

MACHU PICCHU

Una maravilla Inca de la Arquitectura y de la Ingeniería, pero también de la Geología

JHONNY E. CASAS

Escuela de Petróleo y Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela



Vista panorámica del conjunto arqueológico de Machu Picchu. Fotografía del autor.

INTRODUCCION

Machu Picchu (en quechua, Machu Pikchu 'monte o pico viejo'), es el nombre contemporáneo que se da a un antiguo poblado incaico, construido antes del siglo XV, en la vertiente oriental de la Cordillera Central del sur del Perú. Está ubicado en el departamento del Cusco (provincia de Urubamba, distrito de Machupichu), en una cresta montañosa sobre el Valle Sagrado de los Incas, a unos 80 kilómetros al noroeste de la ciudad de Cusco.

Las montañas Machu Picchu y Huayna Picchu son parte la formación orográfica del lugar, en la Cordillera Central de los Andes peruanos. Se encuentra en la ribera izquierda del llamado Cañón del Urubamba, conocido en la antigüedad como Quebrada de Picchu. Al pie de los cerros, rodeándolos, corre el río Vilcanota-Urubamba. El sitio arqueológico incaico se encuentra a medio camino entre las cimas de ambas montañas, a 450 metros de altura por encima del nivel del valle y a 2.438 metros sobre el nivel del mar. La superficie edificada es de unos 530 metros por 200 de ancho, cuenta con 172 edificios en su área urbana.

Machu Picchu, ícono del Imperio Inca, es uno de los sitios arqueológicos más reconocidos y admirados en el mundo. Los incas integraron ingeniosamente sus construcciones en el entorno natural, aprovechando la geología particular de esta parte de la cordillera andina. (Chambers, 2020).

El entorno de Machu Picchu muestra una naturaleza impresionante: altas montañas, algunas de más de 5.000 m de altitud, valles profundos, escarpes casi verticales de más de 100 m, cañones estrechos y una vegetación propia de selva alta, el paisaje es espectacular y paradisiaco. Los arquitectos e ingenieros incas no pudieron elegir un mejor lugar para construir Machu Picchu, también llamada erróneamente la “ciudad perdida”, aunque siempre rodeada de muchos misterios. Aunque nadie lo sabe con absoluta certeza, Machu Picchu fue probablemente un importante centro religioso y lugar de retiro para la familia real inca y los altos sacerdotes.

HISTORIA DE MACHU PICCHU

Hacia 1420, durante su campaña guerrera hacia Vilcabamba, la quebrada de Picchu fue conquistada por

Pachacútec (noveno gobernante del estado Inca). El emplazamiento de Machu Picchu debió impresionar al monarca por sus peculiares características dentro de la geografía sagrada de la región, y por ello habría mandado construir allí, hacia 1420-1430, un complejo urbano con lujosas edificaciones civiles y religiosas.

Durante cientos de años después de que Machu Picchu fuera abandonado por los incas, permaneció oculto a la vista. La vegetación de la selva envolvió la ciudad, y sólo la conocían unos pocos habitantes locales, incluyendo algunas familias que cultivaban en las antiguas terrazas. Las primeras referencias directas sobre visitantes de Machu Picchu indican que Agustín Lizárraga, un arrendatario de tierras cusqueño, llegó al sitio el 14 de julio de 1902.

Hiram Bingham, un profesor estadounidense de historia en la Universidad de Yale, interesado en encontrar los últimos reductos incaicos de Vilcabamba, oyó sobre el descubrimiento de Lizárraga y finalmente llegó a Machu Picchu el 24 de julio de 1911 guiado por otro arrendatario de tierras, Melchor Arteaga, y acompañado por un sargento de la guardia civil peruana de apellido Carrasco. Encontraron a dos familias de campesinos viviendo allí, los Recharte y los Álvarez, quienes usaban las ruinas de los andenes del sur para cultivar y bebían el agua de un manantial, traída por un canal incaico que aún funcionaba. Pablo, uno de los niños de la familia Recharte en el lugar, guió a Bingham hacia la zona de construcciones, cubiertas por la maleza, quedando absolutamente impresionado. Si bien es claro que Bingham no descubre Machu Picchu en el sentido estricto de la palabra, es indudable que tuvo el mérito de ser la primera persona en reconocer la importancia de las ruinas, estudiándolas con un equipo multidisciplinario y divulgando sus hallazgos.

Machu Picchu es reconocida como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, y en 2007 fue elegido por votación como una de las Nuevas Siete Maravillas del Mundo en una encuesta global por Internet (más de 100 millones de votantes). Sus amplias terrazas, los elegantes edificios de piedra y las grandes plazas, todo ello con el dramático telón de fondo de la escarpada montaña Huayna Picchu, son un testamento de los impresionantes talentos de ingeniería y arte de los incas. La historia geológica única del desafiante sitio, combinada con un diseño y una construcción excepcional, han hecho de Machu Picchu lo que vemos hoy en día. (Chambers, 2020)

Machu Picchu fue construido en el estilo Inca clásico, con paredes de piedra seca pulida. Sus tres estructuras principales son el Intihuatana (piedra ritual o reloj solar), el Templo del Sol y el Templo de las Tres Ventanas. La mayoría de los edificios periféricos han sido reconstruidos para dar a los visitantes una mejor idea de cómo era el original. Se estima que alrededor del 70 % de Machu Picchu ya ha sido restaurado, tarea que continúa aun hoy día.

UBICACIÓN, GEOMORFOLOGIA Y CONSTRUCCION

Los Andes están dispuestos en una serie de cadenas montañosas distintas. Machu Picchu se encuentra dentro de la llamada Cordillera Central y forma parte del distrito del mismo nombre, en la provincia de Urubamba, en el departamento del Cusco, en Perú. La ciudad importante más cercana es Cusco, actual capital regional y antigua capital de los incas, a unos 110 kilómetros de allí (Figura 1), siendo el tren la forma más común y rápida de llegar a Machu Picchu desde Cusco.



Figura 1. Mapa de ubicación de Machu Picchu. Fuente: Carlotto *et al*, (2007).

El sitio está rodeado por exuberantes bosques tropicales verdes que se fusionan con las selvas de la cuenca del Amazonas. La estrecha cresta que ocupa la ciudadela conecta dos picos, Machu Picchu y Huayna Picchu. Las pendientes de la cresta descienden abruptamente unos 500 metros a ambos lados hasta el río Urubamba, que rodea el sitio por tres lados.

Las rocas graníticas grises y blancas subyacen en Machu Picchu y se utilizaron para todo el trabajo de piedra incaico en el sitio. Se estima que estas rocas se

formaron hace unos 250 millones de años, cuando América del Sur se unió a África como parte del supercontinente Gondwana, originándose a partir de un magma contenido en una gran cámara magmática situada a unos 5-10 km de profundidad. Durante millones de años, el magma se enfrió lentamente, formando las rocas que pueden verse hoy en día aflorando en la región.

En la zona de Machu Picchu se reconocen cinco tipos geomorfológicos de granitos: Granitos masivos, granitos muy fracturados y movidos por la gravedad, bloques de granitos separados, depósitos coluviales y material de relleno.

Los **granitos masivos** afloran notoriamente en los bordes de la Ciudad, especialmente en el la ladera occidental, por donde se encuentran los andenes orientados al río Urubamba. Este tipo de afloramiento rocoso se puede ver en la pirámide Intihuatana, incluso parte de andenes que rodean el Intihuatana esta construido sobre rocas fijas.

Los **granitos muy fracturados**, el agua que ingresa a las fracturas y la gravedad logran que esta roca se fracture y se separe, pero no completamente. Este tipo de granito se puede observar en el sector del Templo del Cóndor (Figura 2), y en los andenes ubicados en la parte superior de la Plaza Mayor.

Los bloques de **granitos separados**, también conocidos como el “Caos Granítico”, están totalmente separados del afloramiento, estos se pueden apreciar en la zona de la llamada “Cantera”. En este lugar muy posiblemente los incas explotaron el granito. El Torreón o Templo del Sol esta construida sobre “caos granítico”, y es de admirar el trabajo realizado por los incas para lograr la estabilización de los bloques de granito que conforman dicha estructura.

Los **depósitos coluviales**, están compuesto por la parte superficial de los suelos que varían de espesor desde centímetros hasta metros, compuestos de material arcilloso y bloques producto del desgaste y desprendimiento de las rocas. Este tipo de material se puede observar en el sector de los Andenes (Figura 3).

El **material de relleno** esta presente en la zona de las plataformas, sistemas de andenes, que ocupan gran parte de la Ciudad Inca, el material de relleno está

compuesto por grava arenosa, trabajada por los incas para rellenar la base de los andenes (Figura 3).



Figura 2. Templo del Cóndor. Obsérvese como los Incas usaron un gran bloque fracturado de granito para construir el templo e incorporaron su forma natural. Fotografía del autor.

Otro proceso geomorfológico importante que se produce en la región es la tendencia a los deslizamientos de tierra, ya que las escarpadas laderas de las montañas de la región son inestables. Las elevadas precipitaciones estacionales (casi 2.000 mm al año) están descomponiendo lentamente los minerales de las rocas graníticas, proporcionando material susceptible a los deslizamientos. Al situar Machu Picchu en una cresta, los constructores incas protegieron la ciudad de estos peligros. El emplazamiento en la cima de la cresta también proporcionó excelentes defensas naturales.

La Ingeniería Inca, consistió en estabilizar, las rocas con la construcción de plataformas, uso de rodillos, sogas y mucha mano de obra, lo que significó, una especial organización de trabajo. Para estabilizar el terreno, construyeron andenes o terrazas con mucha precisión y herramientas adecuadas, como martillos, cinceles,

combos, etc. Para luego construir sus viviendas, caminos, puentes, etc. En la zona de canteras en la Ciudad de Machu Picchu, se encuentran rocas talladas, listas para la construcción, previamente fueron trabajadas ya en Machu Picchu recibían el acabado final.



Figura 3. Conjunto de andenes cuya función principal es la protección de las laderas, y servir como terrazas agrícolas. Fotografía del autor.

Un elemento interesante de mencionar es que la región esta tectónicamente afectada por la presencia de numerosas fallas. El conjunto incluye las fallas de Machu Picchu y Huayna Picchu, donde el primero está orientado de noreste a suroeste; y el segundo conjunto, está orientado de noroeste a sudeste. Estos conjuntos de fracturas, fueron factores críticos en la selección del sitio y la construcción exitosa de Machu Picchu, como se describirá en capítulos posteriores.

CANTERAS, MANANTIALES, Y LA PARTE OCULTA DE LA CIUDAD

Los constructores incas deben haber examinado diversos lugares de montaña antes de seleccionar la estrecha cresta de Machu Picchu. Una fuente de agua confiable para la ciudad era un requisito esencial y es inusual encontrar una, tan alta en las montañas. Fortuitamente, la roca fracturada a lo largo de la falla de Machu Picchu permitió que el agua de lluvia se infiltre y se almacene bajo tierra. Así, luego fluye hacia la superficie como un manantial perenne. El rendimiento de este manantial fue mejorado por un sistema de recolección de agua de bloques de piedra, bien diseñado, y que todavía está en funcionamiento hoy en día. Una serie de largos canales y una impresionante secuencia de 16 fuentes de piedra, proporcionaban el

agua ceremonial y doméstica que caía en cascada a través de la finca real. El agua más pura, en la parte superior de la serie de fuentes, estaba situada junto a la residencia del gobernante inca.

Una enorme cantidad de piedra de alta calidad era esencial para construir la ciudad. Las rocas graníticas son extremadamente duras y fuertes, por lo que eran ideales para la construcción. Una vez más, de manera fortuita, las grietas formadas durante la orogénesis han fracturado ampliamente la roca, creando una conveniente cantera natural de bloques graníticos, de los cuales muchos se encontraban “pre-cortados” en tamaños útiles. Sin esa fuente de roca adecuada y ubicada en la cima de la cresta, la construcción habría sido sumamente difícil.

Hay mucho más de lo que se ve a simple vista en Machu Picchu. Uno de los hechos más sorprendentes de la ciudad, es que se estima que un 60% del esfuerzo total de construcción está oculto bajo tierra. Las empinadas laderas de la montaña se estabilizaron con la construcción de extensas terrazas, que abrieron el espacio para el uso agrícola y la construcción de edificios. Las terrazas fueron cuidadosamente ensambladas detrás de fuertes muros de bloques de roca, y con una capa inferior de cantos rodados, una capa media de grava y una capa superior de tierra. Estos profundos cimientos, y un extenso sistema de drenaje construido en las terrazas, eran esenciales para soportar las frecuentes y fuertes lluvias. El agua de lluvia que se filtraba a través de las terrazas podía drenar hacia abajo por la ladera de la montaña con una mínima erosión del suelo. Sin esta preparación del terreno, el deterioro se habría producido rápidamente, asentándose los rellenos de las terrazas y desmoronándose los edificios.

GEOLOGIA DE MACHU PICCHU

La ciudad inca Machu Picchu fue construida, sobre el batolito que lleva el mismo nombre, en plena cordillera de Vilcabamba, nominación regional que toma la vertiente oriental de la Cordillera Central de los Andes del sur del Perú. La cordillera de Vilcabamba geológicamente está compuesta fundamentalmente, por rocas metamórficas del Paleozoico y granitoides permo-triásicos (Figura 4), cuyos plutones intruyen rocas del Paleozoico inferior y, en contados casos, del Paleozoico superior. El relieve elevado y accidentado, así como la presencia de valles en U, de glaciares y morrenas, de su vegetación de selva alta son

características que identifican la cordillera de Vilcabamba, en la región de Machu Picchu, como un ecosistema muy particular y concreto (Mendoza, 2013).

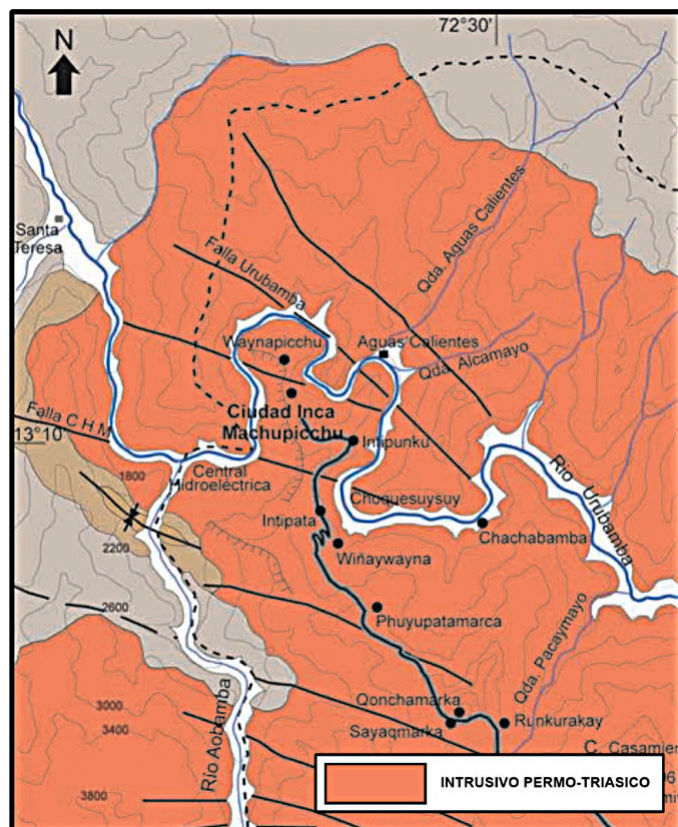


Figura 4. Mapa geológico de Machu Picchu y alrededores. Modificado de Carlotto et al, (2007).

El conjunto arquitectónico de Machu Picchu se encuentra en un área periglacial, consta de dos partes bien definidas: una urbana y otra agrícola. La parte urbana, casi el 100%, edificada de y sobre granito, se construyó sobre una meseta de origen glacial situada entre las montañas Huayna Picchu y Machu Picchu, en medio de lo que se conoce como el “caos granítico”. Esta ubicación facilitó los trabajos de construcción ya que no se tuvo que transportar el material rocoso necesario desde grandes distancias, tal como hicieron los incas en otros sitios importantes. El caso de Machu Picchu fue realmente del batolito directamente al monumento. Se reconoce así que el batolito de granito fue una cantera natural (Mendoza, 2013).

El estudio de los granitos de la ciudad de Machu Picchu revela que están formados por sienogranitos (Figura 5) y monzogranitos, que pertenecen a la serie calcoalcalina. Al granito de Machu Picchu se le ha determinado una edad radiométrica de 246 ± 10 Ma. (U/Pb) y de 256 ± 10 Ma. por Rb/Sr (Mendoza, 2013)

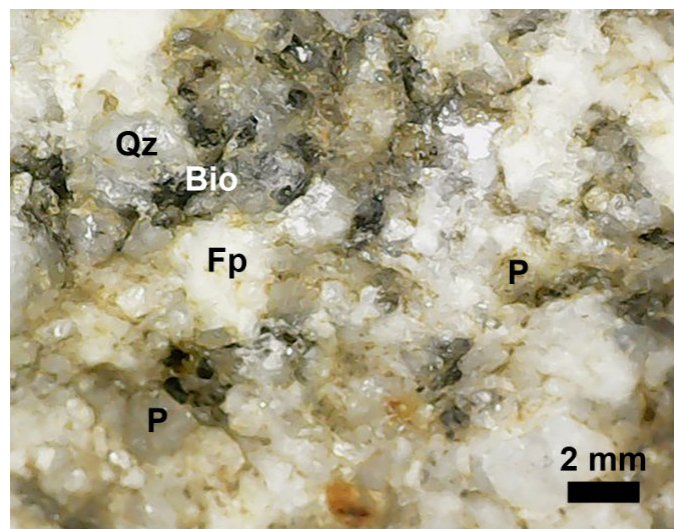


Figura 5. Muestra de mano del sienogranito típico de la zona de la “Cantera”, siendo Feldespato potásico (Fp), Plagioclasa (P), Cuarzo (Qz) y Biotita (Bio), sus componentes principales. Muestra del autor.

El batolito de Machu Picchu tiene una composición bastante homogénea: ortosa y/o microclino, plagioclasas del tipo andesina-oligoclasa y cuarzo como minerales principales (Figuras 5 y 6). El mineral ferromagnesiano más importante es la biotita, la cual está siempre presente, notándose a simple vista. Se podría decir que la presencia de la biotita constituye una característica especial del batolito de Machu Picchu y, en general, de estos batolitos permo-triásicos. La esfena, es el mineral accesorio que más destaca y aparece, algunas veces, incluso como fenocristales con formas euhedrales y bordes muy bien marcados. La sericita, la clorita y la epidota, como asociación profilítica hidrotermal de débil a moderada, aparece también muy a menudo. Los minerales accesorios son el apatito y el zircón. El batolito de Machu Picchu tiene una forma alargada en dirección N-S y una superficie aproximada de 240 km². Los altos picos nevados de la región, como el Salcanta y (6.271 m.) y el Huamantay (5.473 m.) forman parte del batolito de Machu Picchu.

PETROGRAFÍA DEL GRANITO

Examinadas a nivel macroscópico, las rocas son masivas, con textura fanerítica a veces pegmatítica de grano grueso, leucocratas, compuestas principalmente por ortoclasa, plagioclasa y cuarzo; estas rocas a veces contienen xenolitos de dioritas. Al observarlas bajo el microscopio, y clasificarlas utilizando el diagrama cuarzo-plagioclasa-feldespato potásico Q-P-F (Figura 6), encontramos rocas de diferente naturaleza petrográfica, pero que corresponden esencialmente a granitos, luego granodioritas, cuarzomonzodioritas,

cuarzomonzonitas, y con menor frecuencia las cuarzosenitas y granitos alcalinos (Carlotto *et al*, 2007).

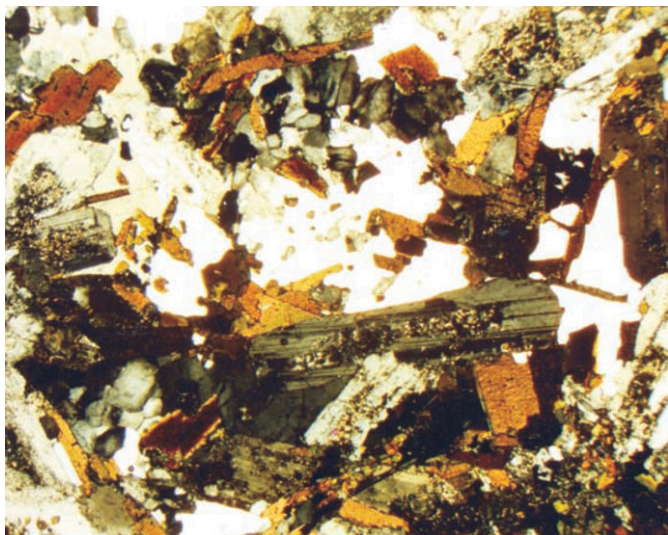


Figura 6. Monzonogranito del macizo de Machu Picchu compuesto de ortoclasa, plagioclasa alterada a sericita y arcillas, cuarzo y biotita alterada a clorita. Ampliación 8X (Nicoles cruzados). Fuente: Carlotto *et al*, (2007).

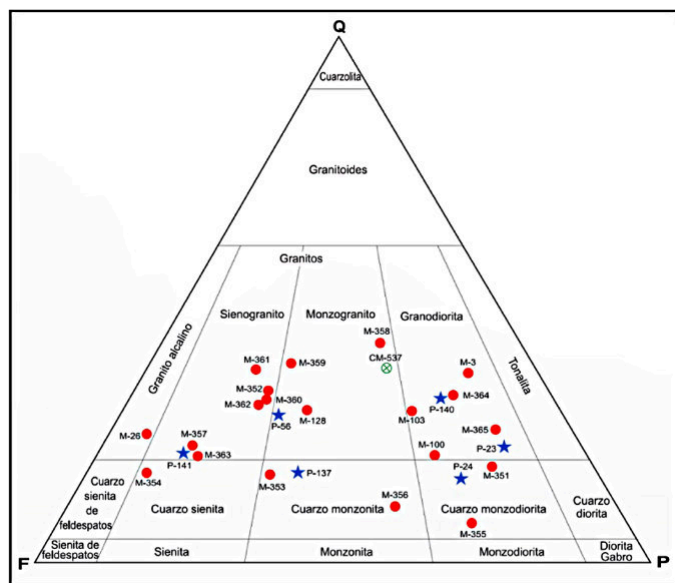


Figura 7. Diagrama de cuarzo-plagioclasa-feldespato potásico (Q-P-F) de Streckeisen (1976), mostrando la clasificación de numerosas muestras analizadas por Carlotto *et al*, (2007) en el batolito de Machu Picchu.

MACHU PICCHU FUE CONSTRUIDO INTENCIONALMENTE SOBRE FALLAS

Los granitos de Machu Picchu están fuertemente fracturados por sistemas de fallas y diaclasas, que muestran tres direcciones principales: NO-SE, NE-SO y E-O. En general, los buzamientos de las fracturas son altos, con medidas entre 50 y 70°; donde estas fracturas son más o menos ortogonales y favorecen la

desintegración de los bloques graníticos, ayudados por la acción del agua y la gravedad. El granito usado por los incas para la construcción, constituye un buen material tanto por su composición como por su estructura (cortado por fracturas), lo que ha permitido tanto una separación natural como también artificial en bloques paralelepípedos de diversos tamaños (Carlotto *et al*, 2007).

En el 2019, Rualdo Menegat, de la Universidad Federal Rio Grande del Sur (Brasil), publicó, utilizando una combinación de imágenes satelitales y mediciones de campo, un mapa mostrando una densa red de fracturas y fallas que se cruzan debajo de Machu Picchu. Su análisis indicaba que estas características variaban ampliamente en escala, desde pequeñas fracturas visibles en rocas individuales hasta grandes lineamientos de 175 kilómetros de largo que controlan la orientación de algunos de los valles de los ríos de la región. Menegat descubrió que en el área, algunas de estas fallas están orientadas hacia el noreste-suroeste y otras tienden hacia el noroeste-sureste, colectivamente crean una forma de "X" cruzándose debajo de Machu Picchu.

El cartografiado efectuado por Menegat (2019), sugiere que los sectores urbanos del casco principal y los campos agrícolas circundantes, así como edificios y escaleras, están intencionalmente orientados a lo largo de los sistemas de fallas. El diseño arquitectónico de la ciudad, refleja claramente la matriz de fracturas subyacente al lugar. Estos resultados indicarían que la red subyacente de fallas y fracturas fueron primordiales para la construcción de Machu Picchu. Como maestros de la roca, los Incas aprovecharon los abundantes materiales de construcción existentes en la zona, y el intenso fracturamiento redujo en gran medida la energía necesaria para tallarlas.

La red de fallas de Machu Picchu, además de ayudar a dar forma a los bloques de piedra, probablemente ofreció a los Incas ventajas adicionales. La principal es que era un verdadero manantial de agua potable, ya que dicha red de fallas y fracturas canalizaban el agua del deshielo y el agua de lluvia directamente al lugar. La construcción de Machu Picchu en una zona tan alta también lo protegió de avalanchas y deslizamientos de tierra, riesgos muy comunes en este entorno alpino con pendientes tan elevadas.

Estas fallas y fracturas además ayudaron a drenar la ciudad durante las intensas tormentas de lluvia que prevalecen en la región en determinadas épocas del año. Menegat (2019) concluye que muy probablemente alrededor del 60-70% del trabajo para levantar la ciudad, involucró la construcción de drenajes subterráneos. Las fracturas preexistentes ayudaron a este proceso y a la larga contribuyeron a su notable conservación. Así, Machu Picchu muestra claramente que la civilización inca fue un imperio que usó su conocimiento natural de las rocas fracturadas.

ALGUNAS IMÁGENES ADICIONALES DEL COMPLEJO ARQUITECTÓNICO DE MACHU PICCHU



Figura 8. Fachada del Templo de las 3 Ventanas, hacia la Plaza Mayor. Fotografía del autor.

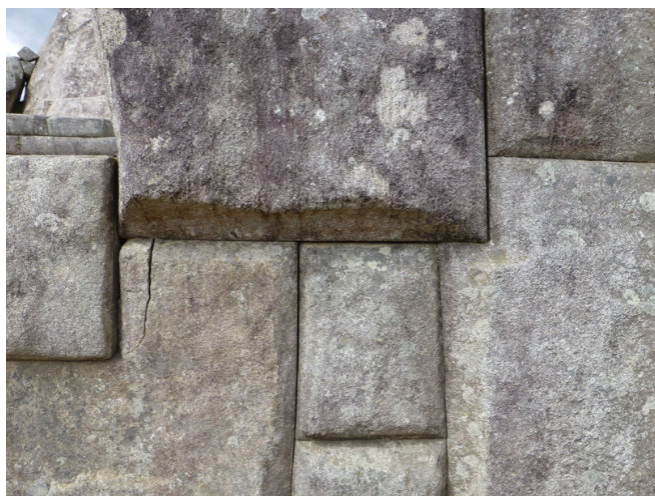


Figura 9. Detalle del encaje perfecto de los bloques del Templo de las 3 Ventanas. Fotografía del autor.



Figura 10. Vista al fondo de la montaña de Huayna Picchu. También al fondo, pero a la izquierda, la pirámide escalonada de Intihuatana. Se observan además en primer plano central e izquierdo numerosos bloques grandes de granito.

Fotografía del autor.



Figura 11. El Torreón o Templo del Sol, única estructura circular en todo el complejo. Fotografía del autor.



Figura 12. El autor sobre un andén con vista panorámica de la mayor parte del complejo arquitectónico de Machu Picchu.



Figura 13. Vista panorámica de la Plaza Mayor de la ciudad de Machu Picchu, con la montaña Huayna Picchu al fondo a la izquierda. Fotografía del autor.

REFERENCIAS

- CARLOTTO, V., CARDENAS, J. Y FIDEL, L. (2007) La Geología en la Conservación de Machu Picchu. *Boletín INGEMMET*, Serie I Patrimonio y Geoturismo N° I, 305 p.
- CHAMBERS, R. (2020) Machu Picchu: Los Incas eligieron esta cresta por su geología. Recuperado el 3 de junio del 2025 de: <https://www.gondwanatalks.com/l/geologia-de-machu-picchu/>
- MENDOZA, J. (2013). Del Batolito a un Monumento: Machu Picchu. *Studia Geologica Salmanticensis*, 49 (2): 157-190 <https://revistas.usal.es/historico/index.php/0211-8327/article/view/14214/14617>
- MENEGAT, R. (2019). How Incas used geological faults to build their settlements. *GSA Annual Meeting*, Phoenix, Arizona, USA. Paper No. 148-9

REFERENCIAS GENERALES

- https://es.wikipedia.org/wiki/Machu_Picchu
- https://viajes.nationalgeographic.com.es/a/machu-picchu-explorando-ciudad-perdida-incas_16558
- https://historia.nationalgeographic.com.es/a/machu-picchu-fue-construido-menos-30-anos-antes-que-se-creia_17116
- <https://www.nationalgeographicla.com/historia/2023/07/4-curiosidades-de-machu-picchu-uno-de-los-lugares-mas-emblematicos-de-peru>
- https://historia.nationalgeographic.com.es/a/fabuloso-descubrimiento-machu-picchu_18663
- <https://www.machupicchu.gob.pe/historia/>

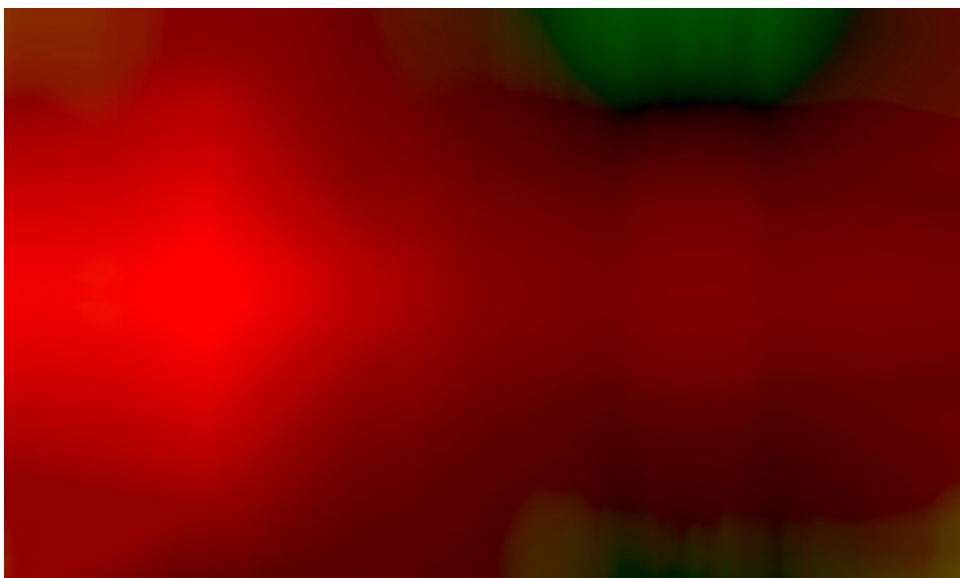


jcasas@geologist.com

Jhonny E. Casas es Ingeniero Geólogo graduado de la Universidad Central de Venezuela, y con una maestría en Sedimentología, obtenida en McMaster University, Canadá. Tiene 38 años de experiencia en geología de producción y exploración, modelos estratigráficos y secuenciales, caracterización de yacimientos y estudios integrados para diferentes cuencas en Canadá, Venezuela, Colombia, Bolivia, Ecuador y Perú.

Autor/Co-autor en 60 publicaciones para diferentes boletines y revistas técnicas, como: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Geophysics, The Leading Edge, Asociación Paleontológica Argentina, Paleontology, Journal of Petroleum Geology, Academia de Ciencias, Academia de Ingeniería y Caribbean Journal of Earth Sciences; incluyendo presentaciones en eventos técnicos: AAPG, SPE, CSPG-SEPM y Congresos Geológicos en Venezuela y Colombia, así como artículos históricos en el boletín AAPG Explorer.

Profesor de Geología del Petróleo (1996-2004). Profesor de materias de postgrado tales como: Estratigrafía Secuencial, Modelos de Facies y Análogos de afloramiento para la caracterización de yacimientos (2003-2025), en la Universidad Central de Venezuela. Mentor en 12 tesis de maestría. Representante regional para la International Association of Sedimentologist (2020-2026) y ExDirector de Educación en la American Association of Petroleum Geologists (AAPG) para la región de Latinoamérica y del Caribe (2021-2023). Advisory Counselor para AAPG LACR (2023-2026).



**Gracias a la memoria se da en los hombres
lo que se llama experiencia.**

Aristóteles