

**DETERMINACION DE LA VELOCIDAD Y DIRECCION DEL
AGUA SUBTERRANEA EN LA ISLA DE SAN ANDRES,
UTILIZANDO RADIOTRAZADORES¹**

CÉSAR O. RODRÍGUEZ N.²

¹ Manuscrito recibido: Diciembre de 1974.

² Hidrogeólogo, M. Sc. Instituto de Asuntos Nucleares, Sección de Hidrología, Bogotá.

RESUMEN

La utilización de radiotrazadores en 10 pozos de la isla de San Andrés permitió determinar la dirección y velocidad del agua subterránea.

La técnica se basa en la inyección de un radiotrazador en un pozo y la posterior observación del cambio de concentración de él en el sistema. La rápida o lenta desaparición del trazador indica velocidades altas o bajas respectivamente, las cuales pueden evaluarse en forma cuantitativa. El cambio de posición del trazador con el tiempo, indica la dirección del flujo subterráneo que lo arrastra en solución.

Las técnicas esbozadas representan un método sencillo, económico y rápido de gran utilidad en la evaluación de parámetros importantes en cualquier estudio de aguas subterráneas.

ABSTRACT

DETERMINATION OF VELOCITY AND DIRECTION OF GROUND WATER FLOW IN SAN ANDRES ISLAND BY MEANS OF RADIOTRACERS

The injection of radiotracers in 10 boreholes in San Andres island allowed the determination of direction and velocity of ground water flow.

The basis of the technique relates to the application of a relationship existing between the observed concentration decrease of a radiotracer solution introduced into a borehole and the velocity of the undisturbed ground water flow in the aquifer. The change of the tracer's position indicates the direction of flow.

Satisfactory results show that techniques described herein are cheap, simple and rapid methods for the determination of important hydrogeological characteristics.

INTRODUCCION

Las características fisiográficas, geológicas y climatológicas de la isla de San Andrés no son propicias a un régimen hidrológico superficial permanente. Sin embargo el balance hidrológico realizado por el autor con datos tan escépticos como considerando una Evaporación Potencial del 86% (RODRÍGUEZ, 1972a), señala que la Precipitación Anual Disponible en la Cuenca Central de la isla de San Andrés, es suficiente para abastecer a una población superior a los 35.000 habitantes. La zona hidrológicamente favorable de la Cuenca Central, tiene una extensión de solo 6 km² (menos de la cuarta parte del total de la isla), y geológicamente se proyecta como un acuífero kárstico con excelentes posibilidades de explotación permanente, aprovechando la recarga anual e incrementando ésta por medio de obras especialmente diseñadas.

Teniendo en cuenta que las características del acuífero exigen un estudio detallado del mismo, el Instituto Nacional de Fomento Municipal (Insfopal), inició una serie de investigaciones hidrogeológicas con el objeto de aprovechar el agua subterránea como principal fuente de suministro para el acueducto de la isla. Como parte de dicho estudio, el Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), realizó en los últimos meses de 1972 un trabajo en 10 de los pozos existentes, para determinar la velocidad y dirección del agua subterránea, parámetros importantes para una evaluación completa de la hidrología subterránea.

En esta disertación se relacionan las técnicas empleadas por la Sección de Hidrología del IAN y se resumen los resultados globales.

I. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

A. Teoría de la técnica empleada.

El método consiste en introducir en un pozo o piezómetro un trazador adecuado y observar la disminución de su concentración en función del tiempo (PLATA 1972, RODRÍGUEZ 1972b). La variación de

la concentración depende principalmente de cualquier tipo de flujo que exista dentro del pozo y en menor escala de la difusión del trazador.

La disminución de concentración de un trazador distribuido homogéneamente en la columna de agua de un pozo, en función del tiempo, está definida por la ecuación diferencial:

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{C}{V_0} \frac{dV}{dt}$$

La solución de esta ecuación conduce a la expresión:

$$V_p = \frac{V_0}{S t} \ln \frac{C_0}{C}$$

en donde

V_p = Velocidad del agua que circula a través del pozo.

V_0 = Volumen del tramo considerado.

S = Sección del volumen V_0 normal a la dirección del flujo real.

C = Concentración del trazador al cabo de un tiempo t .

C_0 = Concentración inicial del trazador.

La velocidad V_p se relaciona con la velocidad del agua en el acuífero por la relación.

$$V_p = \alpha V_a$$

en donde α es un factor que representa la perturbación hidrodinámica causada por el pozo en el acuífero. La ecuación toma entonces la forma:

$$V_a = \frac{V}{S t \alpha} \ln \frac{C}{C_0}$$

de donde

$$\frac{S t V_a \alpha}{V_0}$$

$$\frac{C}{C_0} = (e)$$

Si el diámetro del pozo es d y la altura de la columna de agua marcada es h , el volumen V_0 será:

$$V_0 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 h \quad y \quad \frac{C}{C_0} = (e) - \frac{4 \alpha t}{\pi d} V_a$$

De aquí se deduce que el tiempo $t_{1/100}$, necesario para que la concentración del trazador se reduzca al 1% de su valor inicial, está dado por la expresión:

$$t_{1/100} = \frac{3,62 d}{\propto V_a} \quad \text{de donde:}$$

$$V_a = \frac{3,62 d}{\propto t^{1/100}}$$

El coeficiente \propto depende principalmente de las condiciones de revestimiento del pozo, entubamiento y filtro, y puede evaluarse si se conoce o se determina experimentalmente en el laboratorio. El valor de \propto varía entre 0 y 4.

B. Descripción del procedimiento seguido.

El procedimiento desarrollado por PLATA 1972, consistió sencillamente en inyectar cierta cantidad de radiotrazador a lo largo de la zona estudiada, en tal forma que su concentración fuese uniforme (figura 1a). Luego se midió con el detector la concentración del trazador a lo largo de la columna marcada, en saltos de 0.5 m, 1.0 m, o 0.2 m. según el caso. Las medidas se repitieron periódicamente en las mismas posiciones hasta que la actividad se extinguíó o alcanzó un valor suficientemente bajo.

El marcado de toda la columna de agua se hizo introduciendo hasta el fondo una manguera de plástico abierta por ambos extremos y provista de un lastre en su extremo inferior, para facilitar la inmersión. Luego se vertió por su parte superior una cantidad de solución radiactiva (Bromo-82), igual al volumen interno de dicha manguera (entre el fondo y el nivel piezométrico). Este volumen marcado desplaza totalmente el agua contenida en el interior de la manguera. Posteriormente se extrajo la manguera lentamente y con velocidad constante, con lo cual toda la columna de agua quedó marcada más o menos uniformemente.

La medición del radiotrazador se hizo con un detector Geiger-Müller (figura 1b), conectado a través de 60 m de cable a un intensímetro ubicado en la superficie.

C. Resultados.

Las velocidades horizontales encontradas en los 10 pozos estudiados se resumen en la tabla 1. A manera de ejemplo del procesamiento de los datos se analizan los resultados obtenidos en el pozo 9, el cual tiene una profundidad de 50 m y presenta dos zonas de filtros entre

24,3 - 34,3 y 38,5 - 50,0 metros. El nivel estático se encontraba a 25 m de profundidad durante las mediciones (MÚNERA y col. 1972). La figura 3 muestra los perfiles de concentración y su variación con el tiempo. Las curvas de la derecha corresponden a las primeras mediciones y las de la izquierda a las últimas.

El conjunto de curvas permite identificar las zonas en donde hay flujo horizontal en el acuífero. En el tramo comprendido entre 34 y 36 m (zona de tubería ciega), puede observarse que no hay pérdida del radiotrazador ya que no hay flujos. La figura 2 muestra una curva construida con los datos obtenidos y el cálculo de la velocidad en esta zona.

TABLA 1

Velocidades horizontales del agua en 10 pozos de la Isla de San Andrés.

Pozo N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Velocidad en m/día.	3,0	5,7	2,5	5,0	7,0	1,0	1,6	3,7	2,5	0,1
	3,5	0,4 *		3,0	6,5	0,5	1,2	2,7	5,0	0,1
				2,0		0,05	0,9		6,1	
							0,5		2,0	

* Velocidad vertical.

D. *Flujos verticales.*

En el pozo 2 se detectó la presencia de flujo vertical dentro del pozo, el cual se midió con dos inyecciones de trazador a una profundidad de 36 m. En la primera inyección se colocó el detector a 37 m de profundidad sin que se hubiera detectado el paso del radiotrazador, lo cual indicaba que el flujo era ascendente. En la segunda inyección se colocó el detector a 34 m. de profundidad.

El tiempo transcurrido entre el momento de la inyección y el del paso del trazador por el detector permitió calcular la velocidad del flujo ascendente. Conociendo así mismo la sección transversal del pozo se pudo evaluar el correspondiente caudal ascendente.

II. DETERMINACION DE LAS DIRECCIONES DE FLUJO SUBTERRANEO

A. *Principio básico.*

Si se inyecta un trazador en un segmento de un pozo, aquel será transportado en la dirección del flujo horizontal por el movimiento natural del agua (figura 4a). Midiendo posteriormente la concentración del trazador en las paredes del pozo, por medio de un dispositivo adecuado, se podrá determinar la dirección del flujo que corresponderá a la zona de mayor acumulación del trazador.

B. Técnica utilizada.

Para el estudio de la dirección del flujo subterráneo en San Andrés, se colocó una malla de alambre galvanizado dispuesta en forma cilíndrica contra las paredes del pozo a la profundidad deseada y claramente orientada con respecto al norte. Luego se procedió a inyectar lentamente (en el centro del eje de simetría de la malla) el trazador en forma de un compuesto químico fijable a su paso por la malla metálica, debido a intercambio iónico. Para ello se utilizó Oro-198 en forma de cloruro aurico.

Una vez terminada la inyección se procedió a retirar la malla del pozo y a identificar la zona de deposición del trazador por medio de un detector adecuadamente colimado (figura 4b). La posición del trazador indicó entonces el sentido del flujo con respecto al norte.

C. Resultados.

La figura 5 muestra el diagrama de la dirección del flujo obtenido en el pozo 9, representado en coordenadas cartesianas. La figura 6 presenta las direcciones obtenidas en algunos pozos localizados sobre el mapa de la Cuenca Central de la isla (PLATA y col., 1973).

III. VENTAJAS DE LAS TECNICAS UTILIZADAS

Entre las muchas ventajas que proporciona el uso de las técnicas de radiotrazadores, sobre otros métodos convencionales, se pueden mencionar los siguientes:

1. La velocidad puede determinarse sin conocer la porosidad del acuífero.
2. La técnica representa un método totalmente independiente para determinar la velocidad de filtración (velocidad de Darcy), sin aplicar la Ley de Darcy.
3. Solo un pozo es necesario para realizar las mediciones.
4. La velocidad del agua subterránea a cualquier profundidad dentro del perfil del pozo, se obtiene en forma independiente.
5. Velocidades desde algunos centímetros por día hasta varias decenas de metros por día se pueden medir dentro del pozo.
6. A esto se puede agregar el ahorro de esfuerzos, tiempo y dinero.

La principal desventaja de la técnica empleada es el hecho de que la medición en un pozo representa un dato puntual, el cual puede no ser representativo del área en estudio. Sin embargo, esto puede superarse si se efectúan mediciones en un suficiente número de pozos cuidadosamente seleccionados (RODRÍGUEZ 1973).

IV. CONCLUSIONES PRACTICAS Y APLICACIONES

La gran variación de los valores de la velocidad (de cm/día a m/día), y la existencia de flujos verticales, corrobora la afirmación de que el acuífero no es homogéneo y de que existen zonas impermeables y flujos concentrados a través de fracturas y aberturas de disolución (RODRÍGUEZ 1972).

El análisis hidrogeológico y las implicaciones prácticas que pueden deducirse de la información obtenida, exigen una correlación completa de todos los datos hidrológicos y geológicos, fuera del alcance de esta disertación.

Como conclusión directa de las velocidades altas encontradas y por la importancia que significa en el correcto aprovechamiento y manejo de los recursos hídricos de la isla, debe mencionarse que las zonas de altas velocidades requieren un estudio detallado y un control y manejo adecuado del acuífero, dados los peligros de contaminación biológica del agua subterránea, que pueden derivarse de los pozos sépticos aledaños al área de recarga.

Una vez conocidos los valores de la velocidad de filtración y bajo condiciones favorables de campo, pueden obtenerse parámetros tales como conductividad hidráulica y transmisibilidad.

La técnica tiene importantes aplicaciones en estudios de infiltraciones a través de canales, presas, diques y otras estructuras hidráulicas y problemas geotécnicos.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue iniciado bajo la dirección de A. Plata, del Organismo Internacional de Energía Atómica y ejecutado e interpretado por personal colombiano del grupo de hidrología del IAN. Se agradece la colaboración del ingeniero Jorge Quintero S., Jefe de Hidrogeología del Insfopal y el apoyo económico de esta entidad, sin lo cual no hubiera sido posible realizar el estudio.

REFERENCIAS

- MÚNERA, H., RODRÍGUEZ, C. O., SÁNCHEZ, L., ZAPATA, G. (1972). Determinación de la velocidad horizontal del agua subterránea en ocho pozos de la Formación San Andrés. IAN. Informe N° 3, 7 p., 5 figs. (Mimeografiado). Instituto de Asuntos Nucleares. Bogotá.
- PLATA, A. (1972). Isótopos en Hidrología. Editorial Alambra. Madrid.
- PLATA, A., MÚNERA, H., SÁNCHEZ, L., ZAPATA, G. (1973). Determinación de las direcciones de flujo en los diez pozos de agua de propiedad de Insfopal. IAN.

Informe N° 4, 10 p., 15 figs. (Mimeografiado). Instituto de Asuntos Nucleares.
Bogotá.

RODRÍGUEZ, C. O. (1972a). Análisis hidrogeológico de la Cuenca Central de la isla
de San Andrés, 12 p., 3 figs. (Mimeografiado). Instituto de Asuntos Nucleares.
Bogotá.

RODRÍGUEZ, C. O. (1972b). Isótopos en hidrología de aguas subterráneas. Universidad
Nacional. Facultad de Ingeniería. Sección de Hidráulica. 98 p., 27 figs., Bo-
gotá.

RODRÍGUEZ, C. O. (1973). Determination of aquifer parameters with radiotracers.
Submitted as part of the first term, M. Sc. course requirements in hydrogeology.
33 p., 10 figs. University of London, London.

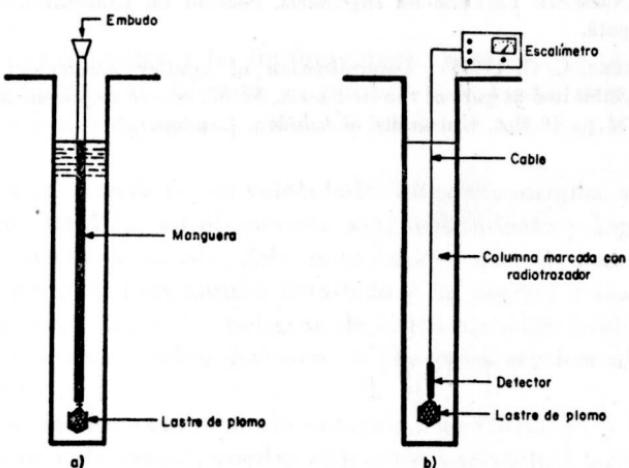


FIGURA 1 — a) Inyección del trazador
b) Sistema de medición

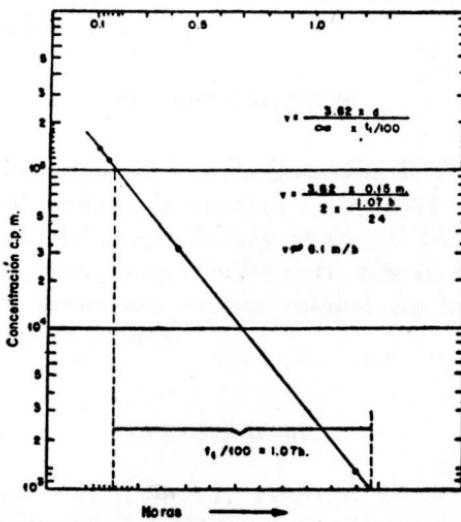


FIGURA 2 — Curva obtenida y cálculo de la velocidad en un nivel del Pozo No. 9

S.G.S.

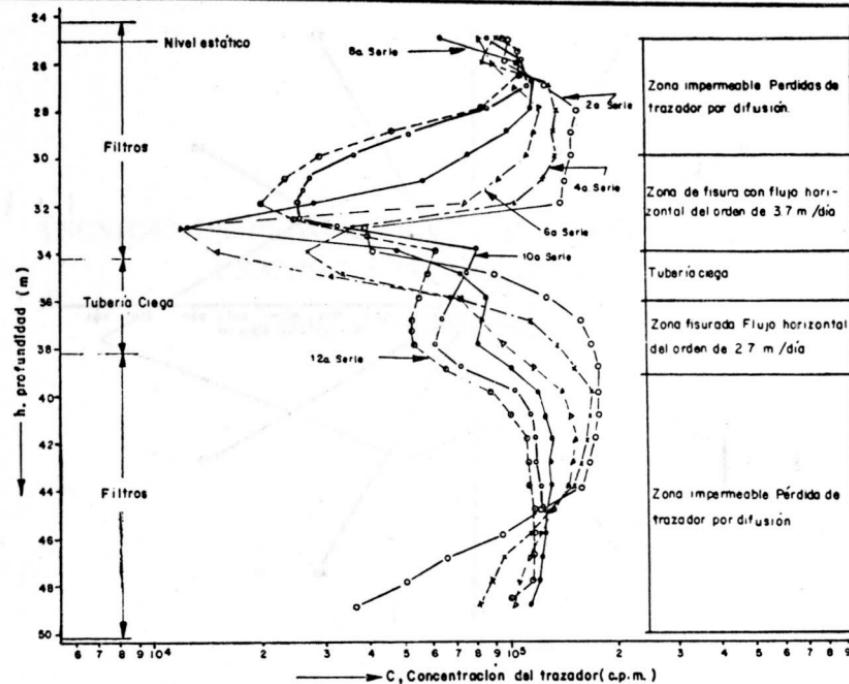


FIGURA 3.— Perfil de velocidades horizontales. Pozo No. 8

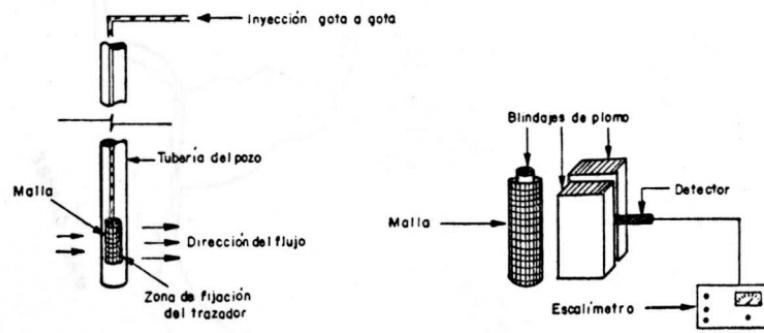


FIGURA 4.— Determinación de la dirección del flujo subterráneo.

S.G.S.

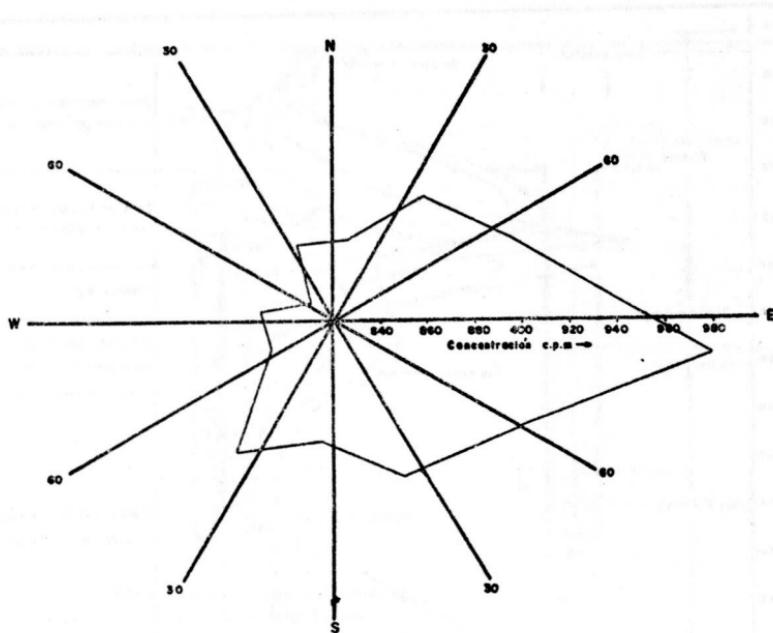


FIGURA 5.- Dirección del flujo en el pozo No. 9.

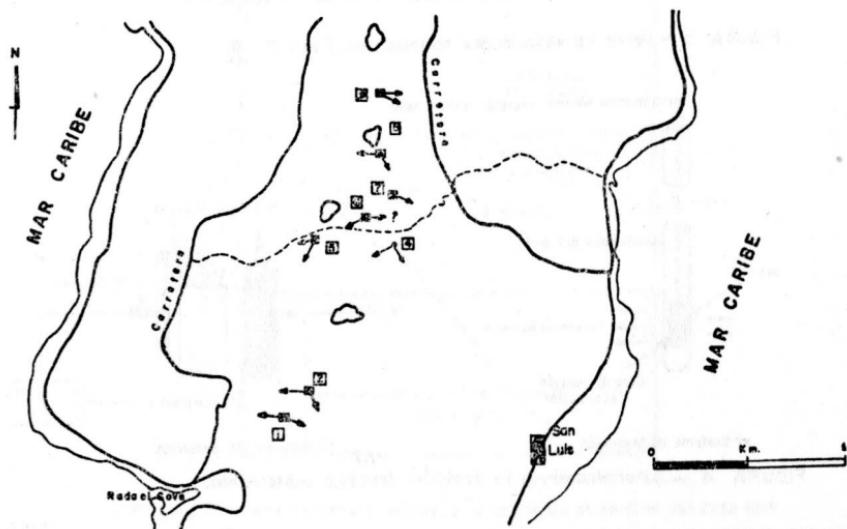


FIGURA 6.- Dirección de los flujos encontrados en algunos pozos de la isla de San Andrés.