

La primera experiencia en la aplicación de los Métodos Electromagnéticos en acuíferos costeros de Costa Rica: El caso de Tamarindo, Guanacaste

M. E. Arias Salguero

Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica. Apartado: 214-2060, Costa Rica
E-mail: marioa@geologia.ucr.ac.cr

RESUMEN

Se describen los resultados de la primera aplicación con fines hidrogeológicos de los métodos electromagnéticos en el país. Esta ha sido realizada con el fin de obtener información sobre el modelo conceptual del acuífero, la extensión de la intrusión salina, así como para completar algunos parámetros necesarios para la obtención del índice de vulnerabilidad intrínseca en Tamarindo. Para ello, se realizaron seis perfiles electromagnéticos en el dominio de las frecuencias (FDEM) y dieciséis sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM). El poder de resolución de los equipos, la facilidad de aplicación en el campo y las ventajas en los programas de interpretación, hacen de estos métodos una herramienta de gran utilidad para la evaluación y caracterización de los acuíferos costeros de tipo aluvial que existen en Costa Rica.

Palabras clave: Costa Rica, intrusión salina, métodos electromagnéticos, Tamarindo, vulnerabilidad intrínseca

The first experience of application of the Electromagnetic Methods in coastal aquifers of Costa Rica: The case of Tamarindo, Guanacaste

ABSTRACT

The first application of the electromagnetic methods with hydrogeological goal in Costa Rica is described. This has been carried out with the purpose of obtaining information on the conceptual model, the extension of the saline intrusion, as well as to complete some parameters for obtaining the index of intrinsic vulnerability in Tamarindo. For it, they were carried out six electromagnetic profiles in the domain of the frequencies (FDEM) and sixteen electromagnetic sounding in the domain of the time (TDEM). The power of resolution of the equipment, the easy application in the field and the advantages in the interpretation programs, make these methods a tool of great utility for the evaluation and characterization of the coastal aquifers in Costa Rica.

Key words: Costa Rica, electromagnetic methods, intrinsic vulnerability, saltwater intrusion, Tamarindo

Introducción

El estudio de los acuíferos costeros en Costa Rica, un país con tan sólo 51.100 km² de superficie, con exuberante vegetación, clima tropical, estabilidad económica y política, se ha convertido en una prioridad académica debido a que actualmente la actividad turística es 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 de pequeños acuíferos costeros tipo aluvial como el desarrollado en Tamarindo.

Esta localidad es particularmente importante, pues en ella se localizan: el Refugio de Vida Silvestre Tamarindo, creado por decreto ejecutivo en 1987, así como el Parque Nacional Marino Baulas, creado mediante la ley de la República 7.524 en 1995, siendo

este uno de los principales sitios de desove mundial de la tortuga Baula. Sin embargo, no han sido exentos de los efectos de la actividad antrópica, que debido al acelerado desarrollo turístico están amenazando el equilibrio natural de las poblaciones de la tortuga Baula, así como del recurso hídrico subterráneo.

Debido a la limitada información geológica e hidrogeológica existente, se procedió en el año 2005 a la aplicación de métodos electromagnéticos para conocer características litológicas, profundidad del nivel estático, conductividad y resistividad del suelo, con el fin de esclarecer el modelo conceptual del acuífero, la extensión de la intrusión salina, así como para completar algunos parámetros necesarios para la obtención del índice de vulnerabilidad intrínseca en Tamarindo.

Contexto geológico e hidrogeológico

El sector de Tamarindo se encuentra localizado en la península de Nicoya, en la costa pacífica del país. Geológicamente, afloran dos formaciones que se describen a continuación:

Complejo de Nicoya

Representa el basamento local y regional de Costa Rica (Denyer y Arias, 1991). El mismo autor indica que el espesor no se puede comprobar por métodos directos y determinó un espesor mínimo aflorante con base en las alturas topográficas máxima y mínima de 1.500 m. Baumgartner (1987), asigna a las radiolaritas más antiguas de esta formación edad Jurásico Inferior. Denyer y Arias (1991), datan el límite superior con los sedimentos pelágicos-hemipelágicos intercalados en el Campaniano Superior. En Tamarindo, afloran basaltos de manera discontinua, principalmente en el Cerro Almendro. Las radiolaritas se encuentran ampliamente distribuidas en la zona, especialmente en el Cerro el Morro y en los poblados de Matapalo, Huacas y Santa Rosa. Por su parte, los gabros son muy comunes en varios cerros entre ellos: El Morro, Achiotal y Redondo.

Depósitos recientes

Los depósitos recientes son de tipo arena, limo y arcilla en forma de planicies costeras y bancos de arena litorales que conforman parte de las playas y manglares como los Esteros Tamarindo y San Francisco. De la información suministrada en los registros de pozos, se evidencia la presencia de aluviones de variable granulometría, así como capas y/o lentes de arcilla de diverso espesor, alcanzando un valor máximo de 30 m reportado en los pozos.

Desde el punto de vista hidrológico, el sector de Tamarindo se encuentra inmerso dentro de dos microcuencas: la primera de ellas es la del río Matapalo que tiene un área aproximada de 60 km² y los tributarios principales son el río Matapalo y Lajas, mientras que el área de la otra es de 22 km² y corresponde con la cuenca del río San Andrés. El régimen de lluvia de esta zona muestra una precipitación mayor en los meses entre mayo y noviembre, con valor promedio de 1.800 mm/año (Morera y Matamoros, 2003).

El mapa hidrogeológico (figura 1) muestra la localización de la zona de estudio y la distribución de los

23 pozos con información litológica que han sido utilizados en la interpretación geofísica, así como las curvas piezométricas y la dirección del flujo del agua subterránea, evidenciando una descarga hacia SO con salida hacia el Estero Tamarindo. Debido a las heterogeneidades de granulometría, litología y espesor propia de estos materiales aluviales (gravas, arenas, limos y arcillas), existen variaciones en los parámetros de: porosidad del suelo, el cual varía entre 25 y 50%; permeabilidad del suelo, variando desde 2,4 E⁻² m/d hasta 1,96 m/d y de transmisividad del acuífero oscilando entre 350 m²/d y 1.800 m²/d. Desde el punto de vista hidrogeoquímico el agua subterránea se caracteriza por ser del tipo bicarbonatada cálcica y bicarbonatada cálcica con tendencia magnésica, presenta un pH neutro y valores de conductividad eléctrica del orden de los 450 mS/cm, reflejando una relación directa de recarga, producto de las aguas meteóricas.

Marco conceptual de los métodos electromagnéticos

Estos métodos geofísicos permiten estudiar el subsuelo a partir del parámetro de resistividad o, de su valor inverso, la conductividad de las formaciones que lo componen. En el caso de los métodos electromagnéticos la corriente es oscilante y por lo tanto asociada a ondas electromagnéticas (Meyer de Stadelhofen, 1995).

Los métodos electromagnéticos se pueden clasificar en primera instancia en dos categorías: una relacionada con las frecuencias de operación utilizada, dando origen a los Métodos Electromagnéticos en el Dominio de las Frecuencias (FDEM), mientras que la otra categoría es la que utiliza el tiempo como parámetro de variación de la profundidad prospectada, dando cabida a los Métodos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (TDEM).

Autores como Kafri y Goldman (2005), Monteiro (2004), Albouy *et al.* (2001), Arias (1999), Rabinovich (1995), Geonics (1992), Nabighiam y Macnae (1991), Goldman *et al.* (1991), Granda Sanz *et al.* (1987), Hatch *et al.* (2002), entre otros; describen los fundamentos teóricos y ejemplifican diversas aplicaciones, destacándose: determinación de zonas fracturadas que favorecen la porosidad secundaria en acuíferos; cartografiado de zonas altamente conductoras dentro del mismo acuífero, que en la mayoría de los casos están relacionadas con plumas de contaminación; determinación de la extensión de la intrusión salina en acuíferos costeros; identificación de cavidades y caracterización de tipos de suelo.

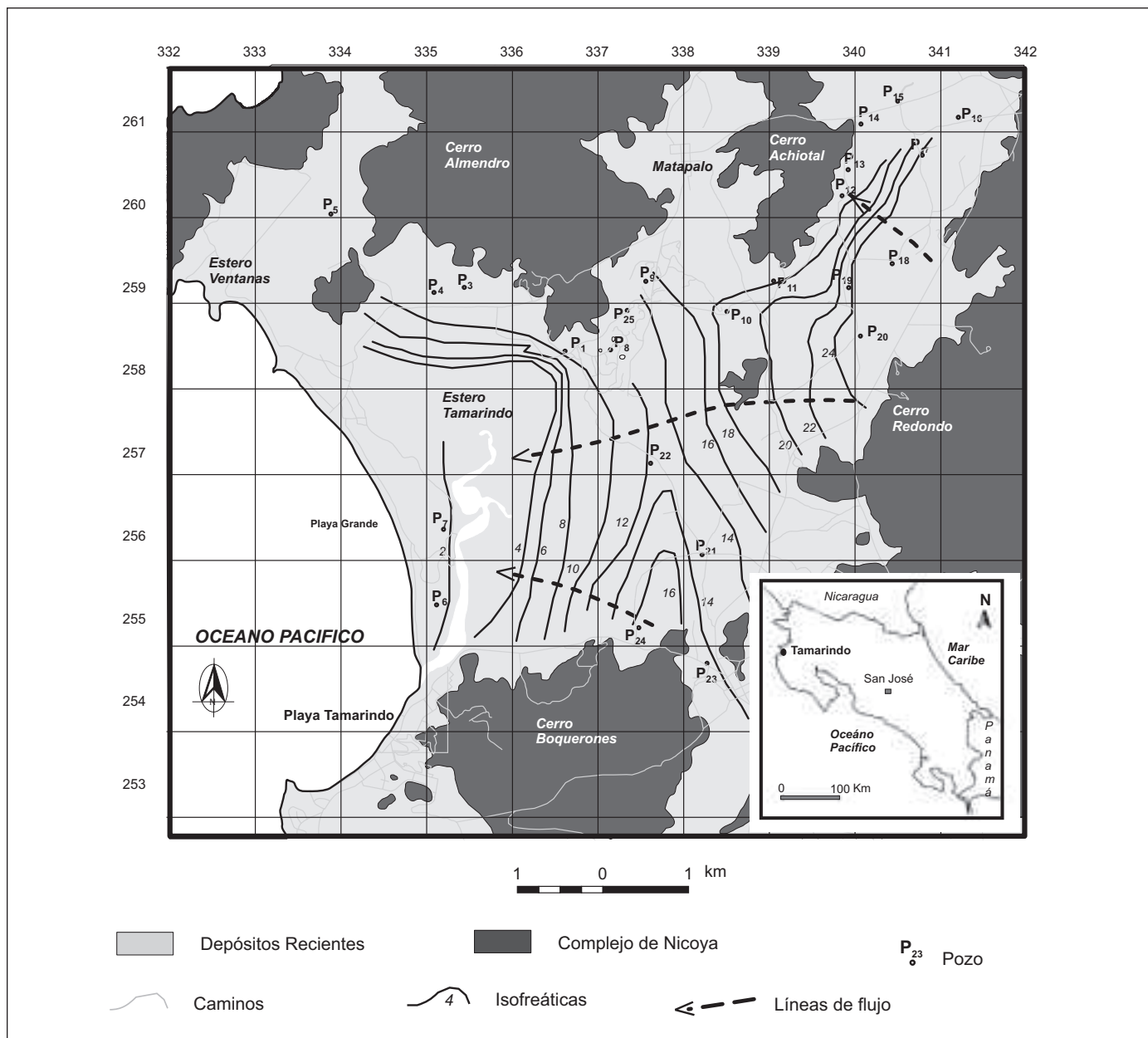


Fig. 1. Mapa Hidrogeológico y de localización
 Fig. 1. Hydrogeological and location map

El Método electromagnético en el dominio de las frecuencias

A pesar de existir una gran variedad de dispositivos de medición tanto para perfilaje, sondeos y cartografiado, en la localidad de Tamarindo se utilizó la instrumentación del tipo EM-34 que mide la conductividad del suelo en mS/m (Geonics, 1980). Sus principales componentes son dos bobinas, las cuales se conectan por medio de un cable de referencia al

transmisor y al receptor de la señal electromagnética. La separación de las bobinas determina la resolución lateral y la profundidad de penetración.

La metodología de trabajo en el campo consistió en la realización de perfiles con distinta penetración en función de la separación de las bobinas y de la posición de las mismas. Así, es posible obtener hasta seis datos en cada punto de medición de un perfil, lo cual permite realizar interpretaciones en función de la profundidad y de las variaciones laterales. Para la rea-

lización de un perfil se requiere de dos personas y en condiciones ideales se podría prospectar hasta 5 km diarios.

El Método electromagnético en el dominio del tiempo

La prospección con la técnica TDEM se basa en la medida del valor de la resistividad aparente del subsuelo a través de la evaluación del transitorio de un campo magnético secundario, producido por la circulación a profundidad de corrientes eléctricas débiles, inducidas artificialmente en el subsuelo por la propagación de un campo magnético primario.

La propagación del campo electromagnético primario en el subsuelo se obtiene por inducción provocada por el paso de corriente alterna en una bobina, constituida por un cable eléctrico dispuesto de forma circular o cuadrada sobre el terreno; las dimensiones de la bobina transmisora y la intensidad de corriente que circula en la bobina condicionan la profundidad de investigación. Una segunda bobina de características similares a la anterior opera como bobina receptora. En algunas configuraciones de medida es posible utilizar la misma bobina con doble función de receptora y transmisora. La máxima profundidad de investigación depende también de la velocidad de atenuación del campo transitorio y de la resistividad eléctrica de las capas superficiales. En términos generales, en los medios eléctricamente conductores la corriente eléctrica queda apantallada por los niveles superiores, mientras que se propaga a mayor profundidad en los materiales eléctricamente más resistivos (Descloitres, 1998).

El equipo utilizado en esta investigación fue una herramienta portable y multifunción denominada TEM-FAST 48 HPC que provee alta resolución, facilidad de operación y con diversos campos de aplicación en el área de las geociencias.

Resultados de aplicación en Tamarindo

Con el fin de obtener información sobre la litología, ambiente deposicional, relaciones estratigráficas, profundidad del nivel estático, conductividad y resistividad del suelo, se realizaron 6 perfiles electromagnéticos en el dominio frecuencial con el equipo EM-34 y un paso de muestreo de 10 m. Además, se realizaron 16 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo utilizando bobinas cuadradas de 25 m de lado. La distribución espacial de estos ensayos se aprecia en la figura 2.

La selección de estos métodos está basada en el poder de resolución y tipo de información que proporcionan (Arias, 2002a; Arias, 2002b).

Perfiles EM-34

Estos perfiles se realizaron utilizando tanto el dipolo vertical como el horizontal con separación entre las bobinas de 10, 20 y 40.

La figura 3, corresponde al perfil L1 con una longitud de 1.720, realizado en el camino principal que conduce a Tamarindo. Debido al efecto del ruido ambiental existente en el lugar (estructuras metálicas y efecto de circulación vehicular), no fue posible la utilización del dispositivo de 40 metros de separación entre las bobinas.

La morfología del gráfico A de la figura 3, muestra una tendencia a valores del orden de 16 mS/m (62 Ω m), con algunos valores anómalos que corresponden precisamente con ubicación de estructuras tales como talleres, postes eléctricos y vehículos estacionados. Sin embargo, a partir de la longitud 1.120 m los valores anómalos son más evidentes y se puede deber al afecto litológico, pues en este sector se encuentra aflorando material basáltico muy fracturado en uno de los márgenes de la carretera.

Por su parte, en el gráfico B de la figura 3 se muestra una tendencia similar con valores del orden de los 40 mS/m (25 Ω m), evidenciando la existencia de las litologías posiblemente meteorizadas del Complejo de Nicoya. Al igual que en el caso anterior, en la longitud 1.120 m es evidente el cambio en la respuesta electromagnética; correlacionándose también con la existencia de material basáltico aflorante.

La figura 4, representa el perfil L2 con una longitud de 700 m, realizado en el campo de aterrizaje de la localidad. En él se aprecia como el valor de la conductividad eléctrica varía en profundidad y lateralmente, brindando información sobre las variaciones litológicas de la zona. La morfología de los perfiles es muy similar entre ellos, mostrando la existencia de sectores conductores con valores del orden de hasta 90 mS/m, equivalente a 11 Ω m, y sectores resistivos con valores de 5 mS/m (200 Ω m). La interpretación está relacionada con los depósitos del Río San Andrés, el cual en este sector se caracteriza por la existencia de gran cantidad de meandros de reducido tamaño, lo cual hace pensar en procesos de deposición de materiales finos como limos y arcillas que caracterizan los sectores conductores y, por otra parte, la deposición de arenas y gravas en paleocanales que corresponden con los sectores resistivos.

Con el fin de caracterizar y establecer si existe una

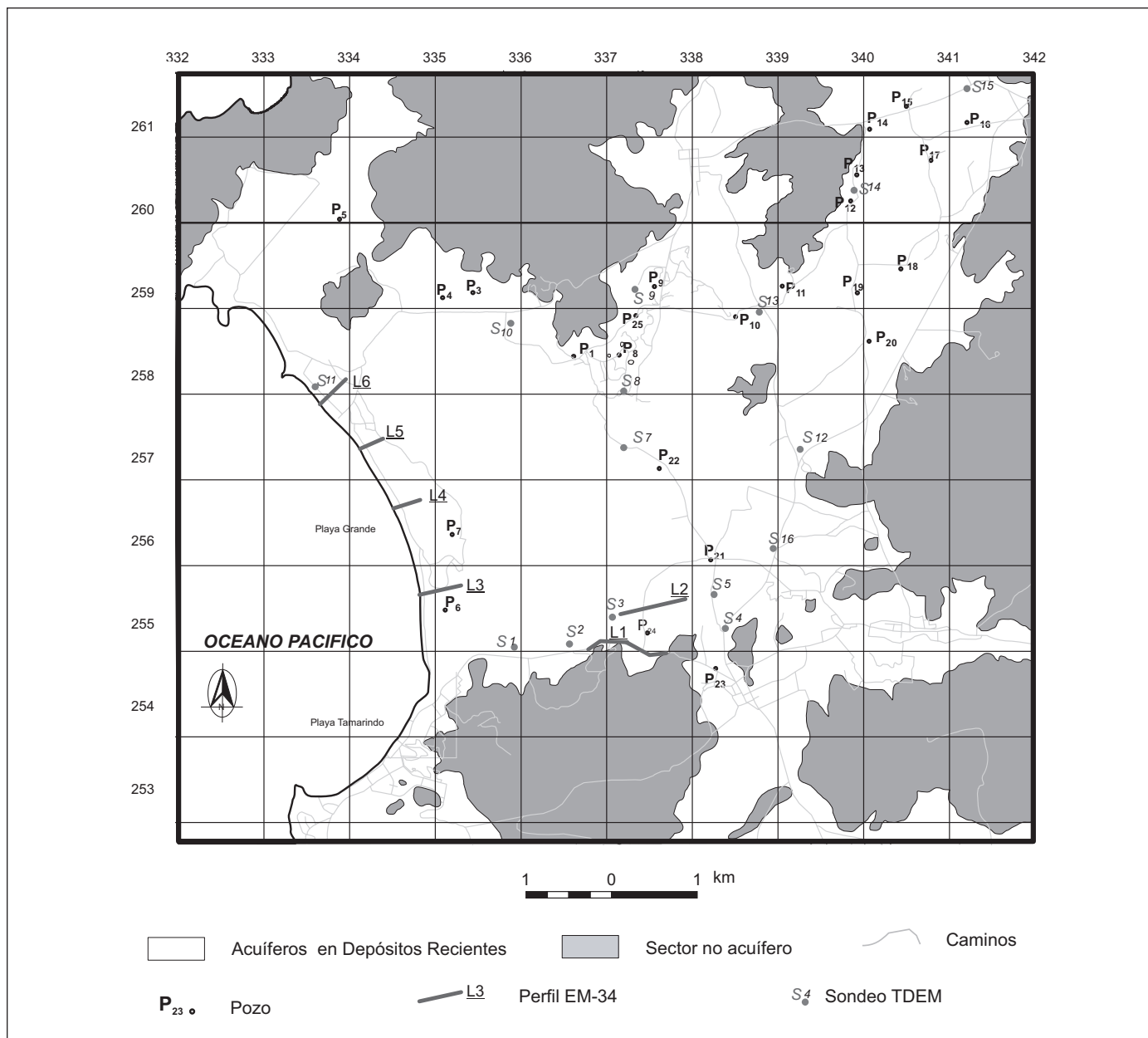


Fig. 2. Localización de Sondeos TDEM y Perfiles EM-34
 Fig. 2. TDEM soundings and EM-34 profiles location

influencia significativa entre el agua salada y la descarga del acuífero, generando ya sea un proceso de contaminación salina –proceso natural debido al efecto de las mareas- o de intrusión salina –debido al efecto antrópico-, se realizaron cuatro perfiles electromagnéticos perpendiculares a la costa en el sector de Playa Grande. Los perfiles realizados desde la línea de costa muestran los cambios de conductividad del suelo, los cuales varían conforme aumenta la distancia desde la costa, evidenciando la influencia

del agua salada sobre el valor de conductividad (figura 5). En estos perfiles, los datos de conductividad para los primeros metros a partir de la línea de costa, son reportados como valores negativos en el gráfico correspondiente al dipolo vertical, esto es debido al alto valor de la conductividad del suelo que ha sido invadido por el agua salada, excediendo el rango de medición del equipo EM-34.

De la distribución de los datos de conductividad del suelo presentados en el perfil L3 y considerando

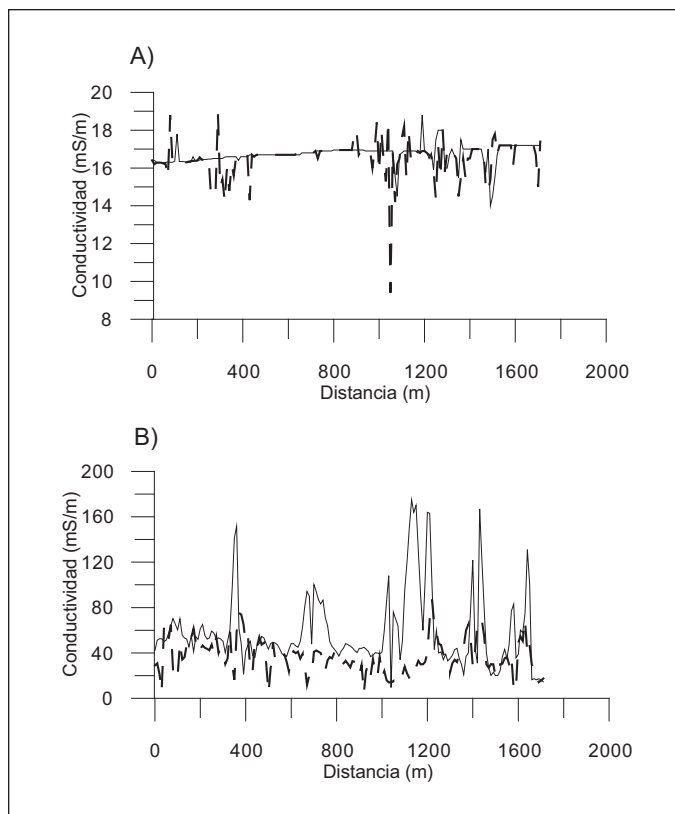


Fig. 3. Perfil electromagnético EM-34 en la calle principal (L1). A) Separación entre bobinas de 10 m. B) Separación entre bobinas de 20 m. Línea continua representa el dipolo horizontal y línea discontinua corresponde con el dipolo vertical

Fig. 3. EM-34 Electromagnetic profile (L1) on the main street. A) 10 m coil separation. B) 20 m coil separation. Continuous lines are horizontal dipoles and dash lines are vertical dipoles

que este perfil se encuentra localizado en el Estero Tamarindo y cerca de la desembocadura del río del mismo nombre, es evidente que a lo largo de los 400 m de longitud se presentan valores negativos de conductividad, reflejando la contaminación generada por el efecto de las mareas.

En los otros perfiles (L4, L5 y L6), los valores de conductividad eléctrica permiten observar como la distancia de invasión del agua de mar desde la línea de costa es relativamente pequeña; no excediendo en estos casos los 100 m (L6). Con respecto a la profundidad, también se aprecia que el contacto del aluvión saturado con agua dulce y del aluvión saturado con agua salada es muy vertical, debido posiblemente a la carencia de explotación actual del agua subterránea en estas localidades, lo cual permite que la zona de interfase se encuentre en este momento en equilibrio hidrodinámico.

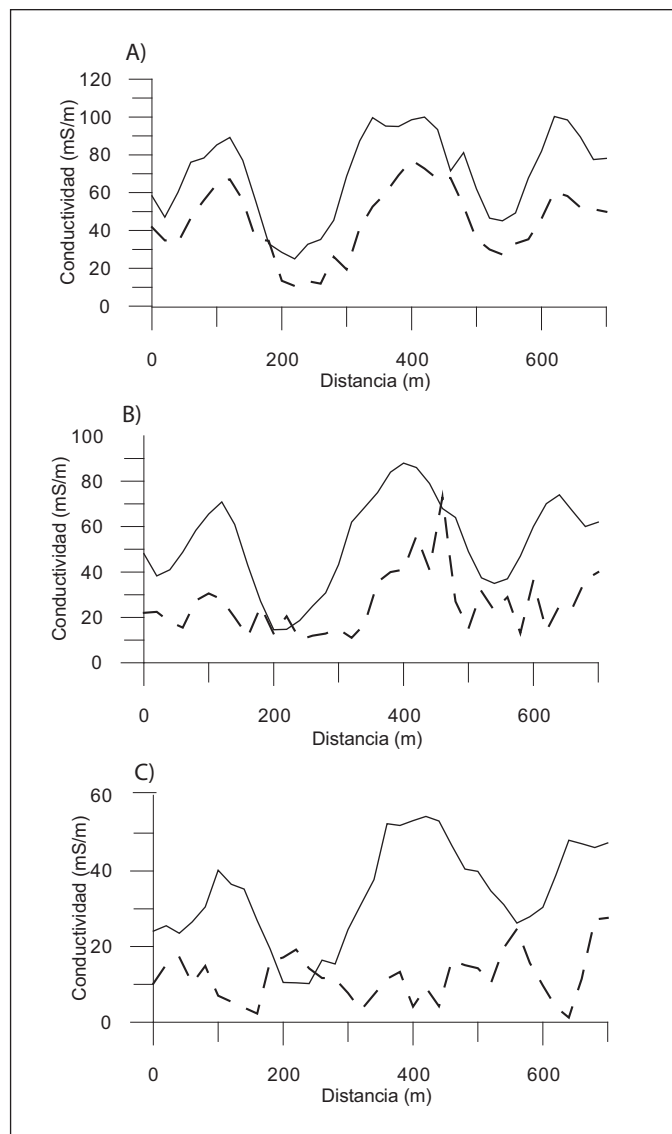


Fig. 4. Perfil electromagnético EM-34 en el campo de aterrizaje (L2). A) Separación entre bobinas de 10 m. B) Separación entre bobinas de 20 m. C) Separación entre bobinas de 40 m. Línea continua representa el dipolo horizontal y línea discontinua corresponde con el dipolo vertical

Fig. 4. EM-34 Electromagnetic profile (L2). A) 10 m coil separation. B) 20 m coil separation. C) 40 m coil separation. Continuous lines are horizontal dipoles and dash lines are vertical dipoles

Sondeos TDEM

Los sondeos Electromagnéticos en el Dominio Temporal, han sido agrupados en varios perfiles de correlacionando la resistividad eléctrica del suelo. El perfil que se describe a continuación (figura 6), corresponde a los sondeos S₁, S₂, S₃, S₅, S₁₆. La figura

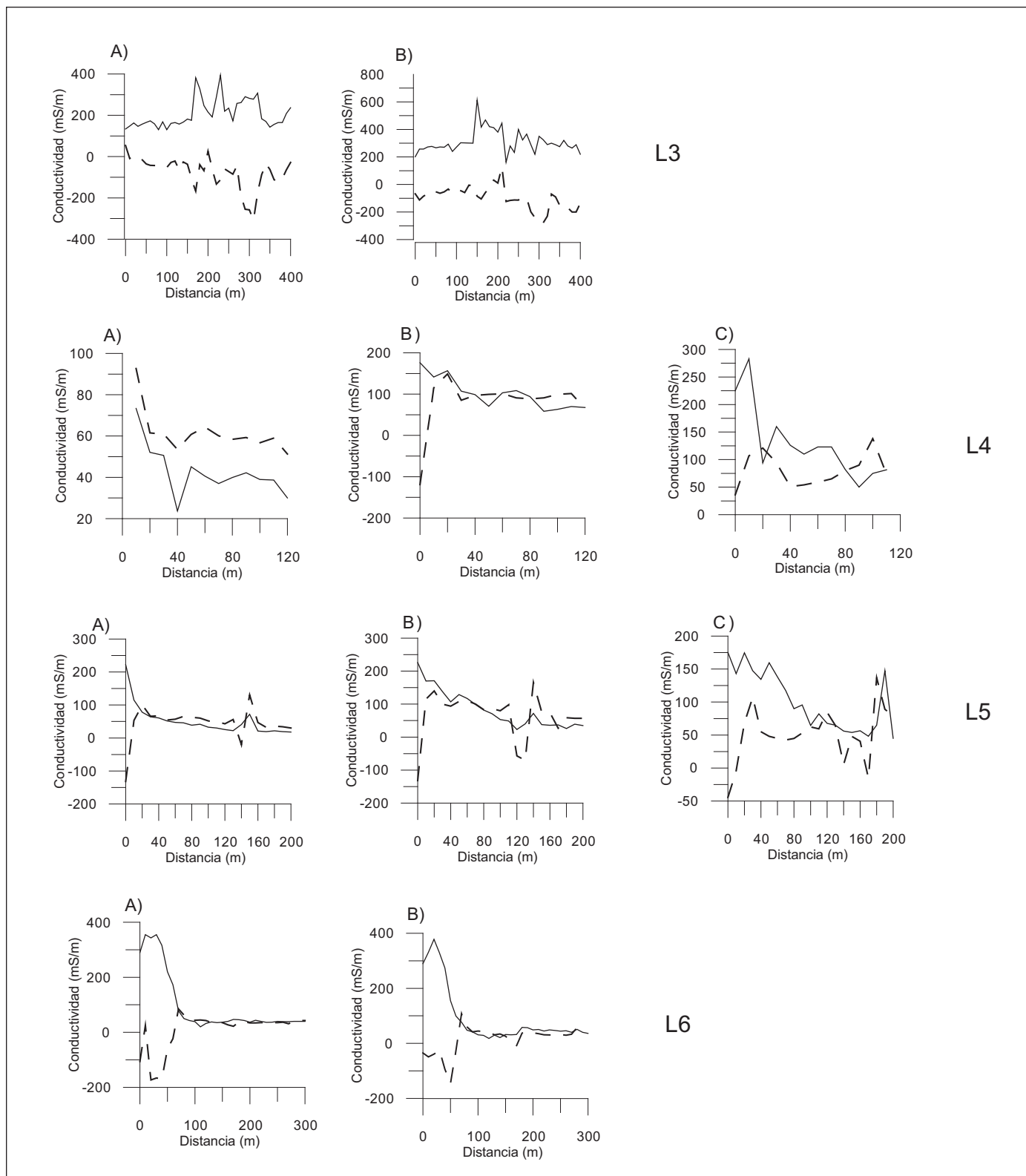


Fig. 5. Perfiles electromagnéticos EM-34 en Playa Grande (L3, L4, L5, L6). A) Separación entre bobinas de 10 m. B) Separación entre bobinas de 20 m. C) Separación entre bobinas de 40 m. Línea continua representa el dipolo horizontal y línea discontinua corresponde con el dipolo vertical

Fig. 5. EM-34 Electromagnetic profiles at Playa Grande (L3, L4, L5, L6). A) 10 m coil separation. B) 20 m coil separation. C) 40 m coil separation. Continuous lines are horizontal dipoles and dash lines are vertical dipoles

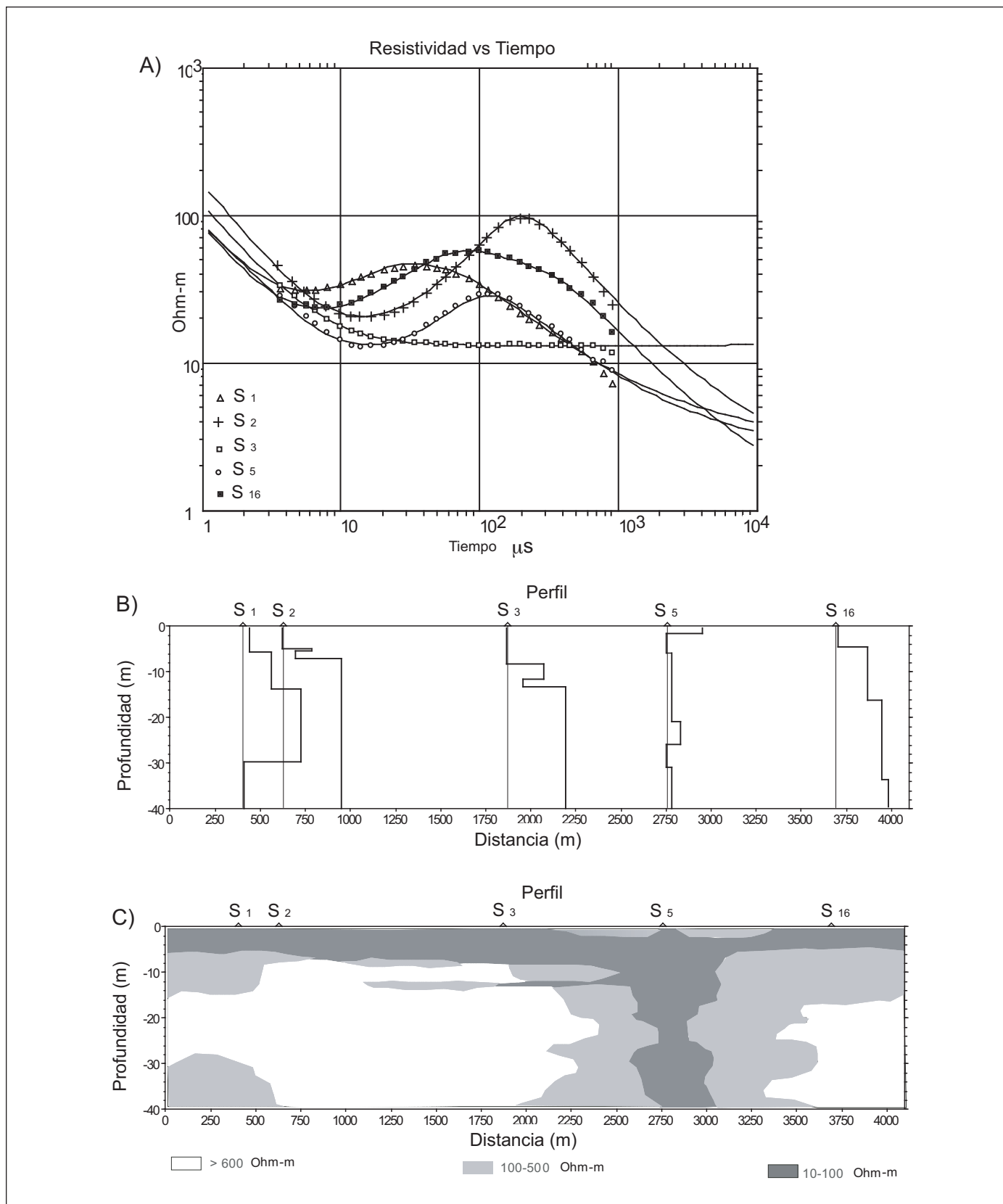


Fig. 6. Perfiles electromagnéticos tipo TDEM
 Fig. 6. TDEM electromagnetic profiles

6A, muestra las curvas de resistividad en función del tiempo de cada uno de los sondeos. De ella se desprende que la tendencia de las curvas, a excepción del S₅, es de presentar al menos una capa resistiva de duración variable en el tiempo (que condicionará el espesor) la cual será correlacionada más adelante como el acuífero. Esta forma de las curvas influye en el modelo de capas obtenido y en la sección de correlación de resistividad eléctrica.

El modelo obtenido después de la inversión de los datos de las diferentes capas geoelectricas en función del espesor para cada una se muestra en la figura 6B. Los modelos de cada sondeo se han ubicado a lo largo de un perfil con dirección NO, comenzando cerca del Estero Tamarindo. El patrón presentado en estas figuras está restringido a una profundidad de 40 m, con el fin de detallar de la parte somera de este sector de Tamarindo.

El modelo de correlación geoelectrica (figura 6C), permite apreciar en la mayor parte de la superficie una capa de baja resistividad (10-100 Ωm) que corresponde con un suelo limo arcilloso y con algunas porciones arenosas. La capa resistiva presenta valores mayores a 600 Ωm, variación en el espesor (20-35 m) y se ha correlacionado con aluvión grueso.

En un sector aledaño al S₅, existe predominancia de valores bajos de resistividad (20-60 Ωm en todo el espesor prospectado, el cual podría corresponder con una zona de falla o un alto estructural del Complejo de Nicoya, limitando en este sector la continuidad de las capas de aluvión.

Vulnerabilidad del acuífero

Con la interpretación y correlación de los 16 sondeos tipo TDEM, fue posible interpolar las variaciones geoelectricas del suelo, que se complementaron con la información litológica de 23 pozos para aclarar el modelo conceptual hidrogeológico y poder establecer el mapa de índice de vulnerabilidad intrínseca del acuífero utilizando el método GOD desarrollado por Foster y Hirata (1991). Este método de vulnerabilidad intrínseca, se basa la evaluación de tres parámetros: Tipo de ocurrencia del agua subterránea (G); características de la cobertura del acuífero (O) y profundidad del agua (D). A cada parámetro se le asigna un índice entre 0 (valor mínimo) y 1 (valor máximo), los cuales se multiplican entre sí, obteniendo el índice de vulnerabilidad intrínseca.

Tipo de ocurrencia del agua subterránea (G)

El mapa de la figura 7A, muestra el tipo de ocurrencia

del agua subterránea, donde en un 17,76% del área existe un acuífero no confinado por lo cual se le ha asignado un índice de 0,9. Por su parte; en un 52,41% del área existe un acuífero no confinado pero cubierto por una capa de suelo (índice de 0,6) y el restante 29,99% se le ha asignado un índice de 0,4 pues el acuífero es semiconfinado.

Cobertura del acuífero (O)

En la figura 7B, se aprecia la distribución de cobertura litológica del acuífero: el 18,67% corresponde a materiales no consolidados (índice 1); el 72,09% a aluviones con granulometría heterogénea por lo cual se

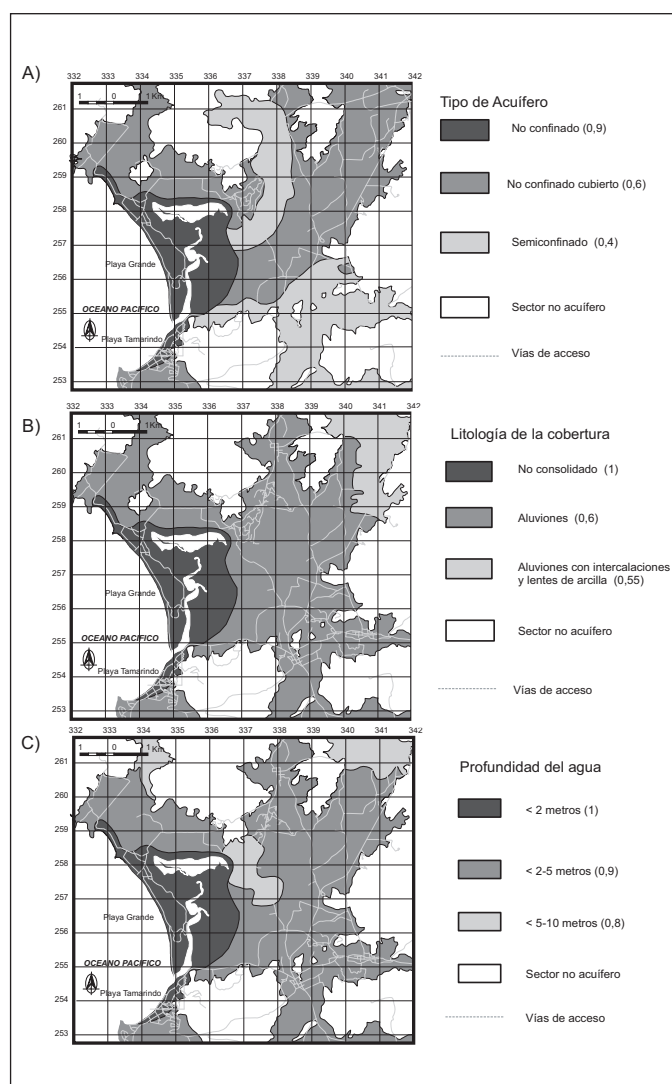


Fig. 7. Mapas de parámetros evaluados en la vulnerabilidad
Fig. 7. Parametric vulnerability maps

le asigna un índice de 0,6 y el restante 9,24% del área del acuífero está recubierta por aluviones con algunas intercalaciones de lentes de arcilla, al que se le ha asignado un índice de 0,55.

Profundidad del agua (D)

Al ser un acuífero costero aluvial y al encontrarnos en la zona de descarga del mismo, la profundidad del nivel del agua es muy somera. En la figura 7C, la zona aluvial se ha dividido en tres sectores: el primero de ellos corresponde a un 18,31% del territorio del acuífero donde la tabla del agua se encuentra a menos de 2 m de profundidad al que se ha asignado un índice de 1,0; este sector corresponde con la zona aledaña a la línea de costa en Playa Grande y Estero Tamarindo.

Al segundo sector, se le ha asignado un índice de 0,9 ya que el agua se encuentra a una profundidad entre los 2 y 5 m, correspondiendo con el 71,16% del área del acuífero y la tercer zona presenta una superficie areal de 10,53% y se le atribuye un valor de 0,8 pues el agua subterránea se encuentra entre los 5 y 10 m de profundidad.

Mapa del índice de vulnerabilidad intrínseca.

Con la metodología GOD, el índice de vulnerabilidad intrínseca para el sector de Tamarindo queda establecido en: extremo que representa el 19,28%; moderado con un 43,48% y bajo correspondiente al 37,24% del territorio donde se encuentra el acuífero aluvial (figura 8).

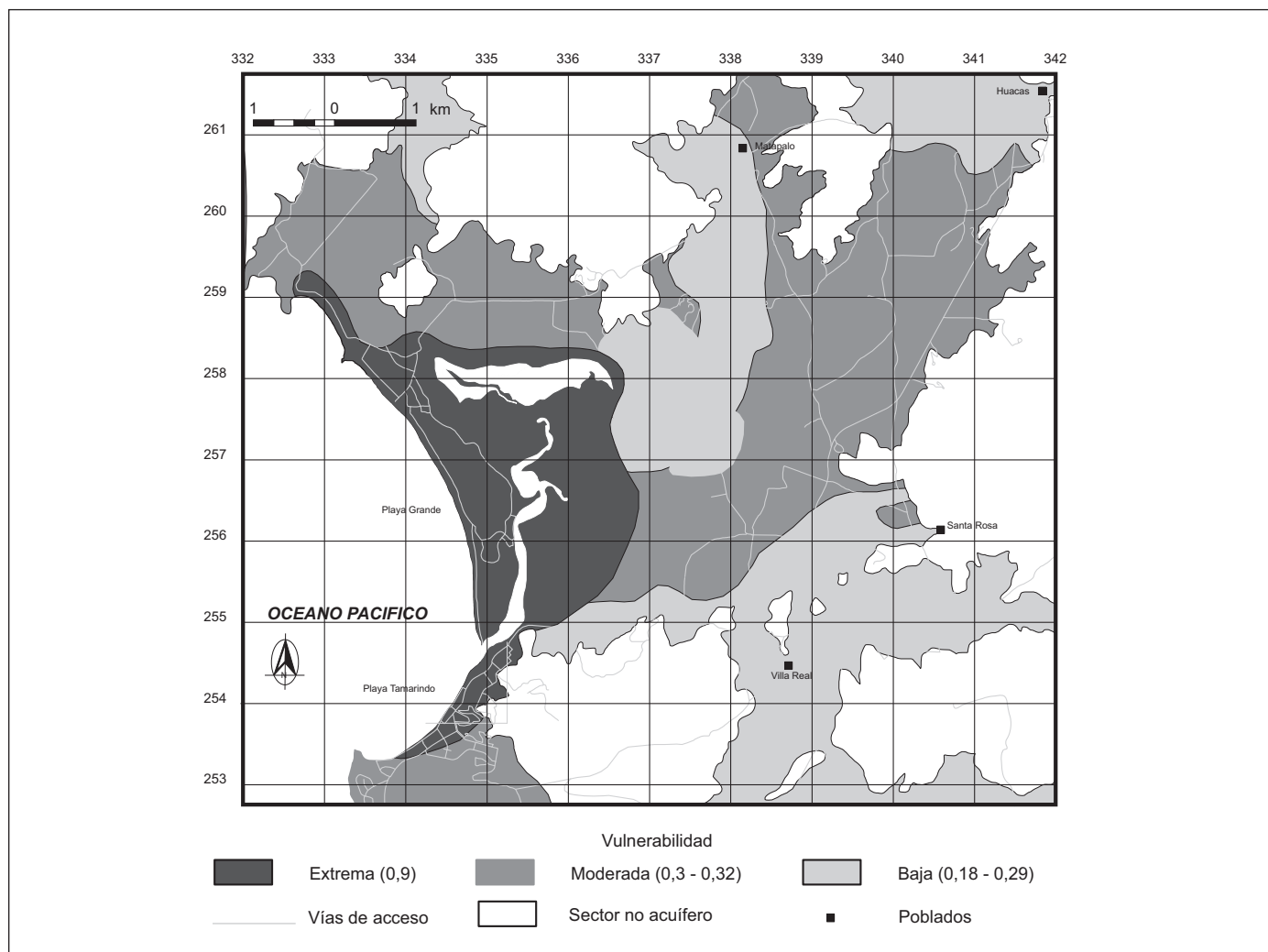


Fig. 8. Mapa de Vulnerabilidad intrínseca
Fig. 8. Intrinsic vulnerability map

Conclusiones

A partir de la aplicación de los métodos electromagnéticos y su correlación con la información geológica y de pozos existentes, se incluye en el modelo conceptual de Tamarindo un sistema acuifero aluvial constituido por lentes, paleocanales e intercalaciones de materiales de diferente granulometría (gravas, arenas, limos y arcillas) que controlan espacialmente las propiedades hidráulicas y características hidrogeológicas del mismo, su espesor no sobrepasa los 35 m y la dirección predominante del flujo de agua subterránea es hacia el OSO con descarga en el Estero Tamarindo, la recarga es principalmente por infiltración directa de lluvia en aquellos sectores donde predominan los aluviones relativamente homogéneos, lo cual está evidenciado por las características hidrogeoquímicas del agua subterránea.

Los perfiles electromagnéticos en el dominio de las frecuencias, obtenidos con un instrumento tipo EM-34, han sido efectivos para evaluar la extensión de la interfase agua dulce - agua salada en la localidad de Playa Grande, la cual es debida a un proceso natural de contaminación y que debido a la inexistente explotación intensiva de pozos, esta interfase se encuentra actualmente en equilibrio hidrodinámico.

La interpretación de los sondeos electromagnéticos tipo TDEM, ha colaborado en el cartografiado de los mapas de tipo de acuifero, profundidad del agua y litología de la cobertura (identificación de paleocanales y lentes arenosos, arcillosos y de grava) utilizados para establecer el índice de vulnerabilidad intrínseca en Tamarindo.

El mapa de vulnerabilidad intrínseca, evidencia que el sector más vulnerable se encuentra en el Estero Tamarindo, Estero Ventanas, Playa Grande y Tamarindo; por lo que es necesario tomar medidas de protección y definir políticas que promuevan un ordenamiento sostenible del uso de la tierra y que estén acordes con la protección del recurso hídrico. Así, las actividades: urbanística, agrícola, ganadera e industrial, en las áreas de vulnerabilidad baja y moderada del acuifero aluvial de Tamarindo, deberían contemplar medidas de control; específicamente en los referente a: sistemas de eliminación de aguas servidas y tratamiento de efluentes en general, restricción en la densidad de población, el área de impermeabilización de los lotes y utilización de agroquímicos. Por su parte, en los sectores de vulnerabilidad extrema, no se debe permitir ningún tipo de actividades productivas, solamente aquellas enfocadas a la conservación.

Agradecimientos

Al Département de Géophysique Appliquée (UMR 7619 Sisyphé), Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Francia; por el préstamo del equipo TEM-FAST 48 HPC y las facilidades para el procesado de los datos de TDEM.

Esta publicación es un resultado parcial del proyecto 113-A6-077, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- AEMR, 2002. *Manual TEM - Researcher*. Applied Electromagnetic Reserch, The Netherlands, 49p.
- Albouy, Y., Andrieux, P., Rakotondrasoa, G., Ritz, M., Descloitres, M., Join, J.L and Rasolimanana, E., 2001. Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TEM sounding: Three case histories. *Groundwater*, 39 (1), 87-97.
- Applied Electromagnetic Research (AEMR), Rusia, 8/2/2006, <http://www.aemr.chat.ru>.
- Arias, M.E., 1999. *Les méthodes de sondages électriques et électromagnétiques: Exemples d'application en Hydrogéologie*. -92 p. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI. [Rapport de fin de Stage, D.E.E.S.]
- Arias, M.E., 2002a. La prospección geoelectrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. *Revista Geológica de América Central*, 27, 21-26.
- Arias, M.E., 2002b. Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 27, 11-20.
- Baugartner, P., 1987. Tectónica y sedimentación del Cretácico Superior en la zona pacífica de Costa Rica (América Central). -En: Barbarin, C., Gursky, H. J., y Meigburg, P. (eds.): El Cretácico de México y América Central. -Actas Fac. Cienc. Tierra, Univ. Autónoma Nuevo León, Linares, 2: 251-260.
- Descloitres, M., 1998. *Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM): Application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Reunion)*.- 241 p. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI. [These Ph. D.].
- Denyer, P., y Arias, O., 1991. Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 12, 1-59.
- Foster, S., y Hirata, R., 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de agua subterránea*. 2da edición. Centro Paramericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, Perú, 80 p.
- Granda Sanz, A., Pérez Terenes, A. y Plata Torres, J.L., 1987. Los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SED): Aspectos más significativos y primeras experiencias en España. *Boletín Geológico y Minero*, XCVIII-III, 392-403.

- Geonics, 1980. *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers*. - 15 p. Ontario [Technical Note].
- Geonics, 1992. *Groundwater Exploration Applications*. -23 p. Ontario [Technical Note].
- Goldman, M., Gilad, D., Ronen, A., and Melloul, A., 1991. Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. *Geoexploration*, 28, 153-174.
- Hact, M., Barret, B., Bennetts, D., Heison, G., Telfer, A., and Roberts, C., 2002. Improved near surface mapping in groundwater studies: Application of fast-sampling time-domain EM surveying methods. Australian Society of Exploration Geophysicists, *Preview* 1, 25-29.
- Kafri, U., and Goldman, M., 2005. The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity. *Journal of Applied Geophysics*, 57, 167-178.
- Meyer de Stadelhofen, C. 1995. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*. -177p. Lavoisier, Paris.
- Morera, S., y Matamoros, G., 2003. *Evaluación del potencial y demanda hídrica subterránea en el acuífero costero Huacas-Tamarindo, Santa Cruz, b y Avenamiento, San José* (informe interno).
- Monteiro, F., 2004. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 123-143.
- Nabighiam, M.N., and Macnae, J.C., 1991. Time Domain electromagnetic prospecting methods. In: Nabighiam, M.N. (ed), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, vol. 2. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 427-520.
- Rabinovich, M.B., 1995. Errors of 1D interpretation of 3D-TDEM data in the application of mapping saltwater/freshwater contact. *Journal of Applied Geophysics*, 34, 23-34.

Original recibido: octubre 2006

Original aceptado: febrero 2007