

Modelo físico-geológico generalizado para depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río, Cuba

Generalized physical-geological modeling for polymetallic deposits in northwest of Pinar del Río province, Cuba

José Antonio Díaz-Duque^{*1}, Amanda Naranjo-Lizaso¹, Orestes F. Carballo-Otero², Ramón G. Pérez-Vázquez¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

²Instituto de Geología y Paleontología. La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia: jaduque@gmail.com

Resumen

El noroeste de la provincia Pinar del Río es una conocida región minera, rica en sulfuros de cobre y polimetálicos hospedados en una cuenca sedimentaria, representada básicamente por las formaciones San Cayetano y Esperanza. Al no disponerse de un modelo físico-geológico de toda la zona noroeste de la provincia para estos depósitos, se dificulta la fundamentación del complejo racional de métodos geofísicos para la prospección, razón por la cual esta investigación tuvo el propósito de obtener tal modelo. Se elaboró primeramente el modelo geológico, a partir de modelos precedentes recogidos en la literatura; igualmente, para elaborar el modelo petrofísico, se recopilaron y procesaron las propiedades físicas contenidas en informes de proyectos. Se calcularon los campos físicos correspondientes y se conformó el modelo físico-geológico generalizado para toda la zona de estudio. El modelo consiguió sistematizar la información dispersa en distintas fuentes y generar un patrón identificativo para este tipo de depósitos, así como determinar el complejo racional de métodos geofísicos para la prospección.

Palabras clave: depósito polimetálico, métodos geofísicos, modelo físico-geológico, modelo geológico, modelo petrofísico

Abstract

The northwest of Pinar del Río province is a well-known mining region, rich in copper and polymetallic sulfides hosted in a sedimentary basin, basically represented by San Cayetano and Esperanza formations. It is difficult to substantiate the rational complex of geophysical methods for prospecting,

since a physical-geological model of the entire northwestern area of the province is not available for these deposits, which is the reason this research was aimed at obtaining such a model. First, the geological modeling was elaborated based on previous models collected in the literature; likewise, to elaborate the petro physical modeling, physical properties contained in project reports were collected and processed. The corresponding physical fields were calculated and generalized physical-geological modeling for the entire study area was formed. The model managed to systematize the information scattered in different sources and to generate an identifying pattern for this type of deposits, as well as determining the rational complex of geophysical methods for prospecting.

Keywords: polymetallic deposit, geophysical methods, physical-geological model, geological model, petro physical modeling

1. INTRODUCCIÓN

El noroeste de la provincia Pinar del Río es una conocida región minera, rica en sulfuros de cobre y polimetálicos hospedados en una cuenca sedimentaria, representada básicamente por las formaciones San Cayetano y Esperanza.

Los recursos contenidos en los yacimientos, depósitos y manifestaciones de sulfuros de cobre, plomo y zinc ubicados al noroeste de las Alturas de Pizarras del Norte no están aun suficientemente estudiados. Esta región se compone de dos provincias metalogénicas: una provincia Cu-Co, representada por depósitos de sulfuros masivos vulcanogenético (VMS) tipo Besshi en la parte más occidental, y otra Zn-Pb-Cu con depósitos tipo SEDEX en la parte más oriental. Estos (Figura 1) son los distritos mineros Juan Manuel-Hierro Mantua (Cu-Co) y Santa Lucía-Matahambre y Dora-Francisco (Zn-Pb-Cu)

El insuficiente grado de estudio de los recursos antes referidos plantea la necesidad de crear modelos físico-geológicos (MFG), los cuales describen el carácter de los campos físicos en el semiespacio superior e inferior de los objetos geológicos de interés mediante la integración de la información geológica, petrofísica y geofísica. Los MFG resultan de la integración de tres modelos: el geológico, el petrofísico y el geofísico; este último como resultado de la realización de la tarea directa sobre el modelo geológico asumido, considerando la información que aporta el modelo petrofísico correspondiente.

La elaboración de un MFG optimiza y abarata las investigaciones geológicas para la prospección de los depósitos polimetálicos, esencialmente porque se logra una representación muy cercana a la realidad sobre la base de una profunda investigación bibliográfica y el cálculo de los campos físicos.

El primer MFG reportado en Cuba para los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río data de 1982 (Díaz-Duque, 1982a) y fue expuesto a los investigadores de este campo durante la Primera Conferencia Científica del Centro Universitario de la provincia (1982b). Este modelo tiene la limitante de que solo abarca una parte de la región noroeste de la provincia de Pinar del Río.

Al no disponerse del MFG generalizado para los depósitos polimetálicos de toda la zona noroeste de la provincia de Pinar del Río, se dificulta la fundamentación del complejo racional de métodos geofísicos para la prospección de este tipo de depósitos, razón por la cual su obtención constituye el objetivo principal del presente trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio (Figura 1) está ubicada al noroeste de Pinar del Río; abarca los municipios Guane, Mantua, Minas de Matahambre, Viñales y La Palma, ocupando un área total de 3839,7 km², que incluye el principal conjunto orográfico cordillera de Guaniguanico, de la que forma parte el valle de Viñales.

En el sector oeste de la región Mantua-Minas de Matahambre (Figura 1) está principalmente desarrollada la formación San Cayetano del Jurásico inferior medio. La litología de esta formación se compone principalmente por pizarras y lutitas negras, conjuntamente con areniscas cuarzosas y polimícticas. Las pizarras negras están constituidas por arcillas endurecidas con bajo grado de metamorfismo, y son oscuras por su alto contenido de carbono de origen orgánico, además poseen finas diseminaciones de pirita autógena precipitadas por bacterias sulfurosas en el barro. Las areniscas están compuestas principalmente por arenas de cuarzo consolidadas después de su acarreo y sedimentación. El territorio es tectónicamente complejo, con plegamientos cabalgados y escamados con fallas inversas, condicionadas por la tectónica alpina (Carballo-Otero, 2021).

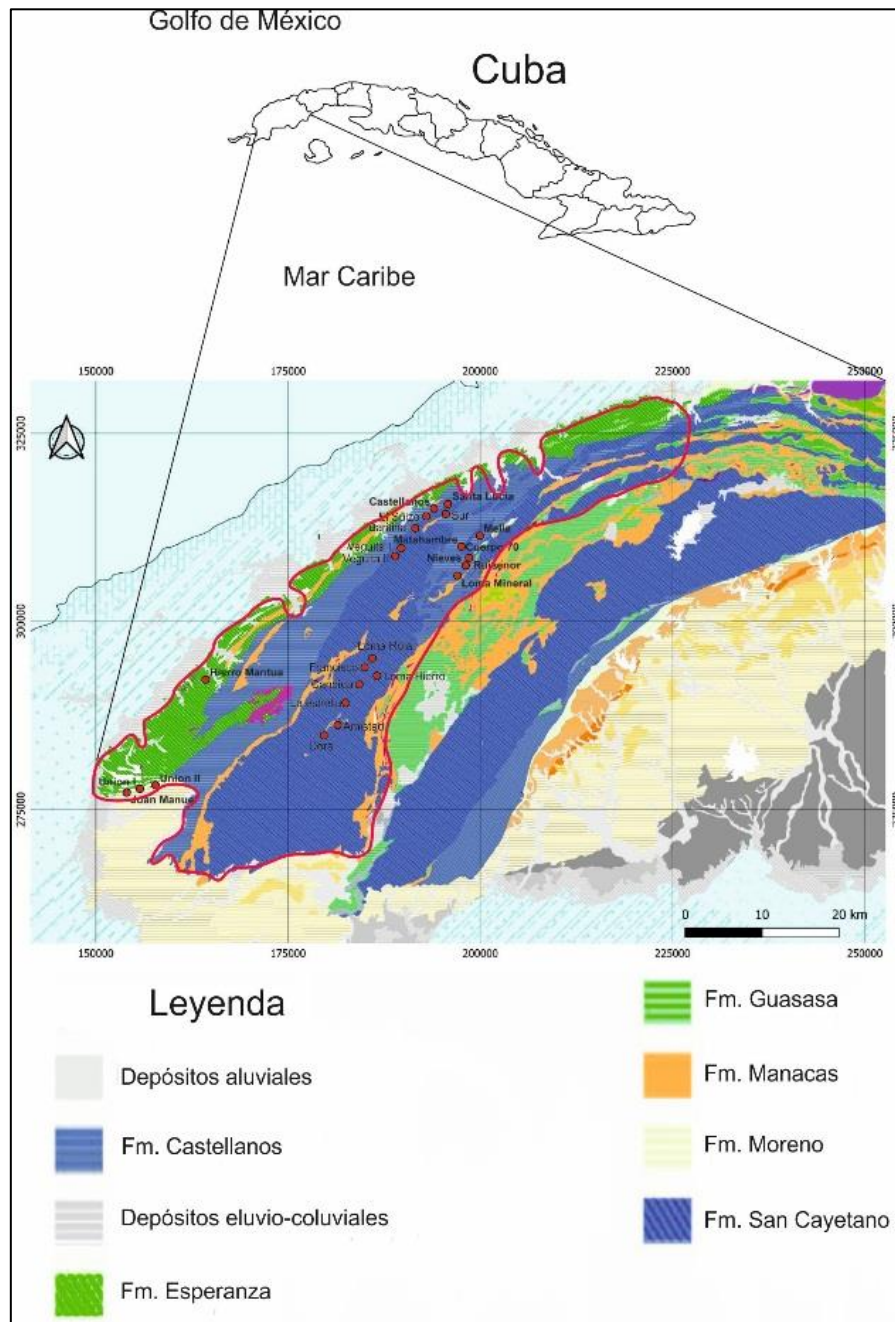


Figura 1. Mapa de ubicación geográfico-geológica de la provincia de Pinar del Río, el área de estudio enmarcada en línea de color rojo y las provincias metalogénicas Zn-Cu-Pb y Cu-Co al noroeste de la provincia con los depósitos de los tres distritos mineros, al noroeste de la provincia: Juan Manuel-Mantua al suroeste, Dora-Francisco al centro y Santa Lucía-Matahambre al noroeste (modificado del mapa geológico de Cuba a escala 1:100 000. IGP/SGC.).

En el sector este (Viñales-La Palma), la mayor parte del área de estudio está constituida por rocas sedimentarias y, en mucho menor grado, ígneas y metamórficas; su edad abarca desde el Jurásico hasta el Eoceno medio temprano (Astajov *et al.*, 1982).

De manera general, otras formaciones encontradas en el área de estudio son:

- Formación Castellanos: se encuentra en forma de bandas alargadas y plegadas en las unidades tectónicas que se presentan y están constituidas por alternancias entre esquistos arcillo-carbonosos, limolitas, limo areniscas y areniscas, predominando siempre las rocas de granulometría más fina. En ella se encuentran hospedados los depósitos de tipo SEDEX.
- Formación Esperanza: su corte puede dividirse en las dos partes siguientes: corte inferior, secuencia carbonatado-terrágena; corte superior: secuencia terrígeno-carbonatada. Su edad es de Jurásico superior (Tithoniano) - Cretácico inferior (Valanginiano). En esta formación se encuentran hospedados los depósitos de sulfuros masivos vulcanogénico (VMS) tipo Besshi.
- Formación Guasasa: está constituida por calizas micríticas masivas, frecuentemente laminadas, algunas veces dolomitizadas. Su edad es de Jurásico superior (Oxfordiano superior) - Cretácico inferior (Valanginiano).
- Formación Manacas: conformada por areniscas polimícticas, limolitas, argilitas, calcarenitas, pedernales, calizas, depósitos caóticos policomponentes de matriz terrígena, polimíctica, con intercalaciones de areniscas vulcanomícticas y silicitas. Su edad se extiende desde el Eoceno inferior hasta el Eoceno medio parte baja.
- Formación Moreno: la parte inferior del corte está compuesta por calizas micríticas y detríticas, que comprenden calcarenitas arenosas hasta calcilitas, a veces con estratificación gradacional. En la parte superior aparecen como elementos predominantes las rocas terrígenas. Edad de Cretácico superior (Santoniano-Campaniano).

Los depósitos de los distritos metalogénicos Dora-Francisco y Santa Lucía-Matahambre han sido bien estudiados y se considera que su génesis es de tipo exhalativo sedimentario, SEDEX (Valdés-Nodarse, 1997; Lastra-Rivero, 2001; Pérez-Vázquez *et al.*, 2017), confirmado por la integración de las características geológicas de la región, los rasgos mineralógicos y geoquímicos de la mineralización sulfurosa, la distribución de las anomalías geoquímicas regionales y las características inherentes a la composición química, distribución espacial e intensidades de las anomalías geoquímicas locales, confirmando la idea acerca del desarrollo de depósitos de tipo SEDEX, lo que demuestra la unidad de los procesos que originaron los diferentes

depósitos minerales (Pérez-Vázquez *et al.*, 2015; Pérez-Vázquez *et al.*, 2017).

Al distrito metalogénico Juan Manuel-Mantua, algunos investigadores (Cazañas *et al.*, 2017; Torres-Zafra *et al.*, 2017; Cobas-Torres y Torres-La Rosa, 2023), basados en las particularidades estructurales, la composición mineralógica, y su relación espacial con los cuerpos de diabasas y gabrodiabasas, así como en los procesos de alteración hidrotermal de las rocas circundantes (silicificación, propilitización carbonatización y, en menor medida, cloritización y sericitización), lo clasifican desde el punto de vista descriptivo como sulfuros masivos vulcanogénico (VMS) máfico-siliciclástico, tipo Besshi.

2.2. Metodología

Para desarrollar la investigación que fundamenta el presente trabajo se hizo uso de la metodología propuesta por Díaz-Duque (2022) la cual consiste en la consideración de tres fuentes informativas para llegar a la construcción del MFG:

- información geológica sobre el objeto que se investiga, en este caso los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río;
- información petrofísica de este mismo objeto y de su medio circundante;
- información del comportamiento de los posibles campos geofísicos que deberán ser observados durante la etapa de la adquisición de los datos.

Estas tres fuentes se resumen en tres tipos de modelos cuya integración conforma el MFG del depósito polimetálico.

Para elaborar el modelo geológico de los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río se hizo uso del mapa geológico 1:100 000 (Instituto de Geología y Paleontología/Servicio Geológico de Cuba, IGP/SGC, 2017), así como de un conjunto de informes geológicos y geofísicos realizados en la zona de estudio (Astajov *et al.*, 1982; Pérez-Vázquez *et al.*, 2017; Carballo-Otero, 2021), así como la generalización de los modelos geológicos anteriores presentados por diversos autores (Díaz-Duque, 1982b; Pérez-Vázquez, 1998; Carballo-Otero, 2021), referentes todos a depósitos polimetálicos situados en la zona noroeste de la provincia de Pinar del Río.

Para obtener el modelo petrofísico de los depósitos polimetálicos de la provincia de Pinar del Río, ante la carencia de suficientes trabajos petrofísicos

sobre el objeto de estudio, se aplicó el Principio de Analogía y se generalizaron los datos aportados por las investigaciones de varios autores llevadas a cabo en la zona de estudio (Sedov *et al.*, 1971; Díaz-Duque, 1982a; Carballo-Otero, 2021; Fuentes, 2021). Las propiedades físicas consideradas fueron: densidad, susceptibilidad magnética, cargabilidad eléctrica, resistividad eléctrica e intensidad gamma.

A partir de los modelos geológico y petrofísico generalizados se procedió a la determinación matemática del comportamiento de los campos físicos relacionados con las propiedades que acusan un mayor contraste, lo cual propició la obtención del modelo geofísico. Para ello se hizo uso de los sistemas informáticos Oasis Montaj (datos de las propiedades densidad y susceptibilidad magnética) y Res2DMod (datos de las propiedades eléctricas resistividad y cargabilidad).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo geológico (Figura 2) se representa mediante un esquema geométrico que respeta las características geológicas esenciales, con vistas a facilitar la resolución de la tarea directa.

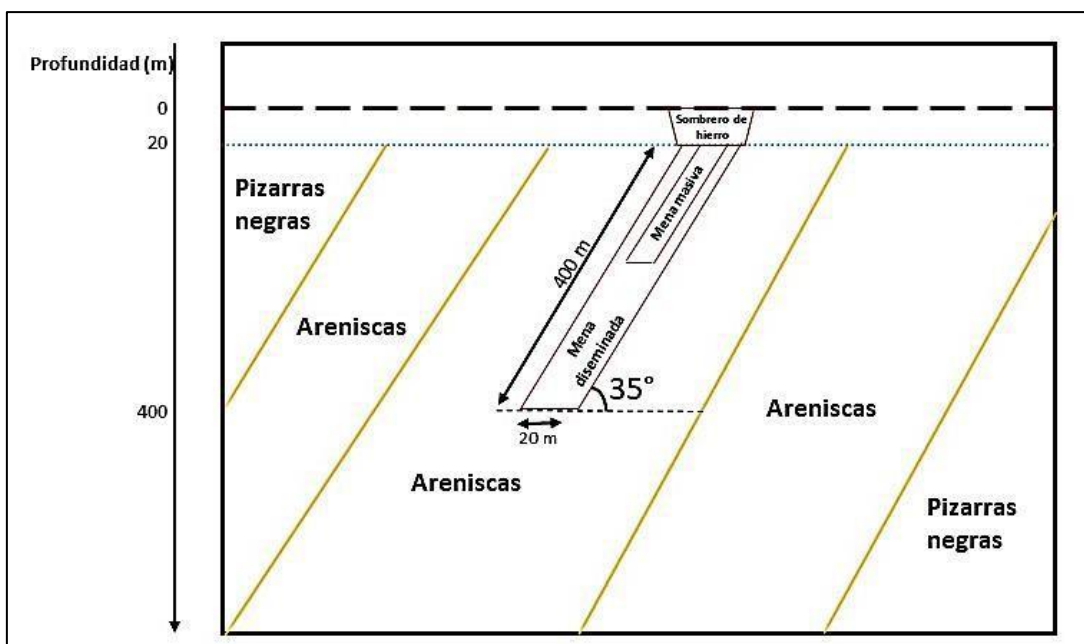


Figura 2. Modelo geológico generalizado para depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río.

En el modelo se identifica al cuerpo polimetálico con una extensión aproximada de 400 m de longitud por el buzamiento y 600 m de longitud por el rumbo, con una potencia promedio de 15 m y con inclinación con respecto a la horizontal de 35°. La representación gráfica está en forma de corte 2D, donde el rumbo del cuerpo no es visible, pero este oscila entre 310° y 320°

NO. Estos cuerpos, por lo general, afloran a la superficie mediante una zona de oxidación, conocida como sombrero de hierro, cuya potencia y extensión son muy variables, en dependencia de las condiciones topográficas, el nivel de erosión y la profundidad del manto freático en la zona en cuestión (aproximadamente 20 m).

El cuerpo polimetálico, de forma tabular o lenticular, se caracteriza por poseer una zona de mineralización masiva acompañada de mineralización diseminada que se extiende en profundidad. Su medio circundante inmediato está conformado por estratos concordantes de areniscas, que pueden estar acompañados de intercalaciones con esquistos, lutitas, menas diseminadas, pizarras negras u otros tipos litológicos característicos de la formación San Cayetano, de edad Jurásico inferior a medio (J_1 - J_2).

El modelo petrofísico se presenta en forma de tabla señalando el tipo de roca y los valores medios para cada propiedad (Tabla 1), los cuales se tomaron para el cálculo de la tarea directa.

Los mayores contrastes entre la mena mineral polimetálica y las rocas circundantes se producen para las propiedades físicas densidad, susceptibilidad magnética, resistividad eléctrica y cargabilidad.

Tabla 1. Modelo petrofísico generalizado para los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río

Descripción	Densidad (t/m³)	Susceptibilidad magnética (SI*10⁻³)	Cargabilidad eléctrica (mV/V)	Resistividad eléctrica (Ωm)	Intensidad gamma (μR/h)
Pizarras negras	2,7	187,5	14,2	144,2	23,7
Areniscas	2,8	3,30	13,7	226,5	17,6
Sombrero de hierro	2,4	1728,3	2,3	85,0	21,8
Mena polimetálica diseminada	3,1	324,5	30,5	109,0	13,5
Mena polimetálica masiva	3,9	650,3	44,3	101,0	9,4

La Figura 3 refleja el comportamiento de los campos físicos gravimétrico y magnético sobre el modelo geológico con los datos de densidad (D) y susceptibilidad magnética (S) para el cuerpo mineral polimetálico y las rocas circundantes.

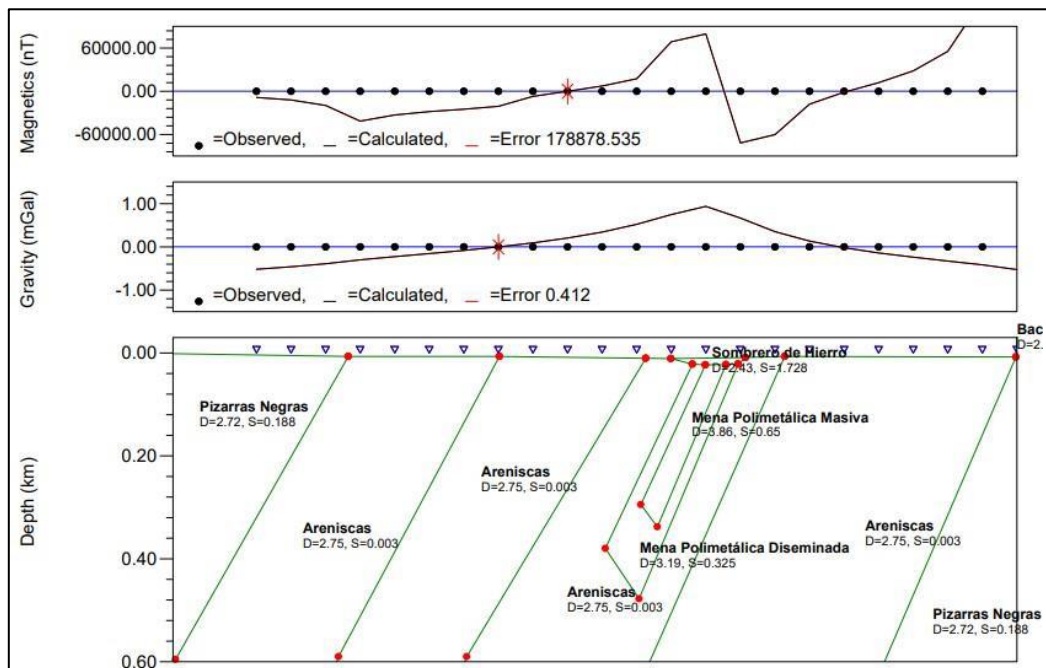


Figura 3. Modelo geofísico generalizado para depósito polimetálicos en el noroeste de la provincia de Pinar del Río que muestra el comportamiento de los campos gravimétrico y magnetométrico.

En ambos casos se aprecian anomalías sobre la proyección en superficie de la parte superior del cuerpo mineral, lo cual responde a los niveles de contrastes de las propiedades físicas densidad y susceptibilidad magnética entre la mena polimetálica y las rocas circundantes.

La curva de magnetometría presenta un notable salto asociado al contraste entre el cuerpo polimetálico y las areniscas, indicando un aproximado de la extensión del cuerpo. El comportamiento de la curva evidencia un máximo de anomalía magnética y un mínimo, reafirmando la presencia del sombrero de hierro y las areniscas a su alrededor.

En el caso de la gravimetría, el pico mayor se corresponde con la presencia del cuerpo polimetálico, formado por menas polimetálicas masivas y diseminadas, y un sombrero de hierro en el techo del cuerpo que contrasta notablemente con las rocas adyacentes (areniscas) que, por su composición mineralógica, responden a menores valores de densidad.

Los restantes modelos geofísicos de los depósitos polimetálicos de obtuvieron empleando el sistema informático Res2DMod, el cual brinda la posibilidad de modelar el comportamiento de los campos en una sección geológica a partir de los valores de las propiedades físicas resistividad eléctrica y cargabilidad.

La Figura 4 muestra la distribución de los valores de la resistividad eléctrica aparente en una sección en profundidad, tomando como centro al eje del

cuerpo polimetálico. Los valores se distinguen por colores, los más bajos en la tonalidad azul oscuro (mínimo de 100 Ωm) y los más altos en la tonalidad rojo oscuro (máximos de hasta 220 Ωm). Las zonas con los mayores valores se corresponden con los estratos de areniscas, con contenido de cuarzo y pequeñas cantidades de feldespato y mica.

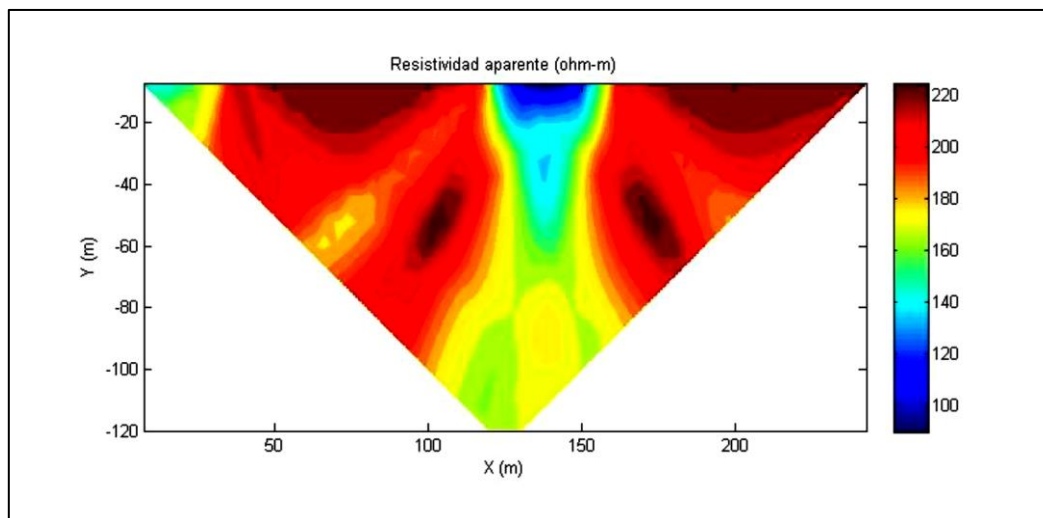


Figura 4. Modelo geofísico generalizado de resistividad aparente para depósito polimetálico del noroeste de la provincia de Pinar del Río.

En el centro de la sección se aprecia una zona con valores medios de resistividad aparente que oscilan entre 140 Ωm y 170 Ωm , identificada por los colores azul claro, verde y amarillo, la cual se asocia a la presencia del cuerpo mineral polimetálico constituido por menas masivas y diseminadas, más conductoras que las capas circundantes. En el tope del cuerpo, coincidente con el sombrero de hierro, se denota el valor mínimo de la resistividad aparente, alrededor de los 100 Ωm .

De igual forma, para el caso de la cargabilidad y empleando el sistema *Res2DMod* se obtiene la sección en profundidad que corresponde al modelo geofísico para esta propiedad física. El comportamiento de la cargabilidad aparente con valores medios (mayores que 1008 mV/V) en el centro del perfil que identifican al cuerpo mineral, en tanto los menores valores identifican la presencia de rocas débilmente polarizadas.

Con los tres tipos de modelos (geológico, petrofísico y geofísico) expuestos se obtuvo el esquema del MFG generalizado resultante, mediante la superposición integrada de todos sus elementos (Figura 5).

En la Figura 5 se han representado, dentro de un rectángulo, los valores que identifican a las propiedades físicas más contrastantes para los diferentes tipos de litologías presentes en el modelo geológico, en correspondencia con el modelo petrofísico representado en la Tabla 1. Estas propiedades son:

susceptibilidad magnética (χ), polarizabilidad (η), resistividad eléctrica (ρ) y densidad (σ).

Considerando toda la información disponible, y a partir del MFG generalizado para los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río, se pudo determinar el complejo racional de métodos geofísicos para la prospección de estos tipos de depósitos.

El complejo racional para la prospección y exploración de depósitos polimetálicos en la zona noroeste de la provincia de Pinar del Río quedaría integrado por los métodos magnético, gravimétrico, eléctrico y polarización inducida. Para todos los casos la prospección se llevará a cabo en escala 1: 10 000. Los perfiles estarán situados de forma perpendicular al rumbo estimado de los cuerpos, es decir, N40°E, a distancias entre ellos de 100 m y entre puntos de 10 m, debiendo garantizarse la precisión y la exactitud requeridas. Las estaciones para los métodos potenciales gravimétrico y magnético serán las mismas y se aplicarán las correcciones requeridas en cada caso.

En el caso de los métodos de resistividad eléctrica y polarización inducida en el dominio del tiempo se recomienda el empleo de la tomografía eléctrica en los mismos perfiles de los métodos potenciales, con dos ristas bilaterales de 24 electrodos cada una y una separación de 10 m entre las tomas a tierra, utilizando la configuración Wenner-Schlumberger con diez niveles de adquisición. Este dispositivo garantiza una buena sensibilidad ante las variaciones horizontales y verticales de la resistividad eléctrica y la cargabilidad y se logra una cobertura intermedia, aunque presenta una limitada profundidad de estudio. Esta característica puede ser compensada mediante la realización de varios sondeos eléctricos verticales de resistividad eléctrica y polarización inducida (SEV-PI) en algunos puntos seleccionados en la red de observaciones, con $AB/2=1\ 000$ m para garantizar al menos una profundidad de estudio de 400 m.

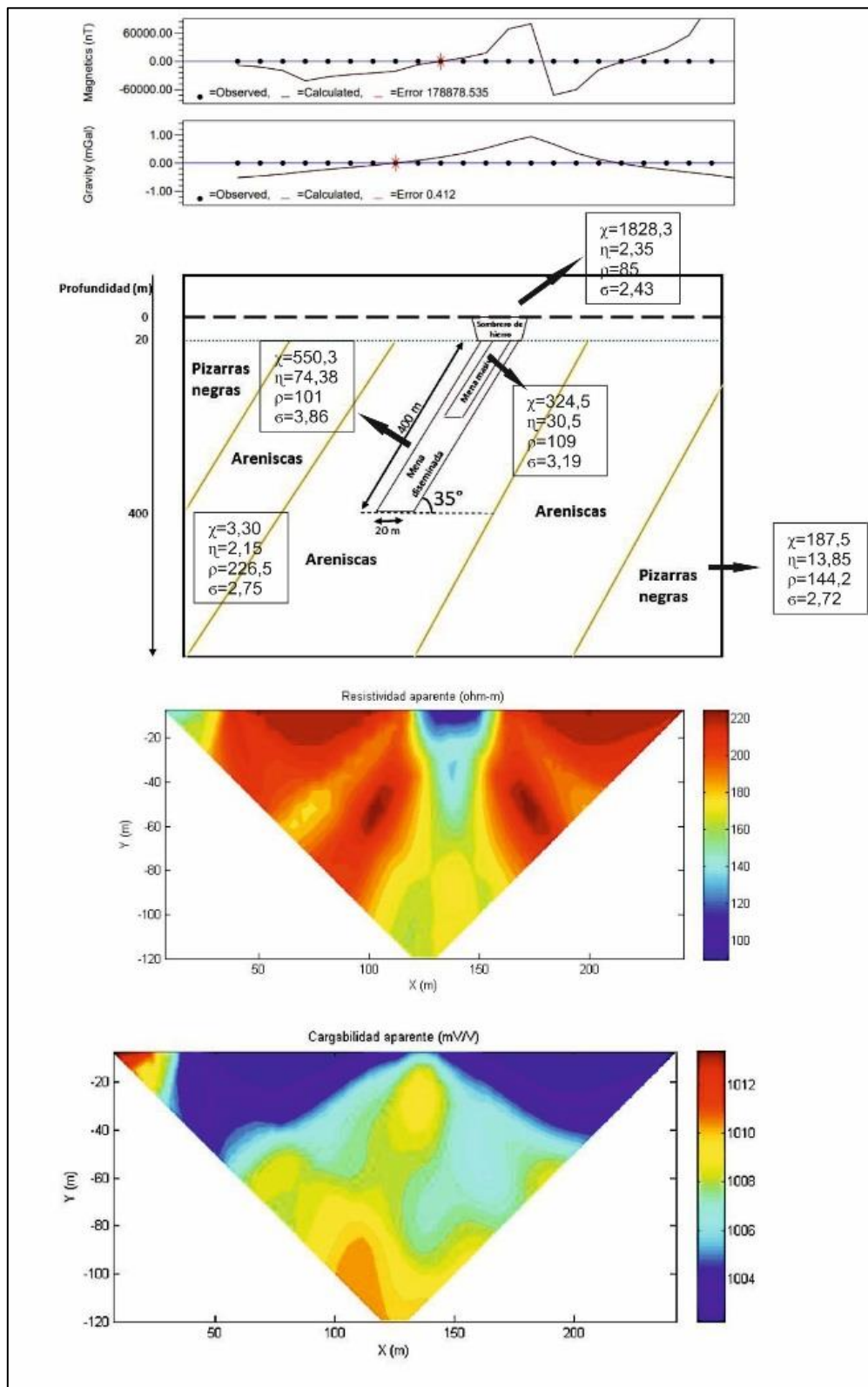


Figura 5. Modelo físico geológico generalizado de los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia del Pinar del Río, integrado por el modelo geológico, el petrofísico y los modelos de los campos físicos gravimétrico, magnético, de resistividad eléctrica y cargabilidad.

Para el proceso de interpretación de los datos adquiridos se recomienda el empleo de los siguientes sistemas informáticos:

- a) Oasis Montaj para los datos de gravimetría y magnetometría.
- b) Res2DInv para los datos de la tomografía eléctrica.
- c) IPI2Win para los datos del SEV-PI.

4. CONCLUSIONES

- La metodología empleada para obtener el MFG generalizado para los depósitos polimetálicos del noroeste de la provincia de Pinar del Río permite sistematizar la información geológica y petrofísica y calcular los campos físicos para los cuales hay un contraste efectivo de las propiedades físicas identificadas, brindando un patrón identificativo en la prospección de este tipo de depósitos.
- El MFG obtenido permite determinar el complejo racional de métodos geofísicos, integrado por los métodos magnético, gravimétrico, eléctrico y polarización inducida, con vistas a la realización de los subsiguientes trabajos de investigación geológica, con el propósito de identificar nuevos recursos en la región noroeste de la provincia de Pinar del Río o, incluso, en otras regiones con características similares.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más profundo agradecimiento a las siguientes instituciones: Instituto de Geología y Paleontología/Servicio Geológico Nacional y a la Oficina Nacional de Recursos Minerales.

6. REFERENCIAS

- Cobas-Torres, R. Y. y Torres-La Rosa, M. (2023). Texturas de enfriamiento en basaltos del campo mineral Hierro-Mantua. Provincia de Pinar del Río. *Geoinformativa*, 16(2 julio-dic) 27-33 <https://rgi.igp.minem.cu/index.php/rgi>
- Astajov, K., Solianik, V., Vasiliev, V., Martínez, D.; Fernández, R., Oubiña, J., Dimidov, S. y Santamaría, Z. (1982). Levantamiento geológico a escala 1:50 000 en el NO de Pinar del Río. 3 tomos. Inédito. La Habana. Oficina Nacional de Recursos Minerales. 497 p.
- Carballo-Otero, O. F. (2021). *Efectividad del sistema aero-electromagnético en el dominio del tiempo VTEMPlus para localizar depósitos de sulfuros masivos en las Alturas de Pizarras del Norte, Pinar del Río, Cuba*. (Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría").

- Cazañas-Díaz, X., Torres-Zafra, J., Lavaut, W., Cobiella, J., Capote, C., González, V., López-Kramer, J., Bravo, F., Llanes, A. I., González, D., Ríos, Y., Ortega, Y., Torres, R., Pantaleón, G., Torres, M., Figueroa, D. (2017). *Memoria explicativa del Mapa Metalogénico de la República de Cuba a escala 1:250 000*. Instituto de Geología y Paleontología. Ministerio de Energía y Minas. Cuba. ISBN 978-959-7117-77-3.
- Díaz-Duque, J. A. (1982a). *Aplicación del método de polarización inducida para las búsquedas de yacimientos polimetálicos en las condiciones de la provincia de Pinar del Río, República de Cuba*. (Tesis Doctoral en ruso, Instituto de Exploración Geológica de Moscú).
- Díaz-Duque, J. A. (1982b). Modelos físico-geológicos de yacimientos y del campo mineral polimetálico del noroeste de la provincia de Pinar del Río. Primera Conferencia Científica del Centro Universitario de Pinar del Río.
- Díaz-Duque, J. A. (2022). *Modelos Físico Geológicos*. Universidad Tecnológica de La Habana. 63 p. ISBN 978-959-261-616-5.
- Fuentes, M. (2021). *Generalización de las propiedades físicas densidad y susceptibilidad magnética de las rocas y minerales de las provincias de Pinar del Río y Artemisa*. (Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Departamento de Geociencias, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría").
- Instituto de Geología y Paleontología/Servicio Geológico de Cuba (IGP/SGC). (2017). Mapa geológico hoja 3483 Pinar del Río, a escala 1:100 000. Ministerio de Energía y Minas. Cuba. La Habana.
<https://www.minem.gob.cu/es/actividades/geologia/mapa-geologico-de-cuba>
- Lastra-Rivero, J. F. (2001). Pronóstico geoquímico de mineralización sulfurada en el distrito metalogénico Dora-Francisco, Cuba Occidental. *Minería y Geología*, 18(3-4), 9.
<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/213>
- Pérez-Vázquez, R. G., Estévez-Cruz, E. y Romero-Espinosa, M. S. (2015). Análisis de Fry en el estudio de la génesis del distrito metalogénico Santa Lucía-Matahambre. *Minería y Geología*, 31(2), 34-47.
<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/1050/1>
- Pérez-Vázquez, R. G., Estévez-Cruz, E. y Romero-Espinosa, M. S. (2017). Modelación descriptiva del yacimiento Santa Lucía (Zn-Pb-Ba), Pinar del Río (CUBA). *Boletín de Geología*, 39(mayo-agosto), 83-93.
<https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017006>
- Sedov, V., Yakovenko, A. y Pérez, A. (1971). Síntesis de los materiales geológicos y geofísicos de los trabajos de búsqueda de años anteriores y de los resultados de los trabajos experimentales geoquímicos y geofísicos en el campo mineral de Matahambre. Oficina Nacional de Recursos Minerales. 348 p.

Torres-Zafra J. L., Lavaut-Copa, W., Cazañas-Díaz, X. (2017). *Modelos descriptivo-genéticos de depósitos minerales metálicos para el Mapa Metalogénico de la República de Cuba a escala 1:250 000*. Instituto de Geología y Paleontología. Ministerio de Energía y Minas. Cuba. ISBN 978-959-7117-74-2.

Valdés-Nodarse, E. L. (1997). Pb- Zn "SEDEX" deposits and their copper stockwork roots, western Cuba. *Mineralium Deposita*, 33, 560-567.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s001260050172>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

JADD: coordinación, control y dirección de la investigación, marco teórico y metodológico, revisión bibliográfica, elaboración del MFG y propuesta del complejo racional de métodos geofísico. Redacción y revisión de la versión final del artículo. **ANL:** diseño de la investigación, localización y procesamiento de datos para el modelo petrofísico, cálculo de los campos físicos sobre el modelo geológico, diseño de la investigación, revisión bibliográfica y redacción del original **OFCO:** diseño de la investigación, elaboración del marco referencial, revisión del procesamiento de datos, elaboración del MFG, integración del complejo racional de métodos geofísicos y redacción del original **RGPV:** diseño de la investigación, revisión bibliográfica, elaboración del modelo geológico y conciliación de los modelos petrofísico y geofísico para su integración en el MFG, revisión y corrección final del original. Todos los autores aprobaron la versión final del original.

ORCID

JADD, <https://orcid.org/0000-0003-0032-4681>

ANL, <https://orcid.org/0009-0007-8686-0886>

OFCO, <https://orcid.org/0000-0001-8975-8309>

RGPV, <https://orcid.org/0000-0002-8559-5271>

Recibido: 24/01/2025

Aprobado: 10/02/2025