

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA Y GEODINÁMICA EXTERNA DE LA CIUDAD INCA DE MACHUPICCHU-CUSCO

Víctor Carlotto^{1,2}, José Cárdenas²

¹INGEMMET, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, vcarlotto@ingemmet.gob.pe

²Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco UNSAAC

INTRODUCCIÓN

El Santuario Histórico de Machupicchu se sitúa en plena Cordillera Oriental del sur del Perú, con nevados que superan los 6000 m como el Salcantay, sin embargo, la ciudad inca está situada a 2450 msnm, mostrando el verdor típico de selva. Este contraste se debe a que el río Urubamba corta la cordillera y forma un cañón donde el río cruza el santuario, entre 2450 y 1800 msnm, lo que permitió el desarrollo de un paisaje impresionante, caracterizado por laderas empinadas a muy empinadas, a veces verticales, en montañas agrestes, como las que rodean a la ciudad inca. A esto se suma la geología y geomorfología con rocas graníticas fracturadas y bloques de granitos apilados formando “caos graníticos”, que ofrecen al paisaje un contexto asombroso y único. Este lugar, tan hermoso y a la vez tan abrupto, fue escogido por los incas para construir la gran ciudad de Machupicchu.

La formación del caos granítico tiene relación con la evolución geológica-estructural y geomorfológica del macizo rocoso del batolito de Machupicchu, y con los efectos propios del intemperismo y la erosión en una zona donde la cordillera comenzó a formarse y levantarse desde el Eoceno. La ciudad inca de Machupicchu fue construida mayormente sobre este caos granítico que actualmente muestra una evolución geodinámica caracterizada por asentamientos, erosión superficial, deslizamientos superficiales, derrumbes y reptaciones; las que están afectando la ciudad.

GEOLOGÍA

El macizo granítico de Machupicchu está formado principalmente por granitos y granodioritas (Fig. 1) que han sido datadas por Rb/Sr en 246 ± 10 Ma (Priem: en Egeler y De Booy, 1961). Estas rocas se hallan cortadas por diaclasas y fallas, las que han jugado un papel determinante modelando la morfología y el aspecto que presentaba la zona cuando los incas llegaron al lugar.

Los estudios geológicos llevados a cabo por Carlotto et al. (1999) ponen en evidencia dos fallas regionales que inciden en la configuración morfológica de la zona de estudio. Una de las fallas, denominada Urubamba, de dirección NO-SE y escala kilométrica pasa por parte del valle y controla la forma de meandro que tiene el río Urubamba a la altura de la ciudad inca. Otra falla, también de escala kilométrica y con dirección NO-SE, denominada Central Hidroeléctrica Machupicchu, es ligeramente paralela a la anterior, pero está situada más al sur (Carlotto et al., 2007).

Kalafatovich (1963) puso en evidencia un sistema de fallas con dirección NE-SO que cruza la ciudad, entre ellas destacan las fallas Waynapicchu, Machupicchu y Foso Seco (Fig. 1), las que definen una minifosa o graben que corresponde a gran parte de la ciudad inca de Machupicchu.

La configuración de las fallas principales Urubamba y Central Hidroeléctrica Machupicchu, con dirección NO-SE, muestran un corredor estructural donde las fallas NE-SO de Machupicchu, Waynapicchu, Foso Seco y otros, serían conjugadas en un sistema transcurrente sinistral (Carlotto et al., 2007). En efecto, los estudios de microtectónica en Machupicchu y alrededores (Carlotto et al., 1999) muestran planos de falla NO-SE con dos movimientos, uno transcurrente sinistral, que parece ser el más antiguo, y otro inverso que sería posterior (Fig. 2).

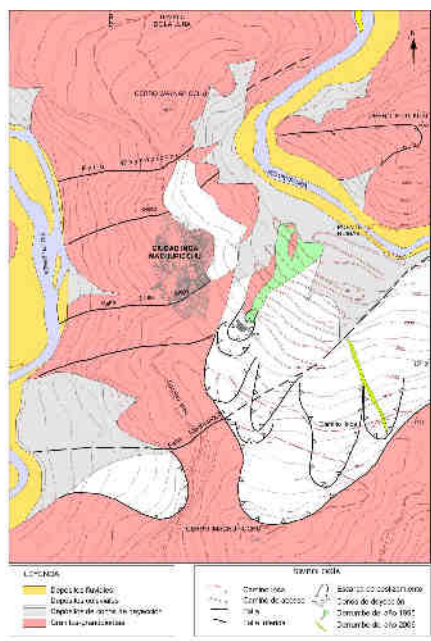


Fig. 1. Mapa geológico de Machupicchu

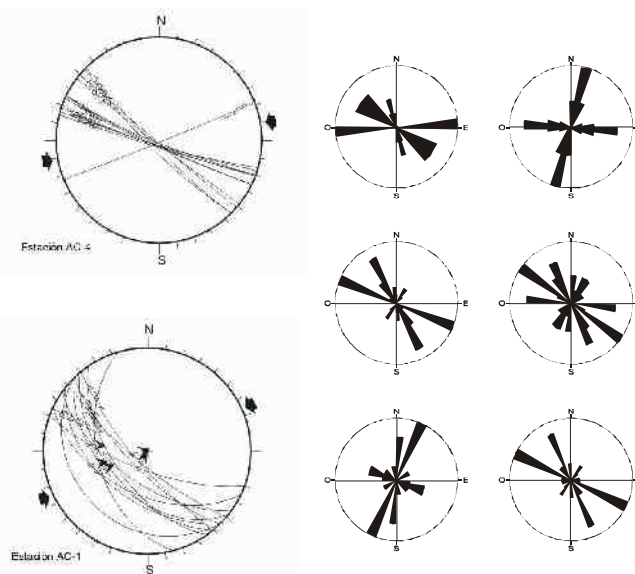


Fig. 2. Diagramas mostrando la cinemática de fallas y dirección de diaclasas

Para plantear un modelo de interpretación tectónica, recordemos que los estudios petrográficos y geoquímicos indican que el batolito se formó al interior de la corteza hace 246 millones de años, en un contexto de rift continental donde dominaban los esfuerzos de distensión que rompen la corteza (Fig. 3). Es posible que los movimientos sinestrales hayan estado relacionados al esfuerzo en extensión y, además, hayan controlado el emplazamiento de los cuerpos graníticos. En efecto, el emplazamiento del magma habría sido parcialmente sintectónico ya que en las rocas se observan estructuras con desarrollo de foliaciones y blastomilonita. Posteriormente, durante la evolución andina y particularmente en el Eoceno-Oligoceno, entre 43 y 30 millones de años, las fallas NO-SE actuaron como fallas inversas e indican un esfuerzo compresivo regional NE-SO, como es bien conocido en la región de Cusco (Carlotto, 1998). En esta época se produce el mayor levantamiento de los Andes y por lo tanto la erosión de las rocas de la parte superior de la corteza continental. Estos procesos han permitido sacar los granitos desde las profundidades de la corteza hasta la superficie.

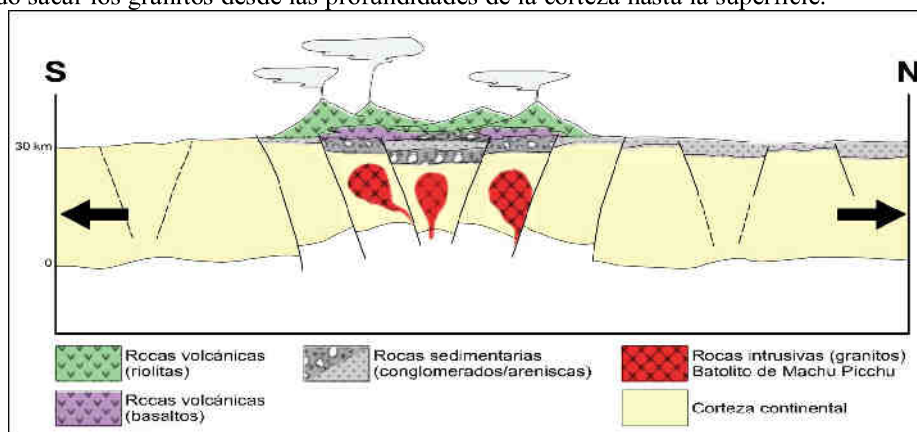


Fig. 3. Modelo de formación del batolito de Machupicchu en un contexto de rift durante el Permo-Triásico

Durante el levantamiento andino y la erosión consecuente se formó el río Urubamba; la intersección de fallas NO-SE y NE-SO han controlado la configuración del río en la zona de estudio y el meandro, que tiene en consecuencia un control tectónico. Las fallas NE-SO han complementado el patrón estructural para la formación del meandro y la configuración de la ciudad, particularmente el graben descrito por Kalafatovich (1963).

Las diaclasas son fracturas sin desplazamiento, originadas por contracciones debidas al enfriamiento del magma o roca fundida, durante su consolidación dentro la corteza terrestre. Se han reconocido varios sistemas de direcciones de diaclasas, que afectan a las rocas graníticas del macizo de Machupicchu, produciendo un verdadero enjambre de fracturas. Las medidas de microtectónica muestran diferentes familias de fracturas, destacan el sistema NO-SE, luego los sistemas E-O y NE-SO (Fig. 2). Es importante mencionar que durante las deformaciones tectónicas posteriores al emplazamiento de los granitos, los esfuerzos principalmente compresivos se han distribuido por las diaclasas y, por eso, es frecuente ver, en la mayoría de ellas, estrías de fallas en los diferentes planos. En conclusión, la combinación de fallas y diaclasas hacen que el macizo rocoso granítico de Machupicchu haya tenido un comportamiento singular y heterogéneo en las diferentes etapas de intemperismo y erosión, facilitando las condiciones para formar el caos granítico.

GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología de Machupicchu tiene un fuerte control estructural o tectónico. En efecto, se ha mostrado la existencia de dos fallas regionales NO-SE, denominadas Urubamba y Central Hidroeléctrica Machupicchu, que forman un corredor estructural dentro del cual se han originado las fallas NE-SO de Machupicchu, Waynapicchu, Foso Seco y otros. Esta distribución tectónica ha influenciado el recorrido del río Urubamba, el meandro y particularmente el graben sobre el cual fue construida la ciudad. Además, las fallas controlan las laderas empinadas, donde se desarrollan deslizamientos como el del cerro Machupicchu.

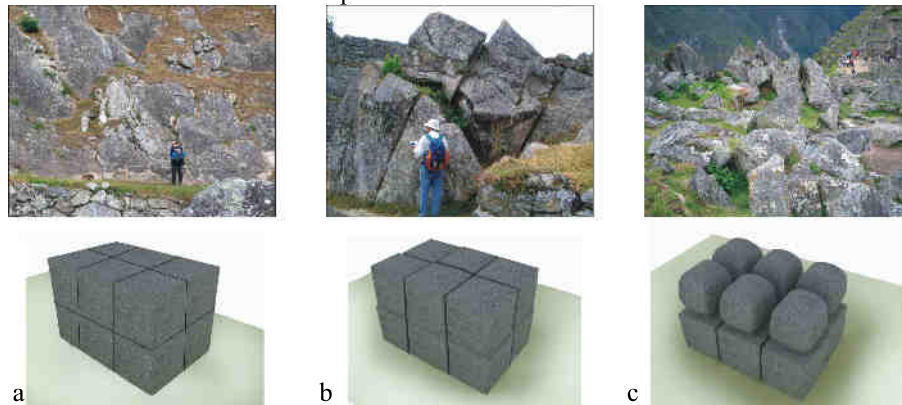


Fig. 4. Origen del caos granítico: a) granitos fracturados en bloques, b) que tienden a separarse aprovechando las fracturas y c) son erosionadas para formar el caos granítico.

En terrenos graníticos, como es el caso de la ciudad inca de Machupicchu, el paisaje controlado por fallas y diaclasas ha originado relieves particulares con apilamientos de bloques de roca, dando lugar al caos granítico. Este tipo de relieve resulta de la intersección, algo perpendicular, de los sistemas de fracturas que en este caso son tres principales: NO-SE, NE-SO, E-O que delimitan bloques de formas más o menos paralelepípedas (Fig. 4a). Los límites de estos bloques se han preformado en profundidad ya que las diaclasas son producto del enfriamiento del magma. Durante el levantamiento andino, las rocas salen a la superficie y se liberan de la carga que ejercían las masas rocosas suprayacentes al granito, siendo por lo tanto favorecidas por los efectos del intemperismo. En este contexto, las aguas de lluvias se infiltran siguiendo las fracturas (Fig. 4b), que además pueden estar alteradas con arcillas. En consecuencia, las aguas lavan o erosionan la roca y el material fino, sobre todo al nivel de los ángulos de intersección y dejan libres los bloques que van adquiriendo formas subredondeadas típicas en las rocas intrusivas (Fig. 4c). Los bloques ya redondeados o bolones formados de esta manera,

podieron entonces desprenderse, descender o caer lentamente por simple gravedad, apilándose unos sobre otros y formando cúmulos o amontonamientos conocidos como caos granítico (Fig. 4).

Antes de la llegada de los incas, la morfología de la zona tenía una depresión irregular (Fig. 5a) entre los cerros Machupicchu y Waynapicchu, controlada por las fallas NE-SO. Esta depresión forma una cumbre (montura) de dirección casi N-S, que delimita dos laderas abruptas, una oriental y otra occidental, ambas miran al río Urubamba, ubicada 500 m más abajo, por efecto del meandro.

La depresión irregular o graben se caracterizaba por ser un sitio de caos granítico (Fig. 5b), con lomas y desniveles; los incas encuentran el lugar e inician la construcción de la ciudad, limpiando los bloques muy inestables, rellenando las depresiones, como la Plaza Mayor, estabilizando las laderas del caos mediante andenerías y muros, e instalando sistemas de drenajes para evacuar las aguas de lluvia que son abundantes en la zona. Solamente después, y encima de estos sitios estabilizados, los incas iniciaron la construcción de recintos, templos y viviendas (Fig. 5c).

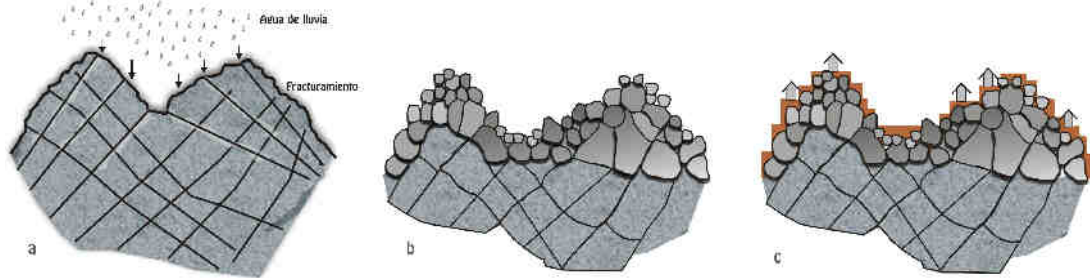


Fig. 5. Construcción de la ciudad inca de Machupicchu: a) morfología del terreno donde las aguas de lluvia penetran las fracturas y fallas, y ayudan a la gravedad a separar los bloques de granito y b) formar el caos granítico; c) los incas encuentran el sitio de caos granítico y lo estabilizan mediante andenes, muros y plataformas, para luego construir sus templos, viviendas, almacenes, etc.



Foto 1. Caos granítico en el sector conocido como La Cantera



Foto 2. Proceso de sufusión que ha causado el colapso de muros en este recinto (Conjunto 13)

LOS FENÓMENOS DE GEODINÁMICA EXTERNA

Los fenómenos que afectan a la ciudad son de geodinámica externa, cuyo origen se relaciona con el agua y la gravedad dentro del contexto geomorfológico del caos granítico (Foto 1).

La sufusión es un fenómeno que ocasiona pequeñas geoformas de colapso o hundimiento, de escala centimétrica a métrica, debido al lavado o erosión de material fino que sirve como matriz entre los bloques de granito. Esto hace que los bloques se reacomoden y se muevan, afectando a las edificaciones levantadas sobre estos, como es el caso del Torreón. Este fenómeno se presenta también en la plataforma de los caminos, en los muros y en la base de los edificios, debido a la erosión del material fino que se halla como matriz en la base de la cimentación, que ocasiona a su vez asentamientos y hundimientos (Foto 2).

La erosión superficial se origina por la escorrentía de las aguas pluviales en la superficie del suelo, y causa problemas cuando las pendientes son empinadas y no tienen vegetación, ya que las aguas

erosionan el material no consolidado presente, sea fino o ligeramente grueso. Como ejemplo, se puede citar al Intiwatana que hasta 1990 se encontraba muy expuesto, particularmente en la ladera oriental, donde la ausencia de una pared de andenería ponía en evidencia el comienzo de una fractura y un desmoronamiento peligroso por escorrentía y erosión superficial; actualmente un piso impermeable controla este problema. Otro ejemplo ocurre en el camino inca a Waynapicchu, que muestra huellas de lavado y erosión por efecto de las aguas pluviales que ponen a la luz las raíces de los árboles y arrastran importantes cantidades de suelo (Foto 3).



Foto 3. Erosión superficial en el camino inca.



Foto 4. Asentamiento en el Templo Principal

Los asentamientos son desplazamientos verticales del suelo; se originan por la sobrecarga o peso de las estructuras edificadas y los bloques de caos granítico en los suelos, que al saturarse con agua pierden su capacidad de carga, causando movimientos y reajustes de bloques. Otro caso de asentamiento ocurre donde existe caos granítico, ya que las aguas pluviales penetran por las fracturas o espacios abiertos, erosionando por sufusión parte del suelo existente, que puede ser el soporte de los bloques y entonces estos se mueven o se asientan buscando un nuevo equilibrio. Los reacomodos de bloques graníticos afectan las edificaciones allí realizadas, tal es el caso de la Puerta de las Sierpes que forma parte del Torreón y fue construida sobre un bloque de caos granítico. No obstante, el caso más emblemático en la ciudad inca es el asentamiento del muro norte del Templo Principal (Foto 4).



Foto 5. Deslizamiento en el cerro Machupicchu.



Foto 6. Reptación que afecta a las terrazas agrícolas

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelos o rocas en las laderas empinadas, debido a la gravedad y la presencia de agua. En la ciudad inca y alrededores se observan varios deslizamientos superficiales, por ejemplo, en el sector de los andenes del borde noreste de la ciudad y en el sector agrícola. En la ladera noreste del cerro Machupicchu un gran deslizamiento antiguo muestra signos locales de reactivaciones recientes que afectan al camino inca y la carretera a Machupicchu (Foto 5). La reptación se presenta muy frecuentemente en las vertientes, donde los suelos saturados en agua se desplazan muy lentamente, a diferencia de los deslizamientos que son más rápidos. Uno de estos fenómenos se observa en los andenes del sector agrícola de la ciudad de Machupicchu (Foto 6).

Los derrumbes y caída de rocas son desprendimientos de material suelto, masas o bloques de rocas, por efecto de la gravedad y que se producen en las laderas muy empinadas, relacionadas con cortes de talud o saturación de agua, los que aprovechan las fracturas preexistentes. Estos fenómenos son frecuentes en la carretera de acceso a la ciudad, como el ocurrido en 1995, o cerca de Intipunko en el año 2006 y que provocó el cierre del camino inca en ese sector (Foto 7).



Foto 7. Derrumbe del 2006 que afectó al inca, en camino el tramo Intipunko-ciudad inca.

CONCLUSIONES

La ciudad inca de Machupicchu fue fundada principalmente sobre una morfología de caos granítico, en una zona de abundantes precipitaciones pluviales, con laderas bastante inestable que los incas estabilizaron mediante andenes y muros, y solamente después comenzaron la construcción de recintos, viviendas y templos. Durante la ocupación inca, los andenes, y en general todas las construcciones, eran conservados mediante canales de drenaje dentro un sistema planificado de desagüe, que permitía la evacuación integral de las abundantes aguas pluviales. Además, las viviendas tenían techos cuyas caídas estaban integradas a los sistemas de drenajes. Sin embargo, actualmente las construcciones no tienen techo y los sistemas de drenaje inca ya no funcionan, generando los problemas de geodinámica externa. En consecuencia, las recomendaciones principales de urgente intervención son la adecuada evacuación de las aguas pluviales y evitar las infiltraciones o la erosión superficial, mediante drenajes y pisos impermeables, los que deben integrarse al sistema de drenaje inca que tiene que ser puesto en valor.

REFERENCIAS

- Carlotto, 1998. *Évolution Andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13-16°S) Pérou*. Tesis de Doctorado, Universidad de Grenoble, Francia. p. 158.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W. y Tintaya, D. 1999. Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machu Picchu. Carta Geológica Nacional INGEMMET, Boletín 127, Serie A, Lima. p. 320.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Fidel, L. 2007. La Geología en la Conservación de Machupicchu. Boletín INGEMMET., Serie I, 1, p. 350.
- Egeler, C. y De Booy, T. 1961. Preliminary Note on the Geology of the Cordillera Vilcabamba (SE Peru), with emphasis on the essentially Pre Andean Origin of the Structure. *Geologie en Mijnbouw* 40: p. 319-325.
- Kalafatovich, C. 1963. Geología de la ciudadela de Machu Picchu y sus alrededores. *Revista Universitaria* 121:217-228. Cusco, UNSAAC.