Ciencias de la Tierra y el Espacio, enero-junio, 2016, Vol.17, No.1, pp.71-80, ISSN 1729-3790

Mapas regionales de resistividad eléctrica en un sector al sur de Cuba occidental

José Antonio García-Gutiérrez [(1*)] y Carlos Sacasas-León [(2)]

[(1*)]*Unidad de Investigaciones para la Construcción, Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, Pinar del Río, Cuba. E-mail: jagarcia@eniapr.co.cu*
[(2)]*Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", La Habana, Cuba. E-mail: csl@civil.cujae.edu.cu*

Recibido: julio 13, 2015	Aceptado: diciembre 30, 2015

Resumen

El objetivo del trabajo es mostrar un procedimiento para elaborar mapas regionales de resistividad eléctrica del suelo, aplicado en un sector al sur de la región occidental de Cuba, entre la península de Guanahacabibes y el occidente de la provincia de Artemisa. El método empleado se basó en caracterizar por su resistividad las formaciones geológicas más representativas cartografiadas en el mapa geológico a escala 1:100 000 de la región (Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico Nacional), a partir del empleo de datos de archivo de sondeo eléctrico vertical y su posterior generalización en 10 modelos. Como resultado, se obtuvieron por primera vez mapas de resistividad eléctrica a diferentes profundidades (2; 5; 10; 20 m), los que muestran su tendencia general a disminuir con la profundidad, debido, en el extremo occidental, a la presencia de aguas salobres y, en el resto, a la elevada arcillosidad de las rocas.

Palabras clave: resistividad eléctrica, mapas regionales de resistividad eléctrica, corte geoeléctrico

Electrical resistivity maps of a sector in western region of Cuba

Abstract

The objective of the article is to show a procedure to elaborate regional electrical resistivity maps, applied to a sector in western region of Cuba, extending from Guanahacabibes Peninsula until the western part of Artemisa province. For their elaboration, was used the cartographic representation of the geological formations of the territory in the map to scale 1:100 000 (Institute of Geology and Paleontology-National Geological Service), on which were reflected the average values of electrical resistivity for these formations, obtained from 10 geolectrical models of the region. As a result, they were achieved for the first time maps of electrical resistivity to different depths (2; 5; 10; 20 m), that show the general tendency of resistivity to diminish with depth, due, in the western part of the region, to the presence of brackish waters, and in the rest, to the high clay content of the rocks.

Keywords: electrical resistivity, regional resistivity mapping, goelectrical model

1. Introducción

Los mapas regionales de resistividad eléctrica (o de su inverso, la conductividad eléctrica) de la parte superior de la corteza terrestre son imprescindibles en diversas aplicaciones, tales como la radiodifusión de señales en ondas medias, estudios de corrosión del suelo a estructuras metálicas de gran extensión, estimación de la capacidad defensiva de los suelos a la infiltración de contaminantes y otras.

El artículo presenta el procedimiento utilizado para obtener mapas de zonificación de la resistividad eléctrica a diferentes profundidades para un amplio sector del sur de la región occidental de Cuba, a partir de la utilización de materiales de archivo de estudios ingeniero geológicos donde se aplicó el método de sondeo eléctrico vertical. También se muestran algunas metodologías empleadas en diferentes países para la elaboración de este tipo de cartografía.

1.1 Antecedentes

La elaboración de mapas de conductividad eléctrica del suelo de grandes territorios, incluso a escala de país o de todo el mundo, es una tarea que ha recibido la atención de investigadores desde, probablemente, la mitad del pasado siglo (Fine, 1957). El Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR) ha subrayado la necesidad de disponer de estos mapas cuando se planifican todos los tipos de radiocomunicación, incluyendo servicios de navegación en las bandas VLF (3-30 kHz), LF (30-300 kHz) y MF (300-3000 kHz), basado en que la conductividad es la propiedad eléctrica más importante del suelo para frecuencias por debajo de 3 MHz, resultando esencial su conocimiento a lo largo de la trayectoria para el pronóstico de la intensidad de la onda de superficie (CCIR, 1992).

Bajo su coordinación, se ha preparado el Atlas Mundial de Conductividades del Suelo, el cual contiene dos tipos de mapas, por continentes y(o) países: VLF (hasta 30 kHz) y MF (estandarizados a 1 MHz), expresados en conductividades efectivas, es decir, teniendo en cuenta los efectos del relieve (CCIR, 1992). Los primeros han sido obtenidos empleando datos fisiográficos y geológicos para definir los límites de áreas de igual rango de conductividad eléctrica, así como la utilización de datos reales disponibles de mediciones directas, mientras que los segundos están basados en mediciones y otras informaciones de interés ofrecidas por los diferentes países. No se tomaron en cuenta las variaciones estacionales de la conductividad eléctrica, las que son despreciables para bajas frecuencias (hasta 1 MHz).

Un método basado en el empleo de datos de conductividad aparente obtenidos de levantamientos aeroelectromagnéticos (AEM) fue empleado para la elaboración del mapa de conductividad eléctrica del horizonte rocoso superficial del Reino Unido (Beamish, 2013). Mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfico, se estableció una relación entre bases de datos de valores de conductividad eléctrica, obtenidos en diferentes áreas estudiadas mediante levantamientos AEM, y de formaciones litoestratigráficas del mapa digital a escala 1:625 000 del Reino Unido. Los datos medidos de conductividad eléctrica fueron tratados estadísticamente antes de ser asignados a las diferentes formaciones litoestratigráficas, quedando un pequeño número de éstas sin valores medidos, los que fueron determinados por analogía (figura 1).

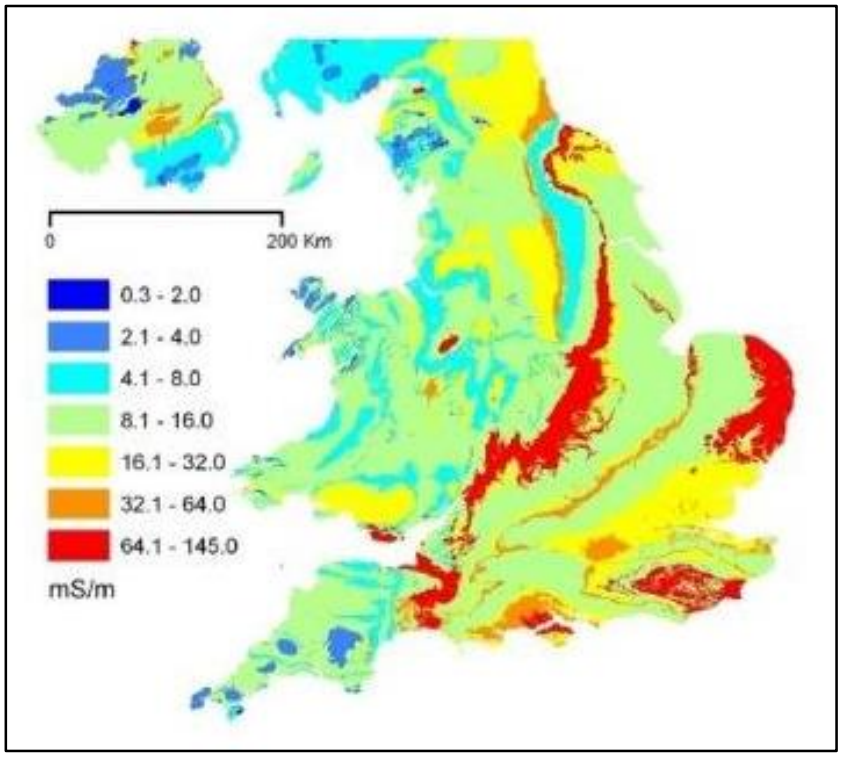

Fig. 1. *Mapa de conductividad eléctrica del horizonte rocoso superficial del Reino Unido a escala original 1:625 000 (fragmento). (Beamish, 2013)*

Otro enfoque diferente fue utilizado por Bashkuev *et al.* (2008) para elaborar mapas de las llamadas secciones geoeléctricas de predicción (GES) a escala 1:5 000 000 de un grupo de países asiáticos (figura 2). Para su confección, se emplearon bases de datos de trabajos de prospección eléctrica realizados en esos territorios con diferentes objetivos, principalmente mediciones de sondeo eléctrico vertical (SEV), con un minucioso tratamiento estadístico para determinar valores representativos por unidades litológicas, empleando como base el mapa geológico de Eurasia a escala 1:5 000 000, editado por Markovsky en 1975. Los autores proponen usar estos mapas en los cálculos de propagación de ondas electromagnéticas en el espectro VLF-LF-MF, y en pronósticos de terremotos mediante el método sismoelectromagnético.

La información en dichos mapas está expresada mediante un código (por ejemplo, 2.5.6…), donde el primer número conduce a la resistividad de la primera capa (ρ1) en una escala de resistividades, el segundo al espesor de la primera capa (h1), y así sucesivamente para las siguientes capas del corte, según una progresión geométrica de los valores:

Número del código	Resistividades (ρj), Ω·m	Espesores (hj), m
0	0.68	–
1	1.47	0.147
2	3.16	0.316
3	6.8	0.68
…	…	…
10	1470	147
11	3160	316
…	…	…

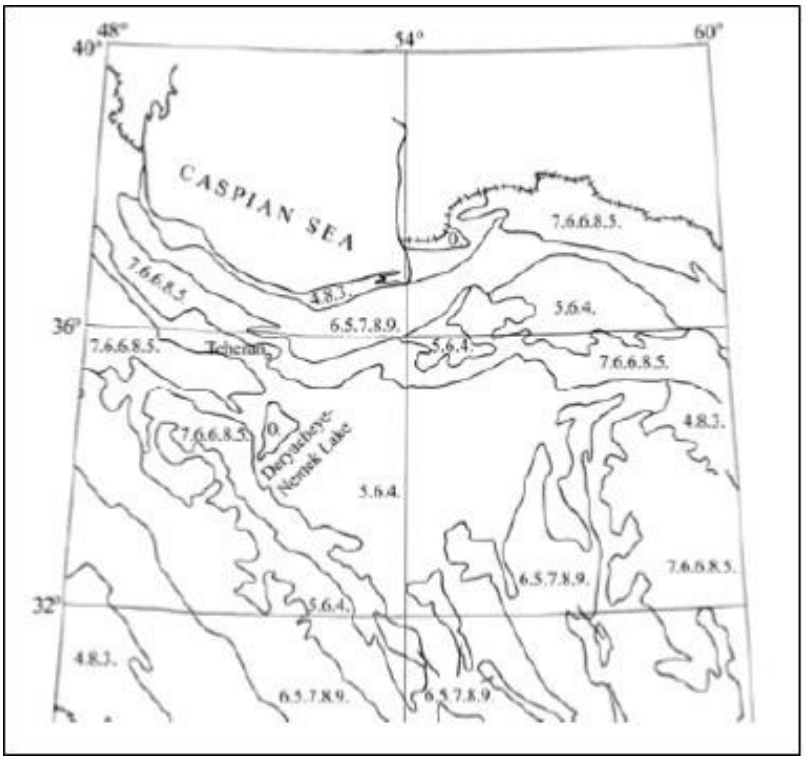

Fig. 2*. Mapa de secciones geoeléctricas (GES) de predicción de Irán (fragmento). (Bashkuev et al. 2008)*

En Cuba, la planificación del desarrollo de la radiodifusión en ondas medias (540-1700 kHz) también ha demandado la realización de este tipo de cartografía a pequeña escala, mediante la elaboración del mapa de la conductividad eléctrica equivalente del país a escala 1:500 000 (Pascual *et al.,* 1995). El método empleado estuvo basado en un algoritmo que parte de la expresión para la componente vertical del campo eléctrico generado por una antena transmisora del tipo dipolo vertical, que son las empleadas por la radiodifusión en ondas medias, donde la atenuación del campo es función de la distancia al transmisor, la longitud de onda de la señal y la conductividad eléctrica equivalente del suelo. Para la confección del mapa se estudió la atenuación del campo a diferentes distancias del transmisor, midiéndose respecto a todos los transmisores existentes en cada provincia. El mapa obtenido se muestra en la figura 3.

En el mismo se aprecia que la parte más occidental del país, donde se ubica la región de estudio, se distingue por la presencia de tres sectores de diferente conductividad eléctrica equivalente: extremo occidental, incluyendo la península de Guanahacabibes, con un valor de 7 mS/m (143 Ω·m); la llanura sur, con un valor máximo de 15 mS/m (67 Ω·m); y, la zona norte, representada por la Cordillera de Guaniguanico, con un valor mínimo de 1 mS/m (1 000 Ω·m). Según los autores del mapa, los valores altos de la conductividad están asociados, generalmente, a llanuras donde existe un drenaje deficiente, debido al predominio de sedimentos arcillosos, mientras que en las alturas y zonas montañosas juega un papel predominante el relieve en la aparición de valores bajos de la conductividad, con presencia de suelos poco potentes subyacidos por rocas de alta resistividad eléctrica.

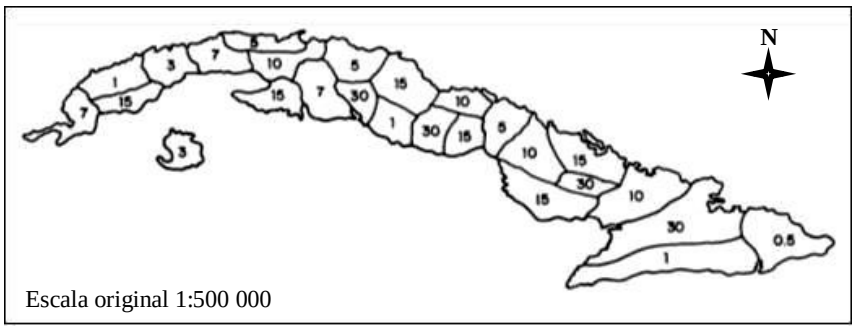

Fig. 3. *Mapa de la conductividad eléctrica equivalente (en mS/m) de Cuba (Pascual et al. 1995).*

Basados en sus amplias aplicaciones, es evidente la necesidad de contar con mapas de resistividad eléctrica (o conductividad) en diferentes regiones del país, a escala 1:100 000 o mayores, que permitan en un futuro cercano disponer de un mapa de todo el territorio nacional.

1.2 Localización geográfica de la región de estudio

Está situada en la parte sur de la región occidental de Cuba, ocupando un área de forma irregular, que se extiende desde la península de Guanahacabibes hasta el antiguo límite de la provincia de Pinar del Río (municipio de Candelaria), perteneciente a la nueva provincia de Artemisa (figura 4). Su borde septentrional está representado por el litoral norte de la referida península y la Cordillera de Guaniguanico, mientras que al sur limita con la costa y la zona de transición entre la premontaña y la llanura baja, con un ancho de unos 5-27 km en este sector. La superficie total abarcada es de 3 854,53 km^2.

La región de interés comprende las subregiones geomorfológicas Llanura de Guanahacabibes y Llanura Sur de Pinar del Río. La primera constituye una llanura marina carsificada, sustentada sobre rocas carbonatadas del Plioceno-Pleistoceno. A continuación, se encuentra la Llanura Sur de Pinar del Río, de génesis fundamentalmente aluvial, formada sobre rocas sedimentarias más antiguas, y cubierta por depósitos arcillo-arenosos jóvenes de gran potencia, arrastrados por las corrientes de la vertiente sur de la cordillera. En la misma se localiza la franja de mayor desarrollo económico y social de la parte más occidental del país, donde se ubican importantes asentamientos poblacionales, entre los que sobresale la ciudad de Pinar del Río, capital de la provincia del mismo nombre.

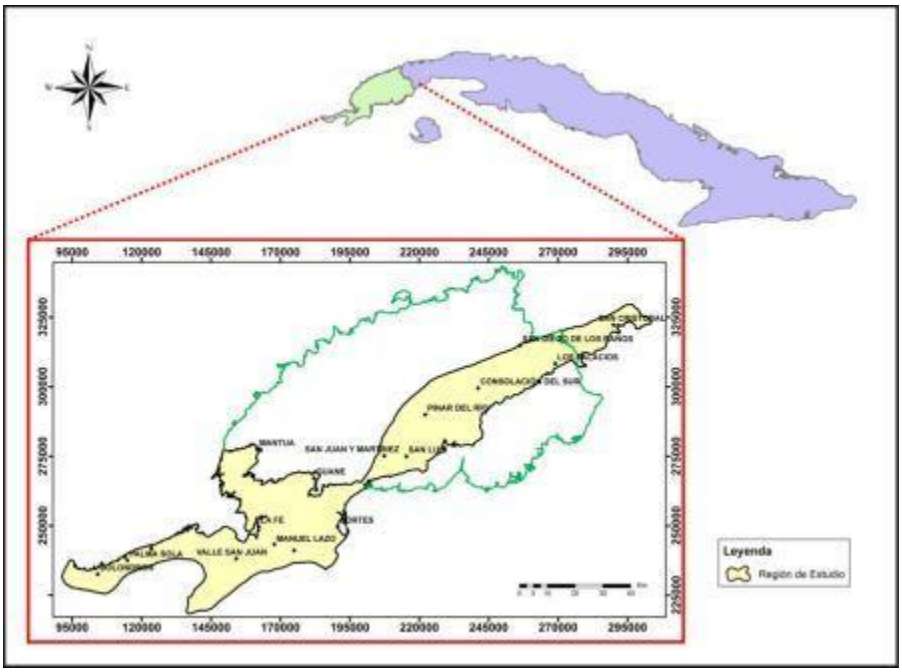

Fig. 4. *Ubicación de la región de estudio.*

2. Materiales y métodos

El procedimiento empleado para la elaboración de los mapas de resistividad eléctrica a diferentes profundidades se basó en caracterizar por su resistividad las formaciones geológicas representadas en el mapa geológico digital a escala 1:100 000 de la región de estudio, elaborado por el Instituto de Geología y Paleontología-Servicio Geológico Nacional (IGP-SGN).

Con este fin se hizo una selección de materiales de archivo de estudios ingeniero geológicos donde se aplicó el método de sondeo eléctrico vertical (SEV), alcanzando un total de 48 obras distribuidas por la región de estudio, con una mayor densidad en los alrededores de la ciudad de Pinar del Río y otras zonas de intensa actividad constructiva (figura 5). El total de puntos de SEV fue de 895, con una abertura máxima de la línea de alimentación de 143 m como promedio y valores extremos de 20 y 300 m, respectivamente. En cada obra se escogió un grupo de puntos de sondeo eléctrico situados junto a perforaciones (paramétricos), con el fin de calibrar el corte geoeléctrico con el litológico. Para ello, se tuvo en cuenta que las curvas no tuvieran signos de distorsión, para que los valores interpretados no difirieran significativamente de los reales. La cantidad de puntos paramétricos empleados fue de 291, para un 32,5 % del total de SEV.

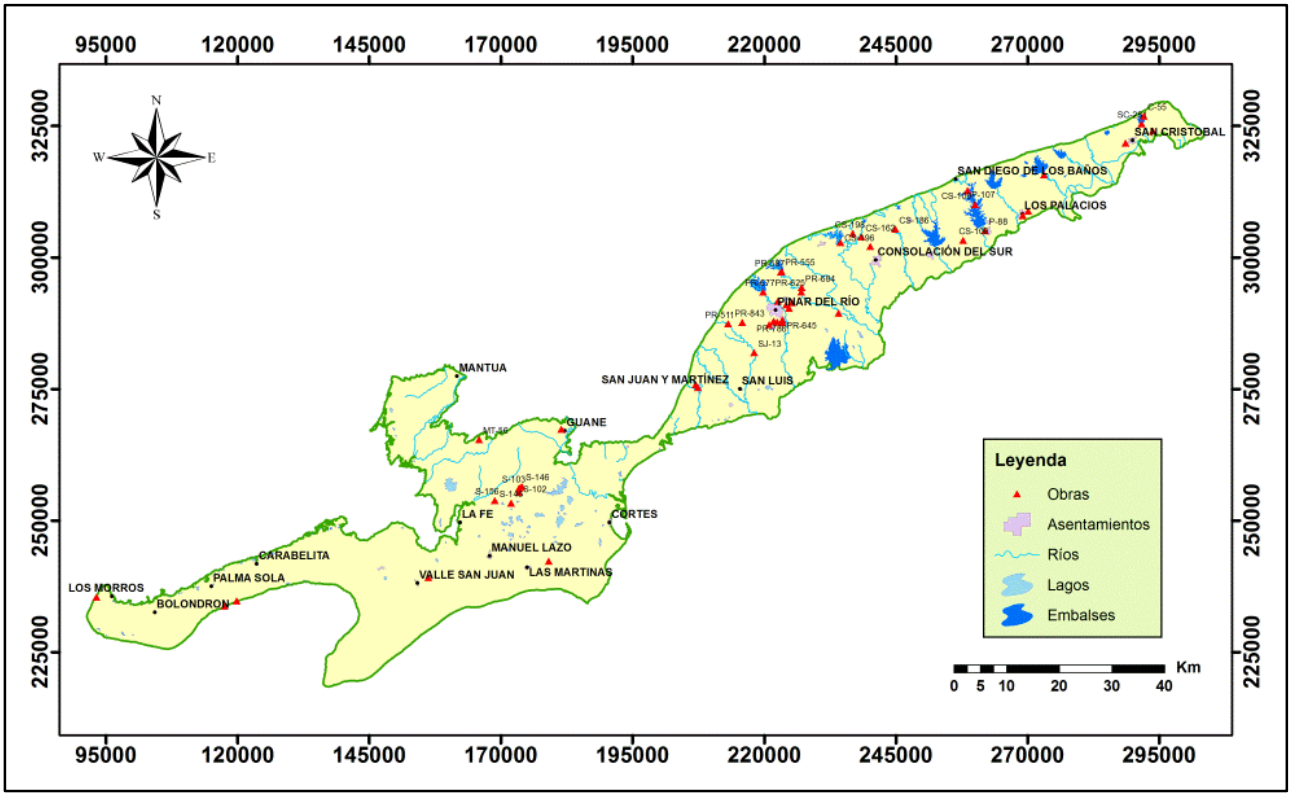

Fig. 5. *Distribución de obras con datos geoeléctricos*

El siguiente paso fue la confección, en cada obra investigada, de un corte geoeléctrico generalizado (CGG), el cual sintetiza las particularidades de la distribución de la resistividad eléctrica de los suelos y rocas hasta la profundidad de estudio. Se representa en forma de columna geoeléctrica, con capas continuas o que se acuñan, y valores de resistividad eléctrica y profundidades de capa determinados estadísticamente a partir de todos los sondeos paramétricos de la obra, expresados por el valor promedio y rango de variación para un nivel de confianza de 95 %. El total de CGG elaborados y su distribución coincide con las obras mostradas en la figura 5, con una densidad de uno cada 78,7 km^2

Por último, se definieron 10 modelos de resistividad eléctrica para la región de estudio, hasta la profundidad máxima de investigación, tomando como base las formaciones geológicas más representativas de la región (tabla I).

Tabla I. Modelos de resistividad eléctrica y cantidad de cortes geoeléctricos generalizados utilizados en su elaboración.

Modelo	Formación geológica principal y condiciones de cubierta	Cantidad de CGG utilizados
I	Vedado descubierta	1
II	Vedado cubierta por suelos eluviales	1
III	Vedado cubierta por suelos de Fm. Siguanea	1
IV	Jaimanitas cubierta por arenas de playa	2
V	Paso Real descubierta	11
VI	Paso Real cubierta por suelos indiferenciados de Fm. Guane y Guevara	4
VII	Paso Real cubierta por suelos de Fm. Guane	12

Modelo	Formación geológica principal y condiciones de cubierta	Cantidad de CGG utilizados
VIII	Paso Real cubierta por suelos aluviales	6
IX	Capdevila descubierta	4
X	Capdevila cubierta por suelos de Fm. Guane o aluviales	6

Basados en los mismos, se determinaron los valores promedio de resistividad eléctrica para las diferentes formaciones geológicas a varias profundidades (2; 5; 10; y 20 m), como se ilustra en la figura 6.

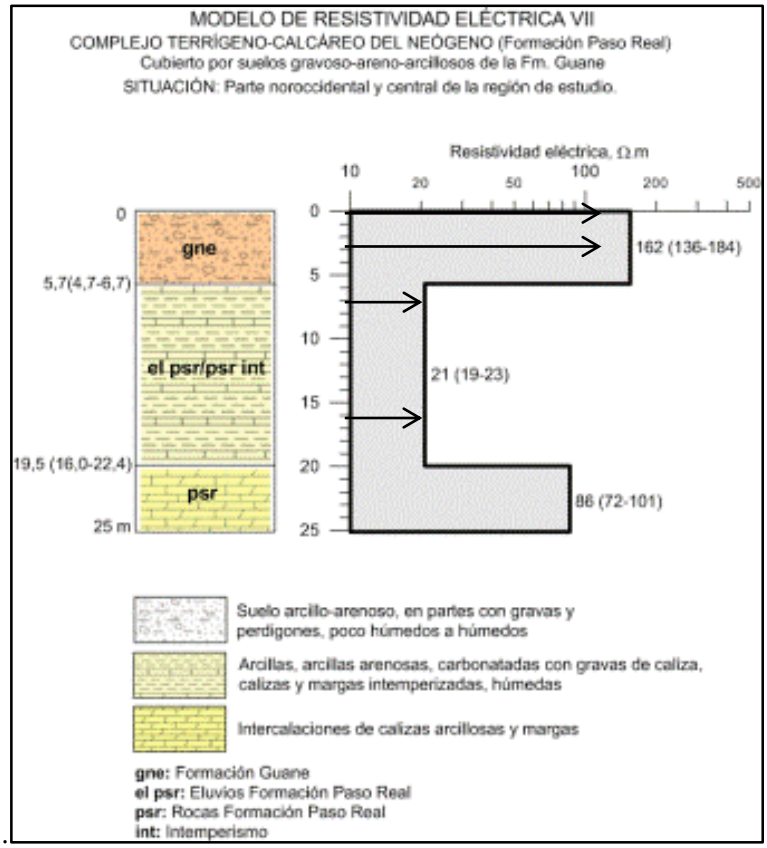

Fig. 6. *Obtención de valores de resistividad eléctrica a diferentes profundidades para las formaciones Guane y Paso Real*

3. Resultados y discusión

Los rangos de resistividad eléctrica de cada formación geológica representada en el mapa geológico a escala 1:100 000, para las diferentes profundidades seleccionadas, se muestran en la tabla II. En el caso de algunas formaciones geológicas confinadas a áreas muy reducidas y no representadas en los modelos de resistividad eléctrica, sus valores se tomaron del informe de Martínez *et al.* (1988), o por analogía litológica con las formaciones mejor estudiadas, abarcando en conjunto solo un 15,13 % de la superficie total de la región estudiada.

Tabla II. Rangos de resistividad eléctrica para las formaciones geológicas cartografiadas en el mapa.

Formación geológica	Rango de resistividad eléctrica (Ω·m)				No. de valores
	2 m	5 m	10 m	20 m	
Depósitos aluviales	50-100	50-100	20-50	20-50	46
Depósitos marinos	50-100	50-100	0-20	0-20	2
Depósitos palustres	0-20	0-20	0-20	0-20	Por analogía litológica
Depósitos biogénicos	0-20	0-20	0-20	0-20	"
Depósitos eluvio-coluviales	50-100	20-50	20-50	20-50	"
Jaimanitas	50-100	50-100	0-20	0-20	4
Siguanea	Más de 500	50-100	50-100	20-50	4
Miembro Cocodrilo	100-200	100-200	0-20	0-20	Por analogía litológica
Guevara+Vedado	Más de 500	0-20	0-20	0-20	"
Guane+Guevara	200-500	200-500	50-100	0-20	52
Vedado	Más de 500	0-20	0-20	0-20	28
Guane	100-200	100-200	20-50	50-100	93
Paso Real	20-50	20-50	20-50	20-50	69
Manuelita	50-100	50-100	20-50	20-50	Por analogía litológica
Loma Candela	50-100	50-100	20-50	20-50	Martínez *et al.* (1988)
Grupo Universidad	20-50	20-50	0-20	0-20	"
Capdevila	0-20	0-20	0-20	0-20	37
Grupo Mariel	0-20	0-20	0-20	0-20	37
Los Negros	50-100	20-50	0-20	0-20	Martínez *et al.* (1988)
Vía Blanca	20-50	20-50	0-20	0-20	Por analogía litológica

Los mapas de resistividad eléctrica de la región de estudio, a las profundidades de 5 y 10 m, están mostrados en las figuras 7 y 8. Su análisis demuestra que en la parte occidental de la región estudiada, ocupada por la península de Guanahacabibes, la resistividad eléctrica está comprendida entre 0 y 20 Ω·m para ambas profundidades, lo que se explica por la presencia somera de aguas fuertemente mineralizadas.

En el resto de la región, los valores máximos de resistividad a la profundidad de 5 m alcanzan hasta 200-500 Ω·m, asociados a suelos arcillo-arenosos, poco húmedos, de la Formación Guane. Con el incremento de la profundidad a 10 m, la resistividad eléctrica no supera los 100 Ω·m, motivado por el aumento del grado de humedad y, sobre todo, la abundancia de material arcilloso en la composición litológica de las diferentes formaciones geológicas del territorio.

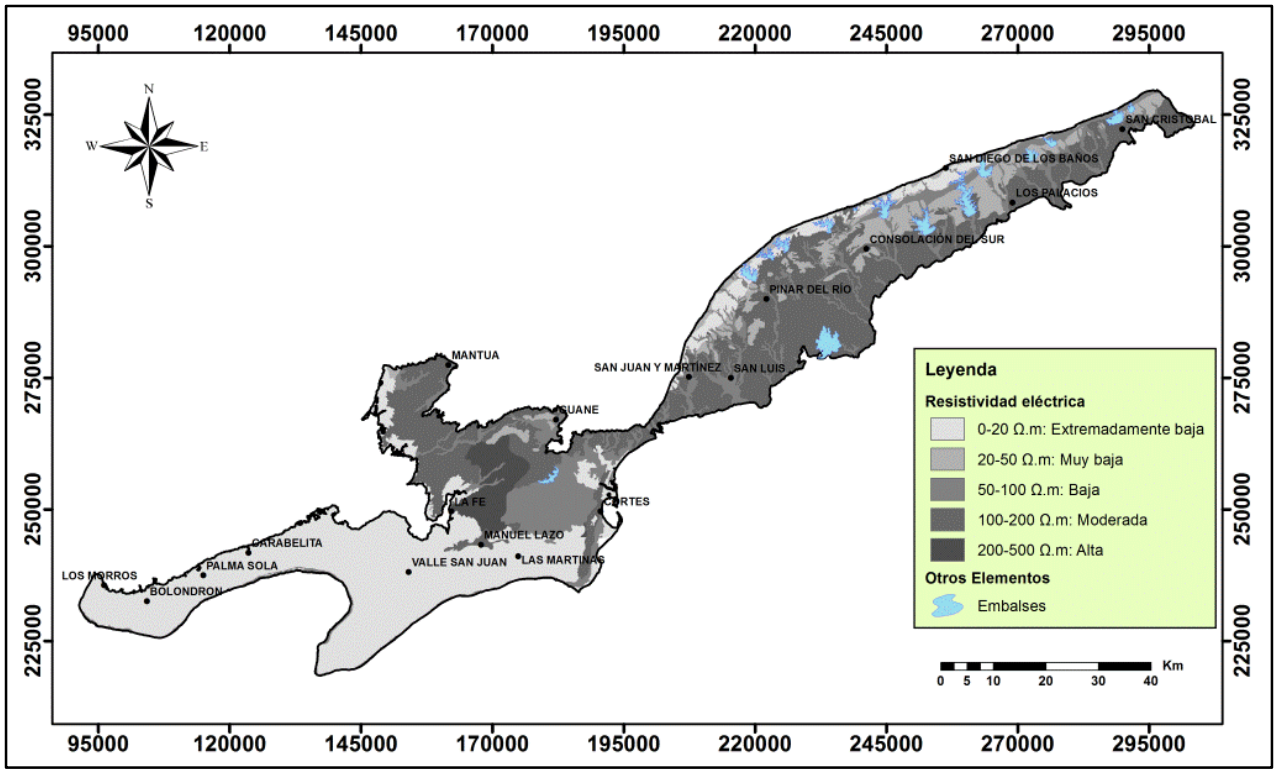

Fig. 7*. Mapa de la resistividad eléctrica a 5 m de profundidad*

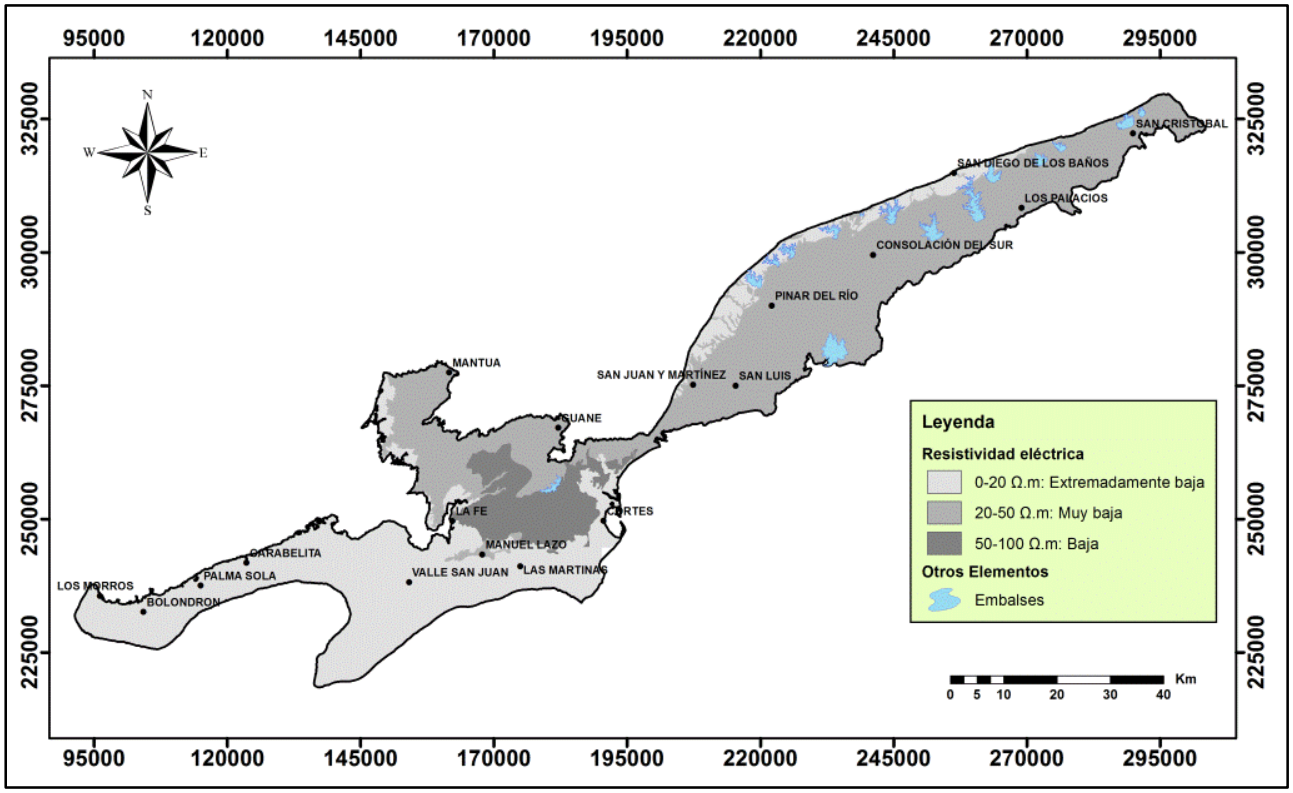

Fig. 8. *Mapa de la resistividad eléctrica a 10 m de profundidad*

Conclusiones

Se obtuvieron por primera vez mapas de resistividad eléctrica a cuatro profundidades (2; 5; 10; 20 m) en una amplia región de la parte occidental de Cuba, de significativa importancia económica y social. El procedimiento empleado permite utilizar con este fin los límites de las distintas formaciones geológicas en el mapa geológico base, las que deben ser caracterizadas por su resistividad eléctrica empleando la información disponible y su tratamiento estadístico, no requiriendo efectuar interpolación entre puntos de resistividad conocida. En este caso, el desarrollo de modelos para representar las particularidades del comportamiento de la resistividad en la región fue la vía escogida para determinar los rangos de resistividad de las unidades geológicas, pero igualmente pueden obtenerse a partir de mediciones eléctricas de pozo u otras variantes.

Aunque los mapas se obtuvieron para la resistividad eléctrica, de mayor uso en la prospección eléctrica, pueden ser convertidos fácilmente a mapas de conductividad eléctrica, lo que resulta más conveniente para algunas aplicaciones prácticas.

Se recomienda la elaboración de estos mapas en otras regiones y provincias del país a partir de materiales geoeléctricos de archivo, lo que disminuye los costos y permite obtener un grado de confiabilidad satisfactorio para sus principales usos.

Referencias bibliográficas

Bashkuev, Y. B. et al. 2008. Maps of geoelectric sections of Turkey, Iran, Afghanistan, Pakistan, Korea and Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 861-868, 2008.

Beamish, D. 2013. The bedrock electrical conductivity map of the UK. *Journal of Applied Geophysics* 96 (2013) 87-97.

CCIR 1992. World atlas of ground conductivities. Rec. 832.

Fine, H. 1957. An effective ground conductivity map for the continental United States. Proc-IRE, 42,1405.

Martínez, D., R. Fernández de Lara *et al.* (1988). Informe sobre los trabajos del levantamiento geológico y búsqueda a escala 1:50 000 en la parte central de la provincia de Pinar del Río. Emp. de Geología de Pinar del Río, Minbas, 959 p.

Pascual, A., Delgado, O. y Fuentes, N. 1995. Determinación de la conductividad eléctrica de los suelos de la República de Cuba. Inst. Geofísica y Astronomía, La Habana, Cuba. *Geofísica Internacional, Vol. 34, Núm. 2, pp. 233-237.*

Informes del archivo ENIA Pinar del Río utilizados (código y año)

S-185 (1995); S-120 (1984); MT-56 (1988); S-156 (1988); S-146 (1987); S-102 (1981); S-103 (1981); S-146 (1987); S-143 (1987); G-73 (1989); SJ-26 (1983); SJ-50 (1988); PR-511 (1984); PR-843 (1990); SJ-13 (1978); PR-677 (1987); PR-464 (1982); PR-654 (1987); PR-732 (1988); PR-344 (1980); PR-587 (1985); PR-555 (1984); PR-786 (1989); PR-645 (1987); PR-711 (1988); PR-653 (1987); PR-419 (1981); PR-625 (1986); PR-684 (1987); PR-588 (1986); CS-196 (1988); CS-198 (1988); CS-162 (1986); CS-146 (1985); CS-186 (1988); CS-108 (1982); P-107 (1986); CS-109 (1982); P-88 (1982); P-114 (1987); P-103 (1986); SC-152 (1982); SC-278 (1993); SC-281 (1990); C-55 (1987); SC-167 (1983).

Acerca de los autores:

José Antonio García Gutiérrez. Ingeniero Geofísico. Máster en Gestión Ambiental. Profesor Asistente Departamento de Geología, Universidad de Pinar del Río. Especialista Superior de Proyectos e Ingeniería UIC Pinar del Río, ENIA, Cuba.

Carlos Sacasas León. Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Geociencias, Instituto Superior Politécnico José A. Echevarría, La Habana, Cuba.