TECNOLOGÍA DE LA INTRUSIÓN DE AGUA DE MAR EN ACUÍFEROS COSTEROS: PAÍSES MEDITERRÁNEOS
©IGME. Madrid 2003. ISBN. 84-7840-470-8

GEOFÍSICA APLICADA AL PROBLEMA DE LA INTRUSIÓN SALINA EN LOS ACUÍFEROS COSTEROS DE COSTA RICA

Mario E. Arias Salguero
M. Sc. Profesor, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
Tesiario, Département de Géophysique Appliquée, UMR 7619 Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, Francia.
marioa@geologia.ucr.ac.cr
Asdruval Vargas
Profesor, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
avargas@geologia.ucr.ac.cr
Roger Guérin
Maître de Conférences, Département de Géophysique Appliquée, UMR 7619 Sisyphe, Université Pierre et Marie Curie, Francia.
guerin@ccr.jussieu.fr

RESUMEN

La prospección geofísica es un complemento de los métodos hidrogeoquímicos, que permite una buena delimitación de la intrusión salina en tres acuíferos costeros de la región pacífica de Costa Rica. La metodología incluye: testificación en pozos (resistividad eléctrica y temperatura), sondeos y pseudosecciones eléctricas, sondeos, perfiles y mapas electromagnéticos de tipo slingram y en el dominio temporal para delimitar la extensión de la cuña de intrusión. Un estudio hidrogeológico tiene como objetivo zonificar y modelar los acuíferos teniendo en cuenta el riesgo y la vulnerabilidad a la contaminación, con el fin de planificar la explotación racional del recurso hídrico. Se presentan resultados preliminares de uno de los acuíferos aluviales seleccionados.

Palabras clave: Geofísica aplicada; Hidrogeología; Acuíferos costeros; Intrusión salina; Zonificación; Costa Rica.

ABSTRACT

Geophysical prospection is a complement of hydrogeochemical methods, that allows a good delimitation of the saline intrusion in three pacific coastal aquifers of Costa Rica. The methodology includes: well logging (electrical resistivity and temperature), electrical soundings and pseudosections, slingram and transitory electromagnetic soundings, profiles and maps, to delimit the extension of the intrusion brine. An hidrogeologic study has the objective to establish the zone and to model the aquifers taking into account the risk and the vulnerability to the contamination with the purpose of planning the rational explotation of the hidric resource. Preliminary results of one alluvial aquifer are presented.

Key words: Applied geophysics; Hidrogeology; Coastal acuifers; Saltwater intrusion; Zonifying; Costa Rica.

INTRODUCCION

Costa Rica; con tan solo 51100 km? de superficie, cuenta con más de 1000 km de línea de costa en el Océano Pacífico y 300 km en el Mar Caribe. La exuberante vegetación, el clima privilegiado del trópico y la estabilidad económica y política han permitido que la actividad turística sea la principal fuente de divisas del país, este hecho, ha repercutido en los recursos hídricos subterráneos, pues gran parte de la demanda de agua se satisface de la extracción en más de treinta pequeños acuíferos costeros de tipo aluvial que existen en el país (figura 1, Modificada de Vargas, 2000).

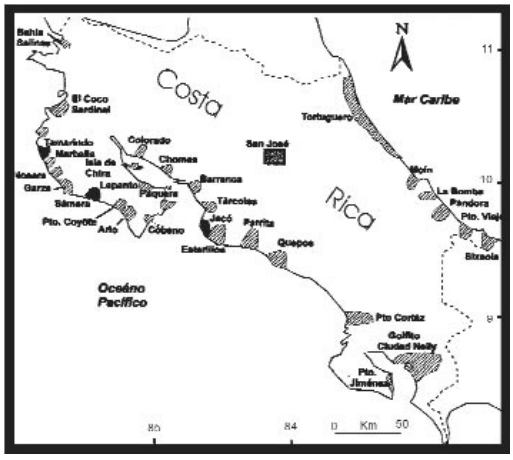

Figura 1. Mapa de ubicación de los acuíferos costeros de Costa Rica.

El aumento de la salinidad del agua subterránea, puesto en evidencia por: Protti (1981), Losilla (1993), Morera (1994, comunicación escrita), Arredondo *et al.* (1995, comunicación escrita), Echandi (1995, comunicación escrita), Arias (1996, comunicación escrita), Arellano y Vargas (2001) es explicado por la

entrada de agua de mar en algunos de estos acuíferos aluviales de la costa pacífica de Costa Rica.

El estudio del proceso de intrusión salina en estos acuíferos, requiere el establecimiento de redes de control que permitan efectuar el seguimiento de la evolución espacial y temporal de la salinidad del agua subterránea. Este control se realiza generalmente analizando la calidad química del agua en pozos y piezómetros ; sin embargo, la construcción y mantenimiento de la red de control es costosa y no proporciona una cobertura completa. Por ello, se ha preparado un proyecto de tesis doctoral, en conjunto, entre la Universidad de Costa Rica y la Université Pierre et Marie Curie en Francia, para potencializar la utilización de la prospección geofísica como una herramienta en la determinación y caracterización de la intrusión salina de los acuíferos costeros de Costa Rica. Este proyecto se desarrolla en la zona pacífica, específicamente en tres acuíferos aluviales denominados: Jacó, Tamarindo y Sámara (situados en la figura 1), se espera que los resultados beneficien directamente a más de 7000 personas y de manera indirecta al turismo que utiliza estas playas.

Para lograr el objetivo general de este proyecto, es necesario:

- caracterizar geofísicamente los acuíferos, utilizando los métodos geoeléctricos (sondeos, páneles, perfiles y mapas), electromagnéticos de tipo slingram (con el EM-34) y en el dominio temporal (TDEM) y registros geofísicos de pozos (temperatura, resistividad eléctrica y potencial espontáneo).
- delimitar los acuíferos seleccionados; tanto en extensión lateral como en profundidad y representar en mapas el inventario de pozos existentes.
- elaborar mapas de isopacas del aluvión y de isoconductividad eléctrica.
- determinar los parámetros dinámicos de los acuíferos: dirección de flujo, gradiente hidráulico, permeabilidad.
- graficar los diferentes parámetros hidrogeoquímicos y bacteriológicos con el propósito de clasificarlos según las normas internacionales.

Por medio de mapas y bloques diagrama, se representará el modelo conceptual del acuífero, con el fin de planificar la explotación racional de los acuíferos costeros y evitar así el proceso de intrusión salina por sobreexplotación o por ascenso del nivel del mar.

Considerando los resultados obtenidos se integrarán en un mapa de zonificación del acuífero, donde se delimitarán las zonas más vulnerables a la contaminación y se marcarán las áreas más aptas para la extracción racional del recurso hídrico.

Las características de los principales métodos geofísicos que se utilizarán en esta investigación son resumidas en Arias (2000a, 2000b).

Los métodos geoeléctricos, han sido y son utilizados como práctica habitual en la investigación hidrogeológica en Costa Rica, para obtener información de las propiedades del subsuelo. Estas técnicas de resistividad del subsuelo, se han realizado habitualmente mediante métodos que operan por corriente continua utilizando un dispositivo de diversos electrodos que se sitúan sobre el terreno, en contacto eléctrico con el medio rocoso a estudiar. Existe una notable variedad de dispositivos de medida en los que a disposición de electrodos se refiere, lo cual confiere a este tipo de medidas una gran flexibilidad para investigar variaciones en la distribución de la resistividad del subsuelo tanto lateral como en profundidad. Esta particularidad, junto con la abundante documentación y material interpretativo disponible, constituye una de las características más atractivas de las técnicas geoeléctricas.

Los métodos electromagnéticos son especialmente útiles en exploración de acuíferos colgados, cartografiado de contaminantes industriales, medición de salinidad e intrusión marina. Sus mayores ventajas sobre los métodos de corriente continua son: mayor sensibilidad a pequeñas variaciones de resistividad, las mediciones se pueden hacer más rápidamente y facilitan las investigaciones a mayor profundidad, además, son más efectivos en la detección de cuerpos conductores que de resistivos. Dentro de ellos, la variedad de sondeos electromagnéticos en el dominio temporal son menos influenciados por efectos laterales y son de especial ayuda en la delimitación del contacto de sedimentos aluviales con el basamento, cartografiado de lentes arenosos así como de la interfase agua dulce/agua salada.

Las técnicas de geofísicas de pozos, permiten realizar una interpretación más fácil y veraz de los datos geofísicos de superficie, constituyendo el nexo de unión entre la información geológica y geofísica. La interpretación conjunta de estos datos proporciona predicciones cada vez más confiables de las características materiales y geométricas de las formaciones infrayacentes, permitiendo al hidrogeólogo realizar modelos en dos y tres dimensiones de parámetros de flujo y transporte ya que es posible medir entre otras cosas: el grado de saturación, porcentaje de arcillas, porosidad, zonas de mayor permeabilidad, localización de la interfase de fluidos utilizando la temperatura, la conductividad y la salinidad, brinda además indicaciones de la litología y del buzamiento de las capas, lo cual permite realizar correlaciones estratigráficas. Estas técnicas serán implementadas en función de las características de los pozos existentes.

RESULTADOS PRELIMINARES

Acuífero de Jacó

Geológicamente, el acuífero aluvial de Jacó está constituido por depósitos cuaternarios de origen marino y terrestre. Los primeros son de tipo litoral y se encuentran principalmente en las desembocaduras de los ríos. Por su parte, los depósitos de origen terrígeno se encuentran aflorando en los cauces de los ríos y quebradas de la zona, correspondiendo con materiales coluvio–aluviales, producto de la acción erosiva de los mismos ríos, correspondiendo con arenas finas a medias, acompañadas de intercalaciones de aluviones que indican poco transporte debido a la característica subredondeada de sus clastos.

Hidrogeológicamente, se caracteriza porque la dirección del flujo subterráneo es hacia el sur-oeste con descarga al mar. La recarga del acuífero es directa y está relacionada con el régimen de precipitación de la zona que asciende a 3500 mm/a. El pH de las aguas subterráneas presentan una tendencia neutra y pocas variaciones en la temperatura. Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas presentan dominancia por ser bicarbonatadas con alguna tendencia cálcico-magnésica, reflejando una relación directa de recarga, producto de las aguas meteóricas.

Debido a la falta de afloramientos, información litológica de los pozos, así como el alto costo de las perforaciones investigativas, se consideró que la prospección geoeléctrica sería el método más apto para la exploración del acuífero, por lo tanto, en el área de Jacó se realizaron 7 sondeos eléctricos (SEV) y a partir de su distribución se integraron en un panel de correlación (figura 2).

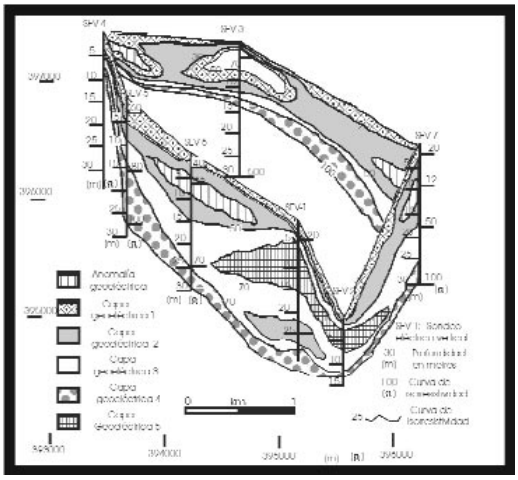

Figura 2. Panel de correlación geofísico a partir de SEV en Jacó.

La interpretación geoléctrica para las diferentes capas, ha permitido integrar la información obtenida en cada SEV y obtener una imagen tridimensional de las variaciones de facies litológicas que condicionan precisamente la distribución del agua subterránea en el sector de Jacó.

En la capa geoléctrica N°1, los valores de la resistividad son menores a 30 Ω.m, con espesores variables entre 1 y 5 m, se asocia con la capa superficial de suelo y se caracteriza por ser arenas finas saturadas que representan el manto acuífero más superficial, el cual ha sido captado por la mayoría de los pozos excavados. En el panel de correlación se observan tres anomalías de resistividad menores a 15 Ω.m, que se han asociado con lentes arcillosas dentro de la formación arenosa. En la capa geoeléctrica N°2, los valores de resistividad se encuentran entre 30 y 50 Ω.m y se han asociado con arenas de granulometría media, con algún contenido variable de saturación y con espesor fluctuante entre los 1 y 12 m. La capa geoeléctrica N°3, pone en evidencia que los valores de resistividad se encuentran entre 50 y 70 Ω.m y corresponden con arenas gruesas con algún porcentaje importante de arcillas, su espesor es muy variable y su potencial acuífero es medio. Por su parte, en la capa geoeléctrica N°4, los valores de la resistividad se encuentran entre 70 y 100 Ω.m y se interpretan como arenas medias, secas y arcillosas, su potencial acuífero es bajo, finalmente; el basamento de la zona queda representado en la capa geoeléctrica N°5, donde los valores de resistividad son mayores a 100 Ω.m y se han asociado con los materiales basálticos existentes.

Riesgo y Vulnerabilidad del Acuífero

Debido a las características del acuífero, la porosidad de los materiales, la velocidad de infiltración del agua y el uso turístico del suelo; se ha considerado que el mismo, presenta un alto riesgo y una alta vulnerabilidad a la contaminación bacteriológica y por intrusión salina. Por ejemplo, la contaminación con aguas negras, producto de la construcción de un tanque séptico ubicado a menos de 10 m de uno de los pozos de monitoreo, puede contaminar un sector importante del acuífero especialmente en la dirección del flujo. Las evidencias de intrusión salina por su parte, se observan cuando los valores de conductividad del agua en algunos pozos ascienden a los 2680 μS/cm (3.73 Ω.m), principalmente en la zona cercana a la costa, en la cual precisamente se encuentra ubicada la mayor cantidad de infraestructura turística que posee o podría en los próximos años construir pozos para el abastecimiento.

Considerando tanto los factores naturales como antropogénicos y legales, se elaboró un mapa de zonificación (figura 3), en la cual se han definido tres

zonas donde no se deben realizar perforaciones o excavaciones para nuevos pozos. La zona N°1 es la de mayor vulnerabilidad a la intrusión salina, y corresponde con los valores más altos de las curvas de isoconductividad registradas en los pozos. La zona N°2 corresponde con el sector en el cual, por normativa técnica del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas; Riego y Avenamiento (S.E.N.A.R.A.) no se deben realizar pozos en los sectores costeros, correspondiendo con 1 km lineal a partir de la línea de costa. La zona N°3, comprende 100 m lineales a partir de la orilla de los cauces de ríos y quebradas en las cuales no se deben realizar pozos por que puede existir comunicación hidráulica entre el río y el pozo y contaminarse el uno al otro.

Figura 3. Mapa de zonificación para la explotación racional del recurso hídrico subterráneo en Jacó.

En un futuro cercano se ha planeado establecer una red geofísica de monitoreo de las propiedades de conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea en Jacó, para delimitar espacialmente y temporalmente la intrusión salina, ya que es posible la determinación de una interfase pseudo-estacionaria que defina la posición aproximada del frente de intrusión marina respecto a la línea de costa a profundidad y se podrá predecir el avance de la intrusión salina con antelación (Díaz *et al.*, 1995). Además se realizarán una serie de pseudosecciones eléctricas así como, sondeos y perfiles electromagnéticos con el propósito de corroborar la delimitación que se obtenga con la medición de conductividad eléctrica y temperatura.

CONCLUSIONES

En los últimos años, la localidad de Jacó ha desarrollado una amplia infraestructura turística que cada día demanda mayor cantidad de agua potable, tanto para consumo humano como para recreación, por esta razón, la mayoría de los centros turísticos del lugar se abastecen de agua subterránea que obtienen de pozos excavados o perforados años atrás. El hecho de una creciente explotación, en algunos casos irracional de este preciado líquido, la cercanía con la costa y el desarrollo urbanístico y turístico requiere de un estudio detallado para evaluar la calidad del agua así como prevenir y controlar la intrusión salina.

La importancia de este proyecto de investigación radica en la implementación de las técnicas geofísicas, que ayuden en la evaluación relativamente expedita y a bajo costo del proceso de intrusión salina en los acuíferos costeros de Costa Rica, además ayudará en la prevención de la contaminación de los recursos hídricos y la garantía de un abastecimiento de agua potable segura y suficiente, lo cual conllevará al mejoramiento en la conservación, gestión y utilización sostenible del recurso agua.

Los resultados de estos estudios, servirán de base para determinar la factibilidad hídrica en el planeamiento y desarrollo de proyectos urbanísticos y turísticos que requieren de un recurso hídrico sostenible en calidad y cantidad. Por lo tanto, los técnicos y profesionales en planificación de instituciones como municipalidades, administradores de acueductos rurales, desarrolladores de proyectos turísticos y los pobladores serán beneficiados al contar con información básica para sus planes de desarrollo.

La aplicación de las técnicas geofísicas, enfocadas a la investigación de las variaciones laterales y en profundidad, es sin duda una herramienta de gran valor para el estudio del problema de la intrusión salina en acuíferos costeros; pues permite obtener una visión bidimensional de las características litológicas asociadas, así como la extensión y monitoreo de la cuña de intrusión (Arias, 2002a, 2002b).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arellano, F. y Vargas, A. 2001. *Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la península de Nicoya (Costa Rica).* Rev. Geól. América Central. 25. 77-84 pp.

Arias, M. E. 2000a. *Las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología*. Primer Simp. Reg.: Manejo Integrado de Aguas Subterráneas, un reto para el futuro. Organismo Internacional de Energía Atómica. Universidad Nacional de Costa Rica [en prensa].

Arias, M. E. 2000b. *Métodos geofísicos*. En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (comp.): Geología de Costa Rica. Ed. Tecnológica de Costa Rica, Cartago. 393-409 pp.

Arias, M. E. 2002a. *La prospección geoeléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidroge*ología. Rev. Geól. América Central. 27. [en prensa].

Arias, M. E. 2002b. *Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica.* Rev. Geól. América Central. 27. [en prensa].

Diaz, J.; Martine, D.; Maldonado, A. y Gomez, M. 1995. *Red de control σ/T para el estudio de la intrusión marina en Almuercar (Granada).* Bol. Geológico y Minero. Vol. 106-4. 358-372 pp.

Losilla, M. 1993. *Evidencias de amenaza a las aguas subterráneas de Costa Rica*. Taller de aguas subterráneas, Colegio Federado de Ingenieros, San José. 23 pp.

Protti, R. 1981. *Geología y geofísica con fines hidrogeológicos en la planicie costera de Jicaral, Puntarenas.* Univ de Costa Rica. San José [Tésis de Lic] 47 pp + 5 mapas.

Vargas, A. 2000. *Acuíferos*. En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (comp.): Geología de Costa Rica. Ed. Tecnológica de Costa Rica, Cartago. 425-442 pp.