

APLICACIÓN DE LA GEOFÍSICA (RESISTIVIDAD 2D Y GEORADAR-GPR) EN LA CIUDADELA INCA DE MACHU PICCHU: CUSCO-PERÚ

Walter Pari¹, Víctor Carlotto^{1,2}, José Cárdenas², Martín Oviedo², Marten Douma³
Mel Best³ & Peter Bobrowsky³

¹INGEMMET, Av. Canadá 1470, San Borja, Lima-Perú wpari@ingemmet.gob.pe

²UNSAAC Av. de la Cultura, s/n Cusco-Perú

³Servicio Geológico de Canadá

INTRODUCCIÓN

En vista de la hipótesis planteada de la existencia de deslizamientos profundos en la ciudadela Inca de Machu Picchu era necesario realizar investigaciones geofísicas sistemáticas en el sitio con el objeto de obtener información geológica y geotécnica del subsuelo, características de los sedimentos superficiales, la topografía del substrato rocoso, así como la presencia de fallas y planos de deslizamiento. En el marco del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (MAP:GAC) con la asistencia del Servicio Geológico de Canadá, el INGEMMET y la Universidad del Cusco, pudieron realizar las investigaciones geofísicas cuyos resultados contribuyen a la evaluación de los peligros, como un aporte para la conservación de la Ciudadela Inca.

Los trabajos de campo han consistido en prospección geofísica aplicando, en su primera fase los métodos de Resistividad Eléctrica y Electromagnetismo EM-31/EM-34 (Mayo del 2004), y en una segunda fase aplicando los Métodos de Georadar de penetración-GPR y Resistividad 2D (Junio-Julio, 2005). El método electromagnético no es tratado aquí por no haber tenido resultados satisfactorios en Machu Picchu.

UBICACIÓN - PRESENTACIÓN

La Ciudadela Inca de Machu Picchu se encuentra ubicada a 112.5 Km al noroeste de la ciudad del Cusco, a una altura de 2,350 msnm (Fig. 1).

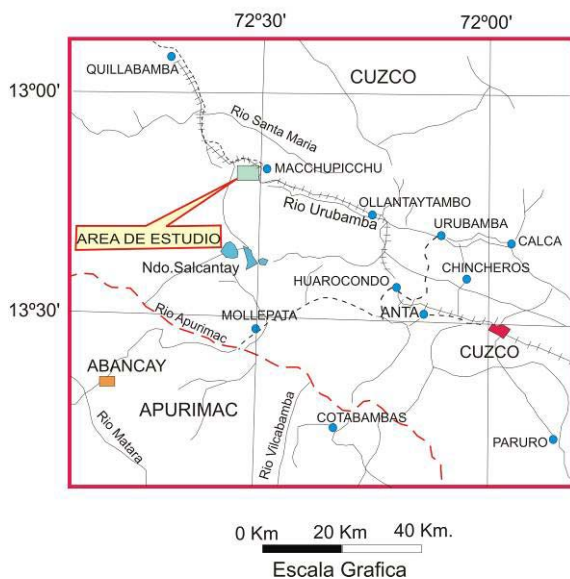


Fig. 1. Mapa de ubicación de la Ciudadela Inca de Machu Picchu

Se localiza en plena Cordillera Oriental, donde el río Urubamba forma el cañón del Urubamba. Descubierta a inicios del siglo pasado, el sitio recibe aproximadamente un millón de turistas por año. En Machu Picchu y sus alrededores se presentan frecuentemente deslizamientos superficiales, caída de rocas y aluviones, produciendo daños materiales y pérdidas humanas como ocurrió en Aguas Calientes el 2004.

MÉTODO DE RESISTIVIDAD-WENNER 2D

Este método se caracteriza por el estudio de las variaciones de los parámetros físicos de las rocas o de los suelos y depende de factores que afectan la resistividad de los materiales, como la porosidad, agua en los poros, conductividad en los granos minerales, grado de compactación, etc. La resistividad y conductividad de los materiales terrestres se basa en la aplicación de la Ley de Ohm ($V = IR$) donde V = voltaje (Voltios), I = corriente (Amperios) y R = resistencia (Ohmios). El método dispone de diferentes configuraciones y para el presente estudio se ha aplicado la

configuración Wenner con 48 electrodos con espaciamentos de 5 m, que ofrece mejor resolución en profundidad pero que su penetración es somera (50 m). Colecta datos de resistividad en dos dimensiones (2D) usando un sistema de múltiples electrodos.

Se realizaron 8 líneas en la carretera de acceso Hiram Bingham y una línea en la Plaza Principal de la Ciudadela. El equipo geofísico empleado fue el Sistema Syscal Iris con 48 electrodos de potencial. El procesamiento y los resultados obtenidos se han desarrollado en base al Programa de Modelamiento de Resistividad en 2 D. (Inversión de resistividad, RES2DINV V.4).

RESULTADOS

El background da valores de resistividad mayores a los 3000 ohm-m que son típicos de rocas graníticas, y corresponde a los afloramientos de la Ciudadela. Los datos de resistividad de los ocho tramos superiores de la carretera (línea 0 a línea 7) nos indican, en color amarillo (Fig. 2), valores bajos por comparación al background, entre 700 y 1200 ohm-m. Estas zonas de baja resistividad se interpretan como rocas intensamente fracturadas con presencia de flujos de agua y coinciden con una falla que atraviesa la zona.

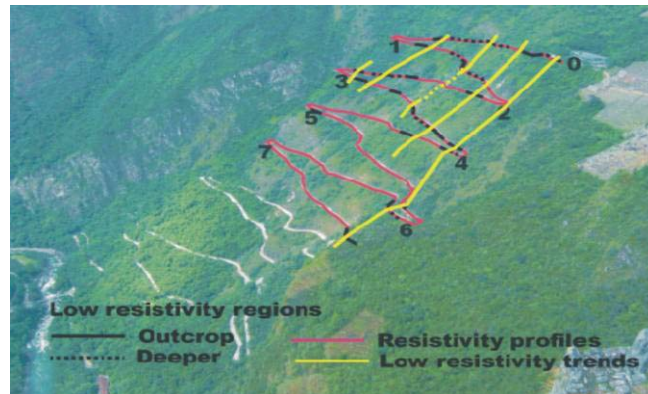


Fig. 2. Perfiles de resistividad y tendencias en la carretera Hiram Bingham

En la ciudadela inca se realizó un perfil transversal a la Plaza Principal donde zonas puntuales de baja resistividad (color azul) se asocian a las terrazas superiores al oeste y este, probablemente debido a suelos de mayor espesor para la agricultura. Así mismo se observa baja resistividad en el área bajo las construcciones como una capa delgada quizás de arcillas o suelos que agregaron los incas para hacer una buena superficie de construcción para los edificios. La zona de baja resistividad al lado este de la Plaza Principal puede ser relacionada a las fracturas saturadas con agua. La alta resistividad mostrada en la base de la plaza está relacionada con la parte superior del substrato rocoso de la Ciudadela. En los extremos este y oeste del perfil, se pueden dibujar planos de deslizamientos superficiales que corroboran la cartografía geológica. Bajo la Plaza Principal no se aprecia planos de falla ni de deslizamientos.

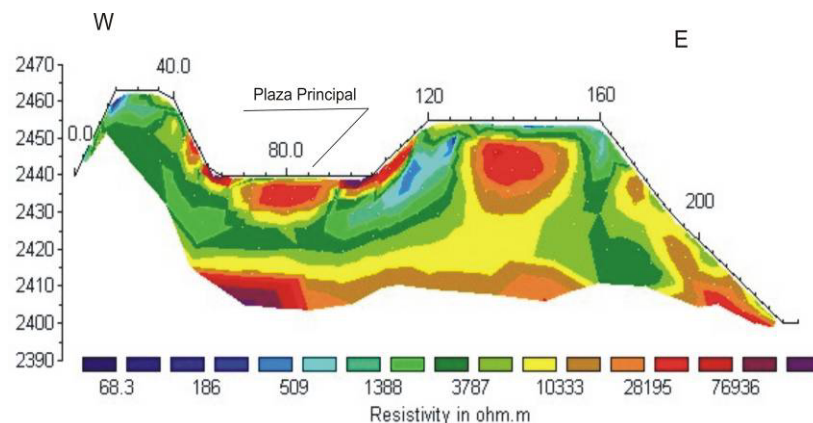


Fig. 3. Perfil geoelectrico en la Plaza Principal

MÉTODO GEORADAR DE PENETRACIÓN-GPR (Ground Penetrating Radar)

El levantamiento georadar fue realizado empleando el Sistema Pulse EKKO 100 fabricado en Canadá. Incluye una unidad de control, un procesador y dos antenas (transmisor y un receptor) de alta frecuencia (50, 100 y 200 Mhz). El procedimiento está principalmente relacionado al método de reflexión sísmica, el cual está constituido por un transmisor (Tx) que emite una señal hacia el subsuelo. El regreso de la onda electromagnética es detectado y registrado por el receptor (Rx).

El GPR funciona generalmente con una separación fija del transmisor-receptor. La adquisición continua de los datos se ejecuta moviendo las antenas del GPR continuamente a lo largo del perfil. La información recolectada se presenta en tiempo real y de manera continua en la pantalla del computador, presentándose como una imagen del material subyacente a lo largo de la línea de investigación. Las reflexiones ocurren donde hay un cambio en la constante dieléctrica y la conductividad del medio (Fig. 4a). Las secciones de los datos ploteados son semejantes a las secciones sísmicas, con tiempo en nano-segundos en el eje vertical y la posición en el eje horizontal (Fig. 4b). La profundidad de investigación varía desde menos de un metro hasta aproximadamente 30 a 40 m.



Fig. 4. Perfil de Reflexión del GPR

Las líneas del Georadar-GPR muestran reflectores electromagnéticos que corresponden a patrones de frecuencia bien definidos, los que indican claramente cambios litológicos causados la permitividad relativa y conductividad eléctrica del medio.

RESULTADOS

Uno de los blancos del GPR fue el área de la Plaza Principal que separa el Intihuatana y el sector urbano de la Ciudadela. El objetivo principal fue obtener la configuración del subsuelo y del substrato rocoso bajo la plaza principal, consecuentemente calcular el espesor de relleno y la topografía del substrato. Otro de los objetivos fue determinar la presencia o la ausencia de planos de falla o deslizamiento de dirección norte-sur.

Tres facies o unidades principales fueron identificadas en las secciones georadar. La primera facies se sitúa al techo de las secciones, entre 0.5 y 1 m. (Fig. 5). Muestra una fuerte reflexión que puede corresponder al suelo agrícola ya que los incas normalmente tenían suelos de 0.5 m. (Wright & Valencia, 1999).

La segunda unidad parece extenderse hasta aproximadamente 4 m de profundidad y representa una unidad de subsuelo compuesto principalmente por bloques, fragmentos de rocas, y otros productos posiblemente acarreados de las canteras por los incas (relleno). La falta de coherencia, en muchas de las reflexiones, representa la dispersión de las ondas de radar ocasionado por los escombros. Los perfiles muestran que la plaza principal es una depresión que habría sido rellena durante la construcción de la Ciudadela.

Infrayaciendo las facies de suelos e indicando los límites de capacidad de penetración del radar, se tiene una tercera unidad pobremente organizada u ocasionalmente de reflexiones hiperbólicas entrecruzadas. Este tipo de apariencia es consistente ya sea con el substrato rocoso o con una litología,

en la cual grandes bloques son la mayoría de componentes. Desde el punto de vista geológico representa la transición substrato-caos granítico.

En los perfiles georadar no se observó ninguna falla principal o plano de deslizamiento a lo largo de cualquiera de las líneas de estudio, aunque hay indicaciones de fracturamiento rocoso de menor importancia con infiltraciones de agua tanto en la carretera Hiram Bingham, así como en la Ciudadela Inca.

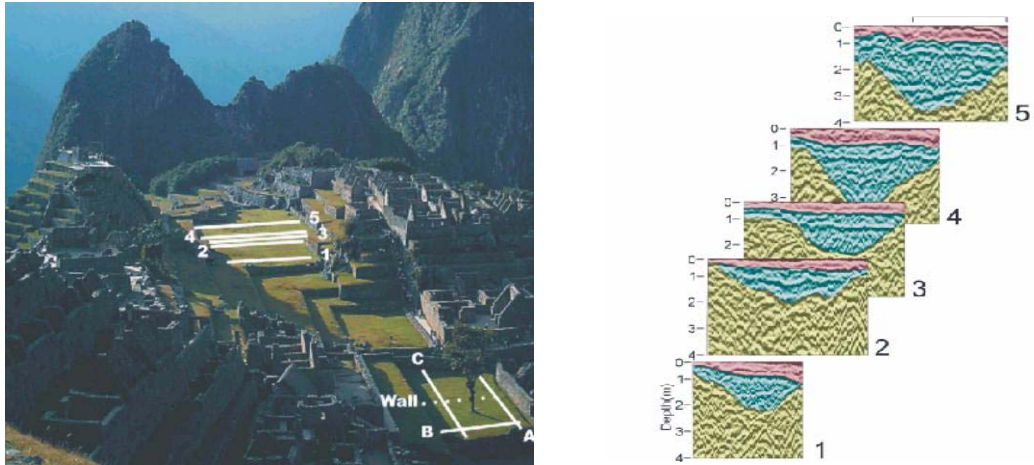


Fig. 5. Ubicación de los perfiles de georadar y perfiles interpretados

CONCLUSIONES

De los tres métodos empleados el electromagnético no fue efectivo para el mapeo en Machu Picchu. La resistividad fue efectiva para las rocas graníticas, pues es capaz de mapear variaciones dentro de rocas altamente resistivas. El georadar de penetración GPR fue efectivo para determinar el espesor del relleno, la litología y la topografía del sustrato.

No se ha observado ninguna falla principal o planos de deslizamiento a lo largo de cualquiera de las líneas o perfiles de estudio, aunque hay indicaciones de fracturas de menor importancia rellenas con agua en la carretera Hiram Bingham y cerca de la plaza principal. El relieve del sustrato bajo la plaza es significativo y la parte superior parece haber sido rellena por fragmentos y escombros. Además el georadar permite interpretar bloques grandes de granito en la parte superior del sustrato que correspondería al caos granítico.

Las especulaciones por otras investigaciones que un plano de deslizamiento profundo de dirección norte-sur podría presentarse bajo la Plaza Principal no están sustentadas por el radar de penetración ni por la resistividad.

REFERENCIAS

- Carlotto, V. Cárdenas, J. Romero, D. Valdivia, W. Tintaya, D. (1999). Geología de los Cuadrángulos de Quillabamba y Machu Picchu. Boletín N° 127, Serie "A": Carta Geológica Nacional. INGEMMET, 317 p.
- Mucho, R. Carlotto, V. Pari, W. Oviedo, M. Douma, M. Best, M. Bobrowsky, P.(2005). The application of Ground penetrating Radar (GPR) at Machu Picchu, Peru (C101-1) En Landslides Risk Analysis and Sustainable Disaster Management I Asamblea General Consorcio Internacional de Deslizamientos-ICL- Washington , 2005: 55-59.
- Wright KR, Valencia, A. (1999) Ancient Machu Picchu drain age engineering. J Irrig Drain E-ASCE 125:360-369.