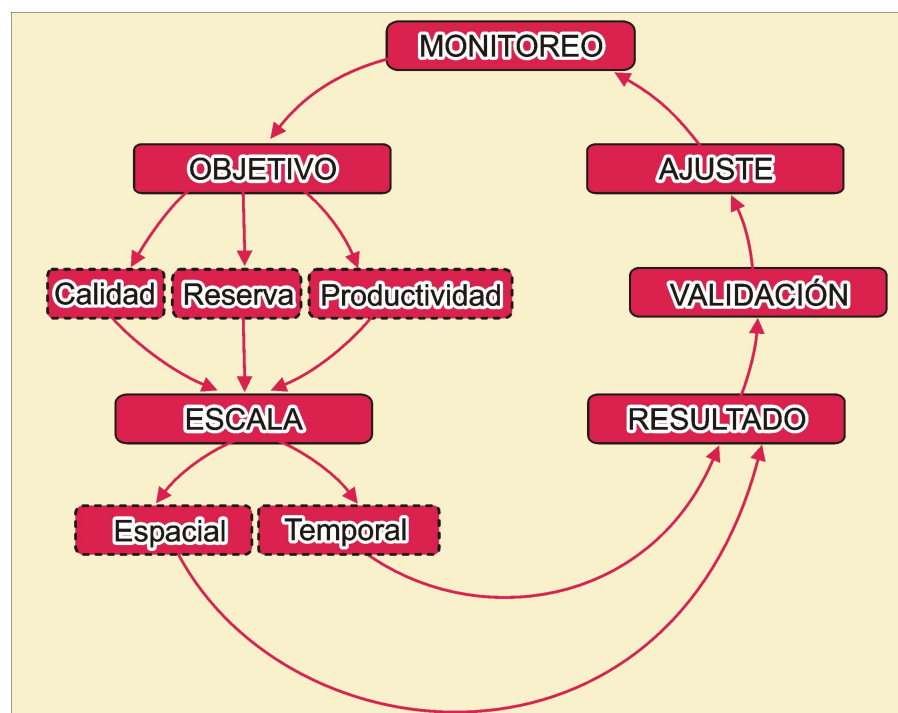


MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA EL MONITOREO DE ACUÍFEROS



Dr. Geól. Miguel Auge

Profesor Titular de Hidrogeología
Universidad de Buenos Aires
auge@gl.fcen.uba.ar

LA PLATA 2006

TEMAS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	2
2.1. CALIDAD	2
2.2. RESERVA	5
2.3. PRODUCTIVIDAD	9
3. ESCALA	10
3.1. ESPACIAL	11
3.2. TEMPORAL	12
4. RESULTADO	13
5. INTERPRETACIÓN	14
6. AJUSTE	17
7. ESTADO DEL ARTE EN AMÉRICA LATINA	17
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	18
9. BIBLIOGRAFÍA	18

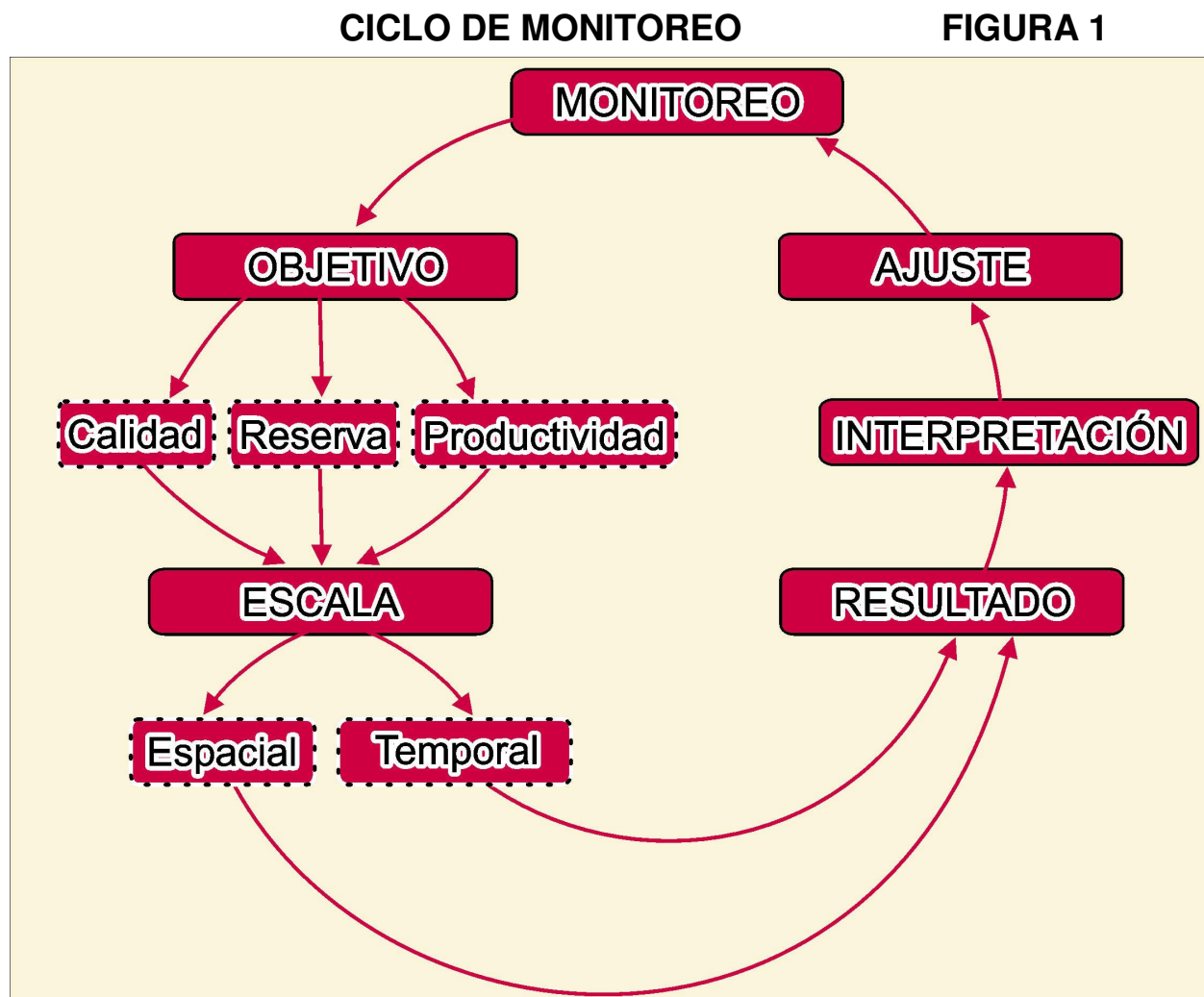
FIGURAS

1. CICLO DE MONITOREO	1
2. LA PLATA NITRATOS (ago – oct/90)	4
3. LA PLATA NITRATOS (jun/91)	5
4. LA PLATA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE HIDRÁULICA	6
5. LA PLATA RED DE FLUJO ACUÍFERO PUELICHE	8
6. LA PLATA PERFIL HIDROGEOLOGICO	9
7. DINÁMICA DE CONTAMINANTES MÁS DENSOS QUE EL AGUA	16

1. INTRODUCCIÓN

El primer paso para un adecuado sistema de prevención hidrogeológica, es la instalación de una **red para el monitoreo de niveles, caudales y calidad del agua subterránea**. El término monitoreo implica seguimiento y por lo tanto, se refiere a mediciones y muestreos reiterados y periódicos.

En la figura 1 se sintetiza un ciclo idealizado, de acuerdo al entendimiento del suscrito, de las fases que integran las tareas de monitoreo. Un ciclo diferente, así como una detallada descripción de los trabajos de monitoreo, puede consultarse en Uil et al, 1999.



Se describen a continuación, las fases que integran el ciclo de la figura 1.

2. OBJETIVO

En la generalidad, el monitoreo tiene por finalidad establecer las características y el comportamiento hidrogeológico, así como sus posibles variaciones, tanto espaciales como temporales. Las propiedades comúnmente monitoreadas de los acuíferos son la **calidad, la reserva y la productividad**.

2.1. Calidad. Comprende tanto la composición química como biológica.

Todo muestreo destinado a conocer la calidad de un acuífero, debe permitir una caracterización areal y espacial representativa del mismo. Estos puntos se tratarán detalladamente en el ítem **escala** por lo que aquí se hará referencia a otros, que también resultan trascendentes, para una correcta interpretación del tema como: forma de realizar el muestreo; preservación de las muestras; equipamiento y laboratorio.

El primer punto a considerar para lograr un muestreo representativo es asegurarse de que la muestra provenga efectivamente del acuífero en el momento de la toma y por ende, que no sea agua almacenada en el pozo durante un lapso relativamente prolongado. En este sentido y pese a que el ámbito de influencia en el acuífero, debido a la extracción en el pozo, varía significativamente en función del caudal y, de los parámetros y propiedades hidráulicas subterráneas (permeabilidad, transmisividad, porosidad, continuidad, heterogeneidad, anisotropía), en términos generales se puede asumir que la extracción de un volumen de agua entre 5 y 10 veces mayor al que almacena el pozo, asegura un muestreo representativo del acuífero. Esto, que prácticamente siempre se logra cuando se emplean equipos de bombeo para la toma de muestras, generalmente no sucede en los casos de muestreadores tipo bailer (cuchara) de pequeño diámetro y capacidad volumétrica.

Sin embargo, en algunos casos particulares, resulta necesario emplear el muestreador bailer, como por ejemplo cuando se necesita establecer la probable existencia de zonación vertical de la salinidad. En otros casos se requieren muestreadores especiales (tipo trampa) para evitar la fuga de hidrocarburos volátiles u otras sustancias gaseosas como el Radón.

Los componentes químicos **mayoritarios** (CO₃H, Cl, SO₄, Na, Ca, Mg y K), no requieren de un tratamiento especial para su conservación y normalmente se los envasa en botellas de plástico de 1 litro, 0,5 y aún menores (0,1 L), de acuerdo al requerimiento del laboratorio. En este grupo, sólo las muestras para determinar compuestos nitrogenados, especialmente NO₃ y NO₂, necesitan mantenerse enfriadas hasta su entrega en el laboratorio.

Para el muestreo de hidrocarburos (HC) es necesario emplear recipientes de vidrio color marrón, para evitar la fotoalteración, acidificar

con HCl hasta un pH de aproximadamente 3 y mantener la muestra enfriada (3 °C). Una precaución insoslayable consiste en evitar contaminaciones “cruzadas”, por el uso del mismo equipo de muestreo en sondeos con agua contaminada, en otros que no lo están. Para ello se pueden utilizar dos procedimientos; el más conveniente es no reiterar el uso del equipo de muestreo, o sea emplear uno diferente en cada pozo. El otro, más económico, consiste en limpiar adecuadamente el equipo de muestreo (bomba, cañería, válvula, etc) luego de cada toma (Auge, 2004).

Los metales pesados (Cr, As, Pb, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Ni), también requieren acidificación a pH 2 pero con HNO₃, envases de vidrio color marrón y enfriamiento.

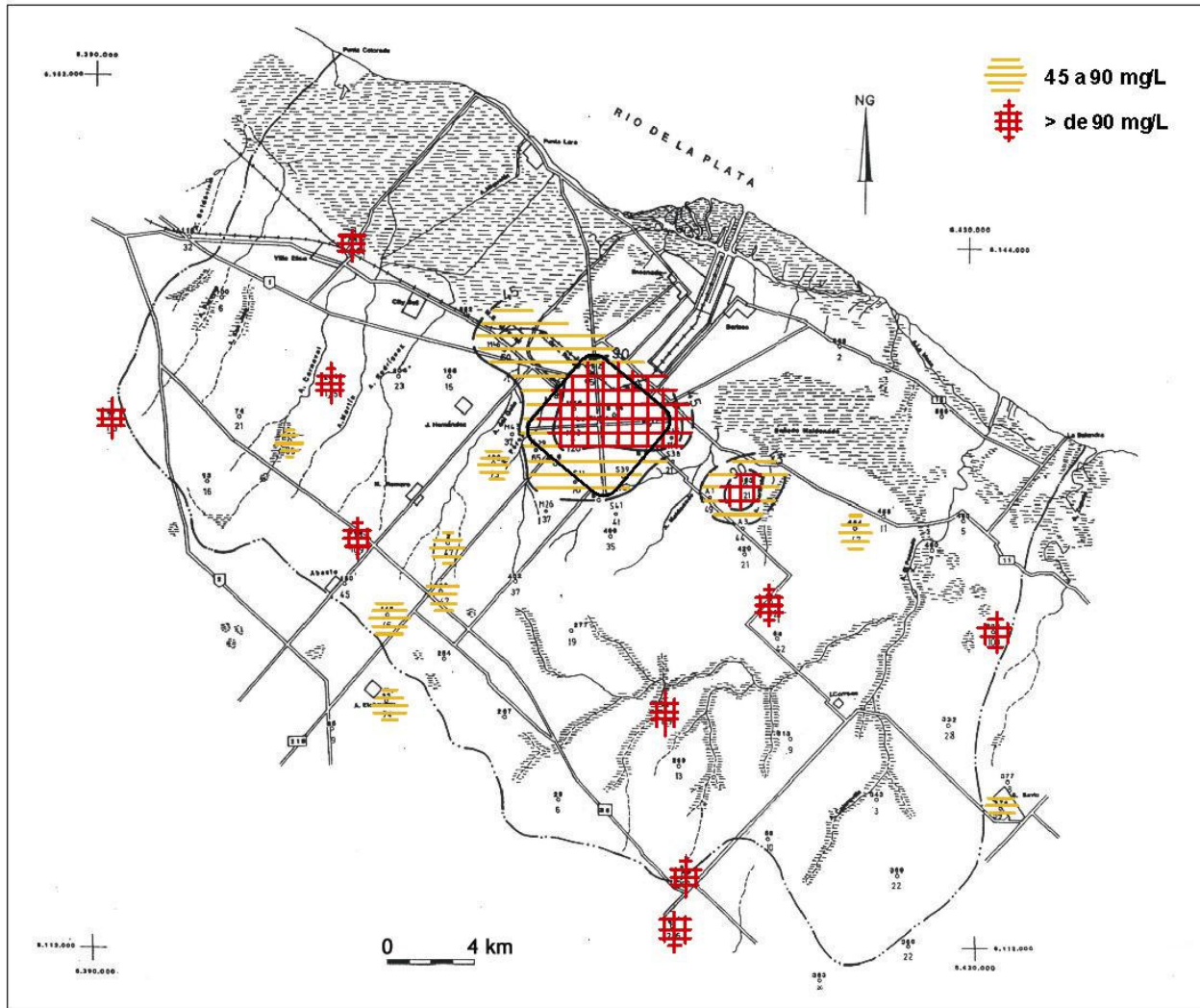
Para establecer el contenido biológico del agua subterránea es necesario purificar el punto de toma a fin de eliminar las bacterias ambientales; para ello se lo somete a una llama, normalmente generada por un hisopo con alcohol, durante 1 o 2 minutos. Posteriormente se toma la muestra en un recipiente estéril, que debe enviarse enfriado al laboratorio, antes de transcurridas 24 horas.

El muestreo de plaguicidas organoclorados y organofosforados, que son tóxicos para el ser humano en concentraciones muy pequeñas ($\mu\text{g/L}$ a décimas de $\mu\text{g/L}$), requiere de un tratamiento especial en el momento de la toma, a fin de lograr un concentrado de los mismos; por ello, el muestreo debe realizarlo personal capacitado. Son válidas para este grupo las precauciones citadas en HC, respecto a evitar la contaminación cruzada por el empleo de muestreadores impregnados con las sustancias a detectar.

En las figuras 2 y 3 se representa la variación areal y temporal en la concentración de NO₃ entre agosto-octubre/90 y junio/91, en la red de monitoreo de La Plata - Argentina, integrada por 50 pozos en un área de 100.000 hectáreas.



En la figura 2 se aprecia un ámbito con más de 45 mg/L de NO₃ en el Acuífero Puelche que encierra a la ciudad de La Plata y también, que en más de las 2/3 partes de la ciudad, la concentración supera 90 mg/L (Auge, 1997). En la figura 3 se mantiene la **mancha** con NO₃ en La Plata, que se caracteriza por ser una contaminación difusa, pero disminuye la cantidad de sitios con más de 90 mg/L en el ámbito rural, donde la contaminación es tipo puntual



El Acuífero Puelche se comporta como semiconfinado por su techo y la contaminación con NO_3 proviene del Pampeano sobrepuesto, que actúa como libre. Este último a su vez recibió el aporte de materia nitrogenada de antiguos pozos absorbentes que existían en el ejido urbano, reemplazados en los últimos 30 años por una red de desagües cloacales. En los barrios periurbanos todavía se emplean los pozos absorbentes, debido a la falta de alcantarillado, lo que permite que continúe la contaminación del Acuífero Pampeano.

2.2. Reserva. Para establecer las posibles variaciones espaciales y temporales del volumen de agua almacenada en un acuífero, se deben medir periódicamente los niveles hidráulicos en los pozos que integran la red de monitoreo. Sin embargo, esto sólo tiene validez directa en el caso de un acuífero que se comporte como libre, pues la variación vertical de la superficie freática, en función de la porosidad efectiva y el área

involucrada, permite establecer las modificaciones volumétricas de la reserva.

En el caso de un acuífero cautivo o confinado, la variación en la posición de su superficie piezométrica, es función de diferencias en la presión hidráulica.

En los acuíferos semiconfinados, la modificación en la posición de su superficie hidráulica, puede provenir de variaciones en la presión hidráulica, de cambios en el volumen almacenado, o de ambos (Auge, 2004).

En la figura 4 se indica la variación de la superficie hidráulica de los acuíferos Pampeano y Puelche en La Plata – Argentina, en el lapso setiembre/91 a febrero – marzo/92 (Auge, 1997). En el mapa se aprecia que la mayoría de las curvas tienen valores negativos, pues las mediciones de niveles realizadas en feb-mar/92 (fin de la época de riego) indicaron un descenso generalizado de la superficie hidráulica, respecto a set/91 (inicio del riego) y por ende una disminución de la reserva. El riego en la región estudiada, se practica exclusivamente con agua subterránea.

FIGURA 4

**LA PLATA VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE HIDRÁULICA
(set 91 – feb/mar/92)**



La red para el monitoreo hidráulico, al igual que la del monitoreo químico, estuvo integrada por 50 pozos distribuidos en 100.000 hectáreas, lo que brinda una densidad de 1 pozo cada 20 km², indicativo de una escala de monitoreo de semidetalle (1 pozo entre 4 y 65 km²).

El resultado de la interpretación de los datos obtenidos con el monitoreo hidráulico, permitió establecer que “La disminución de agua almacenada en el Acuífero Pampeano en la Llanura Alta fue de 39,2 hm³, en el lapso considerado (set/91- feb/mar/92)” (Auge, 1997).

Comparando el flujo vertical por descenso de la superficie freática (39,2 hm³), con el lateral en el Acuífero Pampeano (4 hm³), surge que el primero representa el 91% del total, mientras que al lateral sólo le corresponde el 9%. Este comportamiento caracteriza a la hidrodinámica subterránea de los ambientes llanos (Auge, 1997).

La representatividad en la medición de los niveles hidráulicos que, luego de convertidos en potenciales, permiten la elaboración del mapa con curvas equipotenciales o red de flujo subterráneo, se logra fácilmente en los ámbitos que no están sometidos a una fuerte extracción. Como contraposición, en los ámbitos fuertemente explotados o sobre-explotados, es bastante más difícil lograr valores de niveles hidráulicos representativos. Esto, pues la red de flujo presenta importantes alteraciones debido a cambios en los gradientes y las velocidades, como producto de la extracción.

La existencia de formas como los **conos de depresión** o **embudos hidráulicos** tipifica a estos sitios de concentración en la extracción. Los pozos de observación para el monitoreo deben ubicarse de manera que permitan definir las características de los conos de depresión (extensión lateral y vertical, gradientes hidráulicos), pero también de los ámbitos vecinos no distorsionados por el bombeo. Esta condición puede apreciarse en la figura 5, donde el cono de depresión en el Acuífero Puelche, delimitado por la equipotencial de 0 m, está generado por el funcionamiento de los 127 pozos que producen agua potable para La Plata y localidades vecinas (Argentina), a razón de 74 hm³/año (2.346 L/seg), lo que representa el 60% del abastecimiento total. El 40% restante es agua potabilizada proveniente del Río de la Plata.

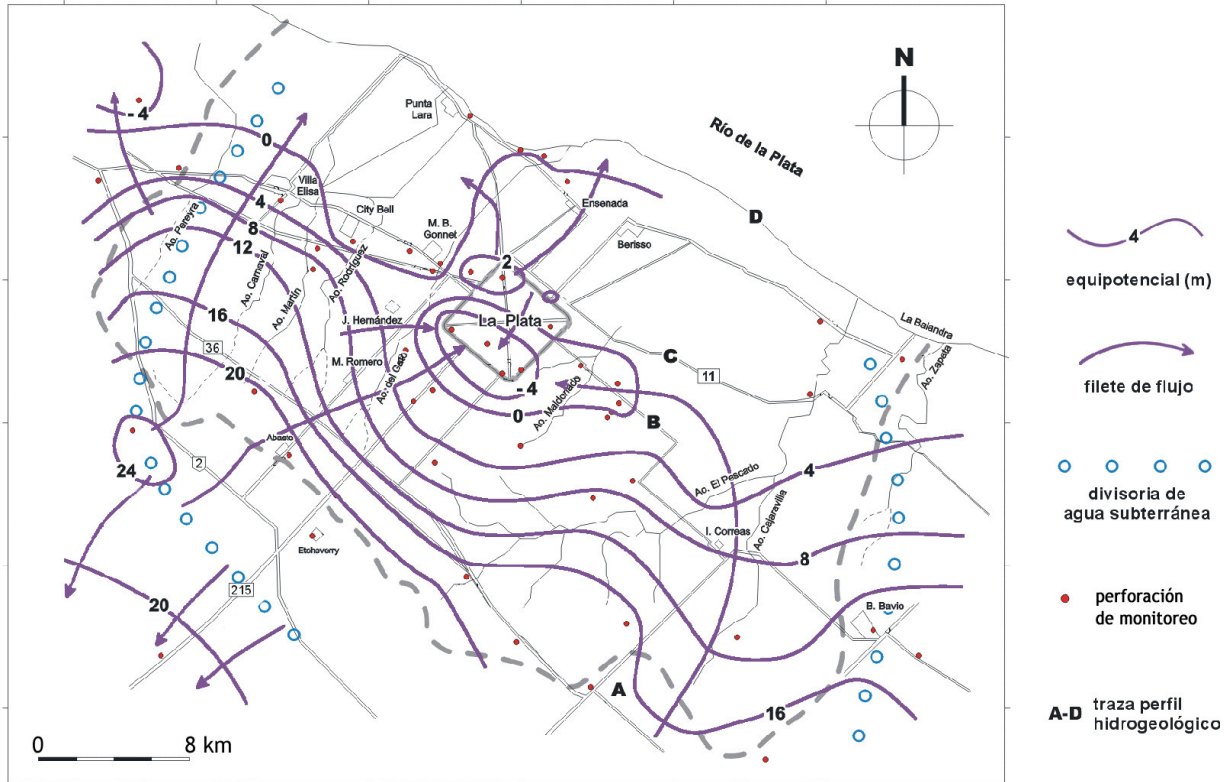
El cono de depresión, que surge de las mediciones piezométricas realizadas entre julio y octubre del 2002, está delimitado exteriormente por la equipotencial de 0 m, tiene forma elongada ONO – ESE, con su eje mayor de unos 13 km y el menor de entre 3 y 6 km. Esta curva se desarrolla a lo largo de unos 35 km y fue la que se utilizó para estimar el flujo subterráneo que ingresa al cono.

$$Q = T \cdot i \cdot L \quad 140.000 \text{ m}^3/\text{d} = 500 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 35.000 \text{ m}$$

Q: caudal T: transmisividad i: gradiente hidráulico L: longitud

LA PLATA RED DE FLUJO ACUÍFERO PUELCHE (jul – oct/02)

FIGURA 5



Los 140.000 m³/d equivalen a 51 hm³/a y dado que la extracción alcanza a 74 hm³/a el déficit asciende a unos 23 hm³/a. La estabilidad piezométrica observada en los últimos años, indica que las entradas deben ser similares a las salidas y por lo tanto, el déficit mencionado debe cubrirse con aporte natural y artificial, ambos a partir del Acuífero Pampeano sobrepuesto, que actúa como libre. El primero, por filtración vertical descendente a través del acuitardo, que lo separa del Puelche infrayacente. El restante, de origen artificial, es producto de las pérdidas en la red de agua potable, estimadas en un 15% del agua circulante. Dado que en la red circulan unos 124 hm³/año (74 hm³/a de agua subterránea y 50 hm³/a de agua superficial), la recarga artificial al Pampeano asciende a unos 19 hm³/a. Adicionándole al flujo (51 hm³/a) este último valor, se llega a un equilibrio bastante aceptable entre salidas (74 hm³/a) y entradas (70 hm³/a).

El Acuífero Puelche, cuyo techo se ubica entre 20 y 50 m de profundidad, con un espesor entre 20 y 30 m, está formado por “arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas, blanquecinas y amarillentas, con

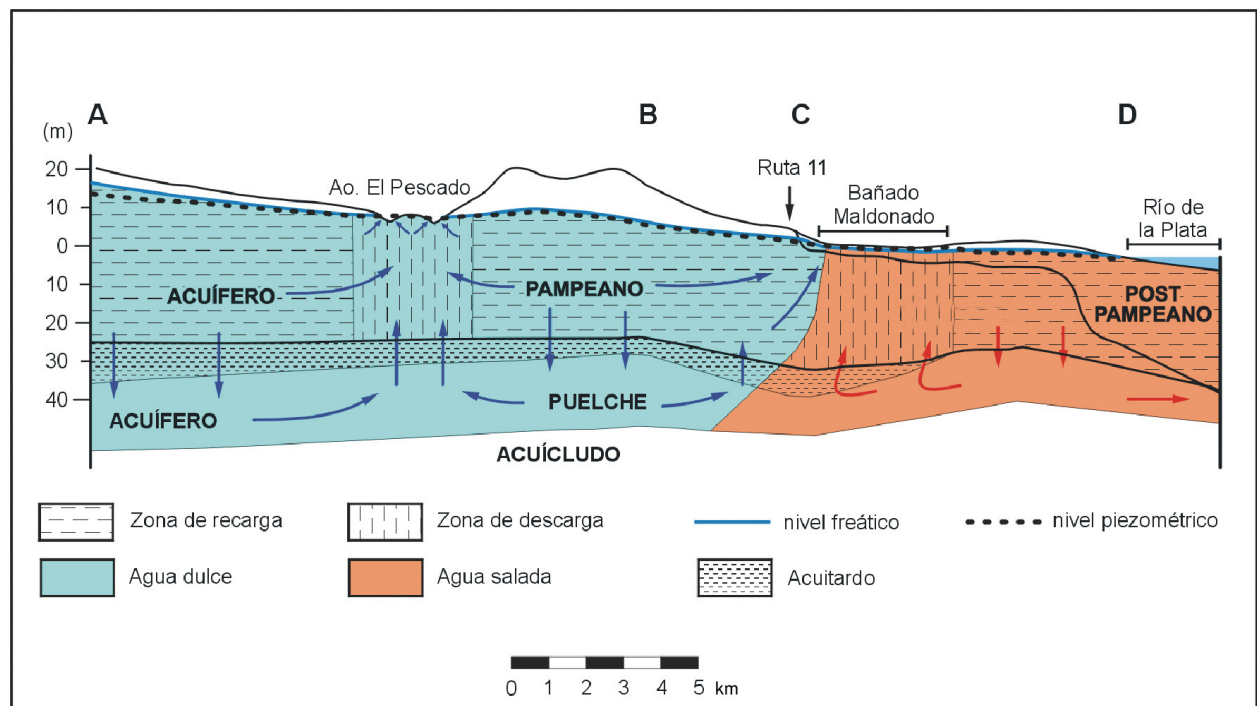
estratificación gradada” (Auge, 1997). Las arenas son de origen fluvial y edad Plio-Pleistocena.

La figura 6 reproduce el perfil hidrogeológico a lo largo de la traza ABCD indicada en la figura 5. En el mismo se aprecia el flujo lateral en los acuíferos Pampeano y Puelche y el vertical, a través del acuitardo que los separa. También la interfase agua dulce – salada, que se ubica en la Planicie Costera, entre la ciudad de La Plata y el Río de la Plata (Auge et al, 2004).

En el ámbito de captación no existen pozos construidos especialmente para monitoreo; por ello, las mediciones de niveles se realizaron en las perforaciones de explotación, luego de detener el bombeo aproximadamente durante 30 minutos. Pese a ello, la interferencia entre pozos no se pudo evitar, debido a que resulta imposible cortar totalmente el suministro de agua potable.

LA PLATA PERFIL HIDROGEOLÓGICO

FIGURA 6



2.3. Productividad. Sus variaciones pueden deberse a modificaciones en la reserva de los acuíferos, o a cambios en el rendimiento de los pozos.

En los ámbitos sobre-explotados, la productividad generalmente manifiesta una disminución a medida que progresa el tiempo de extracción. En algunos casos particulares puede darse un incremento de la productividad, cuando disminuye el caudal total extraído, se utilizan fuentes alternativas, o se redistribuyen más apropiadamente las perforaciones de explotación.

Ya se mencionó en **reserva**, que un descenso de la superficie freática implica una disminución de la reserva, mientras que un descenso de la superficie piezométrica puede indicar una disminución en la presión hidráulica (acuíferos confinados), o lo mismo, combinado con una disminución de la reserva (acuíferos semiconfinados). Cualquiera sea el caso, las mediciones de nivel deben realizarse en condiciones de reposo, para evitar el enmascaramiento que puede producir la pérdida de eficiencia del pozo de bombeo.

El rendimiento de una perforación se expresa mediante la relación caudal/depresión (Q/s) y en ella intervienen los parámetros hidráulicos del acuífero, fundamentalmente la transmisividad, pero también el estado del pozo en relación a su funcionamiento. Se considera que un pozo nuevo bien diseñado y terminado, debe tener una eficiencia de al menos el 70%; esto es, la relación Q/s del pozo real debe ser de por lo menos el 70% de la que tendría un pozo ideal, que se define como aquel que no presenta pérdidas de carga hidráulica durante su funcionamiento. En la práctica, lo más frecuente es que un pozo nuevo ronde el 50% de eficiencia y no es raro encontrar eficiencias menores; por lo tanto, considerando una eficiencia del 50%, la mitad de la depresión generada en el pozo de bombeo es producto de su funcionamiento y el otro 50% deriva de las pérdidas debidas al flujo en el acuífero.

Existe una amplia gama de falencias que pueden afectar a un pozo luego de un período prolongado de funcionamiento, pero una de las más frecuentes que genera disminución en el caudal y el rendimiento, es la derivada de la obturación de las rejillas de los filtros por incrustación y de los poros de los prefiltros, por el acceso de material fino (limo, arcilla, bentonita). Ambas causas derivan también en un incremento de la depresión.

Por lo tanto, para verificar el motivo de la disminución de la productividad, es necesario medir el nivel hidráulico en reposo; en este sentido, si el mismo no ha sufrido variaciones significativas, el descenso del caudal deriva de falencias en la perforación. Como contraparte, si se aprecia una profundización notoria del nivel estático, la disminución de la productividad es consecuencia de una reducción en la reserva subterránea. En los campos de pozos, es muy común que la productividad esté afectada por una combinación de ambos procesos.

3. ESCALA

La síntesis de toda investigación hidrogeológica, incluido el monitoreo, es su representación cartográfica y para ello resulta imprescindible que los mapas estén confeccionados a escala.

3.1 Espacial. Es la relación de tamaños entre el real que tiene el ámbito monitoreado y el del mapa correspondiente. Resulta claro que a medida que aumenta la superficie de la región a investigar, disminuye el detalle y la escala de reproducción. Por ello, el tamaño del área a monitorear y el grado de detalle perseguido, son los principales condicionantes de la escala.

Existen numerosas clasificaciones de escalas espaciales, pero en este trabajo se seguirá la desarrollada por Auge 2003, que se puede sintetizar de la siguiente manera:

mayor de 1:25.000	de 1:25.000 a 1:100.000	de 1:100.000 a 1:500.000	menor de 1:500.000
detalle	semidetalle	semiregional	regional

La realidad muestra que específicamente para monitoreo, sólo se construyen pozos para las escalas de detalle y eventualmente de semidetalle más grande (1:25.000). Para el resto, normalmente se utilizan pozos existentes.

Los monitoreos a **escala regional**, se emplean a nivel de reconocimiento y abarcan varias provincias y/o estados dentro del país, todo el país y aún varios países, en extensiones que van desde centenas de miles a millones de km². Los mismos tienen por objeto brindar un panorama general sobre el comportamiento del agua subterránea, a fin de contribuir en la planificación del uso sustentable de la misma, en grandes extensiones territoriales. Generalmente se aplican al manejo de acuíferos compartidos interprovinciales, interestatales y transfronterizos. La densidad, normalmente no supera **1 pozo cada 1.500 km²**. En este aspecto se asume para el monitoreo, una densidad de pozos 4 veces menor que la empleada para el relevamiento hidrogeológico de campo.

Los monitoreos a **escala semiregional**, se utilizan a nivel de ambiente o provincia hidrogeológica que puede definirse como “toda región que presente características o comportamientos distintivos en relación a sus aguas subterráneas. El término **distintivo** implica la manifestación reiterada y/o fácilmente detectable de alguna característica peculiar y por lo tanto, no siempre involucra un comportamiento hidrogeológico homogéneo. Los factores que ejercen mayor influencia en el comportamiento hidrológico subterráneo son: el geológico, el morfológico, el climático y el biológico” (Auge, 1999). Se los aplica a ámbitos que ocupan desde miles, a centenas de miles de km² y la densidad oscila entre **1 pozo cada 65 y 1.500 km²**, considerando los valores extremos de la escala.

Los monitoreos a **escala de semidetalle**, se emplean para el estudio de cuencas hidrogeológicas o unidades acuíferas individuales, cuando la

extensión de las mismas oscila entre cientos y unos pocos miles de km²; la distribución de pozos normalmente varía entre **1 cada 4 y 65 km²**.

Los monitoreos a **escala de detalle**, se utilizan para la evaluación de ambientes específicos como zonas urbanas, regiones cultivadas y plantas industriales. Generalmente la extensión estudiada abarca desde algunas hectáreas a cientos de km² y la distribución de pozos va de **1 cada 400 m² a 4 km²**.

3.2. Temporal. Es la frecuencia con que se efectúan los registros del monitoreo y depende fundamentalmente de la finalidad del mismo.

En regiones donde se aplica riego, es común que se realice un monitoreo en época de riego y otro en época de secano, para establecer si existen variaciones en la posición de la superficie freática y en la composición química del agua subterránea, derivada esta última, de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas.

Si el objetivo es establecer la variación en la reserva de un acuífero libre, se realiza un monitoreo al finalizar el período de exceso en el balance hídrico y otro al finalizar el período de déficit.

Si la finalidad es verificar la recarga y la descarga de un acuífero semiconfinado, desde y hacia el libre sobrepuesto, las mediciones de nivel en el freático, deben acompañarse con registros del nivel piezométrico en el semiconfinado.

En las baterías de pozos para agua potable, debiera efectuarse un monitoreo hidráulico, químico y bacteriológico, al menos 1 vez al mes.

Para establecer la incidencia de las mareas o las crecidas de los ríos en la superficie hidráulica subterránea, la medición de niveles en los pozos debe realizarse en coincidencia con los períodos de aguas superficiales altas y bajas. Sin embargo, las respuestas subterráneas suelen estar desfasadas temporalmente respecto al efecto superficial.

Para verificar el grado de sensibilidad barométrica de un acuífero, el monitoreo de niveles debe seguir a los cambios en la presión atmosférica.

Las plantas industriales generadoras de altas cargas contaminantes como curtiembres, papeleras, refinerías de hidrocarburos, textiles, lácteas, faenadoras de hacienda, medicinales, agroquímicas, metalúrgicas, alimenticias, etc, debieran tener sus propias redes de pozos para monitoreo, las que tendrían que ser operadas por organismos estatales (municipales, provinciales, o nacionales). Estos también debieran ser los responsables de fijar las prácticas y las frecuencias de los monitoreos.

En algunos casos particulares, el monitoreo temporal puede requerir una frecuencia diaria, horaria, de minutos y aún de segundos. Esto suele aplicarse a los casos en que es necesario establecer la incidencia del bombeo en la salinidad o en la composición bacteriológica del agua subterránea, en mediciones para verificar el funcionamiento hidráulico de

la perforación y en la detección de trazadores para determinar la velocidad de flujo.

Mención especial cabe para las explotaciones mineras, que normalmente emplean grandes volúmenes de agua dañando no sólo la reserva subterránea, sino también la calidad de los acuíferos durante los procesos extractivos y con la acumulación de desechos en las escombreras y diques de colas. Lamentablemente la mayoría de los emplazamientos mineros carece de pozos para monitoreo.

Algo similar sucede con las explotaciones petrolíferas, las que además de la contaminación con hidrocarburos, suelen salinizar significativamente a los acuíferos por el vertido superficial del agua de separación, o por la inyección en profundidad de la misma para la recuperación secundaria.

4. RESULTADO

Este ítem comprende la verificación de los resultados obtenidos con el monitoreo.

En el rubro calidad p.ej. una de las prácticas habituales para establecer el grado de confiabilidad de los análisis sobre iones mayoritarios, es realizar el balance iónico, que consiste en comparar el contenido aniónico con el catiónico, ambos expresados en meq/L.

Según Custodio y Llamas (1976) “En un análisis químico completo debe verificarse que: suma de miliequivalentes de aniones = suma de miliequivalentes de cationes”. Por lo tanto:

$$r(\text{CO}_3\text{H} + \text{Cl} + \text{SO}_4 + \text{NO}_3) = r(\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K})$$

$r = \text{meq/L}$

En la práctica, la sumatoria de los aniones suele ser diferente a la de los cationes y dicha diferencia es el error del análisis. Si el error es significativo, el análisis debe desecharse.

El porcentaje de error del análisis puede expresarse (Custodio y Llamas, 1976) por:

$$\text{Error (\%)} = 100 \cdot \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

El error admisible de un análisis químico, depende en gran medida del tipo de agua y de su concentración; siguiendo a los autores mencionados, a título indicativo, y en función de la conductividad eléctrica:

C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2.000	> 2.000
error admisible (%)	30	10	8	4	4

El grado de precisión de los análisis químicos de: iones minoritarios como As, F y NO₂, metales pesados, hidrocarburos y plaguicidas, no se puede verificar mediante el balance iónico. En estos casos sólo puede confiarse en laboratorios con equipamiento y técnica adecuados, personal idóneo y responsabilidad en la tarea. Lo mismo vale para las determinaciones del contenido bacteriológico del agua.

En relación al monitoreo destinado a establecer el comportamiento hidráulico de los acuíferos (reserva y productividad), el mismo debe estar a cargo de personal entrenado en las mediciones de niveles y caudales, en lo posible profesionales o técnicos, que además conozcan el objetivo y la importancia de la tarea.

5. INTERPRETACIÓN

La interpretación de la información derivada del monitoreo, deben realizarla profesionales altamente especializados en el tema, dado que la misma tiene que orientarse a cuantificar los cambios en la cantidad y la calidad del agua subterránea y también a descifrar el origen de los mismos.

En lo referente a calidad, las variaciones en la composición química pueden deberse a procesos naturales o derivados de la actividad antrópica.

En el primer caso, durante la época de exceso en el balance hídrico, se produce infiltración efectiva y recarga subterránea, con ascenso de la superficie freática. El volumen de agua infiltrada tiende a diluir el contenido de algunos iones en el acuífero libre y a incrementar otros. En este sentido es común que disminuyan las concentraciones de Cl y SO₄ y aumente la de CO₃H; sin embargo, la tendencia general es a la disminución en la concentración de sólidos totales disueltos (STD).

En los lapsos de déficit sucede lo contrario, con una tendencia al incremento en la salinidad total, debido a los procesos de disolución y concentración por evaporación, esto último cuando la superficie freática se ubica a poca profundidad (menos de 3 m).

Las acciones antrópicas producen alteraciones mucho más acentuadas que las naturales, tanto sobre la calidad como en el comportamiento hidráulico de los acuíferos.

La aplicación de fertilizantes y plaguicidas en los períodos de riego, puede incrementar notoriamente el contenido de NO₃, SO₄, y Cl en el primer caso y de los plaguicidas utilizados en el restante. Para la toma de muestras resulta muy conveniente conocer la respuesta hidráulica del

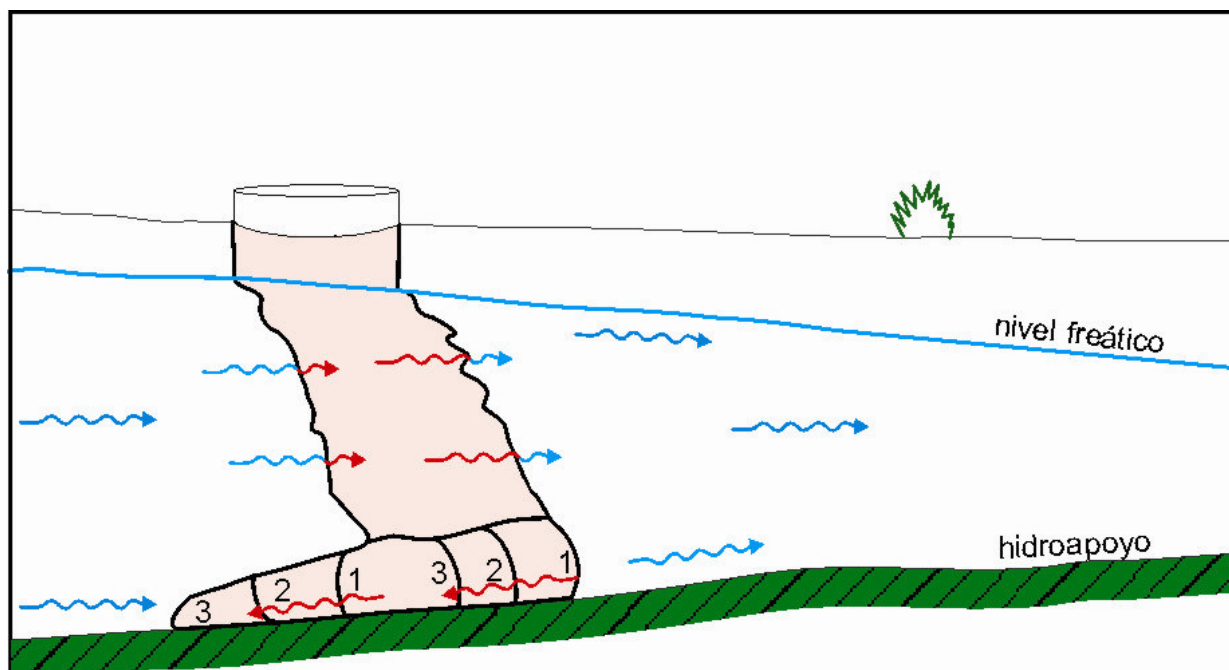
acuífero, pues el exceso de agua aplicada, particularmente cuando se riega por inundación o por surco, puede insumir un tiempo relativamente prolongado (meses y aún años) en llegar al acuífero. El tiempo de tránsito del agua depende de la permeabilidad vertical de la zona subsaturada, del índice de humedad y del espesor de la misma, que equivale a la profundidad de la superficie freática. Sin embargo hay que tener presente que muy pocas sustancias son transportadas por el agua a su misma velocidad, sin sufrir alteraciones, ni reaccionar con el medio físico, con el agua, ni con otras sustancias. En este sentido puede mencionarse a los cloruros que son sumamente estables, altamente solubles y muy móviles. Cuando entran en solución, los Cl sólo salen de la misma por precipitación, pero esto se produce cuando se alcanza una concentración de salmuera (250 g/L). Un comportamiento similar tienen los NO₃, aunque en medio reductor, o por la acción de bacterias desnitrificantes, pueden reducirse a NO₂, NH₄ y finalmente salir de la solución como N elemental al estado gaseoso.

Otras sustancias contaminantes tienen comportamientos particulares, así los plaguicidas organoclorados, si bien tienen alta persistencia en el suelo (hasta años), son fácilmente fijados por las partículas arcillosas y raramente alcanzan al acuífero freático, salvo que éste se ubique a poca profundidad y con una zona subsaturada de alta permeabilidad (aluvio, grava, arena gruesa). Los organofosforados son más solubles y móviles pero menos persistentes, pues se degradan en semanas y, eventualmente, en meses. Los metales pesados son capturados por la materia orgánica existente en el horizonte A de los suelos y las bacterias, rara vez sobreviven más de 50 días fuera de su hábitat propicio, que es el que tiene alta concentración de materia orgánica, como los pozos absorbentes.

Los HC líquidos en general son persistentes, aunque sufren cambios en contacto con el agua y el suelo, transformándose en sustancias hidrocarbonadas cuyo origen generalmente resulta muy difícil de establecer. La movilidad de los HC, además de las condiciones físicas e hidráulicas del medio, depende fundamentalmente de la viscosidad; los livianos (nafta, solvente, querosene, gas oil) son más dinámicos que los viscosos (fuel, asfalto). Secundariamente incide la densidad; en este sentido los más densos que el agua (cloroformo, tetracloruro de carbono, tricloroetileno), tienden a migrar hacia el piso de los acuíferos, e incluso en función de la inclinación del mismo, pueden desplazarse en sentido contrario al flujo subterráneo (figura 7).

En virtud de lo expuesto, queda claro que a la dinámica del agua subterránea hay que agregarle las propiedades de los contaminantes, para prever el comportamiento de los mismos en los acuíferos.

DINÁMICA DE CONTAMINANTES MÁS DENSOS QUE EL AGUA



La red de flujo subterráneo o mapa con curvas equipotenciales (figura 5), no sólo permite realizar interpretaciones sobre el comportamiento dinámico, sino también respecto a la calidad del agua subterránea.

Sobre el primer punto, ya se hizo referencia al cálculo del caudal que ingresa al cono de depresión del Acuífero Puelche en La Plata ($140.000 \text{ m}^3/\text{d} \approx 51 \text{ hm}^3/\text{a}$).

En relación a la calidad, resulta importante señalar que para lograr un conocimiento adecuado sobre el comportamiento de la pluma de agua contaminada, es necesario que los pozos de monitoreo se ubiquen dentro y fuera del ámbito contaminado (figuras 2 y 3), pues ello permitirá establecer la dinámica de la misma. La red de flujo por su parte, resulta imprescindible para seleccionar los pozos de muestreo, dado que permite apreciar las direcciones de circulación del agua subterránea y por ende, las de desplazamiento de la pluma de contaminación.

Mención especial merece la guarda o archivo de los datos e información obtenidos o generada a partir del monitoreo. En este sentido, las mediciones de niveles y caudales, y los resultados de los análisis químicos y bacteriológicos, pueden archivar en una sencilla base de datos del tipo excel. A la cartografía resultante (red de flujo, contenidos químicos y bacteriológicos), conviene desarrollarla en un programa de

información del tipo GIS, con el objeto de facilitar su elaboración y eventual modificación espacial y temporal.

6. AJUSTE

El análisis de los resultados y la interpretación de los datos y la información obtenida con los monitoreos realizados, permitirá ajustar el desarrollo de los monitoreos a realizar.

En relación a resultados, si los derivados del laboratorio elegido hubiesen adolecido de errores importantes, habrá que cambiarlo. El mismo criterio es aplicable al personal destinado a la medición y el muestreo de la red de monitoreo, si los registros y la preservación de las muestras no son confiables.

La interpretación constituye la mejor herramienta para el ajuste. Al respecto es trascendente validar las escalas espacial y temporal, con el objeto de decidir si se debe continuar con las elegidas o es conveniente cambiarlas. Otro factor importante es el referido a las determinaciones de laboratorio, respecto a si se mantiene la necesidad de continuar o no con las seleccionadas preliminarmente. Las determinaciones de laboratorio son costosas en general, pero algunas se destacan por su costo sumamente elevado (metales pesados, plaguicidas, hidrocarburos); por ello, si en los primeros monitoreos no se detecta la presencia de alguna de las sustancias seleccionadas preliminarmente, puede ser conveniente eliminarla del listado de los análisis químicos.

Otro ajuste que debe efectuarse con frecuencia, particularmente cuando se emplean pozos existentes para el monitoreo, es el reemplazo de aquellos con deficiencias, ya sea constructivas, de funcionamiento, o por dificultades en el acceso para las mediciones y muestreos.

Una vez finalizada la etapa del ajuste, se estará en condiciones de reiniciar el monitoreo.

7. ESTADO DEL ARTE EN AMÉRICA LATINA

Respecto al estado del monitoreo en América Latina, son pocos los organismos de los diferentes países que le otorgan importancia al tema y lo realizan sistemáticamente.

Algunas universidades nacionales de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, México y Uruguay, entre otras, tienen programas de monitoreo hidrogeológico, en algunos casos a escala de detalle y en otros regional.

México es uno de los países que mayor significación le otorga al monitoreo, debido a la subsidencia que sufre gran parte del Distrito Federal, como resultado de la explotación de un acuífero semiconfinado, cubierto por potentes capas de arcillas lacustres, que se compactan al perder presión hidráulica por el descenso de la superficie piezométrica.

Este fenómeno ha generado hundimientos superiores a los 10 m en algunos sectores de la ciudad.

En términos generales se puede decir que el monitoreo se practica en muy escasa proporción en América Latina, donde probablemente sólo se cubra alrededor del 5% de la superficie ocupada por los acuíferos destinados al abastecimiento de agua potable, riego e industria. Esta situación no sólo se produce en nuestros países, sino que también afecta, aunque en menor medida, a algunos desarrollados de América del Norte y de Europa como Estados Unidos, Canadá, España, Francia, Italia, Inglaterra y Alemania, y es consecuencia del escaso conocimiento que se tiene en general, sobre la importancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De lo expresado en el punto anterior surge claramente la escasez de redes para el monitoreo de agua subterránea existentes en América Latina; ello constituye la principal falencia que afecta a nuestro continente, trasladando a un segundo plano el tema referido a la forma en que se practica el monitoreo (estado del arte).

Resulta evidente que es necesario ampliar significativamente el ámbito cubierto con pozos de monitoreo, hecho que sólo podrá lograrse cuando se difunda la importancia que tiene el agua subterránea como fuente de provisión para diferentes usos (humano, industrial, agropecuario).

La difusión, que debe estar fomentada por los especialistas en el tema (docentes, profesionales y técnicos), tiene que orientarse no sólo hacia los funcionarios gubernamentales, que deciden sobre las inversiones necesarias para instalar y operar una red de monitoreo, sino también hacia los alumnos primarios, secundarios y universitarios, y para aquella parte de la población que ha dejado las aulas. En este sentido, además de la docencia, resulta trascendente la difusión que puede lograrse a través de los medios gráficos, televisivos y radiales.

9. BIBLIOGRAFÍA

AUGE, M. 1997. Investigación hidrogeológica de La Plata y alrededores. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires: 1-171, 58 mapas, 36 tablas, 86 figuras. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires.

AUGE, M. 1999. Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Ebook: 1-106.
www.gl.fcen.uba.ar/investigacion/grupos/hidrogeologia/auge/libros.htm

AUGE, M. 2003. Vulnerabilidad de acuíferos. Conceptos y métodos. Ebook: 1-38. RedIRIS Red Académica y Científica de España en Internet. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/vulnerabilidad.html>

AUGE, M. 2004. Hidrogeología ambiental. SEGEMAR. Serie Contribuciones Técnicas. Ordenamiento Territorial # 5: 1-131. ISSN 0328-9052. Buenos Aires.

AUGE, M. HIRATA, R. y LÓPEZ VERA, F. 2004. Vulnerabilidad a la contaminación por nitratos del Acuífero Puelche en La Plata – Argentina. Ebook: 1-187.

www.gl.fcen.uba.ar/investigacion/grupos/hidrogeologia/auge/libros.htm

CUSTODIO, E. y LLAMAS, R. 1976. Hidrología subterránea: 1-1157. 2T. Ed. Omega. ISBN 84-282-0446-2. Barcelona.

UIL, H. VAN GEER, F. GEHRELS, J. y KLOOSTERMAN, F. 1999. State of the art on monitoring and assessment of groundwaters. UN/ECE Task Force on Monitoring and Assessment. Vol. 4: 1-84. ISBN 9036952778. Delft, Holanda.