

# Sistema de fallas del yacimiento laterítico níquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba

Rodríguez-Catalá, Alfredo; Rodríguez-Infante, Alina

Sistema de fallas del yacimiento laterítico níquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba

Minería y Geología, vol. 37, núm. 2, 2021

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa 'Dr Antonio Nuñez Jiménez', Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223568255003>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

## Sistema de fallas del yacimiento laterítico níquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba

Fault system of San Felipe nickel lateritic deposit, Camagüey, Cuba

Alfredo Rodríguez-Catalá

Empresa Geominera Camagüey, Cuba

alfredorc@geocmg.minem.cu

 <https://orcid.org/0000-0002-7515-4800>

Redalyc: [https://www.redalyc.org/articulo.oa?](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223568255003)

id=223568255003

Alina Rodríguez-Infante

Universidad de Moa, Cuba

 <https://orcid.org/0000-0001-7997-7145>

Recepción: 09 Diciembre 2020

Aprobación: 25 Marzo 2021

### RESUMEN:

Las escalas de trabajo utilizadas hasta la fecha no han permitido el estudio detallado de las fallas y fracturas de la corteza de intemperismo del yacimiento San Felipe. El propósito de este estudio fue caracterizar las estructuras tectónicas que han condicionado el desarrollo y conservación de la corteza de intemperismo del yacimiento. Como resultado de la interpretación estructural a partir de las mediciones de los contactos geológicos en las perforaciones se identificó la presencia de zonas de fractura aquí denominadas como Sistema de fallas San Felipe. Esas estructuras de falla cortan y desplazan los horizontes, otorgándole al yacimiento la geometría actual, caracterizada por una corteza laterítica de aspecto sinusoidal ocasionado por los desplazamientos de los planos de falla a través de las estructuras lineales de rumbo predominante  $315^{\circ}$ - $345^{\circ}$ . Los resultados de este estudio son de utilidad para identificar discontinuidades, planos de fracturas, el probable sentido de desplazamiento de los horizontes de la corteza y sus recursos, así como los deslizamientos en los frentes de mina.

**PALABRAS CLAVE:** corteza laterítica, estructuras de falla, interpretación estructural, yacimiento San Felipe.

### ABSTRACT:

Working scales used to date have not allowed studying the faults and fractures of the weathering crust of the San Felipe deposit in details. The aim of this research is to characterize those structures that have conditioned developing and conserving crust from the mineral deposit. As a result of the structural interpretation from measurements of geological contacts in boreholes, the presence of fracture zones called San Felipe Faults System was identified. These structures cut and displace the horizons, giving the deposit its current geometry, characterized by a lateritic crust with sinusoidal appearance caused by fault planes displacements through linear structures with predominant direction of  $315^{\circ}$  - $345^{\circ}$ . It was concluded that these results will be useful for identifying discontinuities, fracture plans, probable direction of crust horizon displacements and its resources, as well as the slides in mining fronts.

**KEYWORDS:** lateritic crust, fault structures, structural interpretation, San Felipe deposit.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los informes de exploración de los yacimientos níquelíferos cubanos se obvia con frecuencia el aspecto estructural, con el consecuente encarecimiento de los trabajos de laboreo; el yacimiento San Felipe no es ajeno a esa problemática. Emplazado sobre la altiplanicie homónima posee reservas de níquel y cobalto estimadas al nivel de los mayores yacimientos de su tipo conocidos en el mundo. Se desarrolla sobre rocas peridotíticas serpentinizadas del macizo ofiolítico de Camagüey que yace de manera alóctona sobre el margen continental de las Bahamas.

En general, para los yacimientos lateríticos cubanos los estudios estructurales son escasos. Martínez y Pérez (2000) plantean que “al parecer el estudio general de los yacimientos cubanos es insuficiente”. Se considera que un enfoque estructural a nivel local para estudiar estos depósitos aún está pendiente, de modo que la

revelación del sistema de fallas San Felipe tendrá efectos inmediatos en la actividad práctica de la exploración geológica, y contribuirá a disminuir costes.

Sería de gran interés para las operaciones mineras el estudio estructural del yacimiento, debido a que el agrietamiento tectónico y las fallas que afectan los macizos rocosos originan frecuentes deslizamientos del terreno en los taludes y frentes de mina, los que pueden ser debidamente prevenidos mediante la caracterización del fallamiento en los yacimientos feroniquelíferos cubanos.

La mayor dificultad para realizar el estudio estructural de las cortezas de meteorización en general, y la feroniquelífera en particular, radica en el propio desarrollo del proceso de intemperismo que tiende a borrar de la superficie los elementos estructurales de las rocas, dificultando la observación directa, ya que las estructuras de fractura generan zonas de debilitamiento del macizo rocoso haciéndolas más erosionables y menos visibles, por lo que generalmente no son observables, pero pueden ser inferidas en las discontinuidades geológicas y otros fenómenos como la presencia de zonas de trituración, cizallas y el agrietamiento tectónico (García 1985; Suppe 1985).

En los trabajos de levantamiento geológico del área de estudio (Iturrealde-Vincent y Thieke 1987) fueron representados los principales sistemas de fallas cartografiados en el complejo ofiolítico, sin embargo la escala de trabajo utilizada no permitió estudiar las fallas que atraviesan el yacimiento San Felipe. Los trabajos de búsqueda acompañante del levantamiento geológico complejo a escala 1: 50 000 del Polígono Camagüey (Zimmermann 1987b) revelan algunas características tectónicas del yacimiento a partir de los datos de las perforaciones que cortaron las serpentinitas reportándose, en los testigos de la perforación, planos de fricción y zonas de trituración; además fueron cartografiadas fallas de dirección norte-sur con grietas y vetillas llenas con SiO<sub>2</sub>, así como fallas verticales de dirección este-oeste y noreste-suroeste que ocasionaron las mayores pendientes y limitan los bordes meridional y oriental del yacimiento San Felipe en forma de escarpes.

Las escalas de trabajo utilizadas hasta la fecha no han permitido el estudio detallado de las fallas y fracturas, por lo que la presente investigación tiene como objetivo principal revelar y caracterizar las estructuras tectónicas que han condicionado el desarrollo y conservación de la corteza de intemperismo del yacimiento San Felipe.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Definición del área de estudio

El yacimiento está ubicado en un terreno aplanado, formando una meseta típica (altiplanicie), elevada entre 150 y 180 m y bordeada por el peniplano Camagüey (Figura 1). Las rocas en la región de estudio están representadas por las tectónicas ultramáficas, los cúmulos máficos, diques paralelos de diabasa y basaltos oceánicos, comprendidos en un conjunto tectónico, arqueado e imbricado, de fallas y pliegues de sobrecorrimiento formando un arco convexo hacia el sur (Figura 1).

En la región después que se completó la acreción de las estructuras oceánicas al margen continental, dominaron los movimientos verticales en la etapa neotectónica y se formaron bloques distintivamente elevados como la Sierra de Cubitas y la altiplanicie de San Felipe, a partir del Eoceno Superior (Iturrealde-Vincent 1988, 1989, 1996).

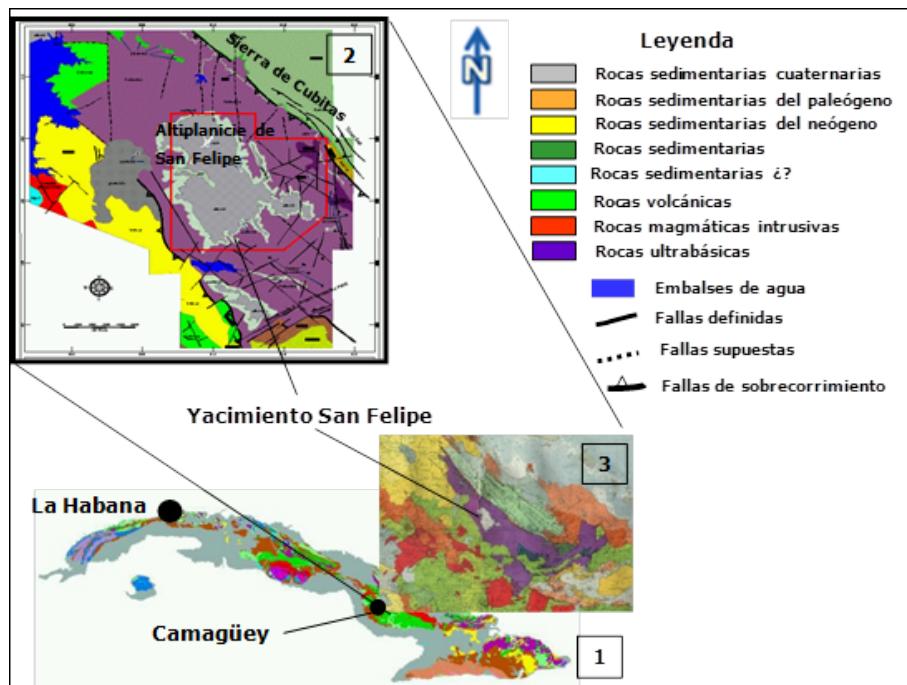


FIGURA 1.

Ubicación geográfica del área de estudio. Con línea roja aparece delimitada la concesión de exploración Geominera S.A-San Felipe Mining Ltd. (2002).

1) Mapa geológico de Cuba a escala 1: 100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, República de Cuba, 2015). 2) Mapa tectónico-estructural a escala 1: 500 000 (Pushcharovski et al. 1989). 3) Mapa geológico del Polígono Camagüey III (Iturralde-Vinent et al. 1987)

## 2.2. Muestreo del área de estudio

El muestreo se realizó a partir de la proyección de los datos distribuidos en diez líneas de secciones de pozos de perforación, equidistantes a un kilómetro, por donde el yacimiento mide 7 km en dirección noreste-suroeste a través de las estructuras principales y tres secciones longitudinales de pozos en dirección noroeste, perpendiculares a las líneas paralelas, por donde el yacimiento mide 12 km, como se muestra en la Figura 2.

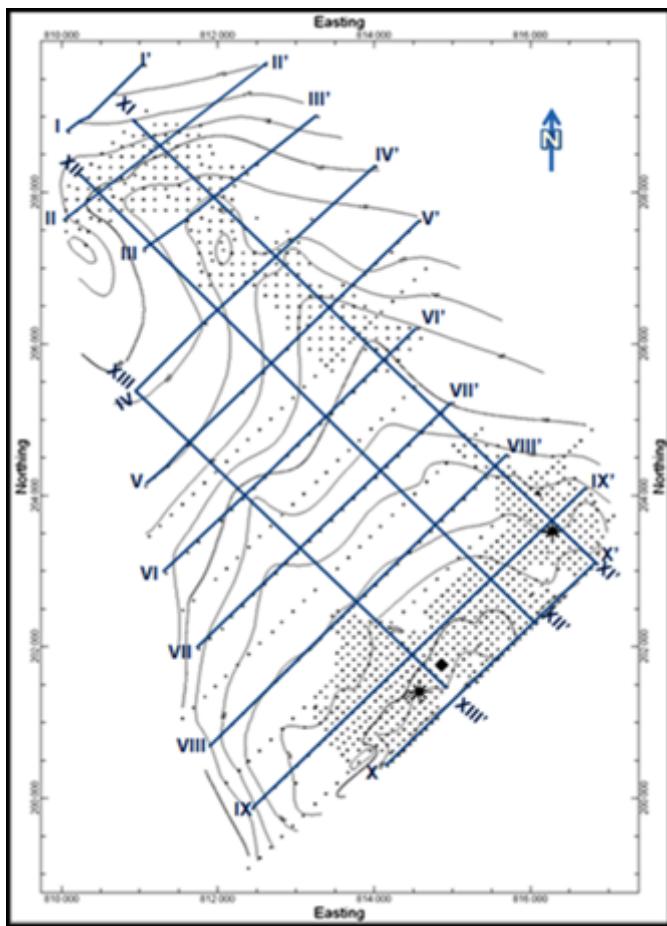


FIGURA 2.

Ubicación de las líneas de secciones en el mapa topográfico del yacimiento San Felipe para el mapeo estructural. Líneas de secciones transversales desde I-I' hasta X-X' y secciones longitudinales desde XI-XI' hasta XIII-XIII'. Se construyó una red regular de 1 km entre perfiles y 200 m entre pozos.

Para el registro de datos se utilizó la base topogeodésica realizada por GEOCUBA, a escalas 1:50 000, 1: 25 000 y 1: 10 000; fotos aéreas 1: 37 000 K10, puntos de cotas fijas y las estaciones trigonométricas. Se empleó el sistema de coordenadas cartesianas diestras (+ x = este, + y = norte y + z = elevación) para representar las relaciones entre ubicaciones en el mapa topográfico y los registros de pozo en el referido sistema (John & Richard 2006).

Para elaborar los perfiles se utilizó la información geológica registrada en la base de datos de los trabajos de exploración. Cada registro de pozo utilizado contiene intervalos de muestreo por sondeos cada un metro con estudio detallado de parámetros físicos, químicos y mineralógicos, lo que garantiza la representatividad y fiabilidad del valor de los datos para la interpretación geológico-tectónica.

### 2.3. Técnicas y procedimientos utilizados

La caracterización estructural del yacimiento San Felipe se realizó a partir de la relación entre el relieve superficial, el relieve del fondo de la corteza y las pendientes. Se revisó la información contenida en la base de datos, en formato Excel, de las redes de exploración de pozos verticales, ubicados en líneas de perfiles perpendiculares a las direcciones fundamentales de la estructura geológica del yacimiento; las redes abarcaron

todo el yacimiento. Estos valores, conjuntamente con las formas y medidas del relieve, constituyen el universo de datos utilizados en el estudio.

Se utilizaron los diagramas de rosa para relacionar la orientación predominante de fallas y grietas; se emplearon también los alineamientos del relieve (González et al. 1986; Rodríguez-Infante 1998) y por el procedimiento citado se determinó la dirección predominante del fallamiento en el yacimiento San Felipe.

La caracterización del sistema de fallas del yacimiento San Felipe se realizó en base al complejo de métodos geológico-morfológicos: confección de secciones transversales y longitudinales obtenidas a partir de los datos de las perforaciones, interpretación de estructuras en base a las secciones, y cartografía de la geometría estructural de las fallas del sistema determinado.

Las secciones transversales se orientaron perpendicularmente al eje del pliegue más grande en el área del mapa en líneas rectas, ya que ofrece la vista más representativa de la geometría (Groshong 2006). A partir de la metodología seguida (Levorsen 1967; Tearpock & Bischke 2003) de correlacionar los registros del muestreo de los pozos de perforación para establecer las posiciones de unidades equivalentes, se realizaron tres líneas de secciones longitudinales sobre la superficie axial del yacimiento en dirección sureste-noroeste, con el propósito de incorporar información geológica entre las secciones transversales, de modo que facilitara la predicción de la geometría de cada horizonte interpolado, para a su vez favorecer la interpretación de la geometría estructural de las fallas del yacimiento.

En las secciones, para determinar la línea de corte de las estructuras se extrapoló la superficie del horizonte guía para cartografiar las diferencias de altitud a ambos lados de la línea de corte (plano o superficie de desplazamiento de la zona de falla). De manera general, en el yacimiento la estructura geológica zonal de los horizontes del perfil laterítico y su continuidad lateral ayudan a confirmar la existencia de las estructuras y a ubicarlas, ya que la secuencia de horizontes de la corteza está presente a ambos lados de las fallas propuestas.

Las serpentinitas y peridotitas constituyen el sustrato rocoso del depósito; ambos horizontes se tomaron como marcadores del fondo de la corteza laterítica niquelífera por sus bajos valores de los índices de intemperismo y del coeficiente de desintegración (Chang-Rodríguez y Rojas-Purón 2018). Los horizontes del sustrato son un reflejo en profundidad de la dislocación de la corteza que los sobreyace y por esa razón se toman como horizontes-guía para la interpretación de la geometría estructural del yacimiento.

La interpretación de las estructuras a partir del horizonte guía facilitó la identificación de desplazamientos a distintos niveles de profundidad de los horizontes de la corteza laterítica, el que se produce en ambos lados del vector de movimiento, que en general en el yacimiento presenta buzamiento de ángulo alto ( $> 45^\circ$ ) y rumbo predominante  $315^\circ\text{-}345^\circ$ .

La Figura 3 muestra la correlación de los puntos de datos georeferenciados utilizando la superficie de las rocas peridotíticas serpentinizadas que constituyen el relieve del fondo de la corteza de meteorización. Los contornos de la estructura en una superficie de falla se construyeron conectando los puntos de igual elevación donde el horizonte guía se cruza con la superficie de la falla en lados opuestos. Esto se denomina superficie de falla implícita (Tarpock & Bischke 2003).

El conjunto de datos de la muestra conformada por los registros de pozos se procesó por el método de interpolación (Jones & Hamilton 1992) con el programa Rock Works 16, para la construcción de secciones transversales.

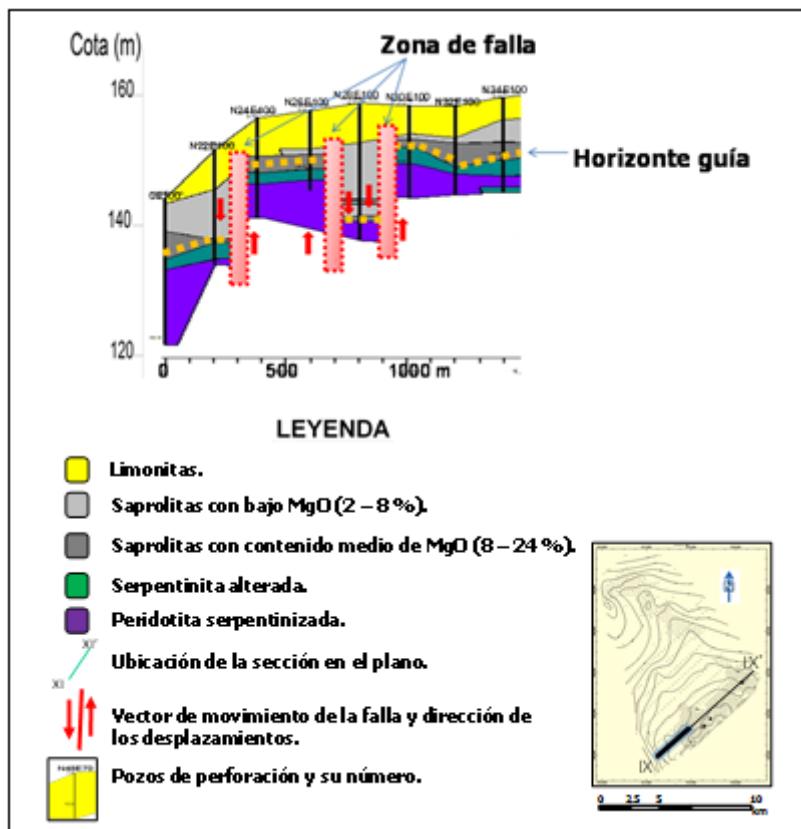


FIGURA 3.

Estructuras interpretadas a partir de la proyección del horizonte guía al plano de falla. Se muestra los niveles hipsométricos de los horizontes de la corteza en ambos lados del plano de falla. La inclinación más probable del plano de falla es vertical o quasi vertical, denotando también que el desplazamiento posea un ángulo alto de buzamiento. Intervalo señalado con línea gruesa en la sección IX-IX'.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Reconocimiento de estructuras en el yacimiento San Felipe

La representación cartográfica mediante perfiles de secciones transversales reveló la complejidad de la estructura geológica del yacimiento y las estructuras de fallas que influyen sobre la geometría y la mineralización asociada a los horizontes de la corteza laterítica. En consecuencia, se presentan varios ejemplos que muestran los procedimientos para identificar las estructuras según los principios metodológicos aplicados.

##### 3.1.1. Discontinuidades en la secuencia geológica

En el yacimiento se infiere una falla donde ocurre la ruptura de la continuidad lateral de la secuencia geológica de la corteza laterítica. En el ejemplo del perfil VII-VII' (Figura 4), en una sección de cinco pozos equidistantes 200 m se interpretó una zona de falla con desplazamiento vertical de aproximadamente 10 m. El bloque entre los pozos N40E80 y N44E80 ascendió, lo que se evidencia por la erosión del horizonte limonítico y

la posición más alta del saprolítico, de bajo MgO; la zona de alto cizallamiento favoreció el desarrollo de la limonita a mayores profundidades, con contenidos bajos de níquel.

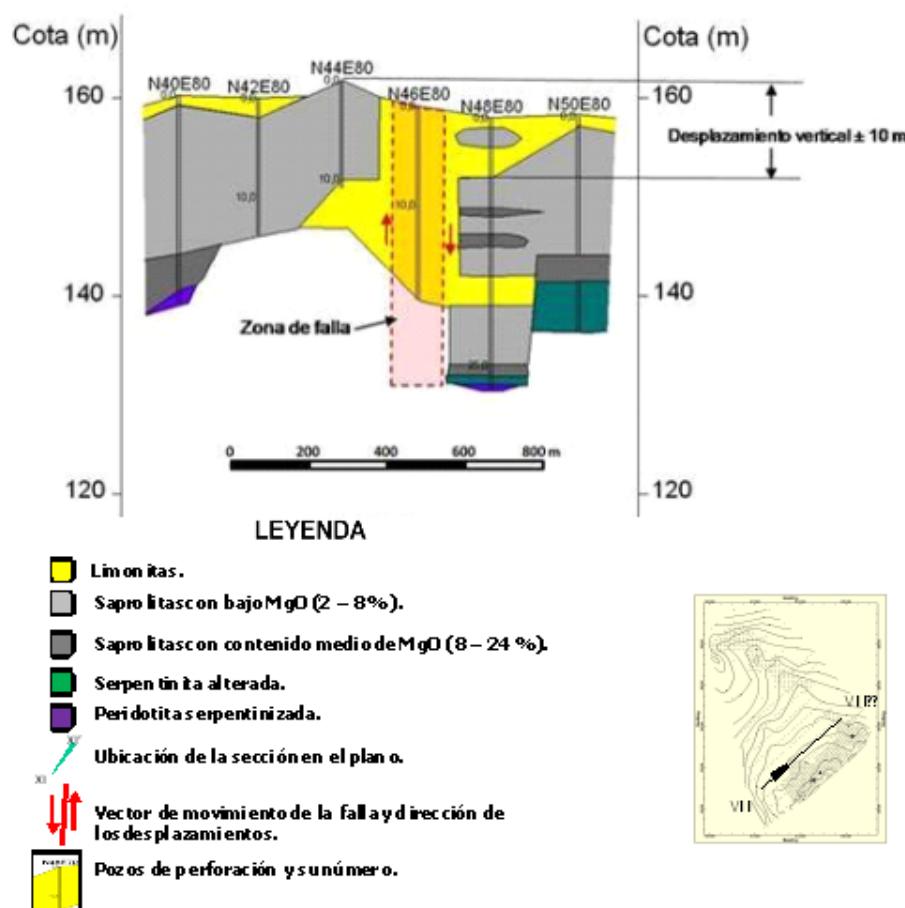


FIGURA 4.

Ruptura en la continuidad lateral del horizonte saprolítico y la zona de falla propuesta, en un sector de 1 km de extensión entre los pozos N40E80 y N50E80 del perfil VII-VII'.

### 3.1.2. Anomalías en los espesores de los horizontes de la corteza

En la sección III-III' (Figura 5) se presenta una zona central donde se produjo estrechamiento y yuxtaposición de los horizontes del perfil laterítico y en superficie esta área coincide espacialmente con una zona de fuerte denudación entre los pozos N74.5E40 y N76.5E40. El arqueamiento de la estructura geológica generó relieve positivo con pendientes en ambos lados de la zona central.

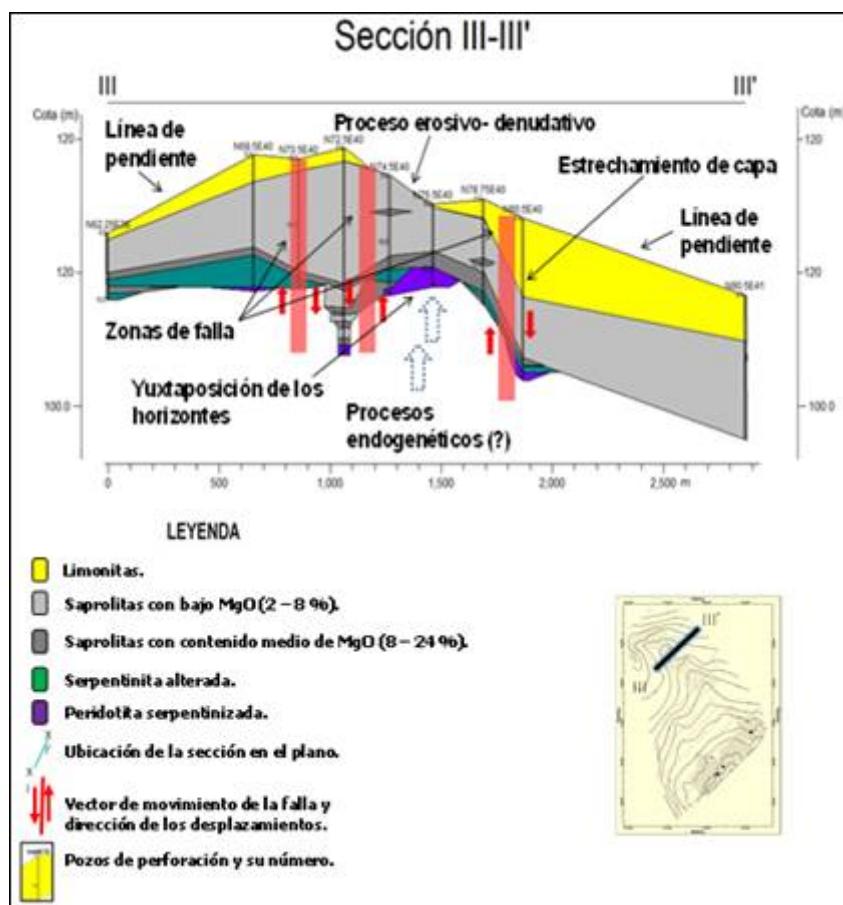


FIGURA 5.

Interpretación de estructuras a partir de la acción de los procesos geológico-geomorfológicos.

En las perforaciones del perfil (Figura 5) se documentaron rasgos geológicos que se relacionan con las zonas de fracturación cartografiadas, como son: presencia de intercalaciones de hasta 2 m de material muy intemperizado (arenoso de grano fino, 1-2 mm y textura relítica bandeadada) con intercalaciones de material intensamente oxidado y abundantes fragmentos de cuarzo opalino y calcedonia. En las peridotitas se documentó bandeamiento intenso del material serpentínítico, lo que es un elemento que coincide espacialmente con el fenómeno de yuxtaposición interpretado para esta zona de fracturación.

### 3.2. Caracterización del sistema de fallas San Felipe

En el yacimiento San Felipe se identificaron las principales rupturas, las discontinuidades de los horizontes de la corteza, la presencia de zonas con materiales triturados oxidados con cuarzo opalino y en relleno de grietas, relacionadas directamente con los niveles hipsométricos de las rocas del sustrato peridotítico, lo que posibilitó la interpretación tectónico-estructural y la presentación de un nuevo sistema de fallas en los límites del yacimiento, no identificado en investigaciones precedentes.

La dirección predominante del sistema cartografiado oscila entre 315°-345° rumbo de sureste a noroeste. Se midieron sistemas subordinados con orientaciones hacia el suroeste-noreste que constituyen estructuras de deslizamiento por el rumbo, ubicadas básicamente en los sectores SE y E del yacimiento. En esta región las estructuras coinciden con la porción más elevada del yacimiento, son fracturas de ángulo alto y desplazamiento por el rumbo con dirección predominante noreste-suroeste y en la parte de menor elevación del terreno, en el extremo noroeste, se desarrollaron estructuras con dirección noroeste-sureste y noreste-

suroeste, donde se observaron los mayores desplazamientos verticales o quasi-verticales en el sector NW del yacimiento.

Los sistemas cartografiados (Figura 6) se corresponden con la forma del fallamiento en Cuba centro oriental (Capote y De la Nuez 2011), las fallas se encuentran espacial y genéticamente relacionadas con la deformación sobrevenida en el complejo ofiolítico serpentinizado.

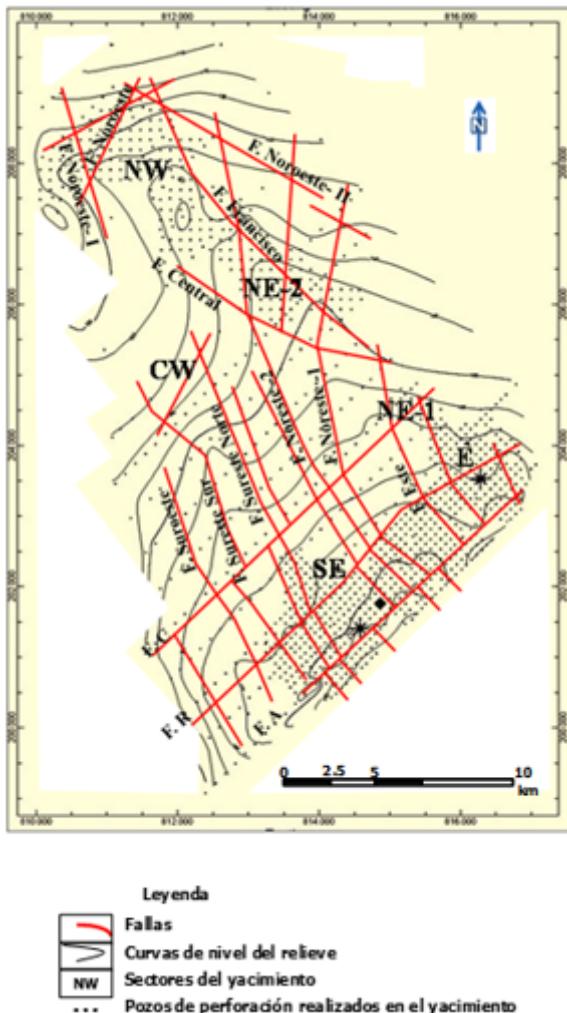


FIGURA 6.  
Interpretación estructural 2D del sistema de fallas y fracturas  
San Felipe determinado por la presente investigación.

Los resultados de la cartografía de la geometría estructural del yacimiento demuestran que las fallas del sistema San Felipe están dispuestas en fajas o zonas de fracturas paralelas que se extienden desde varios cientos de metros hasta varios kilómetros.

En la Tabla 1 se exponen las características de las fallas y fracturas del sistema San Felipe determinado por la presente investigación. La caracterización incluyó la denominación de cada estructura de falla y la medición de sus parámetros: rumbo, buzamiento, longitud, desplazamientos, características geológicas de las zonas de fractura y cizallamiento.

**TABLA 1.**  
Geometría estructural 2D de las principales fallas del sistema San Felipe.

Falla	Rumbo	Longitud	Características
Este	334°	1 - 3 km	Fallas rectilíneas con desplazamientos de alto ángulo. Presencia de grietas abiertas llenadas por oxidación y fragmentos de cuarzo opalino en intercalaciones entre 5 y 10 m de espesor.
Noreste 1	323°	7 km	Falla de alto ángulo, por la línea de corte fuerte adelgazamiento de la capa limonítica y cambios bruscos del relieve del substrato.
Noreste 2	315°	8,2 km	El levantamiento de las rocas del sustrato a ambos lados del plano de la fractura produjo relieve positivo en esta área.
Sureste Norte	326°	> 4,5 km	Estructura lineal con fracturas paralelas en una zona de 200 m de extensión en superficie. Se cartografiaron desplazamientos de alto ángulo en el sustrato, entre 8 y 10 m.
Sureste Sur	315° 334° 332°	4,7 km	Zona de fracturación de rumbo muy variable, con intensa silicificación en relleno de grietas y en fragmentos gruesos oxidados de hasta 10 cm de diámetro. Se cartografiaron desplazamientos de alto ángulo del vector de movimiento en el sustrato de hasta 10,6 m.
Francisco	310°	5,2 km	Falla rectilínea con desplazamientos desde el substrato, transcorticales al complejo ofiolítico.
Central	305° 315°	3,2 km	La fractura produjo el levantamiento y arqueamiento del sustrato y en superficie la traza de la falla ocasionó mayor rugosidad del terreno, con la alineación de colinas en la dirección de la estructura.
Noroeste	14°	2,2 km	Falla con desplazamiento de alto ángulo y una diferencia del nivel hipsométrico superior a 40 m. En ambos lados de la línea de corte de la estructura se conservó la mayor concentración de la mineralización niquelífera en todo el yacimiento.
Noroeste II	296°	3,6 km	Falla rectilínea con desplazamientos en el substrato peridotítico entre 3 y 10 m, cartografiados a ambos lados del plano de falla.
Noroeste I	334°	2,5 km	Zona de fractura rectilínea. Se reportó rotación de los fragmentos gruesos (2-20 cm de diámetro) de calcedonia con oxidación.
C	53°	> 7 km	Fallas de desplazamiento por el rumbo. Alineación del relieve en forma de colinas en la dirección de la estructura.
A	50°	> 4 km	Fallas de desplazamiento por el rumbo,
R	52°	> 7 km	rectilíneas que cortan y desplazan los sistemas de rumbo noroeste-sureste.

Los criterios que permitieron identificar las estructuras se ejemplifican en la falla Central y la falla C. La falla Central (Figura 7), cartografiada desde un punto al este del altiplano donde se interceptó con la estructura de falla Francisco, siguiendo la línea de pendiente del relieve se orienta con rumbo 305°-315° noroeste. El pozo N72E70 situado en la dirección de la estructura cortó el horizonte saprolítico, donde aparecen intercalaciones de 1 m con SiO<sub>2</sub> libre en forma de bandas intercaladas de 3 a 5 cm de grosor y fragmentos angulosos y semi-redondeados de cuarzo opalino de 5 cm en intercalaciones. Hacia el noroeste por el rumbo la estructura atraviesa el corte cerca del pozo N58E60, en esta zona se observó el estrechamiento de la corteza de intemperismo con solo 9 m de espesor y donde las serpentinitas están situadas próximo a la superficie, mostrando la zona relieve positivo. La estructura fue cartografiada entre los pozos N61E50.25 y N66.5E50, en esta zona el comportamiento de la estructura favoreció también el levantamiento de las rocas del sustrato y la conformación del relieve en forma de colinas alargadas por el rumbo de la estructura.

La falla Central produjo el efecto del levantamiento de las rocas del sustrato en la porción centro-norte. En el relieve se observó que la estructura aunque en la actualidad se presenta como una ruptura de alto ángulo de buzamiento, es probable que haya tenido desplazamiento por el rumbo (noroeste-sureste), lo que provocó el desplazamiento y la inflexión de la estructura, aunque no se cartografió su continuidad más al noroeste es posible inferir cierto desplazamiento transcurrente dextral; infiriéndose además que su continuidad más al oeste esté representada por la falla Noroeste I. Este comportamiento se expresa en la configuración morfológica del relieve. En superficie la traza de la falla produjo mayor rugosidad del terreno con la alineación de colinas en la dirección de la estructura.

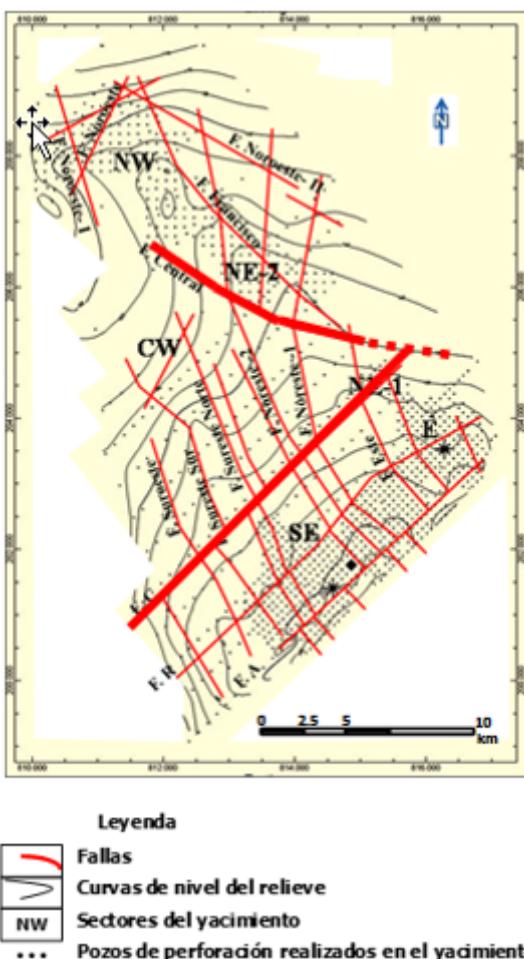


FIGURA 7.  
Interpretación estructural 2D de la falla Central y la falla C (señaladas con línea gruesa).

En la falla Central la configuración morfológica del relieve hacia ambos lados es diferente. Se produjo mayor rugosidad y alineamiento de colinas en dirección de la estructura. En los perfiles longitudinales se reveló la existencia de estructuras con desplazamiento por el rumbo. Estas se desarrollaron en la región sur-sureste sobre el territorio de mayor elevación del terreno, tienen rumbo noreste-suroeste, se cartografiaron fundamentalmente tres estructuras transversales (las fallas A, R y C) de desplazamiento por el rumbo que cortaron y desplazaron las fallas de rumbo noroeste-sureste.

La falla C tiene su expresión morfológica en el relieve en forma de arco convexo, con niveles hipsométricos diferentes a ambos lados de la estructura. En el lado sureste de la falla se desarrollaron curvas de nivel homogéneas en forma de colinas redondeadas y alargadas de dirección noreste-suroeste y cotas entre 170 y 195 m, coincidiendo esta área con la de mayor elevación del terreno. Los parámetros para la identificación

de esta estructura se relacionan a continuación: entre los pozos N48E60 y N48E65 la falla presenta desplazamiento de 3 m por la vertical del horizonte serpentínítico. En la superficie se puede observar la diferencia en la altura del relieve en ambos lados de la estructura con la mayor pendiente del terreno en el lado noroeste. La estructura cortó y desplazó el sustrato peridotítico 11,6 m en dirección vertical entre los pozos N75E63 y N75E69, en esta área se cartografió, cercano al plano de corte, agrietamiento intenso, lixiviación y altos contenidos de níquel por debajo del horizonte menífero en las serpentinitas alteradas.

La caracterización estructural del yacimiento laterítico San Felipe, teniendo como premisa fundamental la posición actual de las rocas, se sustentó en el análisis de las deformaciones del macizo rocoso y su relación espacial con las estructuras que lo afectan, estableciendo las interrelaciones entre las estructuras y el sustrato rocoso a partir del comportamiento observado en los horizontes de la corteza laterítica.

El cartografiado de los resultados del estudio mediante perfiles de secciones transversales y longitudinales a la estructura geológica muestra la interrelación de factores del relieve superficial y la disposición de los horizontes diferenciados por criterios físicos, químicos y mineralógicos (Rodríguez-Catalá 2016), así como la presencia de rupturas de la continuidad lateral de estos horizontes observada a ambos lados de las líneas de corte y planos de fallas, que reflejan el desarrollo tectónico-estructural del yacimiento San Felipe.

Los diferentes sistemas de fallas que atraviesan la región no fueron cartografiados hacia el interior del yacimiento, aunque es presumible la relación espacial y genética del fallamiento regional transcortical con los sistemas interiores del altiplano (Figura 8).

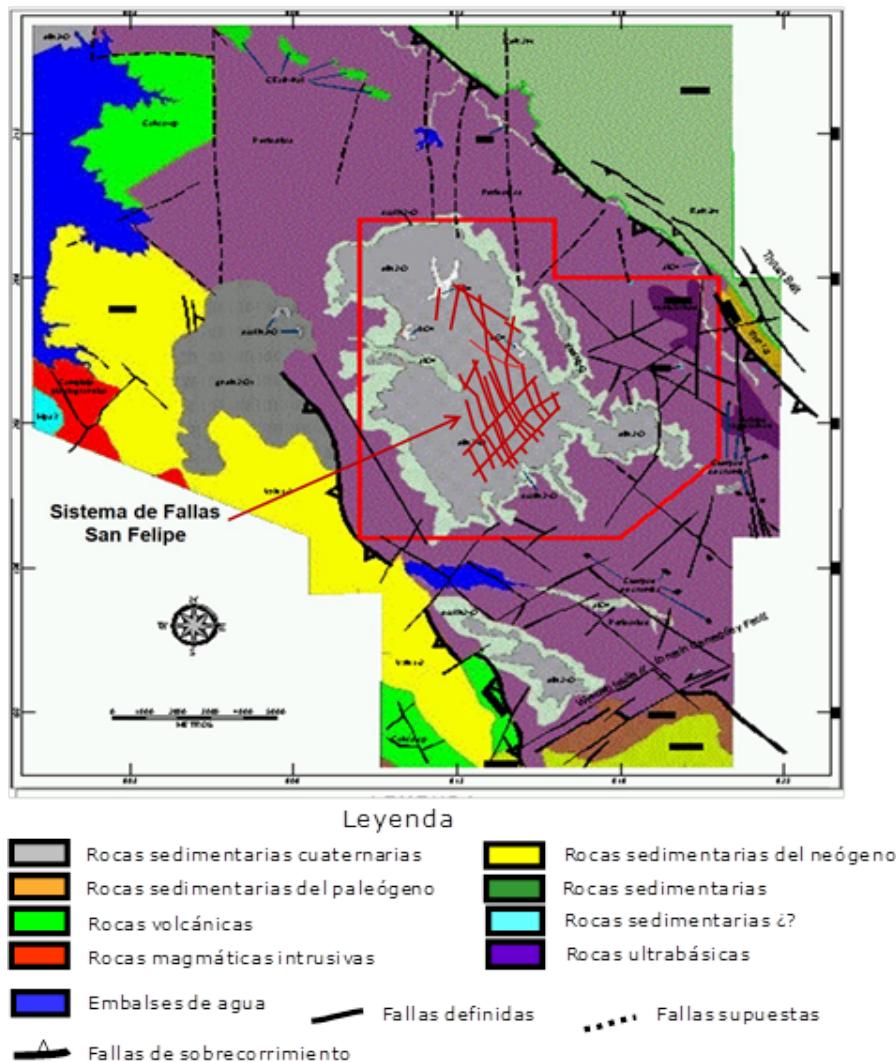


FIGURA 8.

Mapa tectónico-estructural a escala 1: 500 000 (Pushcharovski et al. 1989) donde se muestra, mediante líneas rojas continuas el sistema de fallas propuesto por la investigación.

Un elemento del contexto morfoestructural de la región que se refleja en el yacimiento son las dislocaciones disyuntivas que limitan sus bordes meridionales y orientales, ocasionando líneas de pendientes en forma de escarpes de falla, como resultado de los movimientos verticales de ascenso, una vez concluido el proceso de sobrecorrimiento del complejo ofiolítico (Zimmermann 1987a, b).

Las características tectónicas en los límites del yacimiento San Felipe fueron estudiadas por Zimmermann (1987b) mediante tres perfiles longitudinales que atravesaron la altiplanicie, se cartografiaron las serpentinitas y se indicó un desplazamiento vertical considerable, a partir de la interpretación de las isolíneas del relieve y de los rasgos morfológicos y tectónicos observados.

En la presente investigación se definió el sistema de fallas San Felipe, de modo que en el entorno del área indicada anteriormente por Zimmermann (1987b) se cartografió la falla noroeste con desplazamiento vertical superior a 40 m, coincidente con el sector de mayor concentración de la mineralización niquelífera en el yacimiento.

Los criterios y métodos precedentes empleados durante la interpretación morfológica y tectónica favorecen y corroboran el análisis estructural actual, pero en los límites del altiplano hay un gran número de estructuras con plano de buzamiento de ángulo alto ( $> 45^\circ$ ) que no se manifiestan bien en el relieve, su

expresión morfológica y tectónica solo es posible discernirla con mayor precisión desde la extrapolación de observaciones y síntesis de análisis mesoscópicos.

#### 4. CONCLUSIONES

El sistema de fallas San Felipe está constituido por zonas de fracturas paralelas agrupadas en fajas que se extienden desde varios cientos de metros hasta varios kilómetros y se caracterizan por superficies de elevación relativa del relieve, depresiones topográficas y desplazamientos verticales de los horizontes de la corteza laterítica niquelífera como consecuencia de la fuerte dislocación del sustrato peridotítico serpentinizado.

#### 5. REFERENCIAS

- Chang-Rodríguez, A. y A.L. Rojas-Purón. 2018: Movilidad geoquímica y grado de meteorización del yacimiento San Felipe, Camagüey Cuba. *Minería y Geología*, 34(2): 122-135.
- González, E., C. Cañete, R. Carral, J. Díaz, C. Capote Y A. Rodríguez. 1986: Análisis estructural del macizo Mayarí Baracoa. *Serie Geológica*, (4)
- García-Cardoso. 1985: *Geología Estructural*. Edit. Pueblo y Educación. La Habana. 130 p
- Groshong, Jr. H. R. 2006: *3-D Structural Geology. A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation*. Second Edition, ISBN-13 978-3-540-31054-9 Springer Berlin Heidelberg New York, 400 pp.
- Iturrealde-Vinent, M. & U. H. Thieke. 1987: *Informe Final sobre los resultados del Levantamiento Geológico Complejo y Búsquedas Acompañantes a escala 1: 50 000 en el Polígono Camagüey III*, Camagüey, Tomo II (1981-1987). ONRM, 350 p (inédito).
- Iturrealde-Vinent, M. A. 1996: *Introduction to Cuban Geology and Geophysics*. In: Iturrealde-Vinent M. A. Ed. *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba. Project 364, IUGC/UNESCO*, International Correlation Programme, Ciudad de La Habana. 83-120 p.
- Iturrealde-Vinent, M. A. 1989: *Geología del territorio de Camagüey*. En: *Comisión de Geología Regional y Tectónica*. Edic. 1er Congreso Cubano de Geología, La Habana, Cuba, 101 p.
- Iturrealde-Vinent, M. A. 1988: Composición y edad de los depósitos del fondo oceánico (asociación ofiolítica) del Mesozoico de Cuba, en el ejemplo de Camagüey. *Revista Tecnológica*, 18(3): 13-24.
- Jones, Ta, Hamilton, De. 1992: *A philosophy of contour mapping with a computer*. In: Groshong, Jr. H. R (2006) *3-D Structural Geology*. Second Edition, ISBN-13 978-3-540-31054-9 Springer Berlin Heidelberg New York, pp 68-76.
- John W. Barnes & Richard J. Lisle. 2006: *Basic Geological Mapping*, Fourth edition John Barnes. Copyright @ (2004) John Wiley & Sons Ltd, the Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, Copyright @ 2004, England. p 23
- Levorsen, A.I. 1967: *Geology of petroleum*. W.H. Freeman, San Francisco, 724 pp. In Groshong, Jr. H. R. (2006). *3-D Structural Geology. A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation*. Second Edition, ISBN-13 978-3-540-31054-9 Springer Berlin Heidelberg New York, pp 23-32.
- Martínez-Vargas, A Y Pérez, M. Y. 2000: *Metodología para la modelación de yacimientos residuales de níquel*. Tesis doctoral Instituto Superior Minero Metalúrgico, 118 p.
- Pusharovskiy, Yu., A. Mossakovskiy, G. Nekrasov, S. Sokolov, M. Iturrealde-Vinent et al. 1989: *Mapa Tectónico de la República de Cuba a escala 1: 500 000*, ACC y AC URSS.
- Rodríguez-Catalá, A. 2016: *La zonalidad litológica del yacimiento San Felipe como patrón de reconocimiento de los cambios progresivos del perfil laterítico*. III Congreso internacional de minería y metalurgia. MINEMETAL 2016. Memorias 3-7 Octubre Plaza América Varadero, Cuba. Sesión explotación minera EM-1.
- Rodríguez-Infante, A. 1998: *Estudios morfotectónicos de Moa y áreas adyacentes para la evaluación del riesgo geológico*. Departamento de Geología, Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico, 133 p.

- Suppe, J. 1985: *Principles of structural geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 255 pp.
- Tarpock, Dj, Bischke, Re. 2003: *Applied subsurface geological mapping with structural methods*, 2nd Edn. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River. In: Groshong, Jr. H. R (2006) *3-D Structural Geology*. Second Edition, ISBN-13 978-3-540-31054-9 Springer Berlin Heidelberg New York, pp 18-24.
- Zimmermann, A. 1987a: *Lateritas ferroniquelíferas de la altiplanicie San Felipe*. En: Iturrealde-Vinent et al. *Informe geológico del levantamiento geológico complejo y búsquedas acompañantes a escala 1: 50 000 en el polígono Camagüey III*. Empresa de Geología Camagüey (1981-1987). Tomo VII. ONRM, 717 – 1143.
- Zimmermann, A. 1987b: *Morfología y tectónica de la altiplanicie San Felipe*. En: Iturrealde-Vinent et al. *Informe geológico del levantamiento geológico complejo y búsquedas acompañantes a escala 1: 50 000 en el polígono Camagüey (II parte)*. Empresa de Geología Camagüey (1981-1987). Tomo VI. ONRM, pp 1872 – 1874.

## INFORMACIÓN ADICIONAL

*Conflictos de intereses:* Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

*Contribución de los autores:* ARC: idea de la investigación, diseño del estudio, obtención y análisis de datos, interpretación de resultados, redacción del manuscrito, revisión y corrección de la versión final. ARI: asesoramiento en el desarrollo de la investigación, revisión de los resultados, revisión y corrección de la versión final.