno-18.

En el ciclo hidrológico, los rangos de valores pueden encontrarse entre - 450‰ $< ^2\delta < +100\text{‰}$ y $- 50\text{‰} < ^{18}\delta < +50$. La composición estimada del agua primordial (juvenil) es $^2\delta_{\text{VSMOW}} = \sim -60\text{‰}$ y $^{18}\delta_{\text{VSMOW}} = \sim +5\text{‰}$. Esto difiere de los valores de la atmósfera actual, debido, por un lado, a la pérdida preferencial de ^1H relativo a ^2H en la atmósfera exterior en el lapso de la escala geológica, y por el otro, de la remoción del oxígeno enriquecido en la columna sedimentaria, en particular en carbonatos (Gat et al., 2000).

Los procesos que llevan al fraccionamiento isotópico natural del hidrógeno y del oxígeno del agua, se producen fundamentalmente en la evaporación y condensación, aunque también pueden colaborar con menor intensidad otros fenómenos de tipo de difusión térmica, biológicos, etc. (Custodio y Llamas, 1976). Existen diversos factores que influyen en el contenido de deuterio y oxígeno-18:

- Distancia al mar: el vapor generado tiene δ ligeramente negativo ($\delta \sim -10\%$) y va disminuyendo a medida que penetra en las áreas continentales. La lluvia generada es tanto más ligera (menor δ) cuando más lejos del mar.
- Temperatura: en zonas frías se produce un vapor más ligero (menor δ) que en las zonas más calidas, aunque existe una notable dependencia de las situaciones y de las condiciones climáticas locales. El valor medio de $\delta^{18}\text{O}$ varía según $\delta^{18}\text{O} = 0,7 t_a (\text{° C}) - 13,9$ (Dansgaard, 1964) siendo t_a la temperatura media anual, lo que conduce a una disminución de $0,5\%$ /grado de latitud, con notables excepciones.
- Altitud: la disminución de la temperatura con la altitud hace que en una cierta región la lluvia de zonas topográficamente más altas sea más ligera que en las zonas más bajas. En condiciones geográficas apropiadas se puede llegar a establecer una relación entre la composición isotópica y la altitud.
- Intercambio isotópico durante la precipitación: en regiones húmedas las gotas de lluvia pueden sufrir un intercambio isotópico con la humedad ambiental si su composición isotópica es diferente. Este efecto solo tiene importancia en lluvias de pequeña intensidad o en los primeros momentos de lluvias intensas y no afecta la precipitación nival.

La relación $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O}$ se estudia mediante un gráfico en el que se representan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en función de los correspondientes a $\delta^2\text{H}$. Este análisis se basa en que en una evaporación en condiciones de equilibrio la relación $\delta^2\text{H} / \delta^{18}\text{O} = 8$ de modo que los puntos representativos quedan sobre una línea cuya expresión para el agua de lluvia es $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, estando δ en ‰ VSMOW. Ésta se denomina Línea Meteorológica Mundial (LMM) o Global Meteoric Water Line (GMWL) en sus siglas en inglés. Cuando se produce la evaporación de aguas superficiales, en general no se está en condiciones de equilibrio dinámico y el agua residual se enriquece en $\delta^{18}\text{O}$ más que en deuterio, así, los puntos representativos de la composición isotópica formarán una recta cuya pendiente está entre 4 y 6 en el caso de intensa evaporación.

7.3.2. Aporte de deuterio y oxígeno a las aguas subterráneas

Cuando el terreno es muy permeable, el agua de lluvia pasa muy rápidamente a zonas en las que no actúa la evaporación y la poca agua que queda en la superficie evapora totalmente, de ese modo no existe alteración isotópica importante.

La composición isotópica del agua subterránea en climas templados refleja con una buena aproximación la composición isotópica media de la precipitación de una localidad (Gat y Tzur, 1967). Por otro lado, cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, puede modificarse por evaporación o mezcla de aguas de distinta composición (Gat, 1983) Estas modificaciones dependen de la permeabilidad de los materiales del suelo y del tiempo de permanencia del agua en la superficie.

Si la permeabilidad es alta la infiltración es rápida y la composición isotópica del agua infiltrada puede ser idéntica o similar a la de las precipitaciones, si ocurre lo contrario, se evapora previamente y se infiltra un agua más pesada.

En general, salvo en zonas desérticas, a profundidades mayores a 3 o 4 metros el agua deja de estar sometida a evaporación y su composición isotópica se mantiene constante. También puede ocurrir que se produzcan mezclas con aguas de distintas procedencias, y en el caso de aguas sometidas a altas temperaturas, puede modificarse debido al intercambio isotópico entre el oxígeno del agua y el de las rocas.

En lugares con abundante vegetación el agua es devuelta parcialmente a la atmósfera por evaporación, pero ello no supone un fraccionamiento importante ya que las plantas toman el agua del suelo casi sin alteración isotópica y la evaporan totalmente

El efecto mas importante es la infiltración preferencial en diferentes épocas el año, ya que en otoño-invierno la composición isotópica media del agua recargada es, en general, algo más ligera que la media de la lluvia anual. Esto se acentúa en climas semiáridos, ya que los húmedos pueden permanecer indiferentes a este fenómeno. En zonas muy frías la recarga puede desplazarse al verano produciéndose un enriquecimiento.

En lugares con muy escasa vegetación puede existir una evaporación directa del agua retenida en el suelo dando lugar a un enriquecimiento isotópico que se transmite al acuífero cuando el agua infiltra hasta el mismo. El intercambio con arcillas es en general pequeño y alcanza pronto el estado de equilibrio.

A partir de este análisis se puede identificar el área de recarga. En zonas áridas se pueden encontrar aguas subterráneas más livianas que las de la lluvia en cualquier zona de recarga, esto sugiere que se trata de aguas antiguas infiltradas en una época más lluviosa, por ejemplo, del último periodo pluvio-glacial.

En acuíferos recargados por ríos, lagos, embalses o canales, se produce la influencia de los mismos, y la composición isotópica puede variar notablemente, en general aumentando los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$.

En ambientes marinos o costeros, donde la precipitación es el primer condensado, los puntos muestreados se distribuyen en el diagrama $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ en un círculo o elipsoide a lo largo de la línea meteórica local. En algunas circunstancias, especialmente en zonas relativamente áridas, la evaporación de las gotas que caen dictan el curso de la línea, la cual recuerda a la Línea de Evaporación de las aguas superficiales (Gat, 2005 op.cit.).

7.3.3. Isótopos Estables (Deuterio y Oxígeno-18) en el acuífero costero de San Clemente del Tuyú

Los resultados de ^{18}O y ^2H se presentan en la Tabla 7.5 para el muestreo de julio de 2009. La composición isotópica de las aguas subterráneas se encuentra en un rango de -12,5‰ a -4,3‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -94‰ a -21‰ en $\delta^2\text{H}$.

Muestra Pozo	Ambiente	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ (VSMOW) ± 0.3	$\delta^2\text{H}$ ‰ (VSMOW) ± 1	TSD (mg/L)	Cl (mg/L)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1		-4,5	-27	7580	3061	10770
6	Oeste del médano	-5,7	-35	1850	482	2550
12		-4,8	-30	9251	3422	12530
20		-10,4	-70	7790	2926	10760
3		-5,0	-29	543	38	770
5		-5,3	-30	776	123	1113
43	Centro del médano	-5,2	-30	817	90	130
23		-5,9	-36	1088	94	1515
24		-5,7	-32	494	22	714
38		-4,6	-25	1167	160	1623
41		-5,3	-30	1230	270	1777
4		-4,3	-21	424	29	605
10	Este del médano	-12,5	-94	330	30	459
25		-5,3	-30	469	67	680
33		-5,4	-31	451	41	652
39		-6,8	-39	415	27	589

Tabla 7.5. Análisis isotópicos, sólidos disueltos totales (TSD), Cloruros (Cl) y conductividad del muestreo julio de 2009.

En las Figuras 7.8 y 7.9 se observa a las muestras ordenadas de acuerdo a su ubicación en la morfología del médano. De esta manera los pozos localizados al oeste tienen en su mayoría valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -5,7‰ a -4,5‰ y de -35‰ a -27‰ para el

$\delta^2\text{H}$. El pozo 20 tiene una composición isotópica muy empobrecida en relación a las otras con valores de $\delta^{18}\text{O} = -10,4\text{‰}$ y $\delta^2\text{H} = -70\text{‰}$. El área en el centro del médano presenta valores de $-5,9\text{‰}$ a $-4,6\text{‰}$ a en $\delta^{18}\text{O}$ y de -36‰ a -29‰ en $\delta^2\text{H}$.

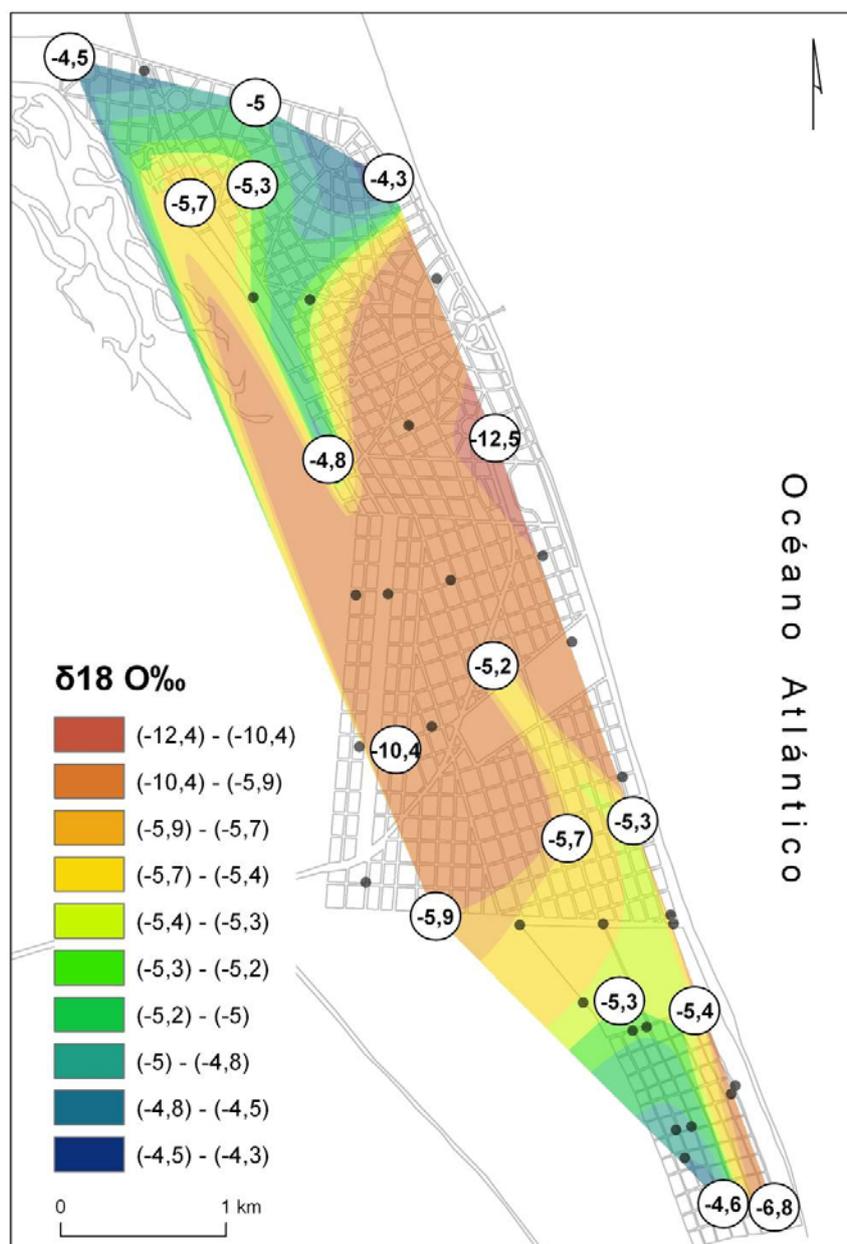


Figura 7.8. Distribución de los valores de $\delta^{18}\text{O} \text{‰}$ (julio 2009)

Para el agua subterránea del sector este, el $\delta^{18}\text{O}$ varía entre $-6,8\text{‰}$ y $-4,3\text{‰}$ y mientras que el $\delta^2\text{H}$ lo hace entre -39‰ y -21‰ , a excepción del pozo 10 con valores de $-12,5\text{‰}$ y -94‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente.

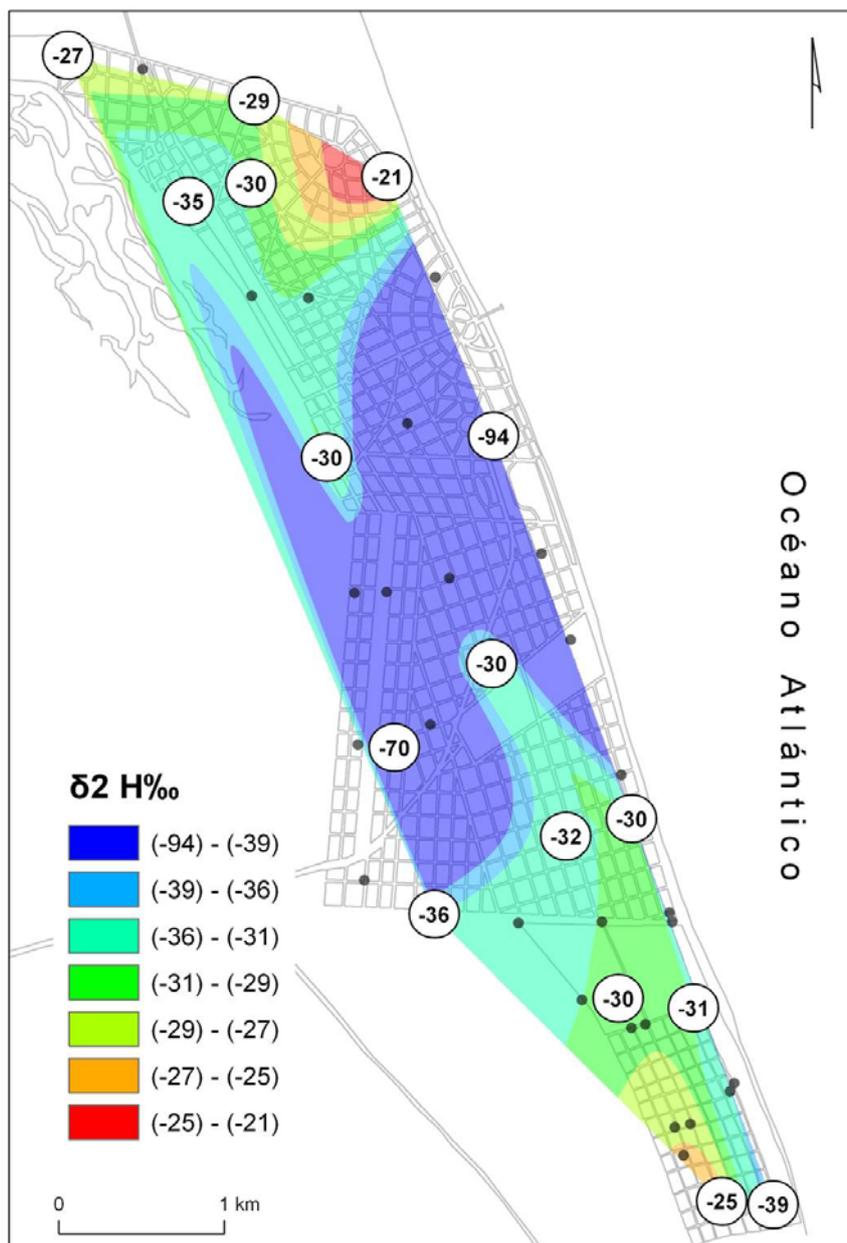


Figura 7.9. Distribución de los valores de $\delta^2\text{H}\text{‰}$ (julio 2009).

Los análisis isotópicos se representaron en un diagrama convencional $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ junto a la línea meteórica local definida por Dapeña (2007) a partir de las estaciones Ciudad Universitaria (Ciudad de Buenos Aires), período 1979-2003 y Estación Azul (Ciudad de Azul, provincia de Buenos Aires), período 1998-2003, *i.e.*: $\delta^2\text{H}\text{‰} = 8 \delta^{18}\text{O}\text{‰} + 12/14$ (Figura 7.10). Dado que no existen registros isotópicos el agua de lluvia de San Clemente se han utilizado las líneas mencionadas considerándose válidas para la región. Las muestras de agua subterránea de San Clemente están comprendidas por éstas líneas, indicando su origen meteórico. En general, la composición isotópica del agua subterránea obtenida para el primer muestreo

responde a la composición isotópica promedio del agua de lluvia lo que confirma lo establecido por Gat y Tzur (1967) para climas templados y analizado por Panarello (1993) para este sector de la costa bonaerense. Sin embargo, en algunos pozos (pozos 10 y 20) se observa una composición más empobrecida que probablemente responde a fenómenos de infiltración preferenciales de precipitaciones.

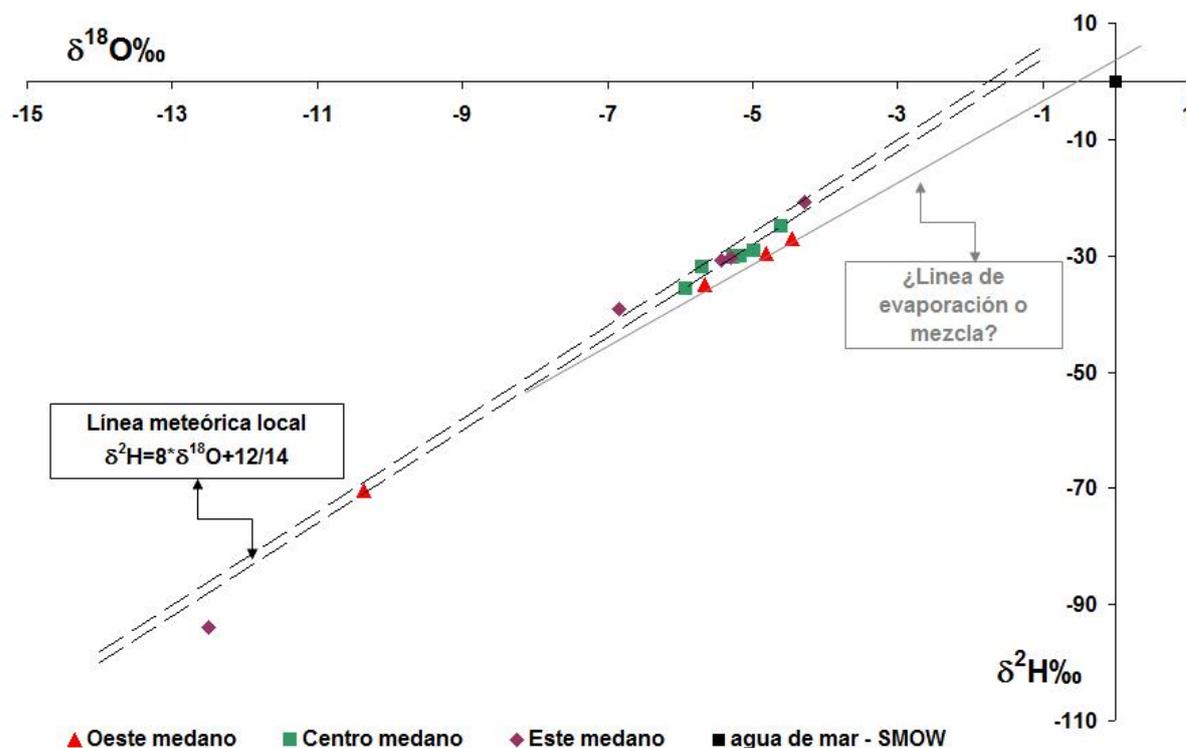


Figura 7.10. Gráfico $\delta^{18}O$ vs δ^2H (julio 2009)

Por otro lado, puede observarse que las muestras recolectadas en el sector oeste del médano sufren una pequeña desviación. Éste fenómeno puede ser producido tanto por evaporación y mezcla entre el agua dulce y salada (Gonfiantini y Araguás, 1988; Geyh, 2000). En este caso, podría ser debido a mezcla con agua somera de los canales de marea y subterránea salobre de la llanura deprimida. Para corroborar este supuesto sería necesario contar con una muestra de dicho ambiente. De todas maneras en el gráfico δ^2H vs cloruros (Figura 7.11) se infiere una posible zona de mezcla que se corresponde con los parámetros químicos de conductividad y TSD (Tabla 7.5). En el caso de la muestra del pozo 20 su elevado contenido de cloruros probablemente se relaciona al contacto con sedimentos marinos. El agua subterránea al este del médano, donde se debe situar la interfase agua dulce - agua salada marina, no presenta signos de mezcla, indicando en ese caso que no hay manifestación de un proceso de intrusión salina, lo cual puede ser detectado a partir

de esta metodología (Mazor, 1976; Figini et al., 1983, Gattacceca et al., 2009; Carol et al., 2009b)

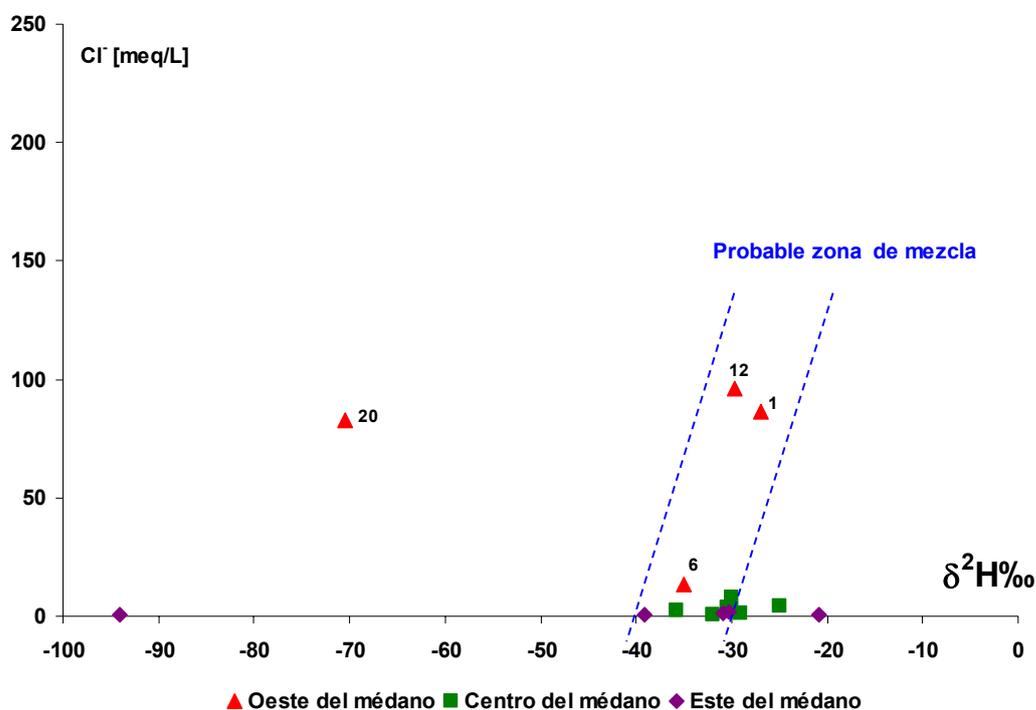


Figura 7.11. Gráfico $\delta^2\text{H}\text{‰}$ vs cloruros (julio, 2009)

Se siguieron los mismos procedimientos para analizar el segundo muestreo, de abril de 2010. Los resultados de oxígeno-18 y deuterio se presentan en la Tabla 7.6. En este caso la composición isotópica de las aguas subterráneas se encuentra en un rango de -7,6‰ a -4,1‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -49‰ a -21‰ en $\delta^2\text{H}$.

Muestra Pozo	Ambiente	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ (VSMOW) ± 0.3	$\delta^2\text{H}$ ‰ (VSMOW) ± 1	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1		-4,9	-29	8330
6	Oeste del médano	-5,0	-28	3030
12		-5,0	-32	12650
20		-4,7	-28	10850
3			-5,3	-30
5		-5,4	-30	715
31	Centro del médano	-6,9	-42	533
23		-7,2	-45	3080
24		-5,0	-27	681
38		-5,3	-30	1317
41		-6,2	-38	1130
4		-6,2	-43	915
10	Este del médano	-4,6	-28	757
33		-5,8	-33	716
39		-4,1	-21	831
9		-7,6	-49	851

Tabla 7.6. Parámetros utilizados para el análisis isotópico del muestreo abril de 2010.

Los análisis isotópicos se representaron en un diagrama convencional $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ junto a la línea meteórica local (Figura 7.12), observándose nuevamente el origen meteórico de las aguas subterráneas. En este caso, las muestras ubicadas en el sector oeste de médano no parecen mostrar la desviación que se observó en el muestreo previo donde se indicaba una posible mezcla con el agua salobre de la llanura deprimida.

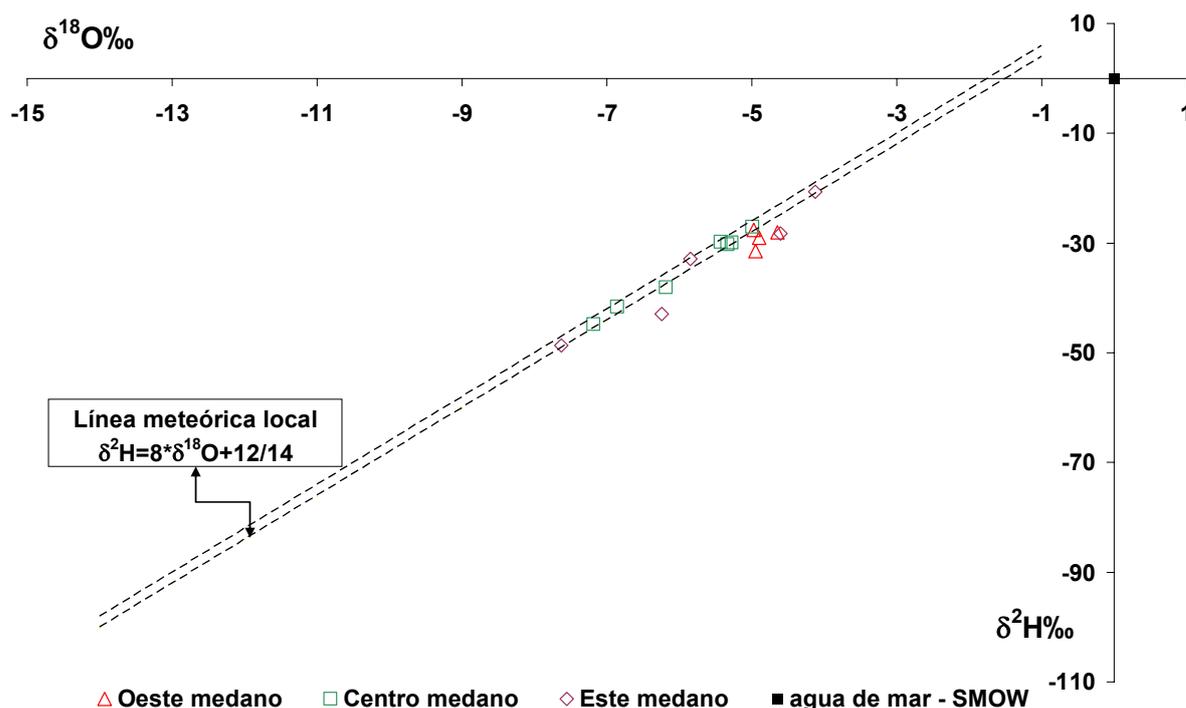


Figura 7.12. Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ (abril 2010)

La distribución espacial puede observarse en las Figuras 7.13 y 7.14, donde las muestras del sector oeste el $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -5 ‰ y -4,7‰, mientras que el $\delta^2\text{H}$ lo hace entre -32‰ y -28‰. El pozo 20 se encuentra dentro de valor medio, a diferencia del muestreo anterior donde la composición era muy empobrecida. Se plantea como una hipótesis a verificar que la variación en la composición isotópica se debería, probablemente, a procesos de infiltración preferencial de las precipitaciones. En el sector central del médano el $\delta^{18}\text{O}$ oscila entre -7,2 ‰ y -5 ‰, y el $\delta^2\text{H}$ entre -45‰ y -27‰. Por último el agua recolectada en la zona al este presenta valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre -7,6 ‰ y -4,7 ‰ y $\delta^2\text{H}$ entre -49‰ y -21‰. El pozo 10 muestra un comportamiento similar al pozo 20 y tampoco presenta valores fuera del rango obtenido para este censo.

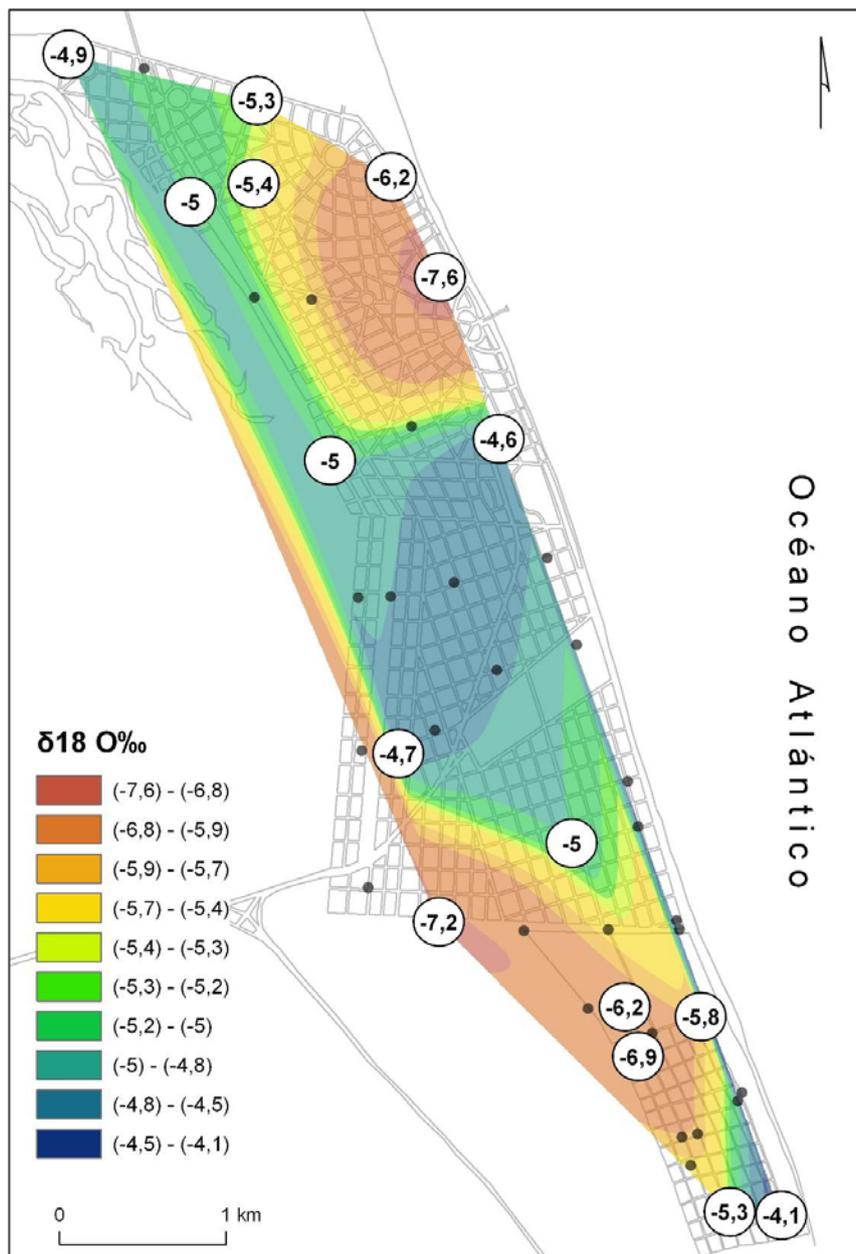


Figura 7.13. Distribución de los valores de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (abril 2010)

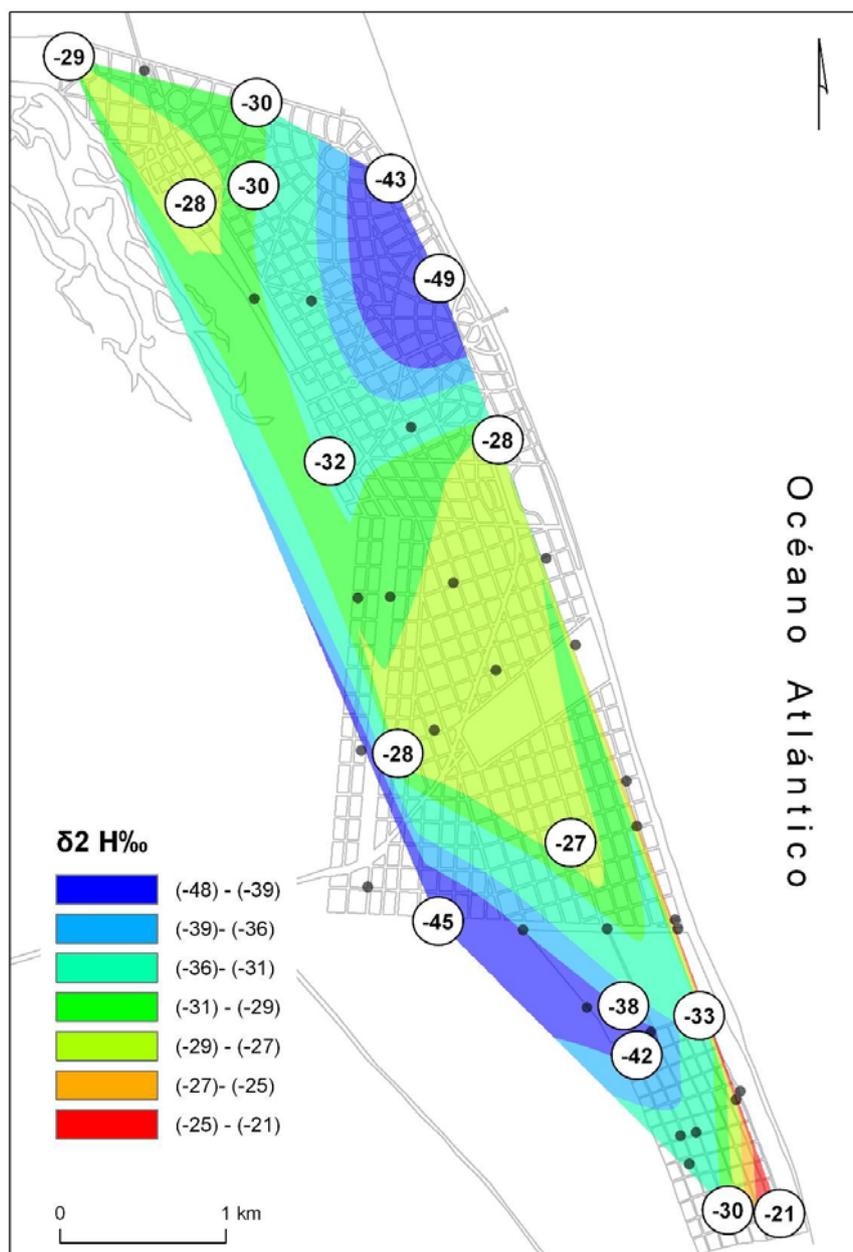


Figura 7.14. Distribución de los valores de $\delta^2\text{H}\text{‰}$. (abril 2010)

Adicionalmente se graficó la composición isotópica de los dos muestreos junto a las lluvias individuales pertenecientes a la Estación Mar del Plata (C.G.C.y C.) (INGEIS, 2009, IAEA/WMO, 2002) (Figura 7.15). Esta estación se ubica relativamente cerca del área de estudio pero no tiene registro suficiente para elaborar una recta meteórica. Sin embargo a partir de la composición isotópica de las lluvias mensuales individuales se pueden explicar los valores empobrecidos de algunas de las muestras, ya que como se observa, existen lluvias que abarcan un amplio espectro de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, pudiéndose reconocer casos de precipitaciones con valores empobrecidos.

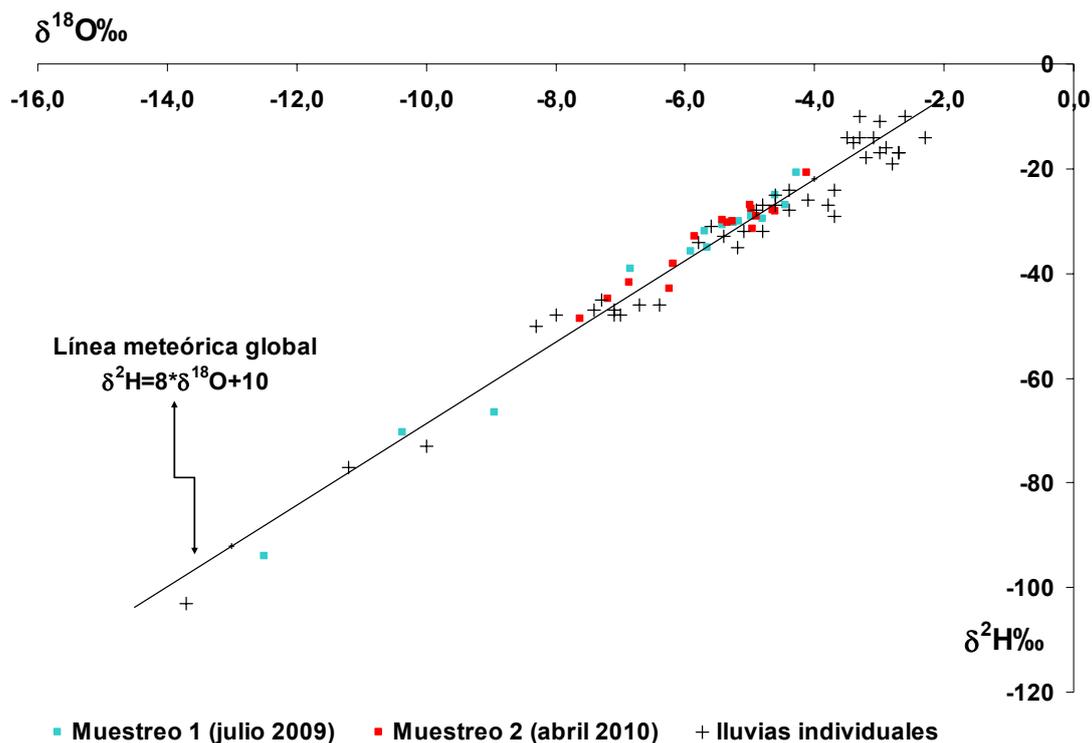


Figura 7.15. Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para ambos muestreos, juntos a lluvias individuales de la estación Mar del Plata

El análisis de las aguas subterráneas mediante el uso de isótopos estables de oxígeno-18 y deuterio permite identificar dos situaciones: la que muestra una composición isotópica similar al promedio de las precipitaciones y en otra, se exhibe una composición de lluvias individuales muy empobrecidas que se infiltran rápidamente en el sustrato arenoso alcanzando el nivel freático sin modificaciones. Además, esta herramienta combinada con otros parámetros químicos ha posibilitado corroborar que, de momento, no se detecta contaminación por intrusión salina en la interfase agua dulce-agua salada marina al este del médano. También se ha podido comprobar la mezcla del agua dulce freática con el agua salobre de la llanura deprimida al oeste de la localidad.

Por otra parte, las diferencias entre los resultados de los muestreos sugieren que se trata de un sistema dinámico, en donde el agua subterránea refleja la importancia de la recarga en el médano y a su vez, la variabilidad en las precipitaciones de la región.

De acuerdo a los resultados obtenidos, surge la necesidad de conocer la composición isotópica de la lluvia del área, y realizar más muestreos para validar las conclusiones o verificarlas.