

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MUSEO

REVISTA DEL MUSEO DE LA PLATA  
(NUEVA SERIE)

IX

Geología 77

LOS ISOTOPOS AMBIENTALES (TRITIO - CARBONO 14,  
DEUTERIO Y OXIGENO - 18) EN EL ESTUDIO DE LA SALINIZACION  
DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA  
—PROVINCIA DE BUENOS AIRES— ARGENTINA.\*

Aníbal J. Figini (1), Gabriel J. Gómez (2), Roberto A. Huarte (2) y  
Jorge E. Carbonari (2).

RESUMEN

En el Laboratorio de Tritio y Radiocarbono - LATYR- de La Plata (CONICET -Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata) se realizó la aplicación de la metodología de los isótopos denominados ambientales (Tritio, Carbono-14, Deuterio y Oxígeno-18) y la hidroquímica, en las aguas subterráneas de la ciudad de Mar del Plata - Pcia. de Buenos Aires -Argentina-, para determinar el origen de la contaminación salina del citado recurso.

A través de la caracterización química del conjunto de sales solubles de las aguas subterráneas y su composición en isótopos ambientales, se han podido determinar aspectos de la salinización que produce el deterioro del acuífero en explotación, el que se utiliza como fuente de agua potable para la ciudad de Mar del Plata.

ABSTRACT

In the Tritium and Radiocarbon Laboratory - LATYR- of La Plata (CONICET- Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata) it was performed the application of the methodology of the environmental isotopes (Tritium, Carbon-14, Deuterium and Oxygen-18) and the hydrochemistry of the groundwater in the city of Mar del Plata - Pcia de Buenos Aires - Argentina -, to determine the origin of the saline contamination of the mentioned resource.

Through the chemical characterization of the whole of the soluble salts of the groundwater and their composition in environmental isotopes it was possible to determine aspects of the salinity that is produced by the deterioration of the aquifer in exploita-

(1) LATYR- Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata - Paseo del Bosque, 1900 La Plata, Argentina.

(2) LATYR- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Museo de La Plata, Paseo del Bosque, 1900 La Plata, Argentina.

(\*) Trabajo expuesto en el "Simposio sobre problemas geológicos del litoral atlántico bonaerense" -CIC- Pcia. de Buenos Aires - Mar del Plata, mayo de 1980.

tion, which is used as the unique source of potable water for the city of Mar del Plata.

## 1-INTRODUCCION

El presente trabajo se realiza como consecuencia de la solicitud de la Cátedra de Hidrogeología de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata para la aplicación de la técnica de los isótopos ambientales como parte de un estudio Geohidrológico del área de Mar del Plata, requerido por la Empresa Obras Sanitarias de la Nación.

La fuente de agua potable de la ciudad de Mar del Plata es principalmente el agua subterránea. El crecimiento edilicio y demográfico de la ciudad balnearia en las últimas décadas, ha involucrado un aumento incesante en la explotación del citado recurso. Al problema técnico y económico que significa satisfacer la creciente demanda de agua, se le suma el hecho del deterioro del acuífero por contaminación salina. Un diagnóstico conveniente del origen y mecánica de la salinización, posibilitará la toma de medidas preventivas y la más conveniente explotación del recurso.

En el presente trabajo se realiza un análisis isotópico (H-3, C-14, D y O-18) de las aguas subterráneas de la ciudad de Mar del Plata, que permite identificar el componente líquido de la fuente salina, y se estudian los cambios isotópicos que acompañan al proceso de salinización. También se efectúa una caracterización química del conjunto de sales solubles en las aguas subterráneas del área de estudio, que suministran otros parámetros que permiten conocer aspectos del proceso de salinización.

## 2-UBICACION Y EXTENSION DE LA ZONA DE TRABAJO

El área de trabajo se encuentra ubicada en la ciudad de Mar del Plata, situada entre los 37° 57' 05" a 38° 04' 38" de latitud sur y entre 57° 31' a 57° 37' 22" de longitud oeste. La zona de estudio cubre una superficie de aproximadamente 90 km<sup>2</sup> (Fig.1).

## 3- RELACIONES CLIMATICAS

De acuerdo con los datos meteorológicos, aportados por el Servicio Meteorológico Nacional en su estación Mar del Plata (Lat. 38° 08' S; Long. 57° 35' 0) para el período 1941-60, las variaciones fundamentales en pluviometría y temperaturas no ofrecerían características salientes a lo largo de los años de la estadística obtenida.

La precipitación media anual es de 849 mm, con un máximo en marzo de 105 mm y un mínimo en junio con 50 mm.

La temperatura media anual es de 13,6°C, siendo los meses de enero y febrero los más cálidos con 19,4°C y julio es el mes más frío con una temperatura media de 7,9°C.

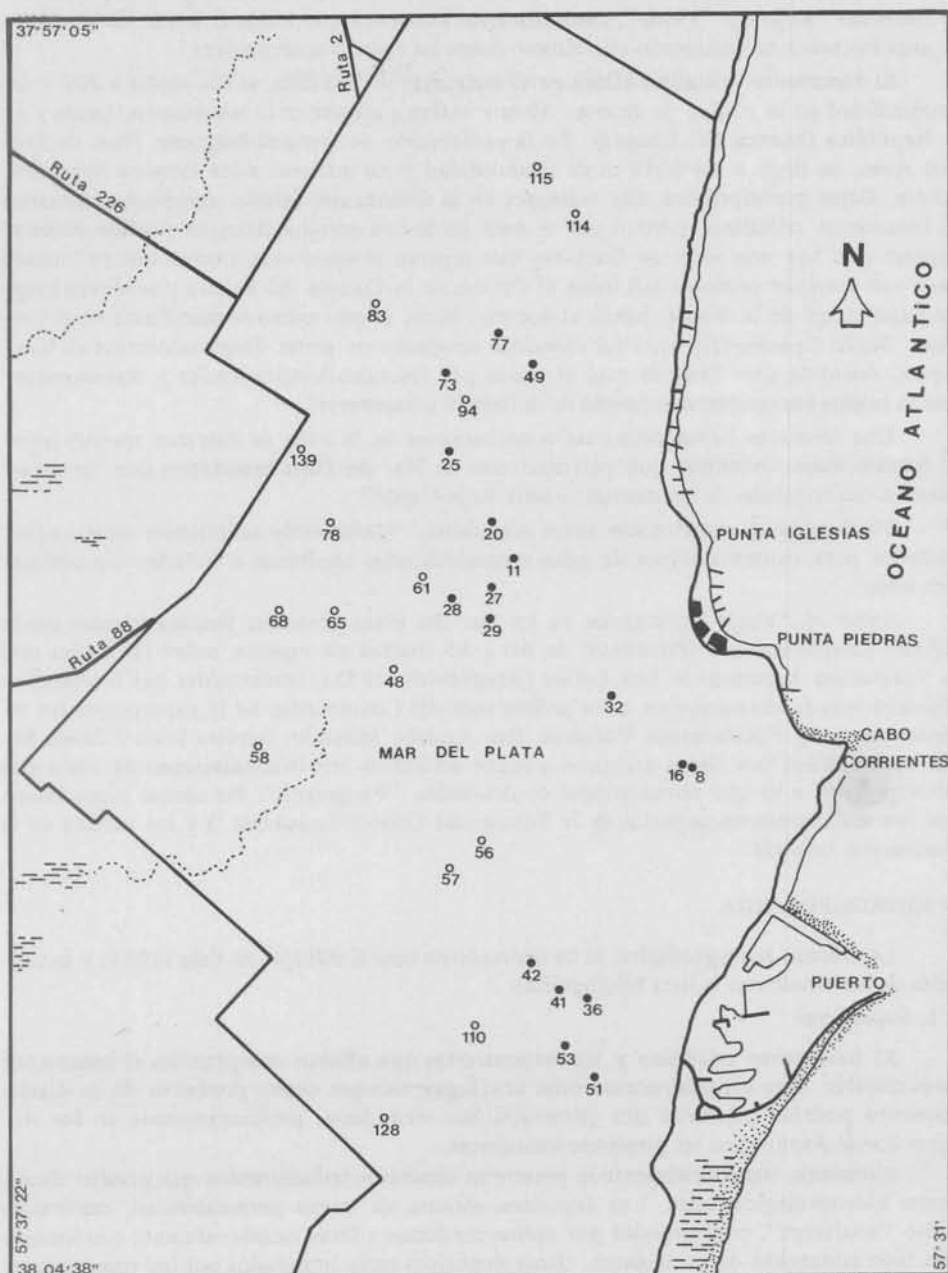
La media anual de la evapotranspiración real, calculada por el método de Thornthwaite, es de 702 mm, siendo máxima en el mes de enero con 109 mm y mínima en julio con una media de 22 mm.

El clima, según la clasificación de Thornthwaite, se tipifica como B<sub>1</sub> B<sub>1</sub>' ra' (húmedo, mesotermal y sin deficiencia de agua).

## 4- SINTESIS GEOLOGICA

Para la realización de esta muy breve síntesis sobre la Geología de Mar del Plata, se han consultado numerosos autores que se mencionan en la lista bibliográfica, aunque se han seguido esencialmente los conceptos de Groeber (1954).

Según el mencionado autor, al basamento cristalino de la cuenca bonaerense se le superpone una cubierta de sedimentos Neopaleozoicos y Triásicos alcanzados en algunas



Referencias

● POZOS SALINIZADOS

○ POZOS NO SALINIZADOS

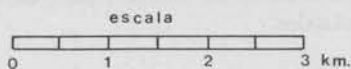


Figura 1 UBICACION DE LOS POZOS DE MUESTREO ISOTOPICO



perforaciones. Por encima están los depósitos "mayormente marinos" convencionalmente llamados "Rojo" y "Verde", esencialmente Miocenos que hacia el borde de la cuenca se asientan sobre el basamento cristalino o sobre las rocas Eopaleozoicas.

El basamento cristalino aflora en el ambiente de Tandilia, se encuentra a 200 m de profundidad en la ciudad de Buenos Aires y vuelve a aflorar en la Isla Martín García y en la República Oriental del Uruguay. En la perforación de General Belgrano, Prov. de Buenos Aires, se llegó a los 4012 m de profundidad y no atravesó a los estratos Neopaleozoicos. Otras perforaciones más recientes en la Cuenca del Salado, tampoco alcanzaron el basamento cristalino, motivo por el cual junto con estudios sísmicos y otros datos se supone que hay una serie de fracturas que separan bloques escalonados que se hundan cada vez a mayor profundidad hacia el Centro de la Cuenca del Salado y se elevan luego de pasar el eje de la misma hacia el noreste, hasta aflorar como se manifiesta en el Uruguay. Según Groeber (Op. cit.) "el cristalino uruguayo no acusa desplazamientos en bloques, mientras que Tandilia está afectada por fracturas longitudinales y transversales" "en la misma forma que el subsuelo de la llanura bonaerense".

Una areniscas bayas pliocenas o eocuatarias en la zona de Balcarce apoyan sobre el Eopaleozoico, mientras que perforaciones en Mar del Plata mostraron que "se atravesó a continuación de las mismas la serie Rojo-Verde".

Finalmente el mencionado autor manifiesta: "todos estos sedimentos están capaces de contener napas de agua y mineralizarlas conforme a las sales contenidas" "en ellos".

Sobre el "Verde" descansan ya en Mar del Plata areniscas limosas friables pardas rojizas, Chapadmalense (Plioceno), de 60 a 65 metros de espesor, sobre las cuales está la Formación Barranca de Los Lobos (Kraglievich, 1952), constituidas por limoarcillas algo arenosas dando comienzo a los sedimentos del Cuaternario. Se le superponen los sedimentos de las Formaciones Vorohué, San Andrés, Miramar, Arroyo Seco y Santa Isabel constituidos por limos arenosos a limos arcillosos con intercalaciones de tosca que corresponden a lo que comunmente se denomina "Pampeano". De menor importancia son los sedimentos encauzados de la Formación Cobo ("Lujanense") y los eólicos de la Formación Lobería.

## 5- HIDROGEOLOGIA

La síntesis hidrogeológica se ha realizado en base al trabajo de Sala (1975) y la consulta de los citados en la lista bibliográfica.

### 5.1. Superficial

El basamento cristalino y las ortocuarcitas que afloran comprenden el basamento impermeable. Son esencialmente rocas acuífugas, aunque como producto de su diaclasamiento podrían presentar una permeabilidad secundaria, preferentemente en los sectores donde disminuyen las presiones litostáticas.

Asimismo, superficialmente se presentan depósitos sedimentarios que pueden distinguirse hidrogeológicamente. Los depósitos eólicos, de buena permeabilidad, calificados como "acuíferos", conformados por arenas medianas a finas, ocasionalmente con limos y con bajo contenido de carbonatos. Otros depósitos están integrados por los comunmente conocidos "limos y loess pampeanos", con la presencia de calcáreos nodulares o niveles de tosca, que pueden clasificarse como de mediana permeabilidad y son considerados "pobremente acuíferos" o acuitardos.

### 5.2. De subsuelo

El mencionado autor postula para el ámbito bonaerense tres secciones geohidrológicas sobre el basamento impermeable: hipoparaniana, paraniana y epiparaniana.

La zona superior de la sección hipoparaniana (Mioceno inferior), comunmente conocida como "Rojo" estaría constituida preferentemente por areniscas arcillosas de color rojizo, de grano mediano a fino, a veces conglomerádicas, con intercalaciones de capas de arcilla también roja y niveles de rodados, grava, gravilla y arena de rocas cuarcíticas y graníticas, a veces compactados por arcilla, con nódulos de yeso y anhidrita. Los sedimentos acuíferos están incluidos dentro de un paquete donde prevalecen los acuitardos.

La sección paraniana corresponde al paquete sedimentario resultante de la ingresión marina homónima. Comunmente está constituida por potentes espesores de arcillas de colores azulados y verde, con abundante yeso y anhidrita; poseen intercalaciones de arena y son ricos en fósiles marinos. Se lo ha denominado también "Mioceno Verde" o simplemente "El Verde" por los perforadores de los pozos de agua. En general puede decirse que en esta sección predominan sedimentos acuícludos, en parte acuitardos, con finas intercalaciones acuíferas. Las aguas contenidas en estos estratos son altamente mineralizadas y saladas.

La secuencia del subsuelo culmina con los depósitos correspondientes a la sección epiparaniana (Plioceno al presente). El núcleo principal está conformado por un complejo sedimentario predominantemente pelítico, limo loessoide, con abundante contenido de vidrio volcánico y, en menor medida, carbonatos pulverulentos; presenta intercalaciones de tosca en sus distintos tipos; además las variaciones granométricas originan lentes y diastemas acuíferas. El resultado hidrogeológico es; un ambiente acuitardo, de baja permeabilidad, dentro del cual insertan lentes de mediana permeabilidad portadores de niveles productivos. A pesar de la anisotropía local resultante, en su conjunto y regionalmente se comporta como homogéneo. Esta sección tiene gran importancia hidrogeológica, especialmente por ser la única en relación directa con las etapas superficial y atmosférica del ciclo hidrológico. El acuífero explotado en la ciudad de Mar del Plata corresponde fundamentalmente al agua que se encuentra en ella.

## 6. GENERALIDADES

Las principales fuentes de salinidad dentro del ciclo hidrológico son las siguientes (Gat, 1975):

- a) transporte eólico de sales principalmente de origen marino, las cuales son lavadas por la lluvia o depositadas como partículas sobre la superficie del terreno.
- b) productos de reacción de los agentes de meteorización en suelos o rocas superficiales.
- c) depósitos de evaporitas, más comunmente halita y yeso, que son lixiviados por las aguas percolantes.
- d) agua de mar u otra fuente de salmuera, que intruyen y se mezclan con fuentes de aguas dulces.
- e) aguas formacionales o connatas, las que pueden incorporarse dentro de las aguas subterráneas potables.
- f) interacción de los componentes de la roca acuífera con el agua, especialmente a elevada temperatura.
- g) sales de aguas juveniles profundas, incorporadas mediante procesos de exhalación magmática.

Las sales, de distintos orígenes, se introducen en las aguas subterráneas por tres vías diferentes (Gat, op. cit):

- son lavadas por el agua meteórica a través de la zona de aereación; - acompañan al agua de la recarga desde la superficie o desde cuerpos adyacentes de aguas subterráneas;
- pueden aparecer en forma gaseosa en las exhalaciones magmáticas.

En síntesis, las sales son introducidas "in situ" por contacto directo entre las for-



maciones y el agua subterránea.

La fuente de salinidad y la forma de su penetración dentro de los cuerpos de aguas subterráneas no especifican ni la composición ni la concentración final de las sales. Las pérdidas de agua por evaporación, transpiración o procesos de ultrafiltración, concentran la solución del agua subterránea y provocan cambios químicos. A su vez ocurren reacciones químicas adicionales, por interacción con los componentes de las rocas a través de mecanismos tales como intercambio iónico, diagénesis o descomposiciones hidrolíticas. Fenómenos de recristalización y actividad bacteriana, son factores complicantes adicionales. Los cambios secundarios, son los causantes de la dificultad en la especificación del origen de las sales, en los análisis químicos de los constituyentes iónicos mayoritarios, aún cuando las fuentes primarias de salinidad pueden estar usualmente caracterizadas por un grupo distintivo de sales.

## 7. - ANTECEDENTES

El crecimiento edilicio y demográfico de la ciudad de Mar del Plata en las últimas décadas, ha involucrado un aumento continuo en la explotación del citado recurso, que va de 16 Hm<sup>3</sup> anuales en 1943, a 77 Hm<sup>3</sup> anuales en el año 1977. Con la intensa explotación del acuífero se ha observado su contaminación por afluencia de aguas saladas en las secciones Centro y Puerto de la ciudad de Mar del Plata. Las características del fenómeno de salinización responden a los siguientes hechos:

- a) Las aguas subterráneas, con un contenido medio aproximado de 800 ppm en sales solubles, comenzaron a aumentar su contenido salino en la década del cuarenta, en la zona Central de la ciudad, más densamente poblada, vecina a las plazas Colón y Mitre, y donde se ubican las primeras perforaciones;
- b) el sentido de avance del frente salino generado, es desde su parte costera, donde primitivamente estaba concentrada la explotación del acuífero, hacia el interior del continente. En la zona Central mencionada, el frente salino había alcanzado, en el año 1976, unos 2,5 km de la costa;
- c) de acuerdo a la información proporcionada por el Lic. V. Ferrante de la Gerencia Mar del Plata de Obras Sanitarias de la Nación, extraída de los análisis químicos seriados de 1948 a 1976, puede observarse un lento aumento en el contenido de sales solubles en los pozos que han sufrido salinización en la zona Central, pasando de las 90 ppm a las 250 ppm en cloruros a lo largo de varios años; sobrepasando dicho nivel, el aumento es mucho más rápido, llegándose en un período de 4 a 5 años a límites que superan los índices de potabilidad (700 ppm en cloruros);
- d) los picos máximos detectados en sales disueltas totales, de acuerdo con la información suministrada por la Empresa Obras Sanitarias de la Nación, antes de sacar de servicio definitivamente a la perforación, fueron en la sección Centro de aproximadamente 7500 ppm (pozo N° 37, julio 1954) y en la sección Puerto de aproximadamente 2900 ppm (pozo N° 51, mayo de 1973);
- e) la Empresa Obras Sanitarias comprueba que regulando el régimen de extracción de los pozos salinizados mantiene, durante un largo tiempo, sus aguas con calidades permisibles para el uso humano, lo que indicaría que dichos pozos presenten fluctuaciones en el contenido de sales solubles en el tiempo, con el régimen de explotación.

## 8. - LOS ISOTOPOS AMBIENTALES EN LAS FUENTES DE AGUAS SALINAS

La abundancia de las especies isotópicas deuterio y oxígeno-18 cambian en el ciclo natural del agua, como resultado de efectos cinéticos, tales como la más baja velocidad de evaporación de los isótopos pesados, el fraccionamiento isotópico inherente a los cambios de fase del agua y equilibrios de intercambio isotópico establecidos entre los sedimentos o evaporitas y la solución acuosa con la cual están en contacto. Como

consecuencia de los procesos de fraccionamiento isotópico, las aguas meteóricas están empobrecidas en isótopos pesados comparándolas con el agua oceánica, y su composición particular estará determinada por los parámetros climáticos y geográficos (Dansgaard, 1964). Las aguas superficiales expuestas a evaporación, se enriquecen en deuterio y oxígeno-18, siendo correlacionadas sus composiciones isotópicas a lo largo de la "línea de evaporación" (Dansgaard, op. cit.).

Las aguas de los hidratos, salmueras superficiales y las aguas geotermales, adquieren una composición isotópica distintiva. Un caso similar ocurre con las aguas formacionales, las cuales están en contacto prolongado con la roca.

El aspecto fundamental del uso de la metodología isotópica como una técnica para dilucidar el origen de la salinidad, es la exacta definición, en la mayoría de los casos, de la composición en isótopos estables pesados del agua subterránea dulce y asimismo aquella de la fuente de agua salina. Existe ambigüedad en la composición de aguas mineralizadas y salmueras, excepto en el caso de agua de mar cuya composición isotópica es bien conocida. En otras fuentes de agua salina, se puede al menos indicar campos de posible composición isotópica y química.

Finalmente se debe considerar el efecto de procesos secundarios en el acuífero, sobre la composición en isótopos estables pesados de aguas salinas. Las pérdidas de agua por evapotranspiración que ocurren por difusión a través de caminos tortuosos en el suelo, o en los poros de las rocas, o por intermedio de freatofitas, constituye un proceso que aparentemente no es acompañado por ningún fraccionamiento isotópico significativo (Zimmerman et al., 1967). En el proceso de ultrafiltración a través de membranas arcillosas, que es un mecanismo por el cual las sales se concentran, resulta algún enriquecimiento isotópico de deuterio y oxígeno-18. La presencia de minerales arcillosos podría dar lugar a un intercambio isotópico de hidrógeno. La interacción del agua con los carbonatos de origen marino u otras rocas, conducen al intercambio isotópico de oxígeno, que produce un enriquecimiento de las especies isotópicas pesadas en el agua subterránea (Gat, op. cit.).

Las reacciones de intercambio isotópico de deuterio y oxígeno-18 y el fraccionamiento isotópico por ultrafiltración, cuyas acciones conforman la composición isotópica de las aguas mineralizadas subterráneas, actúan muy lentamente a temperaturas y presiones moderadas (Gat, op. cit.).

En la mayoría de los ambientes geohidrológicos, la composición en isótopos estables del agua subterránea puede considerarse como una propiedad conservativa. Las reacciones de intercambio isotópico sólo transcurren a velocidades mensurables a altas temperaturas ya que no solamente se acelera la reacción a mayor temperatura sino que el grado del posible intercambio aumenta, como consecuencia de la dependencia de la constante de equilibrio de la reacción con la temperatura.

Los isótopos ambientales radioactivos, tritio y carbono-14, se originan en la alta atmósfera, y posteriormente se oxidan formando la molécula de agua tritiada, HTO, y de dióxido de carbono,  $^{14}\text{CO}_2$ , radioactivo. Estas moléculas se mezclan con el vapor de agua y el dióxido de carbono atmosférico, por lo que los elementos naturales que se encuentran en equilibrio dinámico con la tropósfera adquieren una determinada concentración en tritio y carbono-14. Las aguas de lluvia y cuerpos de aguas superficiales, cuando se infiltran, pierden su contacto con la atmósfera y se interrumpe el proceso de intercambio con la misma. Por consiguiente las concentraciones de tritio y carbono-14 van a ir disminuyendo a través de sus decaimientos radioactivos con un período de semidesintegración de 12,26 años y 5730 años respectivamente. La concentración residual de ambos radioisótopos en el agua subterránea dependerá del tiempo de residencia del agua en el reservorio.

Los isótopos radioactivos del hidrógeno y del carbono constituyen excelentes trazadores naturales para estudios hidrológicos. La determinación de estos isótopos radioac-

tivos ambientales en el agua subterránea dulce y en la fuente de agua salina, permite estudiar aspectos del proceso de salinización de acuíferos.

## 9.- METODOS EXPERIMENTALES

Los análisis de los isótopos estables fueron realizados en el Centro de Energía Nuclear Na Agricultura - CENA - de Piracicaba, Brasil. La determinación de oxígeno-18 se realiza por el método de Epstein y Mayeda (1953). Las mediciones se efectuaron de acuerdo a la técnica usada por Mc Kinney et. al. (1950), con un espectrómetro de masa Variant-Mat modelo CH-4. El error analítico es del orden  $0,2 \text{ ‰}$ , con el criterio de un sigma.

La determinación de deuterio se llevó a cabo de acuerdo a la técnica empleada por Friedman (1953) y utilizando un espectrómetro de masa Variant-Mat modelo GD-150. El error analítico es del orden del  $2 \text{ ‰}$ , con el criterio estadístico de un sigma.

Los contenidos en isótopos pesados son expresados en desviaciones por mil,  $\delta \text{ ‰}$ , respecto del Standard Mean Ocean Water - SMOW - (Craig, 1961):

$$\delta \text{ ‰} = \frac{(R_{\text{muestra}} - 1)}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000$$

donde R se refiere a las siguientes relaciones isotópicas:

$$R = \text{O}^{18} / \text{O}^{16}$$

ó

$$R = \text{D/H}$$

Los análisis de los isótopos radioactivos, tritio y carbono-14, fueron realizados en el laboratorio de Tritio y Radiocarbono - LATYR - de La Plata. El tritio se lo midió con un espectrómetro de centelleo líquido, marca Beckman modelo LS-100, previo enriquecimiento isotópico por vía electrolítica, por un factor de 14, de las muestras de agua (Figini et. al. 1977a,b). El límite de detección (criterio estadístico de dos desviaciones estandar y mil minutos de tiempo de medición) para una muestra enriquecida es de 3UT. La concentración de tritio en aguas se expresa convencionalmente en unidades tritio ( $1 \text{ UT} = \text{T/H} = 10^{-18}$ ).

Los análisis de radiocarbono fueron realizados con un contador proporcional, usando el dióxido de carbono como gas de conteo (Figini et al, 1977c). El contenido de carbono-14 es expresado en porcentaje de carbono moderno (% mod.), definido por:

$$\% \text{ mod.} = \frac{A_m}{0,95 \cdot A_{\text{ox}}} \cdot 100$$

$A_m$ : actividad de la muestra

$A_{\text{ox}}$ : actividad del ácido oxálico National Bureau of Standard (EEUU).

El error analítico de la medición de radiocarbono, se lo expresa con el criterio de una desviación estandar ( $\pm 1\sigma$ ).

## 10.- ANÁLISIS ISOTÓPICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El muestreo realizado por los autores, se efectuó en perforaciones de la Empresa Obras Sanitarias de la Nación cuando se hallaban en régimen normal de explotación. La



profundidad media de los pozos, según información de la mencionada Empresa, es de aproximadamente unos 90 metros, y se explotarán posiblemente más de una capa productiva de agua. Los tenores máximos en sales disueltas detectados en aguas subterráneas, durante el período de muestreo, fueron de 1100 a 2500 ppm. La ubicación de los sitios de muestreo son indicados en la Fig. 1. Los datos del contenido isotópico de las muestras de agua son dados en el Cuadro 1.

En el área de trabajo se han analizado los contenidos isotópicos (H-3, C-14, D y O-18) de las aguas subterráneas dulces (contenido medio de 830 ppm en sales solubles) y salinizadas de las secciones Centro y Puerto de Mar del Plata (contenido en sales solubles mayor de 1000 ppm), y de una muestra de agua de mar.

Las muestras de aguas dulces de ambas secciones poseen valores similares en el contenido de los isótopos estables pesados, siendo su valor medio  $\delta_D = -30 \text{ ‰}$  y  $\delta_{18} = -5,1 \text{ ‰}$ . Las aguas salinizadas en las dos zonas, independientes de la concentración en sales solubles totales, presentan tenores similares en D y O-18, siendo su concentración media  $\delta_D = -31 \text{ ‰}$  y  $\delta_{18} = -5,0 \text{ ‰}$ .

El agua de mar analizada posee una concentración en isótopos estables pesados de  $\delta_D = -4,4 \text{ ‰}$  y  $\delta_{18} = -0,08 \text{ ‰}$ .

El contenido de carbono-14 de las aguas subterráneas dulces y salinizadas, en el área de estudio, presentan un ámbito del 63 % al 91 % de carbono moderno, no existiendo una correlación entre la concentración radiocarbónica y el contenido en sales solubles.

Las concentraciones de tritio, en las aguas subterráneas muestreadas, están en su mayoría por debajo del límite de detección.

## 11.- INTERPRETACION DE LOS DATOS ISOTOPICOS

Si se produce la mezcla de aguas con diferentes contenidos en D y O-18, como resultante se tiene un agua cuya composición isotópica será proporcional a la relación de mezcla y a los contenidos isotópicos de cada uno de los componentes. Es análogo el razonamiento a seguir en el caso de la composición isotópica resultante de la mezcla de una solución salina con un cuerpo de agua dulce, siendo la ecuación representativa una recta que se denomina "línea de mezcla",  $\delta_D = f(\delta_{O-18})$ .

Si para el acuífero de la ciudad de Mar del Plata, se formulara la hipótesis de que existe una directa conexión, a través de la formación geológica que lo constituye, entre el agua de mar y el agua subterránea, la intrusión marina en el acuífero costero provocaría en su interfase, un agua mezcla. La concentración en isótopos estables pesados de ésta, sufrirá una variación en proporción a la relación de mezcla y se encontrará sobre la "línea de mezcla".

Mediante los puntos dados por la concentración media isotópica del agua subterránea dulce ( $\delta_D = -30 \text{ ‰}$ ;  $\delta_{O-18} = -5,1 \text{ ‰}$ ) y el agua de mar ( $\delta_D = -4,4 \text{ ‰}$ ;  $\delta_{O-18} = -0,08 \text{ ‰}$ ) del área de la ciudad de Mar del Plata, se obtiene la línea de mezcla. Se indica también el punto correspondiente al contenido medio del acuífero salinizado (Fig. 2). De la observación del mencionado diagrama, resulta que la composición isotópica media del agua subterránea salinizada no se encuentra sobre la "línea de mezcla". Lo que da un indicio que no sería significativa la presencia de aguas marinas, aunque por sí sola no es una evidencia conclusiva.

También se puede relacionar el contenido de isótopos estables con el tenor salino, lo que permite hallar otra "línea de mezcla", cuya ecuación es una recta:  $\delta_D = f(C\ell^-)$ ;  $\delta_{O-18} = f(C\ell^-)$ . Para las aguas del área de la ciudad de Mar del Plata, se obtendrán, mediante el contenido salino medio y la concentración de D y O-18 del acuífero dulce ( $C\ell^-$ : 3 meq/l;  $\delta_D = -30 \text{ ‰}$ ;  $\delta_{O-18} = -5,1 \text{ ‰}$ ) y del agua de mar ( $C\ell^-$ : 550 meq/l;  $\delta_D = -4,4 \text{ ‰}$ ;  $\delta_{O-18} = -0,08 \text{ ‰}$ ), los puntos que permiten trazar las "líneas de mezcla" para los respectivos isótopos (fig. 3). Se observa que no habría coincidencia entre las "líneas

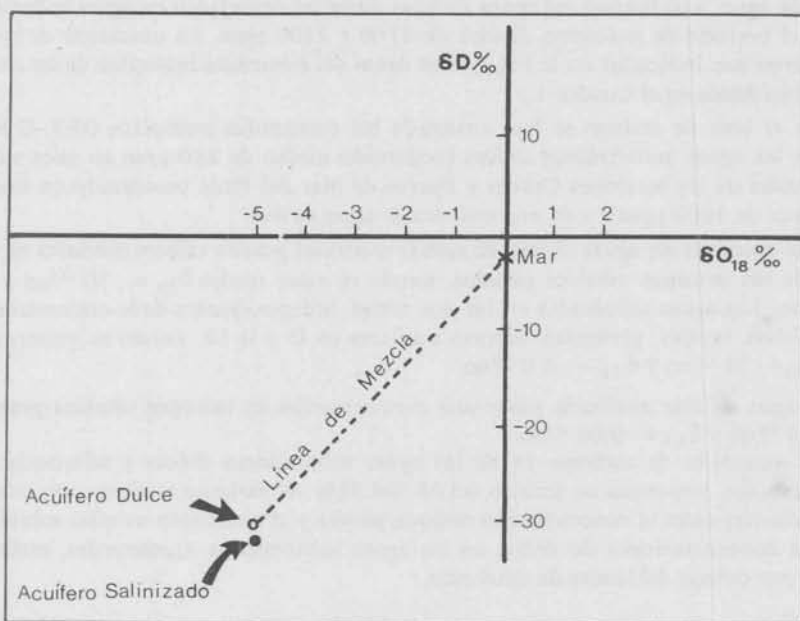


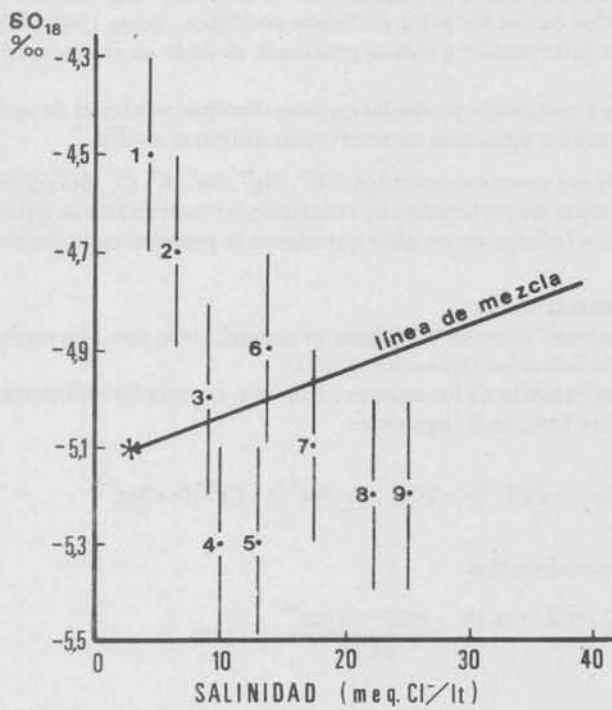
Figura 2 Relación entre  $SO_4$  y  $SD$  en el acuífero dulce y salinizado de Mar del Plata

de mezcla" y la tendencia de los puntos correspondientes a los valores del agua subterránea salinizada, sugiriendo que el agua de mar no sería uno de los componentes de la mezcla, aunque la divergencia no es de una magnitud determinante.

Si se combinan aguas de diferentes edades se obtendrá, como resultante, un agua cuya concentración en H-3 y C-14 será función de la relación de mezcla y de los contenidos isotópicos de cada uno de los componentes. En el caso de existir una conexión directa entre el agua de mar y el agua subterránea, al poseer ambas diferentes contenidos isotópicos, la intrusión al acuífero costero daría lugar a una modificación en la concentración de H-3 y a un incremento en el contenido radiocarbónico. De los datos obtenidos de las aguas subterráneas del área en estudio, podemos observar que en su mayoría las concentraciones de H-3 están por debajo del límite de detección y que no existe una correlación entre C-14 y el tenor en sales solubles. Las variaciones halladas en la concentración radiocarbónica podrían sugerir que se deberían, entre otros factores a una mezcla de aguas subterráneas de diferentes tiempos de residencia.

## 12.- HIDROQUIMICA

El conocimiento de las características químicas de las aguas subterráneas de la ciudad de Mar del Plata, se ha efectuado a través de la recopilación, análisis y sistematización de los antecedentes hidroquímicos suministrados por la Empresa Obras Sanitarias de la



Nº	POZO	Cl'(meq lt.)
1	73	4,5
2	36	6,6
3	53	9,3
4	28	10
5	8	13
6	51	14
7	11	17,7
8	16	22,5
9	27	25,4

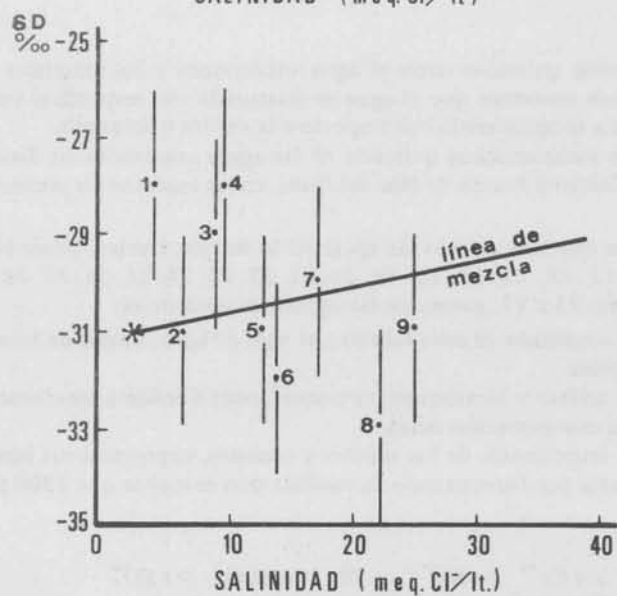


Fig.3: Relación Salinidad-Isótopos Estables en las Aguas Subterráneas de Mar del Plata

Nación. Las muestras de aguas analizadas fueron extraídas de aproximadamente un centenar de pozos de las secciones Centro y Puerto de Mar del Plata. Se han considerado las composiciones químicas del agua extraída con un criterio estadístico, empleándose para ello todos los análisis realizados por la Empresa en forma periódica, desde 1948 a 1978, como control de calidad. La información química procesada es dada en forma sintética en la Fig. 4.

Las aguas potables, cuyo contenido promedio en sales disueltas totales es de aproximadamente 830 ppm, presentan las siguientes características químicas medias:

- la composición química de sus iones mayoritarios,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  y  $\text{HCO}_3^-$  es prácticamente similar en todas las perforaciones. Asimismo las características químicas casi no presentan variaciones a lo largo de los años que abarca la presente compilación estadística.
- el tipo de agua es bicarbonatada sódica.
- la concentración de los aniones cloruros y sulfatos es normal, pero son hipercarbonatadas, según la clasificación de Schoeller (Schoeller, 1962).
- la clasificación según la importancia de los aniones y cationes, expresadas sus concentraciones en r miliequivalentes por litro, es la siguiente:

$$r \text{HCO}_3^- > r \text{Cl}^- > r \text{SO}_4^{--} ; r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{++} > r \text{Mg}^{++}$$

Arrojando las siguientes relaciones medias:

$$r \text{Mg}^{++} / r \text{Ca}^{++} = 0,90 ; r \text{SO}_4^{--} / r \text{Cl}^- = 0,19 ; \frac{r \text{Cl}^- - r \text{Na}^{++}}{r \text{Cl}^-} = - 3,00$$

$$\frac{r \text{Ca}^{++} + r \text{Mg}^{++}}{r \text{Na}^+} = 0,18$$

- considerando los equilibrios químicos entre el agua subterránea y los minerales más comunes en los acuíferos, nos muestran que el agua es insaturada con respecto al yeso o anhidrita, pero está saturada a sobresaturada con respecto a la calcita o aragonita.

Para el análisis de las características químicas de las aguas salinizadas las dividiremos en las dos secciones, Centro y Puerto de Mar del Plata, en las cuales se ha presentado el fenómeno.

Los cambios químicos que han sufrido las aguas en la sección Centro, pozos N° 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 35, 37, 38, 47, 49, 50, 61, 73 y 77, presentan las siguientes tendencias:

- con el incremento en el contenido de sales solubles, el tipo de agua cambia de bicarbonatada sódica a clorurada sódica.
- el contenido en los iones sulfato y bicarbonato es normal, pero tienden a ser cloruradas medias con el aumento en la concentración salina.
- la clasificación según la importancia de los aniones y cationes, expresadas sus concentraciones en r miliequivalentes por litro, cuando su residuo seco es mayor que 1500 ppm, es la siguiente:

$$r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{++} > r \text{Mg}^{++} ; r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^- > r \text{SO}_4^{--}$$

Las relaciones iónicas se modifican con el aumento en la salinidad de las aguas subterráneas. La tendencia de estos cambios la podemos indicar para el caso de máxima concentración en sales solubles, 7500 ppm, encontradas en las aguas del pozo n° 37 en julio de 1954.;

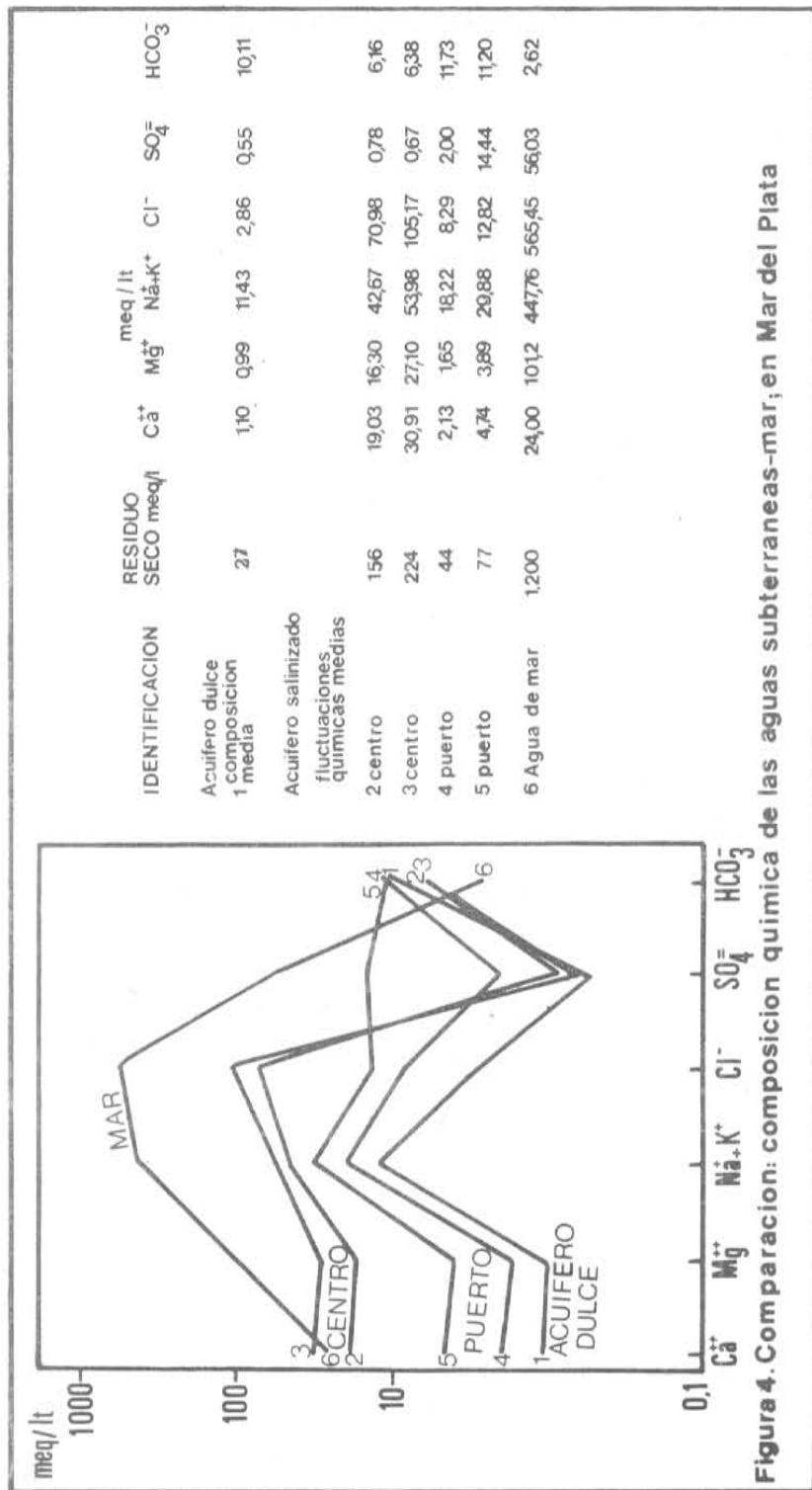


Figura 4. Comparacion: composicion quimica de las aguas subterranas-mar; en Mar del Plata



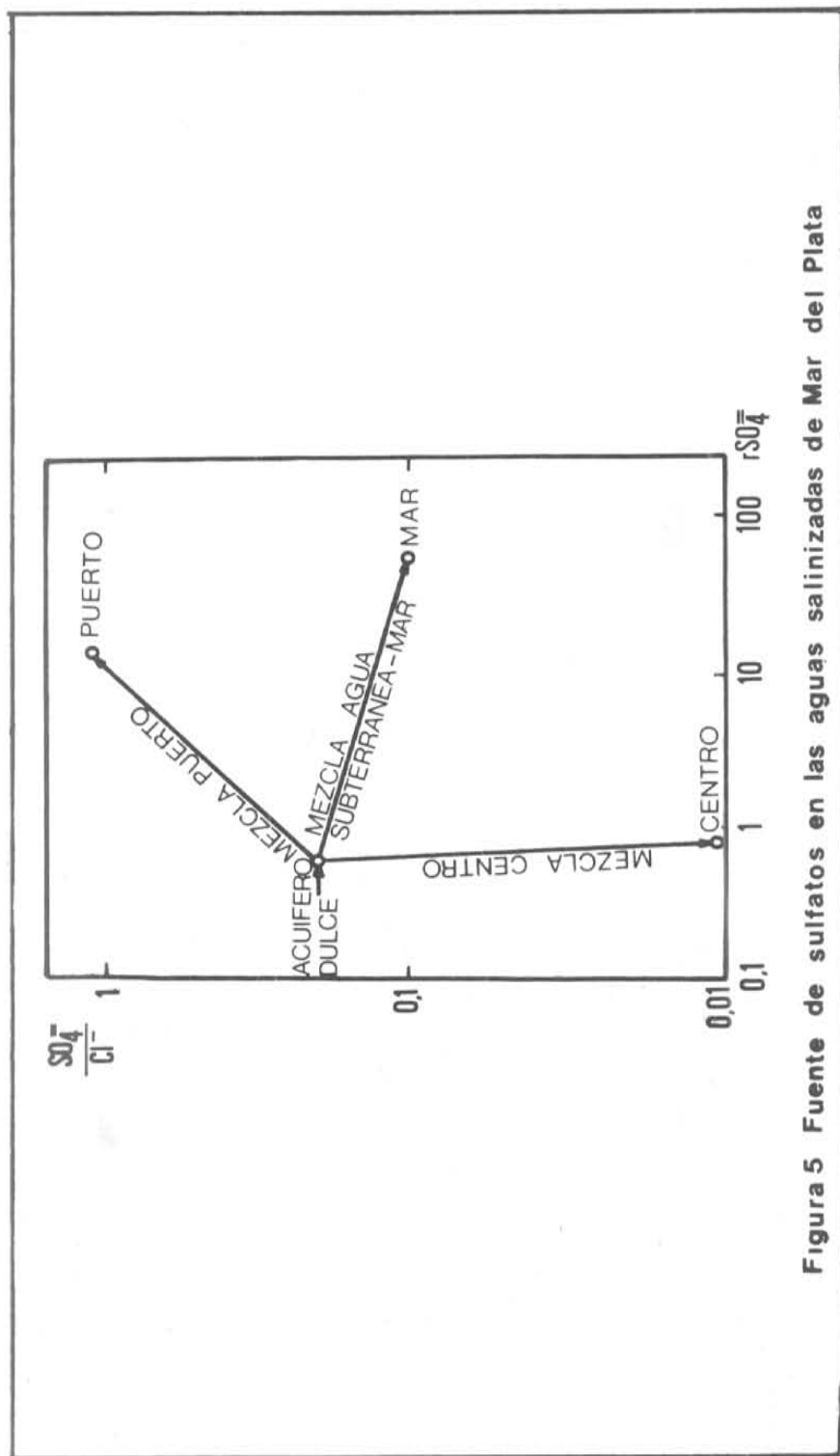


Figura 5 Fuente de sulfatos en las aguas salinizadas de Mar del Plata

$$r \text{Mg}^{++} / r \text{Ca}^{++} = 0,88 ; r \text{SO}_4^{=} / r \text{Cl}^- = 0,01 ; \frac{r \text{Cl}^- - r \text{Na}^+}{r \text{Cl}^-} = + 0,49$$

$$\frac{r \text{Ca}^{++} + r \text{Mg}^{++}}{r \text{Na}^+} = 1,1$$

d) considerando los equilibrios químicos entre el agua y los minerales más comunes en los acuíferos, se observa que el agua es insaturada con respecto al yeso o anhidrita, pero está saturada o sobresaturada con respecto a la calcita o aragonita.

e) en el sector salinizado hemos muestreado los pozos N° 32 y 49, que estaban fuera de servicio hacia varios años; la muestra de agua se tomó luego de bombear por espacio de unas 4 horas con un equipo cuyo caudal de extracción era de aproximadamente 60 m<sup>3</sup>/h; los residuos sólidos fueron de 1468 ppm y 2147 ppm para los pozos N° 32 y 49 respectivamente y las características químicas son coincidentes a las que poseían cuando estaban en servicio y tenían similar nivel de salinización.

Las modificaciones en las características químicas que han sufrido las aguas subterráneas de la sección Puerto de Mar del Plata, pozos N° 36, 41, 42, 51 y 53, presentan las siguientes tendencias.

a) con el incremento en el contenido de sales solubles, el tipo de agua ha variado de bicarbonata sódica hasta llegar a ser sulfatada clorurada sódica en su máximo contenido en residuo seco (2850 ppm del pozo N° 51 y 2360 ppm del pozo N° 53).

b) las aguas son bicarbonatadas normales, oligosulfatadas y oligocloruradas, al incrementarse el contenido salino.

c) la clasificación según la importancia de los cationes y aniones, expresadas sus concentraciones en r miliequivalentes por litro, de las aguas que han alcanzado una máxima salinización en esta sección (pozo N° 51 con 2850 ppm en mayo de 1973; pozo N° 53 con 2360 ppm en marzo de 1974), es la siguiente:

$$r \text{Na}^+ > r \text{Ca}^{++} > r \text{Mg}^{++} ; r \text{SO}_4^{=} > r \text{Cl}^- > r \text{HCO}_3^-$$

Correspondiéndoles las relaciones iónicas:

$$r \text{Mg}^{++} / r \text{Ca}^{++} = 0,83 ; r \text{SO}_4^{=} / r \text{Cl}^- = 1,1 ; \frac{r \text{Cl}^- - r \text{Na}^+}{r \text{Na}^+} = - 1,4$$

$$\frac{r \text{Mg}^{++} + r \text{Ca}^{++}}{r \text{Na}^+} = 0,29$$

d) considerando los equilibrios químicos entre el agua y los minerales más comunes en los acuíferos, se observa que el agua es insaturada respecto al yeso o anhidrita y saturada o sobresaturada en calcita o aragonita.

Las tendencias en las modificaciones de las características químicas, tipo de agua y relaciones iónicas, es diferente en las aguas subterráneas de las secciones Centro y Puerto de Mar del Plata. Esto indicaría diferencias en la naturaleza de las sales que provocan el deterioro del acuífero en las dos zonas analizadas.

Si bien las fuentes primarias de salinidad pueden usualmente estar caracterizadas por un grupo distintivo de sales, los cambios químicos secundarios pueden ser los causantes de la dificultad de especificar el origen de las sales, a partir de los análisis químicos de los constituyentes iónicos mayoritarios.

Si el origen y mecanismo de salinización fuera debido a la intrusión marina en el acuífero costero de la ciudad de Mar del Plata, las características químicas resultantes de-

berían en cierta forma responder a dicho proceso. Mediante planteos teóricos de mezcla, de agua subterránea dulce-mar, la determinación de las tendencias en las variaciones de las características químicas, tipo e índices, y su intercomparación con los parámetros del agua subterránea salinizada, dan como resultado que las modificaciones que sufre cada parámetro no responderían a la hipótesis indicada como proceso de salinización.

Si se determina la "línea de mezcla" en un gráfico de relación de concentraciones de  $\text{SO}_4 / \text{Cl}^-$  en función del contenido del ión sulfato, por medio de los contenidos de dichos iones en el agua subterránea y el agua de mar, podemos conocer la fuente del ión sulfato en las aguas subterráneas salinizadas (Rightmire et al., 1974). Las relaciones iónicas que presentan las aguas salinizadas en la ciudad de Mar del Plata (Fig. 5) caen fuera de la "línea de mezcla", es decir la fuente de ión sulfato no sería el agua de mar, sino que podría deberse a minerales sulfatados presentes en el material acuífero.

Las consideraciones químicas realizadas, indicarían que las aguas subterráneas de Mar del Plata no se mezclarían con agua de mar.

### 13.- CONCLUSIONES

La aplicación simultánea de los métodos isotópicos y químicos han permitido conocer determinados aspectos de la salinización del acuífero de la ciudad de Mar del Plata, que con la utilización aislada de dichos métodos, no hubiese sido posible.

Las conclusiones a las que se arribaron son las siguientes:

- a.— El agua de mar no sería la fuente principal de salinización del agua subterránea en las secciones Centro y Puerto de la ciudad de Mar del Plata. Esta proposición se fundamenta en los resultados de las metodologías aplicadas: la de los isótopos estables, sin ser conclusiva, indicaría que el componente líquido no sería agua marina; la hidroquímica revelaría que el origen de las sales no sería el agua de mar; y la relación entre los resultados de ambas metodologías, marcaría una tendencia a considerar que el agua de mar no sería uno de los componentes de la mezcla.
- b.— La interpretación de los isótopos radioactivos, señala que podrían existir mezclas de aguas subterráneas de diferentes tiempos de residencia.
- c.— La interpretación de la información hidroquímica determina diferencias en las características de las sales que contaminan el acuífero dulce, entre las zonas Centro y Puerto de la ciudad de Mar del Plata.

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas en los puntos anteriores, la salinización del acuífero dulce, en el área de estudio, podría deberse principalmente a la afluencia de aguas mineralizadas existentes dentro del complejo acuífero. Estas se originarían por disolución de sales presentes en los sedimentos por los cuales circula.

Este trabajo será continuado con el objeto de detectar, en un largo plazo, las posibles variaciones decididamente fuera de la tendencia secular; es decir, cuando pueda darse mayor deterioro en la calidad del agua del acuífero.

### AGRADECIMIENTOS

A los Profesores José M. Sala y Mario Hernández por su aporte de información sobre el área de estudio.

A la Lic. Nilda Gonzalez por haber suministrado los análisis químicos.

Al Lic. Eduardo E. Kruse por su colaboración en la extracción y transporte de las muestras de aguas.

Al Dr. Francisco Fidalgo por su colaboración en la elaboración de la síntesis geológica.

Al Lic. Néstor Porro por la lectura del manuscrito.

A la Empresa Obras Sanitarias de la Nación - Gerencia Mar del Plata- por su valioso aporte de datos y colaboración en el muestreo de las aguas subterráneas.

Al Profesor Eneas Salati del Centro de Energía Nuclear Na Agricultura —CENA— de Piracicaba, Brasil, por las determinaciones de deuterio y oxígeno-18.

#### BIBLIOGRAFIA

- CRAIG, H. 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science* 133: 1833-34.
- DANSGAARD W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-68.
- EPSTEIN S. and MAYEDA T. 1953. Variation of 0-18 content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta* 4: 213.
- FIGINI A. J., HUARTE R. y GOMEZ G. 1977a. Enriquecimiento electrolítico de tritio. Obra del Centenario del Museo de La Plata. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Tomo IV, Geología: 285.
- FIGINI A. J., HUARTE R. y GOMEZ G. 1977b. Medición de bajos niveles de tritio con un sistema de centelleo líquido. Reuniones Técnicas y Científicas. Comisión Nacional para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua. CONFAGUA/C 10/3. Mar del Plata.
- FIGINI A. J., HUARTE R. y GOMEZ G. 1977c. Sistema de medición de carbono-14. Reuniones Técnicas y Científicas. Comisión Nacional para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua. CONFAGUA/C 10/4. Mar del Plata.
- FRIEDMAN I. 1953. Deuterium content of natural waters and other substances. *Geochim. Cosmochim. Acta* 4:89.
- GAT J. R. 1975. Elucidating salination mechanism by stable isotope tracing of water sources. International Symposium on Brackish water as a factor in development. Beer-Sheva, Israel (ed. A. Issar) 15-23.
- GROEBER P. 1954. Geología e hidrología en Mar del Plata en relación con el problema de suministro de agua potable a la población urbana. *Rev. Mus. Municip. Cienc. Nat. y Trad. Mar del Plata*, T. I, Mar del Plata.
- KRAGLIEVICH J.L. 1952. El perfil geológico de Chapadmalal y Miramar, Prov. de Bs. Aires. *Rev. Mus. Munic. Cienc. Nat. y Tradic. Mar del Plata*, vol. I entr. 1º Mar del Plata.
- MC KINNEY C. R., MC CREA J. M., EPSTEIN S., ALLEN H.A. AND UREY H. C. 1950. Improvements in mass spectrometer for the measurement of small differences in isotope abundance ratios. *Rev. Sci. Instrum* 21: 724.
- RIGHTMIRE F. J., PEARSON JR. AND BACK W. 1974. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology (Proc. Symp. Vienna 1974). IAEA. Vienna 191-207.
- RUIZ HUIDOBRO O. J. 1971. La intrusión de agua de mar en el acuífero de Mar del Plata, 1er. Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica, Vol. 2, Sec. 3: 845-858. España.
- RUIZ HUIDOBRO O. J. 1977. Invasión en acuíferos costeros. Documento de Base en Reuniones Cient. y Tecnol. paralelas a la Conf. Mund. del Agua. Nac. Unid. Grupo de Trabajo N° 12. Inéd. Mar del Plata.
- RUIZ HUIDOBRO O. J. y TOFALO O. R. 1975. La intrusión de agua de mar en acuíferos litorales. Su control en Mar del Plata. VI Congreso Geológico Argentino (Bahía Blanca). T. II: 515-523.
- SALA J. M. 1975. Recursos hídricos (especial mención de las aguas subterráneas). Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires VI Congr. Geol. Arg. Buenos Aires.
- SCHOELLER H. 1962. Les aux souterraines. Masson, París.
- TAPIA A. 1937. Las cavernas de Ojo de Agua y Las Hachas. *Dir. Nac. Min. y Geol.*, Vol. 43. Buenos Aires.
- TERUGGI M. E. y KILMURRAY J. O. 1975. Tandilia. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires. VI Congr. Geol. Arg. Buenos Aires.
- ZIMMERMANN U., EHHAULT D. AND MUNNICH H.O. 1967. Soil-Water movement and evapotranspiration: Changes in the isotopic composition of the water. *Isotopes in Hydrology (Proc. Symp. Vienna 1966)* IAEA. Vienna: 567-585.

Pozo Nº	Residuo Seco, ppm	$\delta$ 0-18 * ‰	$\delta$ D * ‰	C-14 % mod.	H-3 UT
Centro					
48	833	-5,3	-29		4
61	988	-5,3	-32		
65	758	-5,4	-32		
68	757	-5,4	-29		< 1
78	910			79±2	
83	896	-4,6	-29		
94	920			63±1	
114	856	-4,4	-29		
115	781	-4,8	-26		
139	777	-5,1	-30		
8	1476	-5,3	-31		< 2
8	1457	-5,5	-31		
11	1378	-5,1	-30		
16	1905	-5,2	-33	88±1	< 2
25	1534	-5,0	-31		< 2
27	2152	-5,2	-31	72±2	< 1
28	1312	-5,3	-28		
29	1920	-4,8	-32		
29	2491			70±2	< 1
20	1572	-5,4	-38		
49	2147			85±1	< 2
73	1114	-4,5	-28		
77	1152	-4,7	-27		< 1
Puerto					
56	984	-4,8	-29	88±2	< 2
57	906	-5,4	-34		
57	796	-5,3	-27		
58	641			73±1	
110	743	-5,3	-34		< 1
128	665	-5,3	-32	91±1	3
41	1632	-5,0	-32		
41	1538	-5,0	-32		3
36	1232	-4,7	-31		
42	1333	-4,9	-31		
51	2318	-4,9	-32		
53	1589	-5,0	-29	83±1	7
Mar	34670	-0,08	- 4,4		