



EVALUACIÓN HIDROGEOFÍSICA DE ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS

Arturo Jesús Lorenzo Ferrás

Empresa de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería de Matanzas, San Vicente final s/n Pueblo Nuevo. Matanzas. Cuba. E-mail: arturo@uebcolon.hidro.cu

RESUMEN

Se muestra mediante un caso real las posibilidades de los métodos geo eléctricos para la evaluación hidrogeológica de los acuíferos subterráneos. Mediante la ejecución de múltiples tomografías eléctricas que cubren el territorio de interés, se elabora un modelo tridimensional de las resistividades eléctricas en la cuenca de abasto a la ciudad de Manzanillo, en el oriente de Cuba, que permiten no solo la diferenciación litológica de los diferentes estratos y formaciones que conforman el acuífero, sino también la ubicación de nuevas fuentes de abasto en las condiciones más favorables así como la obtención de parámetros que nos permiten la modelación hidrogeofísicas del acuífero.

ABSTRACT

The possibilities of the resistivity methods in the groundwater evaluation is shown through a real case. With the execution of multiple electric tomographies that cover the territory of interest, a three-dimensional model of the electric resistivities is elaborated in the supply basin of the Manzanillo city, located in the east of Cuba. Not only the lithological differentiation of the strata and formations that conform the aquifer, but also the location of new supply sources under the most favorable conditions as well as the determination of hydrogeologic parameters that allow us the mathematical modeling of the aquifer.

INTRODUCCIÓN

Como es ya ampliamente conocido, los métodos de prospección geofísica se han constituido en técnicas auxiliares básicas en todo estudio hidrogeológico. En sus inicios fueron imprescindibles para llegar a establecer la geometría de los sistemas, dado su bajo costo y rapidez, con relación al de los sondeos mecánicos. Posteriormente se desarrollaron métodos que permiten deducir aspectos relacionados con el flujo de masas y/o con flujos de calor, además de contribuir a mejorar el diseño de las captaciones mediante la aplicación de todas las técnicas de testificación.

En los últimos años el auge se encuentra esencialmente en todas las aplicaciones en el dominio de la contaminación de acuíferos y de otros problemas medioambientales, comenzando con la detección e identificación, y continuando por el seguimiento espacial y temporal, siendo asimismo una herramienta de gran utilidad en las etapas de los estudios de descontaminación.

En la actualidad, la rapidez con que obtengamos los datos necesarios para alimentar un ordenador y obtener una respuesta, es clave para los modernos estudios de modelación matemática de acuíferos. En este sentido; la geofísica se sitúa en primer plano por la rapidez con que delimita las condiciones de frontera (geometría del acuífero) y de sus características hidráulicas (porosidad efectiva, transmisibilidad, conductividad, etc.), por lo que la contribución de la geofísica a esta ciencia puede ser realmente muy amplia, mas aún si consideramos su capacidad de caracterizar rápidamente las condiciones del subsuelo sin perturbarlo, lo que ofrece el beneficio de costos más bajos y menos riesgo, dando un mejor entendimiento general de las condiciones complejas del sitio estudiado. Si a todo lo anterior sumamos que en la actualidad los estudios pueden realizarse en 3 y 4 dimensiones, entonces estaremos conscientes de la magnitud con que la geofísica puede hoy contribuir a los estudios hidrogeológicos.

A continuación se presenta una breve sinopsis de los objetivos y resultados más importantes alcanzados en un estudio para la evaluación de recursos de agua subterránea en una cuenca del



oriente de Cuba, donde entre otros métodos de investigación, se empleó la tomografía eléctrica de resistividad.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental al emplear los métodos geofísicos durante esta investigación, era el de contribuir a definir en planta y en profundidad las condiciones hidrogeológicas, geológicas e hidroquímicas del territorio, definiendo las fronteras laterales y en profundidad del acuífero existente, delimitar la existencia de sectores de rocas más perspectivas para el abasto así como la posible presencia de intrusión salina. Se incluyó también la posible definición de la tectónica y su influencia en las condiciones hidrogeológicas del territorio.

DESARROLLO

La zona de trabajo, ubicada en la zona más oriental de la isla de Cuba, se enmarca en la figura siguiente.



Figura. 1: Mapa del Macro localización área de estudio

Dentro de esta, se delimitaron dos sectores bien diferenciados por sus características. El primer sector se ubica más hacia el sureste del territorio donde se concentran varios pozos de riego y abasto, el cual se conoce como Sector Cayo Redondo. Es un sector bastante llano y que geológicamente lo conforma una sola formación geológica: Fm. Cauto.

El segundo sector se ubica en la parte más al noroeste y se desarrolla cercano a la costa, sobre elevaciones calcáreas que conforman la formación Manzanillo. En esta área de alrededor de 300 Km², se realizaron 307 tomografías eléctricas de detalle distribuidas por todo el territorio. Como mencionamos ya, predominan dos formaciones geológicas:

Formación Cauto. (alQ₄) Edad Pleistoceno. Por sus rasgos estructurales son de estratificación grosera, marcadas por cambios litológicos excepto los materiales con granulometría menor (arcilla aleurolítica y calcarenitas) que pueden presentar estratificación fina y laminar. La potencia varía entre 600 y 800 m. Está formada por depósitos marinos – aluviales indiferenciados del cuaternario, compuestos por arenas, arenas arcillosas y arenas guijarrosas con intercalaciones de limos, gravas y gravas guijarrosas de colores gris, gris parduzco y amarillo grisáceo.

Formación Manzanillo (N₃¹ – N₂ Edad Mioceno Superior – Plioceno). Está cubierta por los potentes horizontes aluviales de la Formación Cauto. Litológicamente la constituyen las margas arcillosas, calizas biógenas, detríticas y dolomitizadas. Por sus rasgos estructurales son de estratificación grosera, marcadas por cambios litológicos excepto los materiales con granulometría menor (arcilla

aleurolítica) y calcarenitas que pueden presentar estratificación fina y laminar. La potencia varía entre 600 y 800 m.

Por su cercanía al mar y la intensa explotación de las aguas subterráneas para el riego y abasto a la población, la presencia de intrusión salina es un riesgo latente en todo el territorio.

En la figura 2 se muestra el mapa geológico del territorio y en color azul la ubicación de las líneas tomográficas medidas de forma espaciada a todo lo largo del territorio.

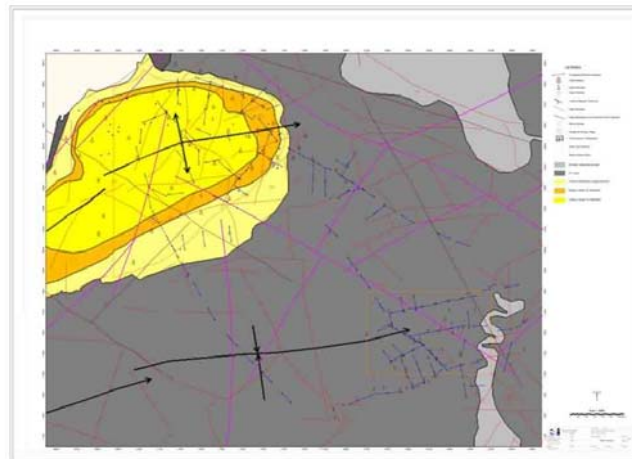


Figura. 2: Mapa geológico del área de estudio

Otros elementos orientativos a tener en cuenta son las dislocaciones tectónicas presentes en el territorio y en tono naranja se puede apreciar los límites de las dos zonas de estudio mencionadas. De forma simplificada veamos algunos resultados que nos arrojan los métodos geofísicos aplicados.

En la figura 3 se presenta la Tomografía Eléctrica T6, ubicada en la zona de Cayo Redondo. Aquí las rocas son inminentemente arenosas, por lo que tienen bajos valores de resistividad, como se aprecia en la figura. En este caso los sectores de mayor resistividad, son los sectores prospectivos para agua subterránea, al estar formados por rocas más resistivas tales como las arenas y gravas. La forma discontinua de los sectores prospectivos pudiera asociarse a cauces abandonados y zonas de acumulación de sedimentos gruesos que han quedado cubiertas por materiales arcillosos. También se destaca muy bien, la disminución de la resistividad con la profundidad que indica el aumento de la mineralización en las aguas a la profundidad superior a los 60 m.

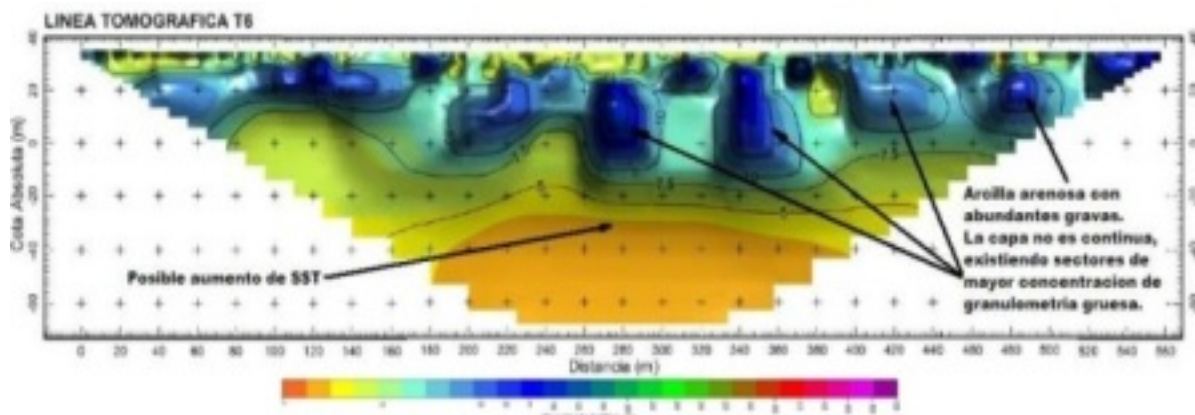


Figura. 3. Tomografía Eléctrica T6. Zona Cayo Redondo.

Por su parte en la Fig. 4 se superpone la información litológica extraída de las calas perforadas a la imagen tomográfica T8, también de la zona Cayo Redondo. Notese el buen grado de correlación litológico con los valores de resistividad interpretados, lo que nos permite dar sentido geológico a la información geofísica alcanzada.

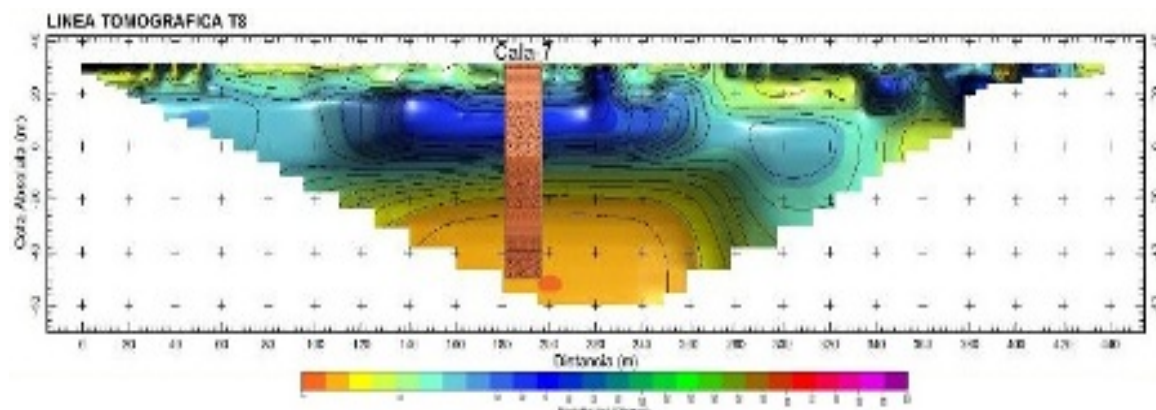


Figura. 4. Correlación entre Cala-7 y Tomografía Eléctrica T8. Zona Cayo Redondo.

Los casos siguientes también denotan una excelente concordancia geólogo geofísica, al corresponderse los gradientes de resistividad con zonas de cambio litológico. Además debemos tener presente otros elementos importantes. La figura 5 muestra bien el contacto entre la formación Cauto y la formación Manzanillo, sobreyaciendo la primera a la segunda. Al ser la primera eminentemente arcillo arenosa, se distingue por valores más bajos de resistividad, mientras que Manzanillo, al estar compuesta por rocas calizas, presentará mayores valores de resistividad. En este caso no se evidencia el fenómeno de intrusión salina.

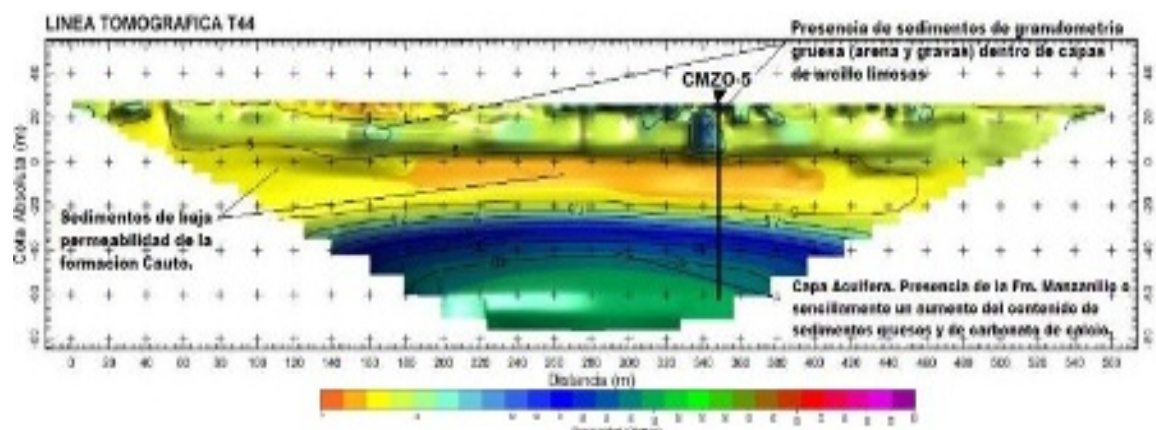


Figura. . 5. Correlación entre Cala-5 y Tomografía Eléctrica T44. Zona Cayo Redondo.

Por último queríamos presentar el caso de la tomografía T91. Es evidente la zona de contacto litológico entre ambas formaciones y el buzamiento que exhibe la formación Manzanillo bajo los sedimentos de la formación Cauto.

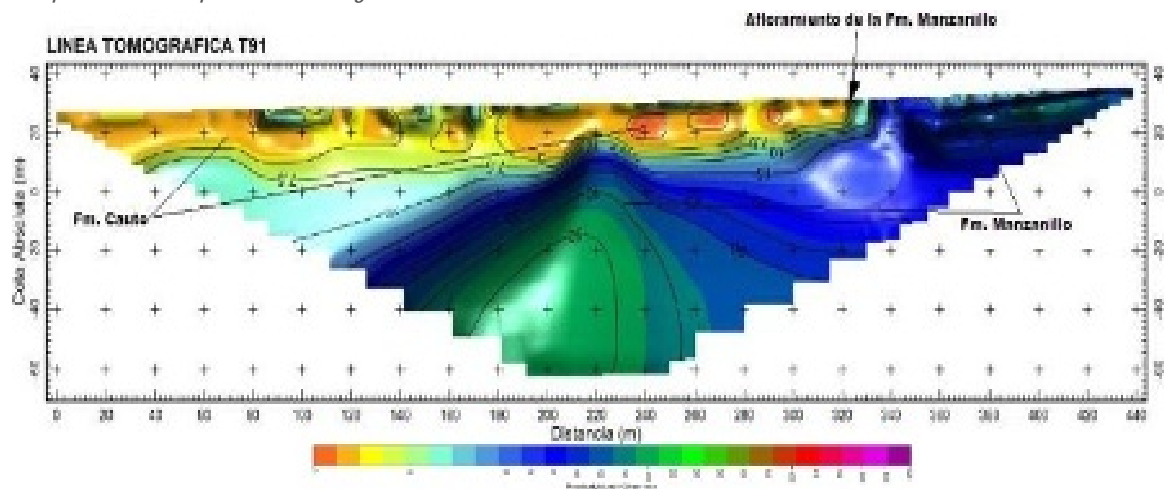


Figura. . 6. Tomografía Eléctrica T64. Zona Cuentas Claras.

A continuación se analizan parte de los resultados alcanzados en el plano bidimensional. En la figura 7 se representa la distribución del parámetro de resistividad eléctrica a la profundidad indicada en cada plano. El primero (extremo superior izquierdo) corresponde a una profundidad de 1.25 m y luego cada plano muestra un incremento en profundidad de 10m cada uno. En este mapa se aprecian los cambios laterales de resistividad más superficiales en los que influirán las rocas que prácticamente afloran en todo el territorio. Por convenio en todas las figuras se mantiene el mismo patrón de colores a fin de poder correlacionar mejor la resistividad con la naturaleza acuífera o no de los sedimentos estudiados. Por supuesto que a esta profundidad tendremos presencia de agua en pocas partes del territorio estudiado, dado que los niveles estáticos en la zona generalmente aparecen a más de 2m de profundidad. Por lo tanto los cambios de resistividad en este caso estarán influidos principalmente por cambios litológicos de las rocas afectadas.

En colores naranjas y amarillos se muestran los sedimentos exclusivamente limosos y arcillosos limpios, en los que la presencia de material arenoso o gravoso no debe estar presente.

Por su parte en colores azules aparecen aquellos sectores en que ya empiezan a formar parte mayoritaria de los sedimentos, las fracciones gruesas de arenas y gravas, generalmente dentro de una matriz arcillo limosa. El contenido de material grueso va a estar en relación directa con el aumento de la resistividad. Posteriormente observamos en colores verdes aquellos sectores en que la resistividad aumenta más de 60 – 100 Ohm-m y que denotan la presencia en superficie de los sedimentos de la formación Manzanillo, mucho más carbonatada que la formación Cauto que debe predominar en el resto del área.

Por su parte la siguiente figura (extremo superior derecho), muestra la relación espacial de la resistividad de las rocas a una profundidad de 10 m. A esta profundidad la mayor parte del área está dentro de la zona de saturación del manto acuífero, con excepción de los sectores altos de Cuentas Claras, donde las cotas del relieve son mucho más elevadas y donde el nivel acuífero debe estar a mayor profundidad. Por esta razón este mapa me muestra una mejor relación espacial de la presencia de las dos formaciones geológicas que componen el acuífero estudiado. En primer plano resalta la zona de altos valores de resistividad que en la parte superior izquierda del mapa representan los sedimentos de la formación Manzanillo que, a esta profundidad de estudio, se desarrollan exclusivamente en la zona de Cuentas Claras. En todo el resto del área predominan valores de resistividad menores de 20 Ohm-m que indican la presencia de sedimentos arenosos y gravosos de la formación Cauto. Dentro de esta formación se identifican los sectores con predominio de sedimentos finos (arcillas y limos limpios) con resistividades inferiores a 7.5 Ohm-m. También se destacan aquellos sectores más perspectivas desde el punto de vista acuífero con valores de



resistividad entre 10 y 25 Ohm-m, siendo localmente mayores, donde la presencia de sedimentos gruesos (arenas y gravas) es mayoritaria. En este sentido se puede apreciar que los sectores acuíferos no son continuos, sino más bien tienen un desarrollo muy heterogéneo y limitado en área. No obstante, veremos que en el área de Cayo Redondo, las zonas perspectivas van a ir disminuyendo en extensión a medida que profundicemos y como las áreas de la formación Manzanillo se irán desplazando cada vez más hacia el sur, hacia donde buzcan sus sedimentos, ocupando mayores sectores del terreno.

A la profundidad de 20 m el comportamiento descrito anteriormente se mantiene, pero se nota una mayor extensión de los sedimentos arcillo - limosos de la formación Cauto, asociados principalmente con la cuenca del río Jibacoa y que cubren casi toda la parte central del territorio, bordeando las elevaciones del terreno de la zona de Cuentas Claras.

Un ligero cambio en las condiciones hidrogeofísicas aparece a la profundidad de 50 m. En primer lugar vemos que la zona de baja permeabilidad se ha reducido hacia el centro del territorio. Vemos también que la formación Manzanillo sigue desplazándose hacia el sur del territorio, siguiendo su buzamiento bajo los sedimentos de la formación Cauto. Se destaca que a 50 m de profundidad, en el sector de Cayo Redondo, apenas existen 4 pequeños sectores bien definidos y separados como perspectivas.

A 60 m de profundidad, las condiciones hidrogeofísicas siguen el desarrollo lógico que hemos venido observando. La formación Manzanillo en su tendencia a desplazarse hacia el sur del territorio, abarca ahora más de la mitad de toda el área estudiada y cubre también casi toda la zona denominada Zona C, mostrando en colores azules (más de 10 Ohm-m) los sectores perspectivas para abasto de agua subterránea. Resalta dentro de esta estructura el sector que ha quedado encerrado dentro de la misma con bajos valores de resistividad (inferiores a 5 Ohm-m) y que puede denotar la presencia de sedimentos arcillo limosos a esta profundidad, pero más probablemente, la presencia de aguas con mayor mineralización. Obsérvese también que comienzan a surgir otros sectores más limitados al noroeste de este, con bajos valores de resistividad que podemos asociar a sectores de mayor salinidad en las aguas subterráneas, ocasionados probablemente por intrusión salina. La intensa explotación del acuífero en estas zonas, es una probable razón a este fenómeno.

Por su parte en la zona de Cayo Redondo se destaca que solo queda como perspectivo un sector limitado al centro del área, la cual debe asociarse a una elevación de la formación manzanillo.

A 70 m de profundidad, se van definiendo mejor las condiciones del acuífero. Obsérvese que las zonas de baja resistividad que indican posible aumento de la salinidad en las aguas subterráneas, han ido definiéndose mejor y aumentando en extensión hacia la línea de costa, y esta extensión ocurre en tres direcciones fundamentales. También se mantiene bien definida la zona perspectiva en el centro del sector de Cayo Redondo. A la profundidad de 80 m, se reafirma lo expresado anteriormente y se definen muy nítidamente tres direcciones de avance de la intrusión salina hacia el acuífero que conforma la formación Manzanillo. Estas direcciones de avance son tan rectas que nos hace pensar en posibles fenómenos tectónicos que en esta área permiten el proceso de intrusión salina, favorecido por la sobre explotación del acuífero. La distribución de estos sectores de baja resistividad coincide plenamente con las anomalías de SST.

En el sector de Cayo Redondo se aprecia que en su centro, existe la posibilidad de ubicar un pozo profundo en este sector perspectivo. Precisamente en esta zona existen los pozos 203 (T-33) y 221 (T-26); pero ambos quedan por encima de los 50 m de profundidad y se ubican en sectores no muy perspectivas si se tienen en cuenta las áreas aledañas como se aprecia en las tomografías correspondientes. Tampoco debemos descartar problemas constructivos en estos pozos para que los caudales reales de explotación no sean los esperados en este sector. Como se aprecia en el mapa para la profundidad de 90 metros, no existen apenas variaciones en las condiciones hidrogeofísicas del sector de Cayo redondo. La extensión de los sedimentos de la formación Manzanillo se mantiene constante a esta profundidad, pero se aprecia bien que todo el sector Noroeste de Cuentas Claras se



encuentra sometido a un proceso de intrusión salina, que se marca bien en dos grandes sectores, los cuales se unen a la entrada de la ciudad de manzanillo, bajo la carretera de acceso a la misma en la zona conocida como Vuelta del Caño.

Una vez obtenido el nivel de conocimiento descrito de las condiciones hidrogeofísicas del territorio estudiado, se empleó el sistema ENCOM PA para el análisis de la información en tres dimensiones, pudiéndose establecer un modelo tridimensional del acuífero estudiado en su conjunto, que puede servir de gran ayuda en la elaboración de modelos matemáticos para definir los recursos explotables y otros análisis. Los voxels (unidad elemental de volumen) se establecieron con dimensiones horizontales de 50 m por 50 m y 2 m de profundidad.

Como hemos visto hasta ahora toda la información en términos de resistividades aparentes, la representación tridimensional se tradujo a siete rangos de resistividades:

- ✓ Resistividades menores de 1.5 Ohm-m. Típicas de los sedimentos arcillo limosos y zonas susceptibles de salinidad en profundidad.
- ✓ Resistividades entre 1.6 y 4.5 Ohm-m. Típicas de los sedimentos arcillo-limosos.
- ✓ Resistividades entre 5 y 10 Ohm-m. Típicas de los sedimentos compuestos de arenas y gravas generalmente envueltos en arcillas. Son acuíferos.
- ✓ Resistividades entre 11 y 15 Ohm-m. Típicas de los sedimentos de gravas limpias, acuíferas.
- ✓ Resistividades entre 16 Ohm-m y 20 Ohm-m. Típicas de las margas.
- ✓ Resistividades entre 21 Ohm-m y 120 Ohm-m. Típicas de las rocas calcáreas saturadas y calizas cavernosas saturadas. Constituye el acuífero más prospectivo.
- ✓ Resistividades mayores de 120 ohm-m. Típicas de calizas cársticas secas.

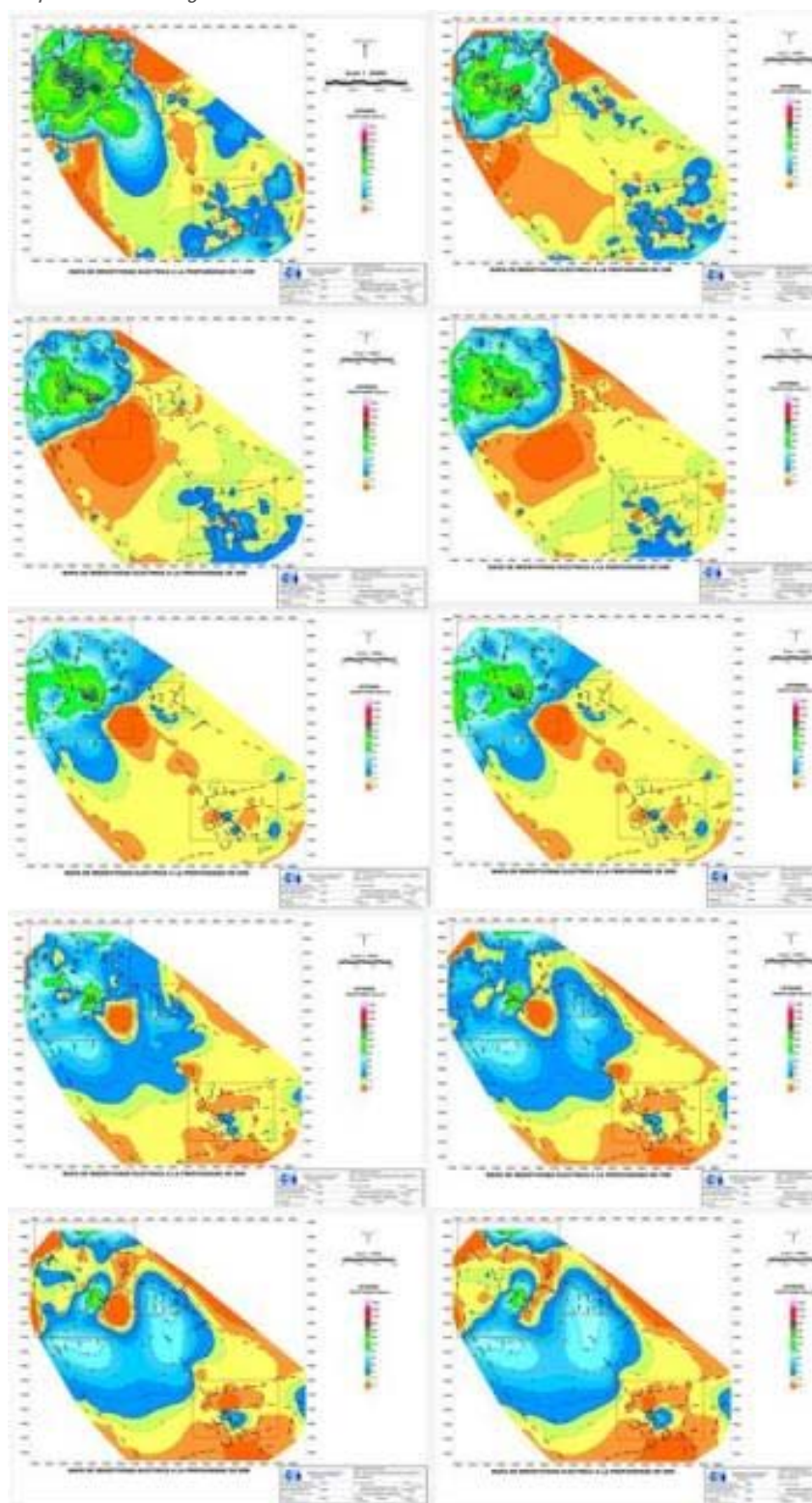


Figura. . 7. Mapas de resistividad eléctrica a distintas profundidades.

En las figuras mostradas a continuación se aprecian diferentes vistas tridimensionales del modelo elaborado. En él se aprecia todas las gamas de litologías descritas, primeramente en función de los valores de resistividad de la roca (imágenes en colores continuos) y luego con una representación



según la litología correspondiente a cada valor de resistividad obtenido. Las rocas con los máximos valores de resistividad están localizadas en las partes más altas de Cuentas Claras, donde existen rocas calizas, areniscas y margas que en estado seco (por encima del nivel estático), muestran altos valores de resistividad, sobre todo en aquellos sectores de calizas cavernosas, donde alcanza valores superiores a los 1000 Ohm-m. En el resto del territorio predominan en superficie los sedimentos arcillo limosos.

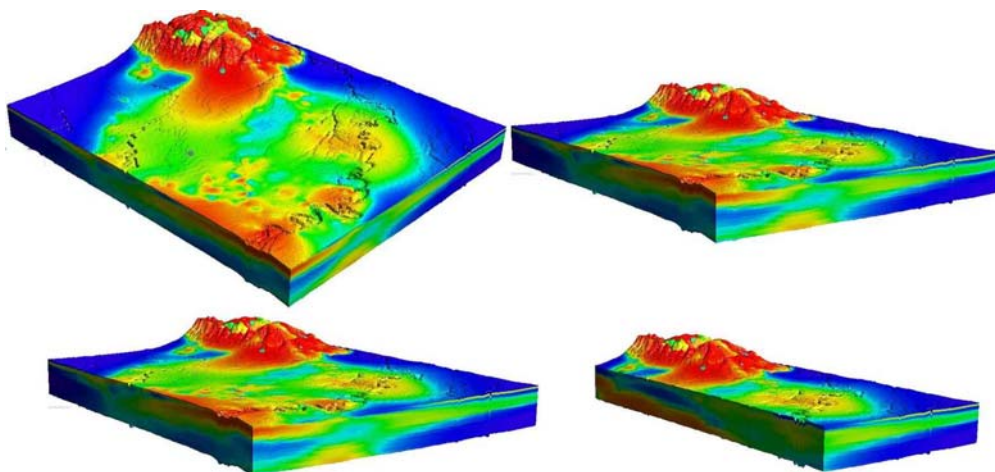


Figura. 8. Vistas Tridimensionales del modelo geo eléctrico elaborado.

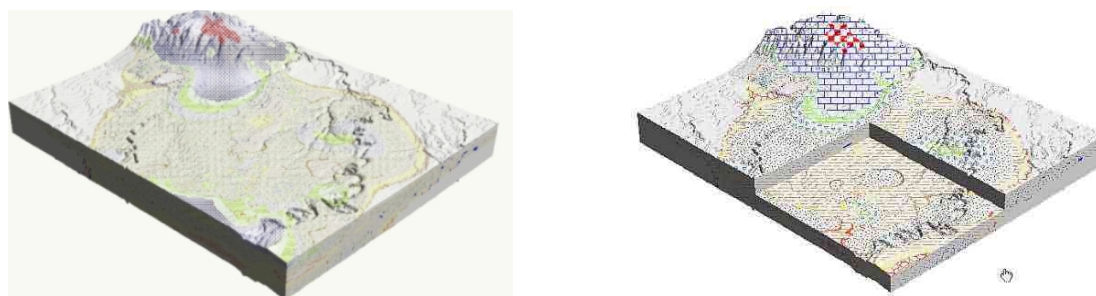


Figura. 9. Vistas Tridimensionales del modelo litológico elaborado.

La utilidad de confeccionar el modelo 3D, está dada en las posibilidades de análisis de cualquier lugar del territorio, confeccionar perfiles en cualquier dirección, aún y cuando en esa zona no coincidan mediciones de campo; en el análisis de tendencias y en la visualización de cada estrato o fenómeno por separado. En la figura 10, por ejemplo se muestran solamente los voxel correspondientes a las calizas acuíferas de la formación Manzanillo, mostrándose la tendencia de su buzamiento regional hacia el sureste, bajo los sedimentos de la formación Cauto.

La facilidad de convertir o transformar un modelo de resistividad como el elaborado, en la base de partida para la modelación matemática de un acuífero subterráneo, se presenta como una herramienta muy útil y poderosa a tener en cuenta en la evaluación de los recursos acuíferos de un territorio, sobre todo a la luz de las últimas investigaciones que demuestran la posibilidad de estimar parámetros hidrogeológicos a partir de los valores de resistividad eléctrica de las rocas (Vidal, E. 2010).

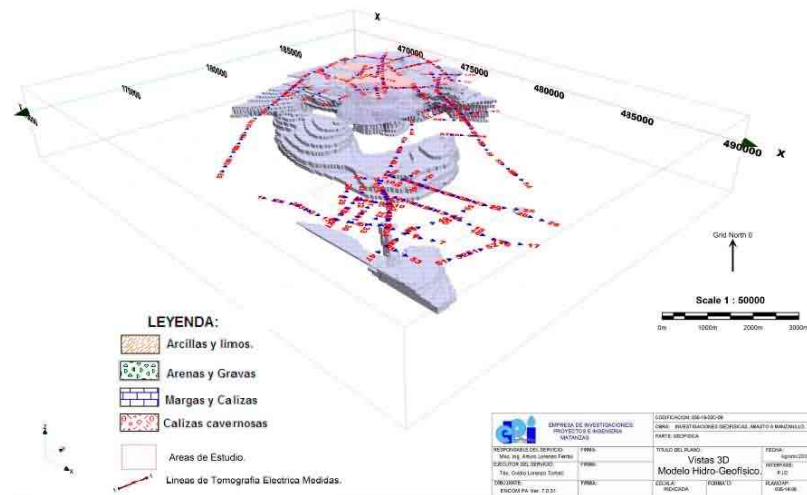


Figura. 10. Vista 3D. Presencia y distribución de las rocas Calizas.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un caso práctico de utilización de la tomografía eléctrica para definir y precisar las condiciones geológicas, hidrogeológicas e hidroquímicas de un territorio con vista a la evaluación de recursos hídricos y la localización de nuevas fuentes de abasto.

Se ha mostrado la utilidad y el grado de detalle que brindan estas técnicas en la diferenciación del corte geológico, en la definición de los sectores acuíferos e impermeables y en la detección de la interfaz agua dulce agua salada.

Los estudios se han realizado desde los enfoques unidimensionales (Sondeos), pasando por los estudios bidimensionales (perfiles y mapas en plantas), hasta llegar a la implementación de un modelo hidrogeofísico tridimensional que permite el análisis estructural del acuífero en cualquier dirección del espacio y distinguir los estratos geológicos, las zonas de cavernas, la presencia de fallas, las elevaciones y hundimientos del basamento, etc. acercándonos a la realidad tridimensional del medio que estudiamos.

La creación del modelo tridimensional de resistividad de la roca, junto al modelo tridimensional de la resistividad del agua subterránea, son herramientas que nos permiten pasar a un estadio superior de análisis para la definición de parámetros hidrogeológicos tales como la permeabilidad intrínseca, la porosidad y la transmisividad del acuífero, llegando al cálculo de recursos de forma rápida y económica.

BIBLIOGRAFIA

- ACC, MINBAS (1983): Contribución a la Geología de Cuba Oriental. C. Habana.
- Escobar, Eric M et al, 2009. Modelo de la estructura geológica regional de la provincia Granma. Líneas V Congreso de Geofísica. geólogo-Geofísicas.
- Lorenzo, A. 2009. "Investigaciones Geofísicas. Abasto a Manzanillo". Empresa de Investigaciones, Proyectos e Ingeniería de Matanzas. Cuba.
- Vidal, E. 2010. "Cálculo de la conductividad hidráulica media regionalizada de los acuíferos a partir de su resistividad eléctrica. Validación práctica" Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas. ISMM Moa. Cuba.