

Cartografía geológica a partir de datos geofísicos y geomorfológicos en la hoja 4679-IV, sector Vidot, Camagüey, Cuba

Geological mapping from geophysical and geomorphological data in the 4679-IV, sector Vidot, Camagüey, Cuba

Rigoberto Báez Gutiérrez¹, Willy Roberto Rodríguez Miranda², Rolando Julio García Sánchez³

¹Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: rigobertobg@civil.cujae.edu.cu

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: willy@civil.cujae.edu.cu, wrodriguezml1955@gmail.com

³Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: rolandogs@civil.cujae.edu.cu

Resumen

Aunque existen numerosos estudios geólogo-geofísicos en la provincia de Camagüey, aún ha sido insuficiente la integración de la información para disponer de la cartografía geológica a escala 1:50,000. Esta investigación muestra una contribución de los métodos geofísicos y geomorfológicos a la cartografía geológica del área de estudio. Para ello se realizó la caracterización estadística de los métodos geofísicos y las formaciones geológicas más representadas. También los principales alineamientos fueron identificados mediante la combinación de los métodos potenciales y la información geomorfológica disponible, lo que además de confirmar las fallas presentes en el mapa 1:100,000 permitió identificar otros contactos. La espectrometría gamma y los métodos potenciales permitieron delimitar también las unidades litológicas mejor representadas en el área. En esta ocasión fue posible diferenciar los grandes cuerpos intrusivos, así como las formaciones Camujiro, Piragua, Florida y Duran. Finalmente se propone un mapa con la interpretación integrada que sin duda apoya el proceso de cartografía geológica en el sector Vidot a escala 1:50,000 y un resumen de las principales características geofísicas de las unidades geológicas cartografiadas.

Palabras clave: Cartografía geológica, métodos geofísicos, mapas, interpretación integrada.

Abstract

Although numerous geological and geophysical studies have been conducted in the province of Camagüey, the integration of information to provide geological mapping at a scale of 1:50,000 has still been insufficient. This research demonstrates the contribution of geophysical and geomorphological methods to the geological mapping of the study area. A statistical characterization of the geophysical methods and the most represented geological formations was performed. The main alignments were also identified by combining the potential methods and the available geomorphological information. This, in addition to confirming the faults present on the 1:100,000 map, also allowed for the identification of other contacts. Gamma spectrometry and potential methods also allowed for the delimitation of the best-represented lithological units in the

area. On this occasion, it was possible to differentiate the large intrusive bodies, as well as the Camujiro, Piragua, Florida, and Duran formations. Finally, a map with an integrated interpretation is proposed, which undoubtedly supports the geological mapping process in the Vidot sector at a scale of 1:50,000, along with a summary of the main geophysical mapped geological units.

Keywords: Geological mapping, geophysical methods, maps, integrated interpretation.

1. Introducción

1.1. Fundamentación

La cartografía geológica representa una tarea de especial interés en las geociencias y en particular para la geofísica, por cuanto permite conformar el modelo geológico de una determinada región representando los distintos tipos de rocas, sedimentos y suelos que afloran en la superficie terrestre, su disposición y geometría en profundidad.

Muchas han sido las aplicaciones de los campos potenciales y la exploración radiométrica dentro del amplio espectro de las investigaciones geológicas, que van desde su utilización independiente para resolver tareas sencillas, hasta la aplicación combinada dentro de un gran proyecto para la prospección geofísica. En la cartografía geológica se destacan investigaciones asociadas a la determinación relativa de la edad de las rocas, la identificación litológica y estructural, siempre teniendo como principio la existencia de contraste en las propiedades físicas de las unidades geológicas existentes para tener como resultado final un mapa geológico del área de estudio. Los trabajos realizados por [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8] demuestran lo planteado.

Aumentar el conocimiento geológico de un país debe constituir necesidad prioritaria para cualquier gestión gubernamental, las informaciones básicas propuestas por cualquier mapa geológico, garantizan el correcto desarrollo de actividades esenciales como la minería, la explotación de aguas superficiales y subterráneas, la preservación del medio ambiente, la prevención de catástrofes naturales relacionadas con los peligros geológicos y los efectos del cambio climático, la agricultura, la planificación física y el ordenamiento territorial. De ahí que contribuir a la confección del mapa geológico nacional 1: 50,000, sea una tarea prioritaria en las investigaciones geofísicas en Cuba.

En Camagüey se han desarrollado trabajos para la búsqueda y prospección de yacimientos de minerales metálicos asociados al Arco Volcánico Cretácico y a génesis hidrotermales, destacándose la búsqueda de yacimientos auríferos, la caracterización de los grandes cuerpos granitoides existentes en el área, además de la representación del control estructural metalogénico existente en la zona. En esta investigación se presentan los resultados de la utilización de métodos geofísicos con el fin de apoyar la cartografía geológica en la hoja 4679-IV en la zona sur de Camagüey, Sector Vidot (Figura 1).

1.2. La geofísica en la cartografía geológica

Desde los años 80 se comienzan a utilizar las composiciones de color, hoy llamadas mapas ternarios, que hacen uso de las combinaciones de colores RGB y CMY. Estos mapas son muy utilizados porque permiten delimitar unidades geológicas diferentes a partir de su expresión espectrométrica, también en otros trabajos [9, 2 y 10] se relacionan combinaciones de los diferentes radioelementos en imágenes coloreadas para lograr una mejor interpretación.

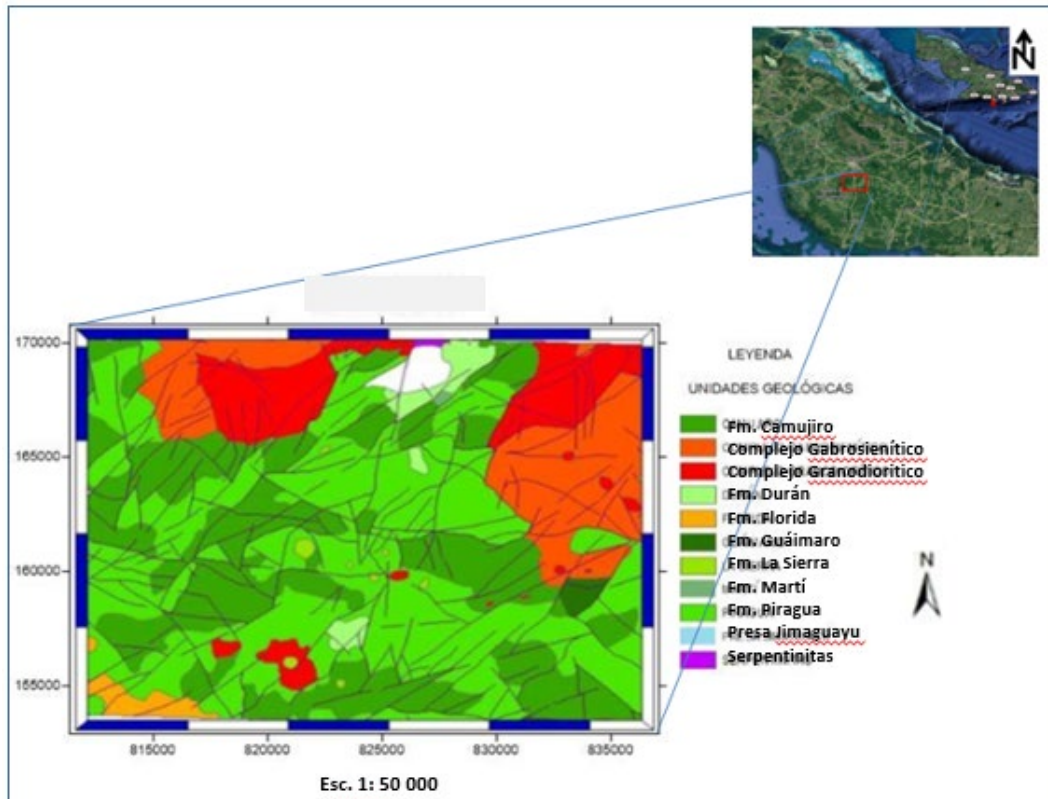


Figura 1. Ubicación del área de estudio y mapa geológico 1:100,000 representado en escala 1:50,000 (modificado de: IGP 2016).

En la actualidad los mayores esfuerzos en el uso de la geofísica para la cartografía geológica están centrados en el análisis integrado de toda la información y del uso de técnicas modernas de procesamiento, ejemplo de esto lo constituyen los siguientes trabajos:

[11] integran información aerogeofísica, satelital y el modelo digital de elevación (MDE), para la cartografía geológica de estructuras graníticas y los principales dominios geológicos del área.

[4] hace un estudio aero-gravimétrico y aero-magnético para estudiar las potencialidades de ambos métodos reconociendo alineamientos en superficie, que demuestren la presencia de fallas en el área de estudio. También propone zonas anómalas que podrían servir para proyectar nuevas investigaciones de búsqueda y prospección.

[12] introduce la utilización de gradientes horizontales para mejorar la resolución de los datos aerogamma.

[13] realiza una interesante investigación donde justifica las posibilidades de la Geobotánica para la cartografía geológica, en regiones con amplia cobertura vegetal.

[14 y 15] presentan resultados favorables del uso de los métodos geofísicos durante la identificación de fallas y depósitos minerales en Egipto e Irán respectivamente.

[16] utilizan un complejo de métodos geofísicos para cartografiar tipos de suelos y caracterizar horizontes acuíferos.

En Cuba se han realizado levantamientos geológicos y geofísicos con objetivos orientados a la cartografía geológica a diferentes escalas. Sobre la base de los resultados de todos los levantamientos regionales señalados, se llevó a cabo la generalización del mapa geológico a escala 1:100,000 [17]. Dentro de los trabajos geofísicos regionales ejecutados se destaca el levantamiento aerogeofísico complejo (LAGC), el cual cubrió el territorio nacional con levantamientos aeromagnético y aero-gamma-espectrométrico, todos a escala 1:50,000. Como principales resultados de éstos trabajos regionales se confeccionaron los mapas geofísicos correspondientes [18].

[19] realizan la integración de métodos gravimétricos, magnéticos, eléctricos y electromagnéticos para cartografiar estructuras relacionadas con menas de cromitas en la región oriental con buenos resultados.

[20] realizan la interpretación sobre datos gravimétricos, magnéticos y el MDE con el fin de cartografiar las estructuras que representan el control estructural metalogénico de un sector favorable, donde hace una caracterización del comportamiento de los campos físicos para cada estructura, además de proponerlas como elementos favorables para la ocurrencia mineral.

Una aplicación del reconocimiento de patrones para la identificación litológica del corte geológico utilizando métodos geofísicos de pozo fue realizada por [21].

[22] presentan los aportes del análisis petrofísico y los métodos geofísicos durante la identificación de rasgos geológicos de interés en la región de Bahía Honda.

[23] muestran las posibilidades de los métodos geofísicos para la cartografía geológica en la Isla de la Juventud.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales disponibles

Se contó con los materiales siguientes, suministrados por el Instituto de Geología y Paleontología:

- Mapa de Anomalía de Bouger a escala 1:50,000.
- Mapa del Campo Magnético Anómalo a escala 1:50,000.
- Mapa Gamma–Espectrométrico a escala 1:50,000 (canales de uranio (U), torio (Th), potasio (K) e intensidad gamma total (IGT)).
- Mapa Geológico Digital a escala 1:100,000.
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con una resolución de 25 m.

2.2. Métodos empleados

Se realizó el análisis exploratorio de datos para cada uno de los canales geofísicos existentes y para las unidades geológicas más representadas en el área, teniendo como patrón al mapa geológico 1:100,000. Se realizó el análisis de factores, para conocer la interrelación numérica entre las variables y su supuesta relación geológica, de ambos análisis estadísticos se determinaron las variables más informativas.

Fueron realizadas transformaciones como la separación regional-residual y el gradiente horizontal para los campos potenciales.

Transformaciones como variables complejas, el factor de formación y el mapa ternario que pueden ser muy útiles para la discriminación de rocas sedimentarias fueron aplicadas sobre los datos radiométricos.

Se realizó también un análisis geomorfológico y estructural en la zona partiendo del MDE en el área de estudio y de la red de drenaje.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultado del análisis exploratorio de datos.

El análisis estadístico demostró (Tabla 1) que las formaciones geológicas con menores coeficientes de variación coincidían con las mejor representadas y las de menor dificultad en el momento de la interpretación. Este es el caso de las formaciones Piragua y Camujiro, así como los granitoides, donde la variabilidad puede estar asociada a cambios en la composición en los bordes de los mismos.

El análisis de los canales individuales evidenció comportamientos multimodales en los canales espectrométricos, que pueden responder a los cambios litológicos en la zona de estudio y de ahí la justificación de los mismos como la más fuerte herramienta para la discriminación. Sin embargo, la respuesta de los campos potenciales pudiera estar más asociada a cuerpos en profundidad ya que su comportamiento estadístico fue bastante homogéneo y con una distribución normal (Figura 2).

Tabla 1. Resumen del comportamiento estadístico de las Fm. Piragua y Camujiro, y los grandes cuerpos intrusivos presentes en el área

Fm. Piragua	IGT μR/h	K %	U ppm	Th ppm	Dg mGal	Dt nT
Media	3,61	1,38	1,6	1,69	0,06	-17,52
Mínimo	1,56	0,36	0	1,21	-3,05	-321,29
Máximo	11,89	5,36	4,71	5,55	2,71	227,17
Coefficiente Variación	0,35	0,43	0,33	0,27	---	---
Fm. Camujiro	IGT μR/h	K %	U ppm	Th ppm	Dg mGal	Dt nT
Media	3,37	1,36	1,41	1,4	0,25	-17,52
Mínimo	1,59	0,36	0,96	1,23	-2,31	-272,03
Máximo	6,08	2,86	2,15	1,95	2,4	209,49
Coefficiente Variación	0,18	0,26	0,19	0,12	---	---
C. Gabrosienítico	IGT μR/h	K %	U ppm	Th ppm	Dg mGal	Dt nT
Media	8,47	1,8	3,19	3,16	-1,21	-50,98
Mínimo	3,99	0,36	1,11	1,33	-2,07	-244,01
Máximo	13,79	6,36	4,98	6,93	0,92	139,48
Coefficiente Variación	0,27	0,59	0,27	0,31	---	---
C. Granodiorítico	IGT μR/h	K %	U ppm	Th ppm	Dg mGal	Dt nT
Media	4,47	3,65	3,19	1,98	1,8	2,13
Mínimo	1,58	1,86	1,11	1,18	-268,65	0,01
Máximo	12,19	6,36	4,98	4,93	14,62	3,52
Coefficiente Variación	0,46	0,29	0,27	0,31	---	0,36

El análisis de factores

El análisis de factores confirmó la alta correlación entre los canales espectrométricos, así como entre los campos potenciales, como era esperado y a su vez poca relación entre ambos grupos lo que debe estar asociado a la diferente profundidad de la respuesta asociada a los mismos, para los fines cartográficos.

3.2. Resultados de las transformaciones realizadas a los campos potenciales, los datos radiométricos y al MDE.

Se realizó la superposición de los resultados de la interpretación de los métodos potenciales y geomorfológicos para buscar coincidencias y compararlos con los alineamientos ya descritos en el mapa geológico 1:100,000, así como detectar otros posibles en el área.

El método geomorfológico constituyó un elemento más para complementar la interpretación geofísica. En general el patrón de la red de drenaje es dendrítico y sub-dendrítico, esto se podría asociar a rocas ígneas masivas y sedimentarias con poca estratificación (presentes en la zona) o donde los estratos tengan aproximadamente la misma dureza, aunque en toda el área se puede apreciar una cierta tendencia al control estructural en los cursos de los ríos.

Del análisis integrado a partir de las líneas de máximos reconocidos en el mapa de la componente residual y los altos gradientes de la derivada horizontal para los datos gravimétricos, con dirección NS, se pueden reconocer aproximadamente ocho alineamientos que se interpretan por la coincidencia de ambos mapas y en la zona central aparecen los alineamientos más importantes. Para los datos magnéticos utilizando la misma metodología, es posible el reconocimiento de aproximadamente 10 alineamientos que coinciden en muchos casos con los propuestos por gravimetría, destacándose los ubicados en el este y el NO del mapa.

Utilizando como base el mapa geológico 1:100,000, la mayoría de los alineamientos se asocian a fallas regionales seguras ubicadas en la región de estudio, relacionadas principalmente con los alineamientos obtenidos solo por gravimetría y los obtenidos por más de un método. También aparecen otros alineamientos asociados a fallas supuestas que son ubicadas en la zona NE del mapa de estudio (Figura 3).

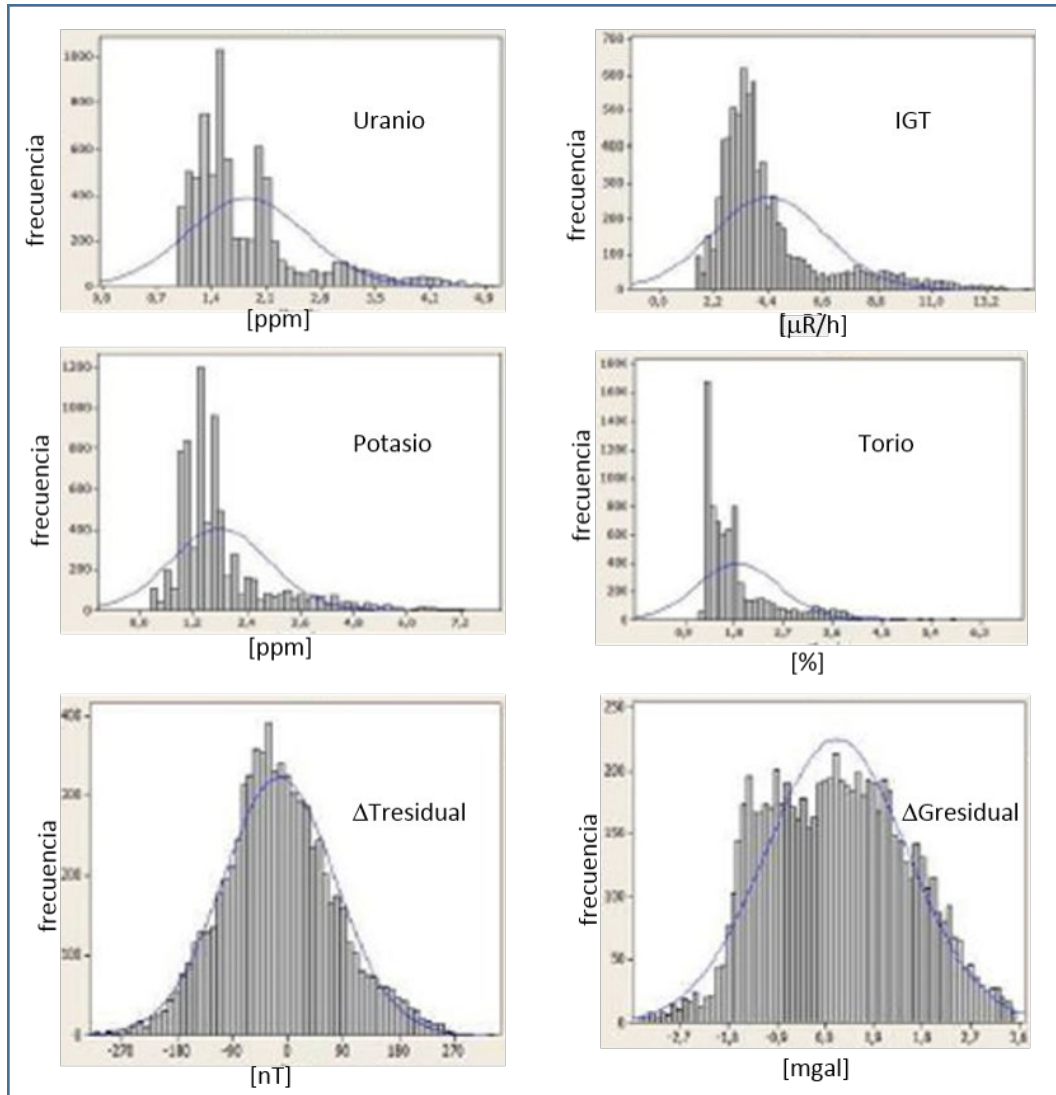


Figura 2. Respuesta estadística de los canales geofísicos disponibles.

Las transformaciones realizadas a los datos radiométricos ofrecían resultados muy parecidos en la discriminación litológica a la de los canales individuales, solo el mapa ternario arrojó información complementaria y más organizada sobre las unidades estudiadas.

En esta oportunidad se presentan los resultados de la interpretación sobre el mapa de intensidad gamma total (IGT) y el mapa ternario, que describen muy bien las principales unidades geológicas (Figura 4).

3.3. Índices geofísicos para la cartografía geológica.

Como otro de los resultados, se realizó un resumen de los índices geofísicos para la cartografía geológica (Tabla 2), con el objetivo de simplificar los futuros trabajos de reconocimiento en el área de estudio. Se describen solo las formaciones geológicas que fueron adecuadamente cartografiadas por los métodos geofísicos, especialmente por los métodos radiométricos

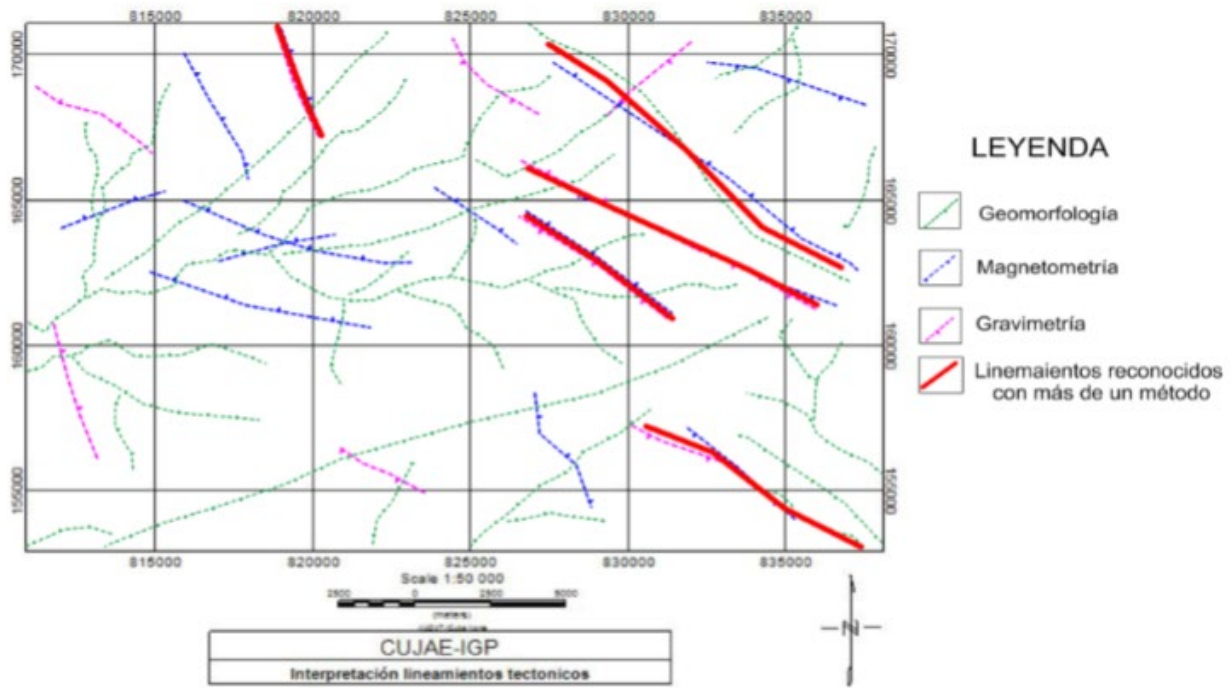


Figura 3. Mapa de los principales alineamientos en el área.

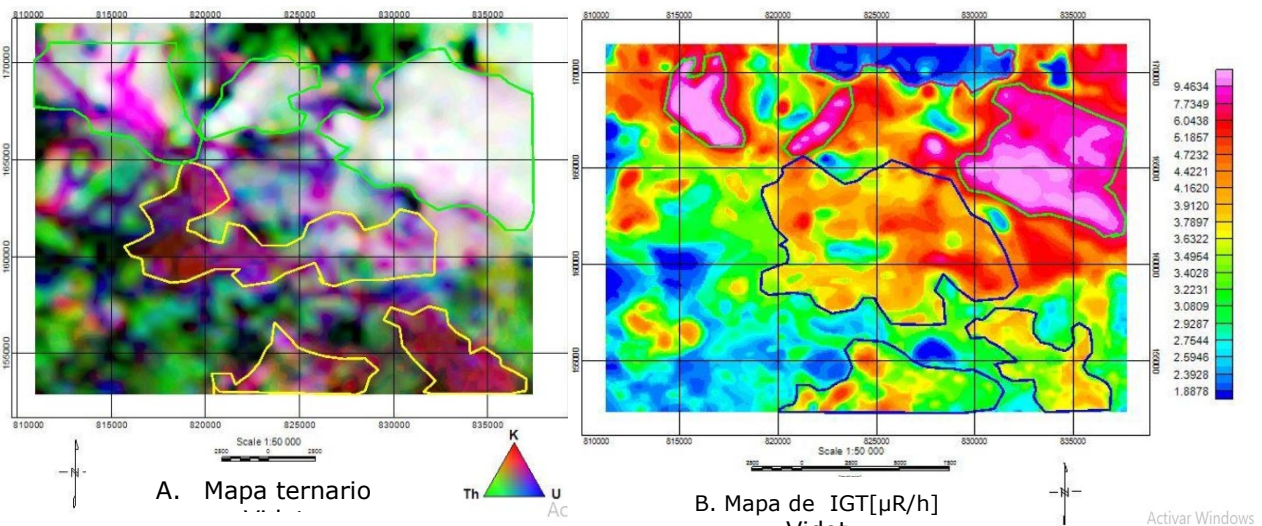


Figura 4. Mapas ternario y de intensidad gamma total, zona Vidot.

4.- DISCUSIÓN

El análisis de los resultados geofísicos muestra de forma clara las unidades geológicas más importantes en la zona de investigación. Los métodos potenciales se destacaron principalmente en el reconocimiento de zonas tectónicas y fallas seguras ya descritas, aunque también se delimitaron contrastes en los valores de la anomalía de Bouguer que pueden estar asociados a rocas sedimentarias de la Formación Durán y los grandes cuerpos intrusivos. Como era esperado los datos radiométricos fueron mejores en la identificación litológica.

El mapa de IGT (Figura 4B) responde de forma muy parecida al mapa de contenido de potasio y sobre todo, ubica a las rocas vulcanógeno-sedimentarias de la Formación Camujiro con valores medios que rondan los 3 $\mu\text{R/h}$. La Formación Piragua se destaca por su amplia variabilidad, pero en general se manifiesta con valores bajos y el resto de las formaciones que pertenecen al AVC presentan una gran dificultad al ser reconocidas, debido a su poco contraste en las respuestas de este atributo, con respecto a las formaciones mejor distribuidas en el área.

Tabla 2. Índices geofísicos para las unidades geológicas cartografiadas

Unidades geológicas	Principales características geológicas	Principales características geofísicas
Complejo Granodiorítico	Compuesto por gabros dioritas cuarcíferas, granodioritas y granitos que instruyen a las rocas volcánico-sedimentarias en las áreas donde afloran.	Representados por altos valores en todos los canales espectrométricos, bien delimitado dado sus altos contrastes con las formaciones que los circundan. Los contenidos de uranio y torio equivalente rondaron las 3 ppm, los niveles de potasio rondan el 4 % para ambos casos y para IGT aproximadamente 9 μ R/h. Reconocidos como anomalías medias de los métodos potenciales.
Complejo Gabrosienítico	Compuesto por rocas intrusivas como monzo-gabros, monzo-dioritas con cuarzo, además sienitas como un producto de metasomatismo potásico en una fase tardía del magmatismo granodiorítico.	
Formación Camujiro	Constituida por rocas efusivas de composición medio-básica, con alcalinidad potásica, fundamentalmente por tobas, de composición variable.	Para el canal de torio se comporta con valores bajos, con aproximadamente 1,3 ppm, para el canal de potasio con valores medios con 1,6 % y para el canal de IGT los valores oscilan entre los 3-4 μ R/h.
Formación Piragua	Unidad sedimentaria con una alta variedad en la composición litológica. Compuesta por brechas y conglomerados tobáceos, calizas biogénicas y menor profundidad por tobas vitro-clásticas y vitro-cristalo-clásticas	Caracterizada por valores medios de torio y bajos de potasio, que rondan los 1,6 ppm y 0,9 % respectivamente. Los valores de IGT rondan los valores medios
Formación Durán	Compuesta por conglomerados volcanomícticos, areniscas grauváquicas volcanomícticas de grano fino a medio, además se encuentran areniscas de origen aluvio-marino, con limitado cemento calcáreo	Puede estar asociada a muy bajos valores de IGT, uranio y potasio. Bajos valores de gravimetría.
Formación Florida	Formación sedimentaria compuesta por calciruditas con fragmentos de volcanitas, calizas biógenas, arcillas y limolitas	Para el canal de IGT pudiera estar asociada a bajos valores, también posiblemente identificable para el canal de potasio con muy bajos valores

El mapa ternario con combinación RGB (Figura 4B) muestra en color blanco la presencia de altos valores para los tres radioelementos, los polígonos de dicho color que se aprecian en el mapa, deben estar respondiendo a rocas de los grandes cuerpos intrusivos, aunque al noroeste del mapa se destaque por valores no tan elevados de contenido de torio. También se muestran polígonos con borde amarillo y coloración púrpura, que caracteriza principalmente zonas con valores altos de U y K pero bajos en Th, por lo tanto pudieran estar respondiendo a rocas efusivo-sedimentarias de la Formación Camujiro. En general el resto de las formaciones del área se caracterizan por bajos valores de U y K, entonces esa coloración verde oscura respondería a rocas de las formaciones Piragua, Guáimaro, Durán y Florida que van desde vulcanitas a rocas sedimentarias representadas por areniscas y calizas polimícticas. Como dato interesante se observa que en la zona más al norte donde los canales de IGT, K y U poseen valores bajos, y se muestran sectores negros, pudieran estar indicando un tipo de formación con características diferentes a las que aparecen en la zona.

Como parte de la integración de la interpretación, se propone un mapa con la contribución final a la cartografía geológica 1:50,000 en la hoja Vidot (Figura 5). Los resultados radiométricos permiten reconocer rocas de las formaciones Piragua, Camujiro, Florida y Durán. Estas últimas fueron las que presentaron mayor incertidumbre. A partir de los métodos potenciales se cartografiaron las rocas ígneas de los grandes cuerpos intrusivos, en la zona norte del área de estudio. También se incluyen en el mapa de interpretación integrada los alineamientos obtenidos por los métodos potenciales y la geomorfología, muchos asociados a fallas regionales descritas en el mapa geológico a escala 1: 100 000. Otros alineamientos se asocian a fallas seguras de menor longitud también descritas en dicho mapa y otros se consideran fallas supuestas y no verificadas por levantamientos geológicos. Este mapa constituye la cartografía geológica final propuesta para el área a partir del procesamiento e interpretación de la información geofísica disponible.

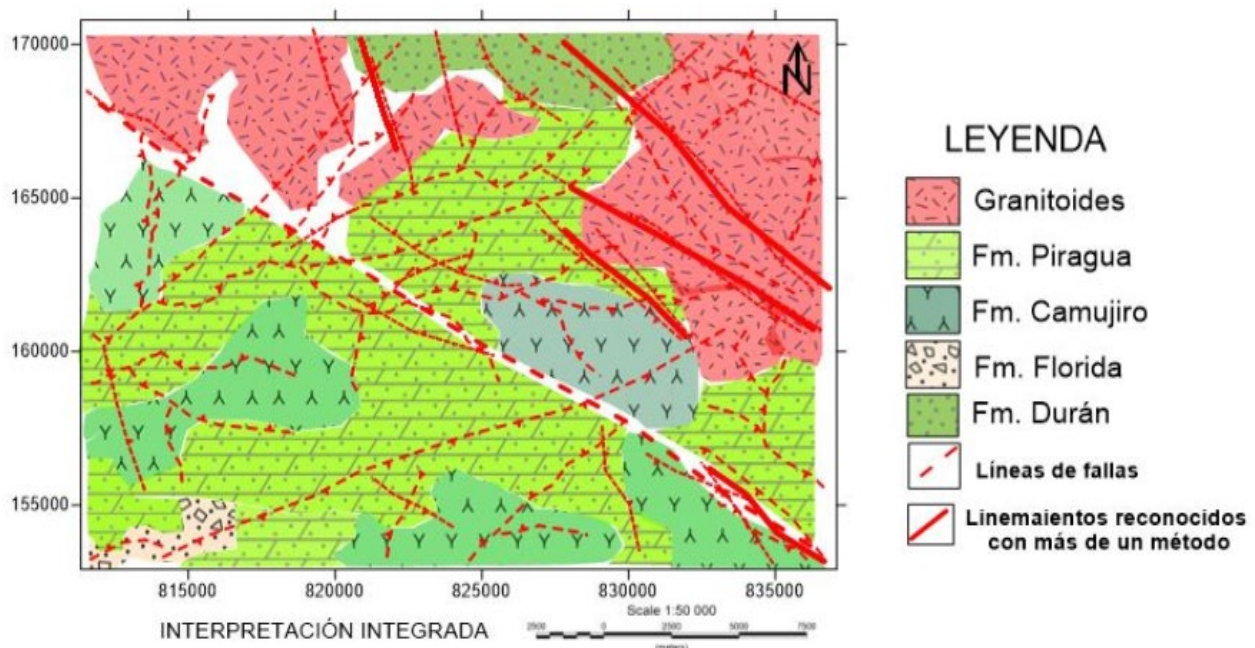


Figura 5. Mapa con la interpretación integrada y la propuesta de cartografía geológica 1:50,000 para la hoja Vidot, Camagüey.

4. Conclusiones

La combinación de los métodos de campos potenciales y el MDE permitió la identificación de los principales alineamientos existentes en el área, muchos de los cuales confirman la presencia de los descritos en el Mapa Geológico 1:100,000 de la República de Cuba. La interpretación integrada de los métodos geofísicos y el MDE permitió realizar una propuesta de cartografía geológica 1:50,000

del área Vidot, Camagüey, donde se identifican las principales formaciones geológicas que pueden ser reconocidas con el nivel de información disponible. A partir del análisis de los resultados de la integración de la información geofísica disponible fue posible establecer un grupo de índices geofísicos para las formaciones geológicas descritas en la región y reconocibles con el nivel de información disponible.

Referencias

1. Russell, W.L.; Steinhoff, R.O. *Radioactivity of volcanic sediments in Brazos County, Texas*. Geophysics, 1961. 36(5): p. 618-625. DOI: <https://dx.doi.org/10.1190/1.1438923>
2. Minty, B.R.S.; Mcfadden, P.; Kennettz, B.L.N. *Multichannel processing for airborne gamma-ray spectrometry*. Geophysics, 1998. 63(6): p. 1971–1985. DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444491>
3. Rodríguez-Miranda, W.R., *Nueva metodología para la interpretación de campos potenciales y aerogamma-espectrometría durante la cartografía geológica*. Tesis de Doctorado, 1998. Departamento de Geofísica. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". 120 p.
4. Lyatsky, H., *Magnetic and Gravity Methods in Mineral Exploration: the Value of Well-Rounded Geophysical Skills*. Geoscience Research & Consulting Ltd., 2010. 02: CSEG RECORDER, Calgary, Alberta, Canada. 35(8): Recuperado a partir de <https://csegrecorder.com/articles/view/magnetic-and-gravity-methods-in-mineral-exploration>
5. Airo, M.-L.; Hyvönen, E.; Lerssi, J.; Leväniemi, H.; Ruotsalainen, A. *Tips and tools for the application of GTK's airborne geophysical data*. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 215, 2014. Recuperado a partir de <https://www.researchgate.net/publication/274008539>
6. Ramos, J. A.; Rodríguez Miranda, W.R.; Gamazo, P., *Evaluación hidrogeológica en Melo, Uruguay con el empleo de métodos geofísicos y técnicas geomáticas*. Revista Cubana de Ingeniería, 2016. 7(3): p. 45-53. Recuperado a partir de <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/536>
7. Abdelhalim, A.; Aboelkhair, H.; Hamini, Z. & Al-Gabali, M. *Mapping lineament features using GIS approaches: case study of Neoproterozoic basement rocks in the South-Eastern Egypt*. Arabian Journal of Geosciences, 2020. 13: p. 651. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05673-4>
8. El Qassas, R.A.Y.; Salaheldin, M.; Assran-Assran, S.M.; Abdel-Fattah, Th.; Rashed, M.A. *Airborne gamma-ray spectrometric data interpretation on Wadi Queih and Wadi Safaga area, Central Eastern Desert, Egypt*. Journal off Astronomy and Geophysics, 2020. 9(1): p. 155-167. DOI: <https://doi.org/10.1080/20909977.2020.1728893>
9. Duval, J.S. *Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data*. Geophysics, 1983. 48: p. 722-735. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1441502>
10. Jayawardhana, P.M.; Sheard, S.N. *The use of airborne gamma-ray spectrometry — A case study from the Mount Isa inlier, northwest Queensland, Australia*. Geophysics, 2000. 65(6): 1993–2000. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444883>
11. Ruy, A. C.; Moreira-Silva, A.; Benfica, C. L.; Souza-Filho, C.R. *Uso de dados aerogeofísicos de alta densidade para mapeamento geológico em terrenos altamente intemperizados: o estudo de caso da região de Cláudio, porção sul do cráton São Francisco*. Revista Brasileira de Geofísica, 2006. 24(4): p. 535-546. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400007>
12. Beamish, D. *Enhancing the resolution of airborne gamma-tay data using horizontal gradients*. Journal of Applied Geophysics, 2016. 132: p. 75-86. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.appgeo.2016.07.006>
13. Odhiambo, B.D. *The place of Geobotany in Geology*. International Journal of Geobotanical Research, 2016. 6(2016): p. 27-36

14. Youssef, M.A.S.; Sabra, M.E.M.; Abdeldayem, A.L.; Masoud, A.A.; Mansour, A.A. *Uranium migration and favourable sites of potential radioelement concentrations in Gabal Umm Hammand area, Central Eastern Desert, Egypt*. Journal of Astronomy and Geophysics, 2017. 6(2017): DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.10.004>
15. Al-Khafaji, W.M.S.; Al-Dabbagh, H.A.Z. *A geophysical correlation between near-surface radioactivity and subsurface faults detected by gravity method for a region located in the western desert of Irak*. Iranian Journal of Earth Sciences, 2019. 11(2): p. 95-103. Recuperado a partir de <https://oiccpres.com/ijes/article/view/5638>
16. Siemon, B.; Ibs-vont-Seht, M.; Steuer, A.; Deus, N.; Wiederhold, H. *Airborne electromagnetic, magnetic and radiometric surveys at the German North Sea Coast applied to groundwater and soils investigations*. Remote Sensing, 2020. 12(2020): 1629. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12101629>.
17. Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba. *Mapa geológico de la República de Cuba*. Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba, 2016.
18. Mondelo-Diez, F.; Sánchez-Cruz, R.; Pérez-Delgado, P.H.; Pardo-Echarte, M.E.; Bello-Dávila, V. *Mapas geofísicos regionales de gravimetría, magnetometría, intensidad y espectrometría gamma de la República de Cuba, 1:2 000,000 hasta 1:50,000*. Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba, 2011. TTP 617965. La Habana.
19. Dussac-Tamayo O.; Acosta-Breal, J. & Gentoiu, M. *Evaluación de la aplicación de un complejo de métodos geofísicos para la cartografía de estructuras relacionadas con menas de cromitas*. Anuario de la Sociedad Cubana de Geología, 2014. 2: p. 75-78
20. Batista-García, J.C.; Vega-Carreño, M.B.; Capote-Marrero, C.R. *Identificación mediante interpretación geofísica del control estructural metalogénico en la zona aurífera La Unión-La Botija, provincias Camagüey y Las Tunas*. Revista Minería y Geología, 2020. 36(4): p. 377-389. Recuperado a partir de https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art2_No4_2020
21. Valcarce-Ortega, R.M.; Rodríguez-Miranda, W.R., *Reconocimiento de patrones aplicado a la identificación litológica del corte geológico*. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 2018. 12(3): p. 93-103. Recuperado a partir de <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci&page=article&op=view&path%5B%5D=1761>
22. Rodríguez Miranda, W.R.; Mesa Hernández, E.; Fuentes Rodríguez, M., *Caracterización petrofísica de los litotipos en la región de Bahía Honda, Cuba occidental*. Revista Minería y Geología, 2020. 36(3), p. 284-299. Recuperado a partir de https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art3_No3_2020
23. Hechavarría Govin, E.; Rodríguez Miranda, W.R.; Vega Carreño, M.B. *Contribución de los métodos geofísicos y la minería de datos a la cartografía geológica del sector Nueva Gerona, Isla de la Juventud*. Revista Infomin, 2020. 12: enero-diciembre. Recuperado a partir de <https://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/147>

Agradecimientos

Agradecemos al Instituto de Geología y Paleontología – Servicio Geológico de Cuba (IGP-SGC) la posibilidad de realizar esta investigación al suministrar la información geológica y geofísica necesaria para su desarrollo, así como por los intercambios obtenidos con sus especialistas durante su ejecución.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses relacionado con la investigación que se presenta.

Contribución de los autores

Rigoberto Báez Gutiérrez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5346-7013>

Participó en el diseño de la investigación, el procedimiento para realizar la cartografía geológica a partir de la información geofísica disponible y la obtención de los resultados. Participó en la redacción y edición del manuscrito.

Willy Roberto Rodríguez Miranda. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-6472>

Participó en el diseño de la investigación, la revisión y evaluación de los resultados obtenidos. Participó en la redacción y edición del manuscrito.

Rolando Julio García-Sánchez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7323-4252>

Participó en la revisión y evaluación de los resultados, así como en la edición del manuscrito.