

METODOLOGÍA GEOFÍSICA PARA LA BÚSQUEDA DE SITIOS DE ENTERRAMIENTOS HUMANOS, NO ARQUEOLÓGICOS, DE MÁS DE UNA DÉCADA

Dr. Noel Pérez Martínez (1), Dr. Carlos Sacasas León (2), Dr. José L. Cuevas Ojeda (3), Dr. José Pérez Lazo (2), Dr. Manuel J. Fundora Granda (3), Ing. Agnelio Pérez (1), Ing. Leodegario Lufriú (4), Ing. Beatriz Rodríguez (4), Ing. José L. Prol (5), Dr. Ramón González (2) e Ing. Jorge Olivera (3)

(1) ENIA/MICONS, (2) ISPJAE/MES, (3) IGA/CITMA, (4) IGP/MINBAS, (5)
EG/MINBAS

RESUMEN

El presente trabajo es una propuesta metodológica de aplicación de un complejo de métodos geofísicos conjuntamente con el procesamiento automatizado de la información geofísica y la evaluación de índices complejos, que permiten localizar zonas alteradas en profundidad debido a la actividad antrópica que puede estar relacionada con enterramientos humanos. El complejo de métodos geofísicos incluye: kapametría para la cartografía de los diferentes tipos de suelos, perfilaje electromagnético en variantes de dipolos vertical y horizontal, para la cartografía de la conductividad electromagnética y la susceptibilidad magnética a profundidades de hasta 1,5 m, imágenes eléctricas, utilizando diferentes dispositivos (Schlumberger, Wenner y Dipolares) con un equipo de sistema inteligente capaz de conformar imágenes, ejecutándose a partir de un sistema multielectrodos, construyéndose una pseudoimagen del corte que con posterioridad se transforma en una imagen tomográfica de la resistividad real. Para el caso de esta propuesta se establecieron los parámetros de los dispositivos capaces de estudiar hasta 4,0 m, perfilaje sísmico de tiempo capaz de caracterizar el medio geológico, tanto por el tiempo de propagación de las ondas como por su velocidad real y aparente; y georadar, capaz de detectar la rotura de alguna frontera guía. La propuesta metodológica incluye el procesamiento automatizado de la información geofísica con software específico elaborado al efecto y la utilización de métodos de superposición de la información geofísica, para la conformación de las zonas anómalas a partir de la sintetización de la información del complejo de métodos propuestos, así como la utilización de índices complejos, es otra propuesta novedosa en este tipo de investigación.

La presente propuesta metodológica fue utilizada con éxito, en la búsqueda y hallazgo del enterramiento múltiple de los restos mortales del Comandante Ernesto Guevara de la Serna y sus compañeros de guerrilla en las inmediaciones de la Pista Vieja de Vallegrande, Dpto. de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de sitios de enterramientos humanos es una tarea muy compleja, tanto desde el punto de vista del medio geológico circundante, como de las características propias del enterramiento, léase las dimensiones de la fosa, tiempo del enterramiento y contexto histórico. La geofísica constituye una vía adecuada a través de la cual se pueden encontrar este tipo de sitios. Es conocido que toda actividad de enterramiento conlleva de por sí una actividad antropogénica que inevitablemente altera al medio geológico en el lugar del mismo, en resumen la hipótesis de partida para encontrar tales sitios parte del supuesto que las propiedades físicas del medio geológico han sido alteradas, aspecto este muy importante dado que no se va a buscar "la aguja, sino el pajar". Es sobre la base de esta hipótesis que los métodos geofísicos entran a jugar un papel importante en la búsqueda de tales sitios, dado que los mismos son capaces de caracterizar este tipo de zonas, a partir de un complejo de métodos geofísicos que sean capaces de detectar estas zonas anómalas. El modelo a esperar puede ser un medio caracterizado por la baja resistividad, baja susceptibilidad magnética, baja velocidad y tiempos altos de propagación de la onda reflejada, así como la poca diferenciación de las propiedades resistivas y de velocidades entre dos medios que puedan entonces considerarse uno sólo y que puede constituir de hecho una zona de enterramiento.

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental el presentar y discutir una propuesta metodológica para la aplicación de un complejo de métodos geofísicos de superficie, conjuntamente con el procesamiento automatizado de la información geofísica y la evaluación de índices complejos, que permitieron localizar zonas alteradas en profundidad debido a la actividad antrópica relacionada con enterramientos humanos. El complejo de métodos geofísicos incluye: kapametría para la cartografía de los diferentes tipos de suelos, perfilaje electromagnético en variantes de medición de dipolos vertical y horizontal, para la cartografía de la conductividad electromagnética y la susceptibilidad magnética a profundidades de hasta 1,5 m, imágenes eléctricas, utilizando diferentes dispositivos (Schlumberger,

Wenner y Dipolares) con un equipo de sistema inteligente que es capaz de conformar imágenes a partir de sondeos eléctricos verticales realizados y referenciados a cada electrodo, ejecutándose a partir de un sistema multielectrodos, que conforman combinaciones de cuádrupolos que de acuerdo al dispositivo seleccionado, puede construirse una pseudoimagen del corte la que con posterioridad se transforma en una imagen tomográfica de la resistividad real y que en dependencia del espaciamiento entre electrodos y la cantidad de los mismos, puede determinarse la profundidad de estudio, que para el caso de esta propuesta es de hasta 4,0 m, perfilaje sísmico de tiempo el cual es capaz de caracterizar el medio geológico por sus características, tanto de tiempo de propagación de las ondas como por su velocidad real y aparente; y georadar, capaz de detectar la rotura de alguna frontera guía, entre otras características y donde puede estar presente la actividad antrópica buscada. La propuesta metodológica que se presenta incluye el procesamiento automatizado de la información geofísica con software específico elaborado al efecto, así como de sistemas profesionales, además de la utilización de métodos de superposición o comparación de mapas de la información geofísica, para la conformación de las zonas anómalas a partir de la sintetización de la información del complejo de métodos propuesto, así como la utilización de índices complejos tanto para la información electromagnética como sísmica, partiendo de la hipótesis antes mencionada es también parte de la propuesta metodológica. La red de medición propuesta para este complejo es de 1 x 1 m, de forma tal que pueda caracterizarse el medio a un detalle que permita que se detecten enterramientos singulares.

La metodología que aquí se presenta y discute fue utilizada durante los trabajos de prospección geofísica realizados durante la campaña de búsqueda de los restos mortales del Comandante Ernesto "Che" Guevara de la Serna y sus compañeros de guerrilla (27/V/97 - 28/VI/97). La misma permitió y dio lugar al hallazgo del enterramiento múltiple en las inmediaciones de la Pista Vieja de Vallegrande, Provincia de Vallegrande, Dpto. de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

ANTECEDENTES

Entre 1995 y 1996 se dan las condiciones para que un grupo de científicos argentinos aborden la tarea de buscar y encontrar los restos mortales del Comandante Ernesto Guevara de la Serna y sus compañeros de guerrilla caídos en la Quebrada de Yuro o asesinados en La Higuera, Vallegrande, Dpto. de Santa Cruz,

Bolivia. En esta búsqueda se utiliza una técnica de alta tecnología: el georadar (o como es conocido por sus siglas en inglés GPR - "Ground Penetration Radar"), en esta ocasión la técnica empleada no brindó los resultados esperados. A principios de 1996 un grupo de geofísicos cubanos abordan también el problema, utilizando otros métodos geofísicos, en esta oportunidad tampoco se llegan a obtener los resultados deseados. Entre 1996 y 1997 se crea un grupo de trabajo con especialistas en Geofísica de diferentes instituciones cubanas con el fin de elaborar un proyecto de investigación para la búsqueda antes mencionada. El proyecto se elaboró entre Febrero y Abril de 1997, a partir de: la reconstrucción histórica (Ariet et al., 1996) y los resultados de investigaciones edafológicas y geológicas básicas realizadas por otro grupo de investigadores (Ortega et al., 1997). Los trabajos de aplicación de la metodología geofísica propuesta se ejecutaron entre Mayo y Junio en las áreas seleccionadas a partir de la reconstrucción histórica, el procesamiento de imágenes aéreas y de la información fotogramétrica (GeoCuba, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

MODELO CONCEPTUAL DEL PROBLEMA

Como es conocido, cuando se hace una determinada fosa para el enterramiento de restos humanos, irremediamente el medio geológico donde se realiza la misma, queda alterado, ya bien sea porque se ha roto un contacto entre diferentes tipos de rocas, así como que las propiedades físicas del medio también son alteradas. Ahora bien, estas dos características antes mencionadas, son afectadas por la variable tiempo, o lo que es lo mismo, el tiempo puede hacer que algunas propiedades físicas sean restablecidas a sus valores originales, lo que puede hacer que la tarea de detectar estas zonas, se convierta en algo muy complejo y difícil. Otro aspecto a tener en cuenta en el modelo a estructurar, es a lo que le hemos llamado aquí como enterramientos humanos no arqueológicos: esto se refiere a que la búsqueda no está basada en encontrar elementos físicos antrópicos, tales como podrían ser paredes de ciudades viejas y que se encuentren enterradas, u otros elementos que ocurren cuando se realizan enterramientos donde se incluyen elementos rituales, que podrían ser de origen metálico. Por otra parte, dentro del modelo debe incluirse las dimensiones de la fosa, que deben de estar relacionadas con la cantidad de cuerpos que hayan podido ser enterrados. Hay un aspecto que es de vital importancia en la conceptualización del modelo a buscar y se refiere al objeto de búsqueda, dentro del modelo podría incluirse la propia existencia de los cuerpos enterrados, esto entonces

supondría propiamente la búsqueda directa de los mismos. Este aspecto es de vital importancia pues podría llevar la investigación a no tener el éxito esperado. Es por ello que la hipótesis que se planteó no es el de buscar "la aguja en el pajar", sino que por el contrario buscar "el pajar para encontrar la aguja".

En resumen desde el punto de vista geofísico, el modelo a esperar se define por sus características geométricas (forma, orientación y dimensiones aproximadas), así como por sus parámetros físicos expresados en la intensidad y variabilidad de los campos observados por los métodos geofísicos.

Para este caso se asumió como hipótesis inicial que ese medio puede estar caracterizado por la baja resistividad, baja susceptibilidad magnética, baja velocidad y tiempos altos de propagación de la onda, así como la poca diferenciación de las propiedades resistivas y de velocidades entre dos medios que puedan entonces considerarse uno sólo y que puede constituir de hecho una zona de enterramiento. Se podía esperar además perturbaciones en los radargramas, variabilidad en la susceptibilidad magnética y hodógrafos sísmicos irregulares. La geometría esperada consistía en un volumen alargado en el sentido paralelo a la pista, con un tope inferior de hasta 3 m y un ancho de 2 y hasta 4 m y largo de hasta 6-7 m. Esa hipótesis fue establecida partiendo del supuesto que la excavación se hubiese realizado por un quipo pesado tipo bulldózer, el cual para maniobrar necesitaría esas distancias. Atendiendo a la característica de que el borde de la pista es un talud del lado más cercano al camino de acceso al pueblo, hace sea lógico que la orientación de la excavación se haya realizado paralelo a la pista y en las cercanías del talud.

MÉTODOS

Es sobre la base de la hipótesis antes planteada que los métodos geofísicos entran a jugar un papel importante en la búsqueda de tales sitios, dado que los mismos son capaces de caracterizar este tipo de zonas, a partir de un complejo racional de métodos geofísicos que sean capaces de detectar estas zonas anómalas y no por la aplicación de un sólo método, que aunque de alta tecnología, los autores de la presente investigación consideran no debe de ser abordado este problema, como lo fue con anterioridad por colegas argentinos. Una característica muy importante que deben de tener los mismos es que por las dimensiones del objeto de búsqueda, la metodología a emplear debe de ser detallada, de ahí que en la metodología propuesta a utilizar se determinó la utilización de métodos y tecnologías de

avanzada, que permitan reducir los tiempos de investigación, ya sea por su grado de automatización desde la adquisición de los datos en los trabajos de campo, hasta el procesamiento y la interpretación. Estas premisas y el modelo conceptual del problema a enfrentar, hizo que se determinara incluir dentro del complejo de métodos geofísicos para enfrentar este tipo de tareas los siguientes: kapametría, perfilaje electromagnético, perfilaje geolétrico para la obtención de imágenes eléctricas del corte geológico, perfilaje sísmico de tiempo y georadar. Todos estos métodos propuestos para ser utilizados en la metodología geofísica propuesta fueron utilizados con equipos de tecnología de avanzada, para poder cumplir con lo antes mencionado por los autores.

Kapametría. Este método se propuso para la diferenciación de los diferentes tipos de suelos, de forma tal que puedan ser cartografiados, y obtener a partir de la susceptibilidad magnética superficial una caracterización de los mismos. Esto permitiría, comparando con mediciones de la misma naturaleza pero en profundidad en el corte geológico, obtener un esquema de cual es la diferencia encontrada entre la superficie y la profundidad, pudiéndose entonces valorar la posibilidad de encontrar una zona anómala que esté relacionada con una actividad antrópica para realizar un enterramiento. El equipo utilizado para este tipo de medición fue un KT-5 de fabricación checa.

Electromagnetismo. Con la utilización de este método se propuso la variante del perfilaje en variantes de dipolo vertical y horizontal, para el cálculo de la conductividad electromagnética, para ambas variantes, a partir de estas mediciones se calcula e interpretan las conductividades reales para un corte equivalente de 2 capas, así como la profundidad de la primera. Por otra parte con mediciones de dipolo vertical a dos niveles de altura, puede también obtenerse la susceptibilidad magnética para un medio equivalente hasta la profundidad de estudio del equipo utilizado (1,5 m). La utilización de este método permite cartografiar en superficie la conductividad o resistividad, así como la susceptibilidad magnética hasta la profundidad de estudio. El equipo propuesto para la aplicación de este método fue la sonda electromagnética de fabricación canadiense EM-38 de la Geonics Limited. Para el cálculo e interpretación automatizada de las mediciones de campo fue elaborado especialmente para esta tecnología el software EM-38 (Cuevas y Díaz, 1997).

Geoelectricidad. Teniendo en cuenta como en los anteriores métodos propuestos, la hipótesis del modelo a esperar, se propuso hacer un estudio simultáneo del comportamiento de la resistividad eléctrica verdadera con varios dispositivos de medición, tomando en consideración que la tarea a resolver exige conocer en detalle el comportamiento del medio en profundidad y lateralmente, partiendo de la premisa de la correspondencia de la distribución de la resistividad con respecto al estado diferenciado de los distintos elementos naturales con respecto a elementos antrópicos. Para este tipo de estudio se propusieron dispositivos simétricos del tipo Wenner, Schlumberger y Dipolares, el primero atendiendo a su alto poder resolutivo en determinar los contactos en profundidad, a pesar de que promedia más los diferentes elementos geoelectricos, el segundo logra más penetración pero es más susceptible a las variaciones laterales superficiales debido al tamaño del dipolo de medición, y el tercero se planificó para conocer las variaciones laterales de la resistividad por su alto poder resolutivo en este tipo de tareas. Para poder realizar este tipo de estudio simultáneo es importante destacar la utilización de la tecnología de avanzada de los llamados sistemas inteligentes con los que pueden conformar imágenes a partir de sondeos verticales realizados y referenciados a cada electrodo. Todas las variantes se ejecutan a partir del sistema multielectrodos, o sea, combinaciones de cuatropolos que de acuerdo al dispositivo conforman una pseudoimagen del corte la que con posterioridad se transforma en una imagen tomográfica de la resistividad real (Loke, 1996).

El sistema de medición se propuso conformarlo con 30 nodos inteligentes (aunque esto puede ser aumentado, en dependencia de las posibilidades prácticas), con separaciones entre los mismos de 1 m y en algunos casos 0,8 m para obtener mayor detalle. En el caso de los dispositivos Wenner y el Schlumberger se hacen todas las combinaciones posibles para 30 electrodos (135 y 196 respectivamente y para el dispositivo dipolo-dipolo 125 combinaciones. A partir entonces de la distribución de los electrodos a una separación constante en el perfil dado, se procede a realizar automáticamente todas las mediciones de las combinaciones de cuatropolos (4 electrodos, 2 de corriente y 2 de potencial) programados en base al tipo de dispositivo de medición. Este procedimiento de la secuencia de mediciones de los cuatropolos se realiza mediante el software "Electre" (Iris Instruments, 1995) el que además transfiere al equipo de medición el fichero confeccionado. De esta manera se programa una secuencia lógica de mediciones de cuatropolos eléctricos para confeccionar la imagen o corte de resistividad eléctrica aparente hasta la profundidad de estudio del dispositivo utilizado. Las imágenes o cortes de resistividad real que se

obtienen con la metodología propuesta se obtienen mediante un proceso de interpretación automatizado con un novedoso software (Loke, 1996). Para la preparación de la base de datos para la interpretación automatizada se elaboró un software para esta tecnología (Pérez, 1995).

Sísmica. La inclusión de este método dentro del complejo también responde a la capacidad del mismo para detectar zonas como las que se han planteado en el análisis del modelo conceptual del problema que nos ocupa. En este caso particular se propuso el perfilaje de tiempo, capaz de caracterizar al medio geológico, tanto por el tiempo de propagaciones de las ondas directas y reflejadas, así como por sus velocidades. Con el objetivo de obtener las características generales del corte sísmico y escoger las distancias entre los puntos de recepción y excitación de ondas se realizaron algunas puestas sísmicas aisladas de refracción.

Fue seleccionada la metodología de los perfiles de tiempo según Skopec (1982) en Mares et al. (1984), por permitir, de forma rápida y efectiva, valorar posibles cambios laterales de la velocidad de propagación de las ondas, tanto directa como refractada, atendiendo a las distancias escogidas entre receptor y la fuente de excitación. Para la interpretación automatizada de las mediciones de campo se elaboró al efecto el software VELOC v 1.0 (Sacacas y Cuevas, 1997) donde se puede a partir de los dispositivos de recepción propuestos, llamados cortos (1, 2 m) y largos (10, 14 m) determinar profundidades que son utilizadas para la caracterización del medio geológico. La representación y valoración cualitativa de los resultados fue realizada con un sistema profesional. Igualmente fue utilizado el software SPIDIM (Sánchez y Sacacas, 1995) para la interpretación de los hodógrafos de encuentro mediante los métodos de Múltiples Capas Inclinas y con el Método T_0 . El equipo utilizado para la aplicación de la metodología propuesta fue el sismógrafo de prospección sísmica somera OYO modelo 1198A de seis canales de fabricación japonesa.

Georadar (GPR). El método del georadar es una variante geofísica de alta tecnología, que es capaz mediante la emisión de una onda electromagnética a diferentes frecuencias (en la propuesta metodológica 100, 200 y 400 MHz) hacia el medio geológico, de obtener reflexiones de dicha onda, lo que permite poder seguir fronteras, obtener evidencias de objetos singulares por difracciones en el corte electromagnético (en este caso similar a cortes de tiempo sísmicos). Con esta tecnología, a través de software de adquisición de datos de campo, se obtienen directamente los radargramas de cada perfil realizado. El procesamiento de cada

radargrama se efectúa con software especializado donde pueden hacerse diferentes procesamiento: amplificación de señales para el mejoramiento de la relación señal/ruido, filtrado digital, tanto en frecuencia como en el espacio, con posibilidades de filtrado por bandas de frecuencias etc., migraciones entre otros procesamiento. La profundidad de estudio del GPR depende de la frecuencia de las antenas utilizadas, de ahí que se propusieron estas variantes de antenas para asegurar la penetración del medio geológico hasta los 3,0 m, por otra parte se propusieron separaciones de 10 cm entre una emisión y otra de la onda electromagnética con 256 "stack". El equipo utilizado en los trabajos de aplicación de la metodología es de fabricación sueca.

METODOLOGÍA

Metodología de los trabajos de campo. Los trabajos de campo que se propusieron en esta metodología parten del supuesto de que como se dijo con anterioridad deben de haber un conjunto de investigaciones básicas entre las que se encuentran las referentes al contexto histórico que permitan reducir el área de búsqueda a una zona elementalmente razonable, que dé la posibilidad de utilizar una red lo suficientemente detallada para que un enterramiento singular pueda ser detectado. Es por ello que todos los métodos geofísicos (excepto el georadar) se planificaron para una red de 1 x 1 m.

Metodología de los trabajos de interpretación compleja. La propuesta metodológica hecha en el presente trabajo incluye además del procesamiento automatizado de los datos de campo ya antes referidos y para los que se elaboraron algunos software específicos y la utilización racional de otros profesionales ya referidos, la utilización de métodos de superposición y sintetización de la información de los diferentes métodos geofísicos utilizados, como una forma de interpretación compleja automatizada que permite resaltar la coincidencia espacial del aporte en el campo físico de que se trate del modelo antes explicado. Para ello se utilizó el Sistema de Procesamiento Digital de Imágenes e Información Bidimensional ImagPc v 2.0 (Valdés et al., 1990), ya probado con éxito en otras investigaciones geofísicas (Cuevas et. al. 1992; Cuevas, 1994). Para poder utilizar de forma compleja y racional la mayor cantidad de información geofísica que se obtiene con los métodos geofísicos propuestos fue necesario elaborar un software para transformar las mediciones de los cortes en profundidad (xz) de imágenes eléctricas de resistividad

real a planos xy (Pérez, 1997) a diferentes profundidades, y de esta forma poder comparar y sintetizar información referentes a los métodos de kapametria, electromagnéticos y sísmicos, para las diferentes profundidades en dependencia de la naturaleza y profundidad de estudio de los otros métodos. Se establecieron como posibles superposiciones para encontrar zonas anómalas que respondieran al modelo conceptual planteado las siguientes: resistividades electromagnéticas de una primera y segunda capas (ρ_{1em} y ρ_{2em}), susceptibilidad magnética superficial y electromagnética (K_p y K_{pem}), resistividades a partir de las imágenes eléctricas a diferentes niveles (ρ_{75} , ρ_{127} , ρ_{185} , ρ_{249} , ρ_{396} - 0,75 m, 1,27 m, 1,85 m, 2,49 m, 3,96 m): (ρ_{75} , ρ_{127}), (ρ_{127} , ρ_{185}), (ρ_{185} , ρ_{249}), tiempo de propagación de dispositivo de recepción corto y largo (T_c , T_l máximos), similarmente con las profundidades (Z_c y Z_l), velocidad del primer medio y tiempo máximo para los dos dispositivos (V_{1max} , T_{clmin}), (K_{pem} , ρ_{1em} y ρ_{2em} todos mínimos), (K_p , ρ_{75} , ρ_{127} todos mínimos), otras superposiciones también se proponen.

Índices complejos. Este es otro aspecto novedoso introducido en la metodología para asumir la interpretación compleja de una forma que la subjetividad siempre implícita en la interpretación sea disminuida y por otra parte trabajar por otra vía en la sintetización de información geofísica, teniendo en cuenta el complejo modelo asociado con los sitios de enterramientos. Para estos índices se utilizó la información sísmica y la electromagnética. En ambos casos antes de proponer los índices a calcular se procedió a realizar un estudio con variantes diferentes que amplificaran el efecto de encontrar el modelo esperado. Para el caso de la sísmica se consideró un índice que se definió como:

$$I_c = Z_o T_c T_l / V_o V_1 \quad (1)$$

$$I_c = T_c T_l / V_o V_1 (V_1 - V_o) \quad (2)$$

donde Z_o - Profundidad estimada para la primera capa

T_c - Tiempo del dispositivo corto

T_l - Tiempo del dispositivo largo

V_o - Velocidad de la onda directa

V_1 - Velocidad de la segunda capa

De manera similar se estableció para las mediciones electromagnéticas un índice complejo definido como:

$$I_c = \rho_h \rho_v \sigma K_{pem} / (K_{pem} - K_{pemm}) (\rho_h - \rho_v) \quad (3)$$

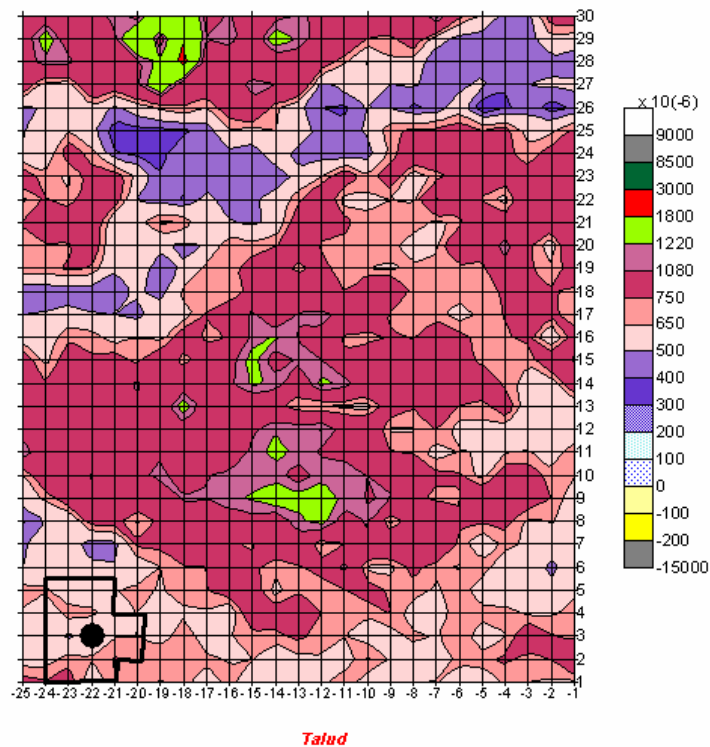
donde ρ_h - resistividad debida al dipolo horizontal

- ρ_v - resistividad debida al dipolo vertical
 K_{pem} - susceptibilidad magnética
 K_{pemm} - susceptibilidad magnética media
 σK_{pem} - desviación estándar de la susceptibilidad magnética

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hasta aquí se ha expuesto en su forma más general la propuesta metodológica que se hace en el presente trabajo para la búsqueda de sitios de enterramientos humanos con las características que se han descrito. Esta metodología fue utilizada durante los trabajos de prospección geofísica para la búsqueda de tales sitios. Aquí sólo expondremos a manera de ejemplificar algunos de los campos físicos medidos en el área de trabajo, así como superposiciones donde se puede apreciar el comportamiento de estos parámetros.

*Fig. 1. Susceptibilidad Magnética superficial
rangos característicos de las rocas presentes
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)*



En la figura 1 se muestra un mapa de la susceptibilidad magnética superficial y donde se muestra la zona donde se realizó la excavación que dio lugar al hallazgo del enterramiento múltiple, aquí se puede observar que los valores predominantes son muy bajos $500 - 650 \times 10^{-6}$ S.I., lo que está en correspondencia con lo esperado y planteado en el modelo conceptual. Así mismo este parámetro pero caracterizando una mayor profundidad (1,5 m) se puede observar en la figura 2, donde también se puede apreciar que en el lugar de la excavación los valores de la susceptibilidad también son del mismo orden, con incluso algunos valores entre $200-500 \times 10^{-6}$ S.I., lo que está corroborando que en el primer metro y medio hay una alteración del medio geológico como se había supuesto ocurriría en este tipo de zona con actividad antrópica.

Fig. 2. Susceptibilidad Magnética hasta 1,5 m
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)

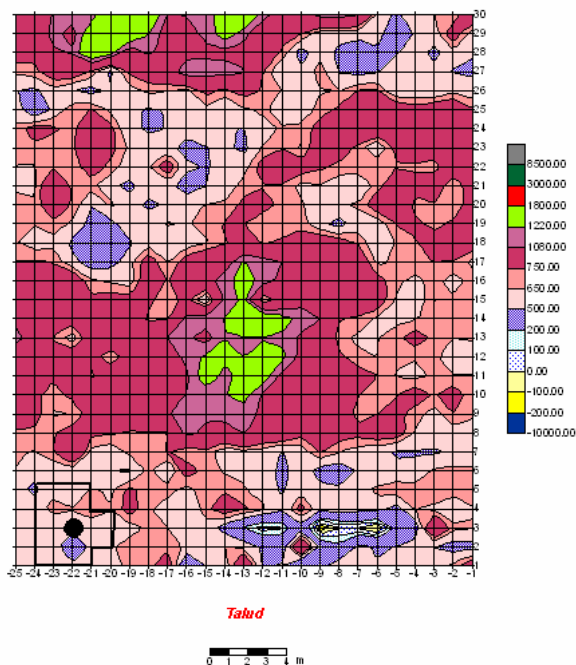
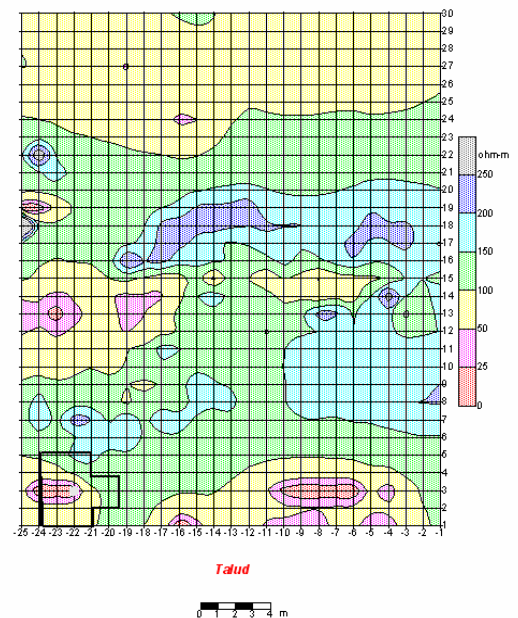


Fig. 3. Resistividad real primera capa conductora
con sonda electromagnetica
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)

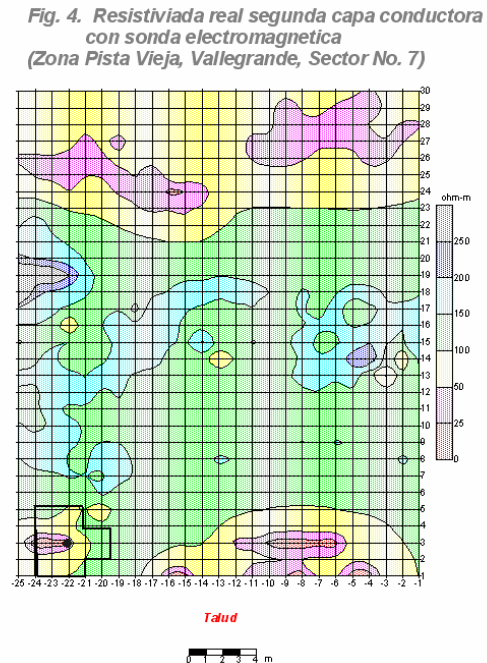


Otra muestra de cómo es el comportamiento anómalo en la zona del hallazgo se muestra en la figura 3 donde se aprecian valores mínimos de resistividad interpretadas a partir de la información electromagnética, aquí los valores son menores 50 ohm-m. Esta misma situación se puede observar para la resistividad real de la segunda capa, aunque aquí ya los valores alcanzan hasta los 100 ohm-m, pero siguen siendo bajos relativamente (figura 4).

**Fig. 5. Resistividad real H=1,27 m
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)**

**Fig. 4. Resistividad real segunda capa conductora
con sonda electromagnetica
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)**

Talud



Un último aspecto que se aborda en esta presentación de algunos resultados que ilustran la eficiencia y certeza de la metodología propuesta es la interpretación compleja, ejemplificada aquí con la utilización de la superposición de campos geofísicos y la sintetización de los mismos.

En la figura 9 se presenta un mapa donde se ha sintetizado la información de susceptibilidad magnética, tanto a nivel superficial como en profundidad, de forma tal de con la misma poder caracterizar hasta ese nivel, aquí se muestra que en la zona del hallazgo se observan valores mínimos predominantes, lo que habla como ya se ha expresado de la característica buscada. Ahora bien es necesario observar que en la misma figura se observan otros valores mínimos que sabemos están asociados a la distribución de los diferentes suelos y a los que responde muy bien la kapametría superficial, aspecto este que también se había planificado en le propuesta metodológica.

Fig. 6. Resistividad real $H=1,85\text{ m}$
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)

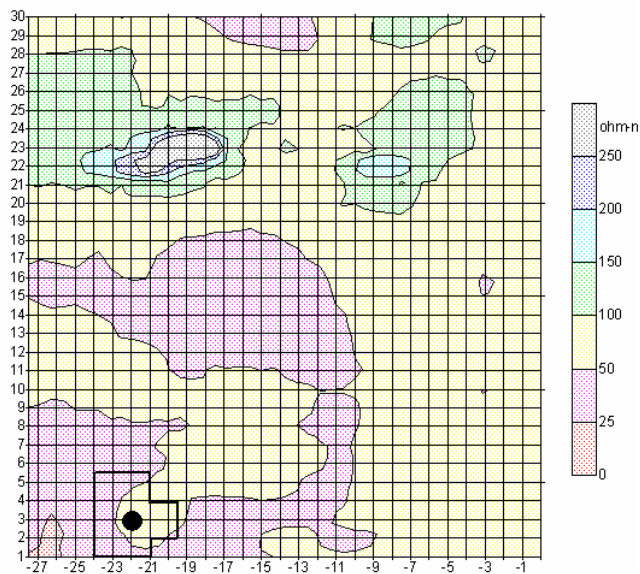
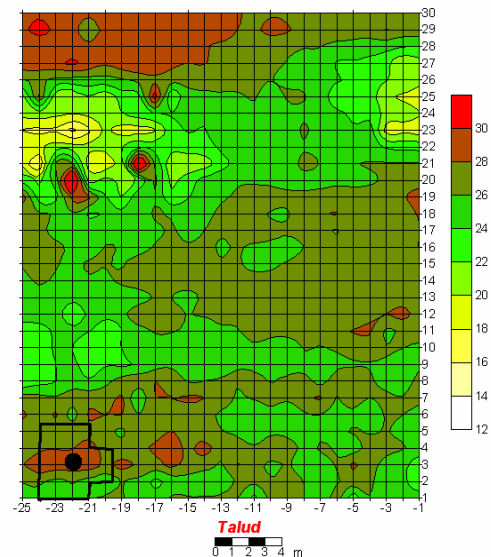


Fig 7. Tiempo de propagación sísmica T_1 . Dist 14 m
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)



También se aprecia muy bien en la figura 10 una superposición realizada con las resistividades interpretadas por el método electromagnético, donde se han destacado las coincidencias entre los mínimos de resistividades de los mapas individuales de este parámetro. Aquí se observa con una mayor claridad la coincidencia de estas informaciones con valores de significación mayores de 0.9 en la zona del hallazgo. Entonces llama la atención otra zona anómala más hacia la derecha en el plano y que también se observa con altos valores de coincidencia de los campos. Esta zona corresponde con una zona de excavaciones realizadas por los colegas argentinos en el año 1995, esto también corrobora la justeza del modelo planteado por los autores, y verificado en la práctica.

Es entonces prudente mostrar un mapa que contiene la superposición integrada de un número grande de información geofísica y que sirve como ejemplo de como abordar este tipo de tareas altamente complejas. En la figura 11 se muestra una superposición y sintetización de la información de la susceptibilidad magnética hasta 1,5 m, de las resistividades reales interpretadas a partir de las imágenes eléctricas a profundidades de 0,25 m, 0,75 m y 1,27 m, además se superpuso la información del tiempo de propagación para dispositivos de 2m y 10 m, los mapas de las velocidades V_i y V_o , así como la resistividad electromagnética. En este caso otro mapa muestra otros sectores de los investigados, aquí se vuelve a observar con una mayor claridad la coincidencia de información en la zona del hallazgo, y se vuelven a destacar otras zonas anómalas siendo las que están a la izquierda de la zona del hallazgo también coincidentes con excavaciones realizadas con anterioridad por los argentinos, y que fueron también excavadas corroborándose la actividad antrópica en las mismas.

Fig. 8. Velocidad V_i de la onda refractada
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)

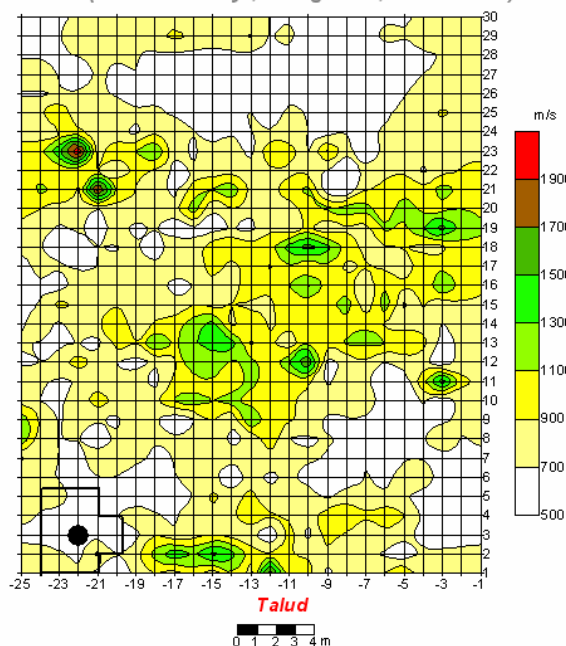
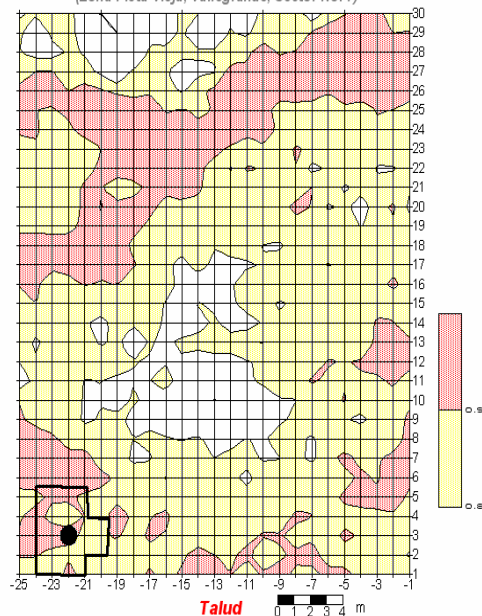


Fig. 9. PROCESAMIENTO SUPERPOSICION DE CAMPOS
Susceptibilidad Magnética superficial y hasta 1,5 m
(Destacados los valores mínimos)
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)



Se ha mostrado en una apretada síntesis cuáles fueron algunos de los resultados principales, que sirvan para ilustrar, como se expresó anteriormente, que la metodología propuesta para la búsqueda de sitios de enterramiento humanos ha sido probada con eficiencia y que utilizada adecuadamente y con creatividad por parte de los especialistas encargados de la tarea y sin ajustes estrictos es capaz de detectar este tipo de zonas con elementos de actividad antrópica.

**Fig. 11. SUPERPOSICION DE CAMPOS GEOFISICOS ZONAS 7, 8 y 9
Vallegrande**
Integración Kapa 1,5 m; Rho=0,25 m, 0,75 m y 1,27 m, Tiempo L=2 y 10 m
Vi y V0, Rho electromagnetica hasta 1,5 m
(Destacadas anomalías hasta 1,5 m)

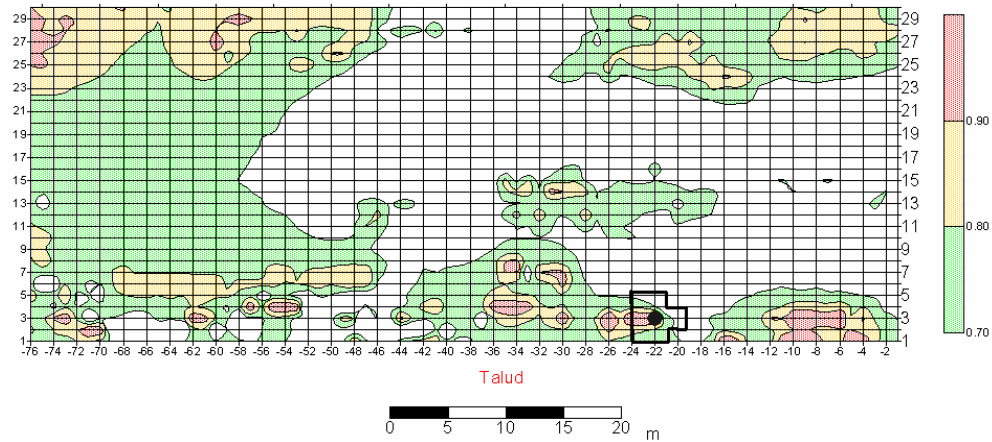
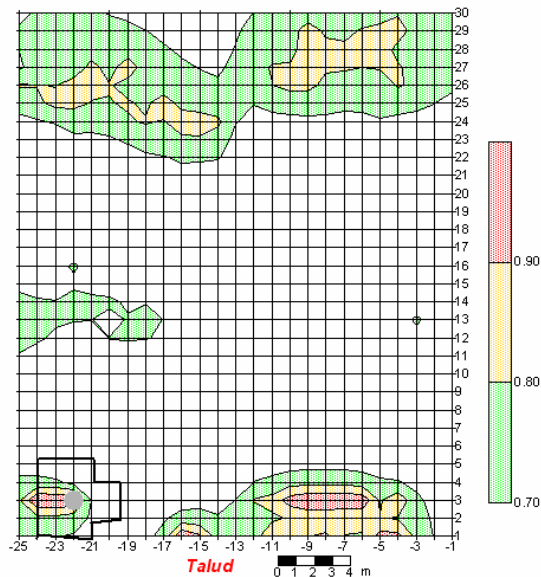


Fig. 10. PROCESAMIENTO SUPERPOSICION DE CAMPOS
Resistividad real 1ra. y 2da. capa conductora
con sonda electromagnetica
(Destacados los minimos de resistividad hasta 1,5 m)
(Zona Pista Vieja, Vallegrande, Sector No. 7)



Un aspecto que no se ha comentado y que tiene un carácter importante es que desde el punto de vista de la práctica de las excavaciones en las zonas determinadas como anómalas, puede ocurrir que se presente un medio que por su dureza al excavar, se pueda tener la apreciación de que ese medio no ha sido alterado, y esto ocurre por varios factores y uno principal es el tiempo, esta experiencia ocurrió efectivamente como se explica. Se observó este fenómeno de

dureza en la fosa del hallazgo, no así en las fosas abiertas donde habían excavaciones reconocidas de los argentinos y otras que evidentemente se encontró que la actividad antrópica había ocurrido.

CONCLUSIONES

El trabajo que se ha presentado aquí es solamente una parte del resultado final. En resumen se puede establecer las siguientes conclusiones:

- ♦ El modelo conceptual del problema asumido y discutido en el presente trabajo, resultó ser un modelo adecuado para la búsqueda de sitios de enterramientos humanos,
- ♦ El complejo de métodos geofísicos: kapametría, electromagnetismo (variantes de conductividad en dipolos horizontal y vertical, así como de dipolo vertical en dos niveles para la obtención de la susceptibilidad magnética), los cortes de imágenes eléctricas tomográficas, el perfilaje sísmico de tiempo, y el georadar propuestos como parte de la metodología geofísica, constituye un complejo muy eficiente para la detección de zonas anómalas que responden al modelo conceptual del problema que nos ocupa,
- ♦ Los métodos de procesamiento automatizados implementados y el uso racional de algunos software profesionales constituyen un pilar importante dentro de la metodología propuesta,
- ♦ La utilización de la superposición y sintetización de la información del complejo de métodos geofísicos, así como la determinación de índices complejos, como parte de la metodología propuesta es un aspecto novedoso e importante en dentro del proceso de interpretación compleja, a la que se sometió la información geofísica,
- ♦ Por primera vez geofísicos cubanos proponen y ejecutan un complejo de métodos Geofísicos, con equipos de alta tecnología, que son utilizados para la búsqueda de sitios de enterramientos humanos, lo que de hecho aporta un nuevo conocimiento a este tipo de tareas, que pueden ser utilizadas en otras ramas como la criminalística y la arqueología.

- ♦ La presente propuesta metodológica fue utilizada con éxito, en la búsqueda y hallazgo del enterramiento múltiple de los restos mortales del Comandante Ernesto "Che" Guevara y sus compañeros de guerrilla, caídos en Bolivia.

REFERENCIAS

- Ariet, Ma. del Carmen, J. González y L. Sánchez (1996):** Reconstrucción histórica de los hechos relacionados con el enterramiento del Comandante Ernesto "Che" Guevara y sus compañeros de guerrilla, caídos en Bolivia. Arch. Pers. Ernesto Guevara, Inst. Med. Legal, PRELA, La Habana
- Cuevas, J. L. (1994):** Caracterización de Anomalías Gravitacionales en Cuba centro oriental y su Utilización en estudios de tectónica y sismicidad. Tesis de Doctorado, Inst. Geof. y Astron., La Habana, 146 pp.
- Cuevas, J. L., R. Alvarez, F. García y otros (1992):** Investigaciones Geofísicas Complejas para el estudio de la constitución profunda de la corteza terrestre en Cuba centro oriental. Inst. Geof. y Astron., La Habana, 150 pp.
- Cuevas, J. L. y L. A. Díaz (1997):** Programa EM-38 v 1.0 para la interpretación de levantamientos electromagnéticos con el equipo Geonics EM-38, de medición de la conductividad eléctrica. Dpto. Geof. Reg. y Riesgos, Inst. Geof. y Astron., La Habana.
- GeoCuba, Investigación y Consultoría (1997):** Trabajos generales de fotointerpretación y procesamiento digital de imágenes fotográficas de la zona de la Pista Vieja de Vallegrande y sus inmediaciones. La Habana.
- Iris Instruments (1995):** Electre Software. Iris Instruments, Francia.
- Loke, M. H. (1996):** Rapid 2D Resistivity Inversion using the Least Squares Method. Terraplus Inc., Ontario, Canada.
- Mares, S. y otros (1984):** Introduction to applied geophysics. D. Reidel Publishing Company
- Ortega, F., G. Cid y R. Rodríguez, (1997):** Geografía de Vallegrande, Provincia Vallegrande, Dpto. de Santa Cruz Inst. Arqueol., La Habana, 85 pp.
- Pérez, N. (1995):** Programa Syscal2.exe "Preparación de datos para software", ENIA, La Habana.
- Pérez, N. (1997):** Programa TrIMG "Transformación de datos de cortes de imágenes eléctricas a planos xy de resistividad real", ENIA, La Habana.
- Sacasas, C. y J. L. Cuevas (1997):** Programa VELOC v 1.0 para la interpretación de Perfilaje Sísmico de Tiempo v 1.0, Dpto. Geof. ISPJAE y Dpto. Geof. Reg. y Riesgos, Inst. Geof. y Astron., La Habana.

Sánchez, E. E. y C. Sacasas (1995): Sistema para el procesamiento e Interpretación de Datos Sísmicos de Microrrefracción, SPIDIM v 2.0. Dpto. Geof. ISPJAE, La Habana.