



Microtomografía de Rayos X: Ejemplos para su aplicación en Geociencias

Gert Heuser*¹, Gloria Arancibia^{1,2}, Loreto Muñoz³

¹ Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

² Centro de Nanotecnología en Materiales Avanzados CIEN, UC, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

³ Departamento de Química y Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avenida Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

* email: gkheuser@uc.cl

Resumen. Con el objetivo de conocer mejor la arquitectura interna en tres dimensiones de rocas y minerales, en este trabajo se realizó una evaluación de la capacidad del Microtomógrafo de Rayos X (MicroCT, *computed microtomography*) con este fin. Esta técnica permite distinguir diferencias de densidades de materiales estructurales entre componentes de una muestra de unos pocos centímetros de tamaño. Se analizaron tres muestras de roca constituidas por elementos de significativa diferencia de densidad: una pómez, una andesita amigdaloidal y un pórfido andesítico con vetillas de sulfuros. Para cada una de ellas, la captura, reconstrucción y análisis de imágenes se llevó a cabo con distintas resoluciones, evaluando las ventajas y desventajas de cada una de las configuraciones. Los resultados preliminares sugieren que la configuración óptima es la de resolución intermedia, debido a que permite un manejo adecuado de información, en un tiempo razonable. El resultado final es la reconstrucción en 3D de los constituyentes de la roca con la siguiente capacidad de discriminación: a) en la pómez se distingue la masa fundamental, los poros y los microcristales de plagioclasa; b) en la andesita se distingue fenocristales de plagioclasa, masa fundamental, amígdalas rellanas de minerales hidrotermales y un mineral de alta densidad no identificado c) en el pórfido se distingue masa fundamental y pirita/calcopirita en vetillas y diseminado. Estos resultados sugieren una aplicación directa de esta técnica en problemas geológicos a esta escala de trabajo, tales como estimación de porosidad y permeabilidad y definición de estructura interna en 3D de las rocas, entre otros.

Palabras Claves: Microtomografía de Rayos X (MicroCT), rocas, porosidad, permeabilidad, estructura 3D

1 Introducción

La tomografía computarizada de Rayos X (CT), ha sido principalmente utilizada en el ámbito médico, en estudios de estructura de huesos y tejidos humanos. En las últimas décadas esta técnica se ha llevado a otras disciplinas, entre ellas las Geociencias (e.g. Carlson y Denison, 1992, Landis et al., 2000, Géraud et al., 2003). El principio básico de la CT, es la detección de contraste de densidad de materiales, como respuesta a la excitación con rayos X. El resultado es una imagen de contraste de densidades en 2 dimensiones, que puede ser calibrada para la identificación y la visualización de la distribución de los objetos de distinta

densidad en una sección de la muestra de estudio. Si se realiza una secuencia semicontinua de imágenes, se puede lograr la reconstrucción virtual del objeto en 3 dimensiones.

El empleo de esta técnica y de su sucesor de alta resolución, conocida como microtomografía de Rayos X (MicroCT), representa una herramienta de gran utilidad en Geociencias debido a que permite la visualización y cuantificación de la estructura interna (3D) de diversos tipos de materiales. Si bien todavía no existe un uso masivo de ella, algunos ejemplos son estudios de estimación de permeabilidad y de porosidad primaria y secundaria (Anisofira y Latief, 2015), además de la estructura de porosidad y visualización la heterogeneidad en la matriz de muestras de roca y suelo (Allan et al., 2002).

En este contexto, la cuantificación de parámetros tales como porosidad y permeabilidad en rocas por ejemplo, es relevante por cuanto tienen un rol fundamental en la comprensión de procesos asociados a la circulación y transporte de fluidos en la corteza terrestre. A su vez, estos fenómenos tienen aplicaciones directas en la exploración de campos geotermales, depósitos minerales, acuíferos e hidrocarburos (Cnudde et al., 2006). La técnica de Micro CT permite analizar muestras de rocas y minerales de un tamaño entre 1 mm y 7 cm, con una resolución de 1080x672 y un tamaño de pixel de 26 μm ó una resolución de 2016x1344 y un tamaño de pixel de 13 μm . Entonces, esta caracterización puede entregar importante información acerca de la arquitectura de la roca a escala de centímetros a micras, lo que puede ser extrapolado de manera autosimilar a otras escalas geológicas de trabajo (e.g. Jensen et al., 2011).

Este trabajo tiene por objetivo evaluar la capacidad del Microtomógrafo de Rayos X (MicroCT, *computed microtomography*) para la distinción de distintos objetos geológicos y definir una configuración óptima para este tipo de investigación.

2 Metodología y Materiales

El análisis se realizó mediante el sistema de microtomografía de alta energía (Skyscan/Bruker, modelo

1272, Fig. 1), recientemente adquirido por la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y localizado en el Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos.

El sistema fue calibrado de dos maneras, una para operar a 100kV de energía y corriente de 100 μ A, y otra a 70 kV de energía y corriente de 142 μ A. El proceso consta de varias etapas: adquisición, reconstrucción, visualización 3D, análisis y rendering 3D. A través del uso del equipo se obtienen imágenes 2D/3D, cortes transversales y secciones específicas del objeto de estudio. Durante este proceso, se realizan correcciones para minimizar el efecto de los artefactos (*Ring artifact, noise, beam hardening and scatter*, entre otros) mediante filtros metálicos de cobre de 0,11 mm de espesor y/o aluminio de 0,5 mm de espesor, o una combinación de ambos, para cada configuración del sistema respectivamente (de Castro et al., 2012).

Las muestras utilizadas en este estudio corresponden a: una pómez, una andesita amigdaloidal y un pórfido andesítico con vetillas de sulfuros (Fig. 2). Estas muestras fueron seleccionadas en base a los contrastes de densidad de sus diferentes constituyentes. La pómez corresponde a una muestra de baja densidad y alta porosidad, en la cual el “aire” de sus poros pasa a ser el constituyente de mínima densidad. La andesita amigdaloidal fue seleccionada para la visualización y contraste entre fenocristales y masa fundamental además del/los minerales de relleno de amígdalas. Finalmente, el pórfido andesítico tiene una alteración biotítica en la masa fundamental y sulfuros en vetas y diseminado, que es este caso corresponden a los objetos de mayor densidad. Las dimensiones de las muestras son las siguientes: pómez (1,0x1,0x1,5 cm), andesita (1,2x1,0x1,2 cm) y pórfido (1,1x1,1x2,0 cm).

Posterior al proceso de adquisición (en total 315 imágenes en baja resolución y 914 en alta, por muestra), las imágenes son reconstruidas mediante el software Nrecon®, versión 1.6.9.18, el cual integra las imágenes para formar un modelo 3D basado en el algoritmo de Feldkamp et al., (1984). La visualización de la reconstrucción se realiza mediante el software CTvox® (v. 3.0), mientras que para el procesamiento y análisis de imágenes se utiliza el software CTan® (v.1.14).

En esta primera etapa fue posible distinguir poros, minerales formadores de roca, minerales secundarios de baja y alta densidad, y su geometría en 3D. Las próximas etapas de este trabajo consisten en lograr cuantificar de manera precisa valores de porosidad y sus aspectos geométricos (tamaño, conectividad, etc.) y calcular el volumen real de los distintos constituyentes mediante el software CTan® (v.1.14).

3 Resultados Preliminares y Discusión

Mediante escaneo de alta energía MicroCT se generaron modelos virtuales 3D de cada una de las muestras (Fig. 3).

La primera muestra corresponde a pómez de alta porosidad, en la cual es posible distinguir mediante modificación de bandas de color RGB fenocristales de plagioclasa y matriz. Por su parte, la muestra correspondiente a andesita amigdaloidal fue escaneada a alta y baja resolución espacial (tamaño de pixel 13 μ m y 26 μ m, respectivamente) distinguiéndose amígdalas rellenas de al menos tres minerales de distinta densidad, fenocristales de plagioclasa y un mineral de alta densidad el cual probablemente corresponda a magnetita. Por su parte, en la muestra de pórfido es posible distinguir matriz, y pirita/calcopirita en vetas y diseminada. Los parámetros utilizados son resumidos en la Tabla 1, en donde destaca el tiempo de escaneo resolución intermedia de la andesita amigdaloidal (2016x1344 pixeles), además cabe señalar que en máxima resolución (4032x2688 pixeles) este tiempo se extiende a 11 horas, lo que hace demasiado costoso el análisis. Sin embargo, de Castro et al. (2012) señala que al reducir el tamaño del pixel se logra una optimización del proceso de captura y análisis, sin una pérdida relevante de información.

Del análisis de alta energía MicroCT a baja y alta resolución, es posible distinguir en las muestras analizadas componentes minerales que a escala macroscópica no es posible distinguir, tal es el caso de fenocristales de plagioclasa en el caso de la pómez, y en el caso de la andesita amigdaloidal se distinguió magnetita, y tres minerales distintos como relleno de amígdalas. En el pórfido andesítico se distingue calcopirita que ocurre tanto en vetas como diseminado, lo que es una buena herramienta para cuantificar el volumen de mineral que precipitó en la porosidad intrínseca de la roca (primaria) respecto al volumen de calcopirita que rellena fracturas (porosidad secundaria, Fig. 3 d-e). No obstante, en este caso no fue posible distinguir la mineralogía de alteración presente correspondiente a la biotita secundaria posiblemente, debido a que ésta no presenta un contraste de densidad notorio con los componentes originales de la roca (densidad 3,09 g/cm³).

4 Conclusiones y Trabajo futuro

La técnica 3D microCT es adecuada para la visualización de los componentes minerales de distintos tipos de roca, permitiendo distinguir minerales que a escala macroscópica no es posible reconocer. Sin embargo, cuando los componentes de una roca son de densidades similares se dificulta la identificación de éstos. Además es una herramienta útil para estudios de porosidad tanto primaria como secundaria, lo que en el caso de precipitados minerales puede permitir determinar el volumen asociado a cada tipo de porosidad. Las diferencias observadas a distintas resoluciones señalan que a una resolución espacial baja (tamaño de pixel 26 μ m) permite una buena identificación de minerales y de la estructura de porosidad, lo que tiene como ventaja un tiempo de escaneo reducido respecto a una mayor

resolución y un mejor manejo de las imágenes ya que entrega como resultado archivos de menor tamaño (1,7 GB). En etapas posteriores de este trabajo se espera cuantificar de manera precisa valores de porosidad, aspectos geométricos (tamaño, conectividad) y volumen real de los constituyentes de la roca, para definir la estructura interna completa en 3D.

5 Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al equipamiento recientemente adquirido por la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, mediante el proyecto FONDEQUIP EQM130028 (CONICYT). Esta es una contribución al Núcleo Milenio NC130065 “Millennium Nucleus for Metal Tracing Along Subduction”.

REFERENCIAS

Anisofira, a., Latief, F., 2015. Permeability Estimation of Crack Type and Granular Type of Pore Space in a Geothermal Reservoir Using Lattice Boltzmann Method and Kozeny-Carman Relation. Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia.

Carlson, W.D., Denison, C., 1992. Mechanisms of porphyroblast crystallisation: results from high-resolution computed X-ray tomography. *Science* 257, 1236–1239.

Cnnude, V., Masschaele, B., Dierick, M., Vlassenbroeck, J., Van Hoorebeke, L., Jacobs, P., 2006. Recent progress in X-ray CT as a geosciences tool. *Applied Geochemistry* 21. 826–832.

de Castro, A., Lima, I., Tadeu, R., 2012. Reservoir Rock Microstructure Evaluation by X-ray Microtomography. *ICQNM 2012: The Sixth International Conference on Quantum, Nano and Micro Technologies*.

Géraud, Y., Surma, F., Mazerolle, F., 2003. Porosity and fluid flow characterization of granite by capillary wetting using X-ray computed tomography. In: Mees, F., Swennen, R., Van Geet, M., Jacobs, P. (Eds.), *Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences*, Spec. Publ., 215. Geol. Soc., London, pp. 95–106.

Jensen, E., Cembrano, J., Faulkner, D.F., Veloso, E., Arancibia, G., 2011. Development of a self-similar strike-slip duplex system in the Atacama Fault system, Chile. *Journal of Structural Geology* 33, 1611–1626.

Feldkamp, L.A., Davis, L., Kress, J., 1984. Practical cone beam algorithm. *J. Opt. Soc. Am.* 1, 612–619.

Landis, E.N., Petrell, A.L., Lu, S., Nagy, E.N., 2000. Examination of pore structure using three-dimensional image analysis of microtomographic data. *Concr. Sci. Eng.* 2, 162–169.



Figura 1. Sistema de microtomografía de alta energía Skyscan/Bruker, modelo 1272.



Figura 2. Muestras analizadas. De izquierda a derecha: pómez, andesita amigdaloidal y pórfido andesítico. Escala en centímetros.

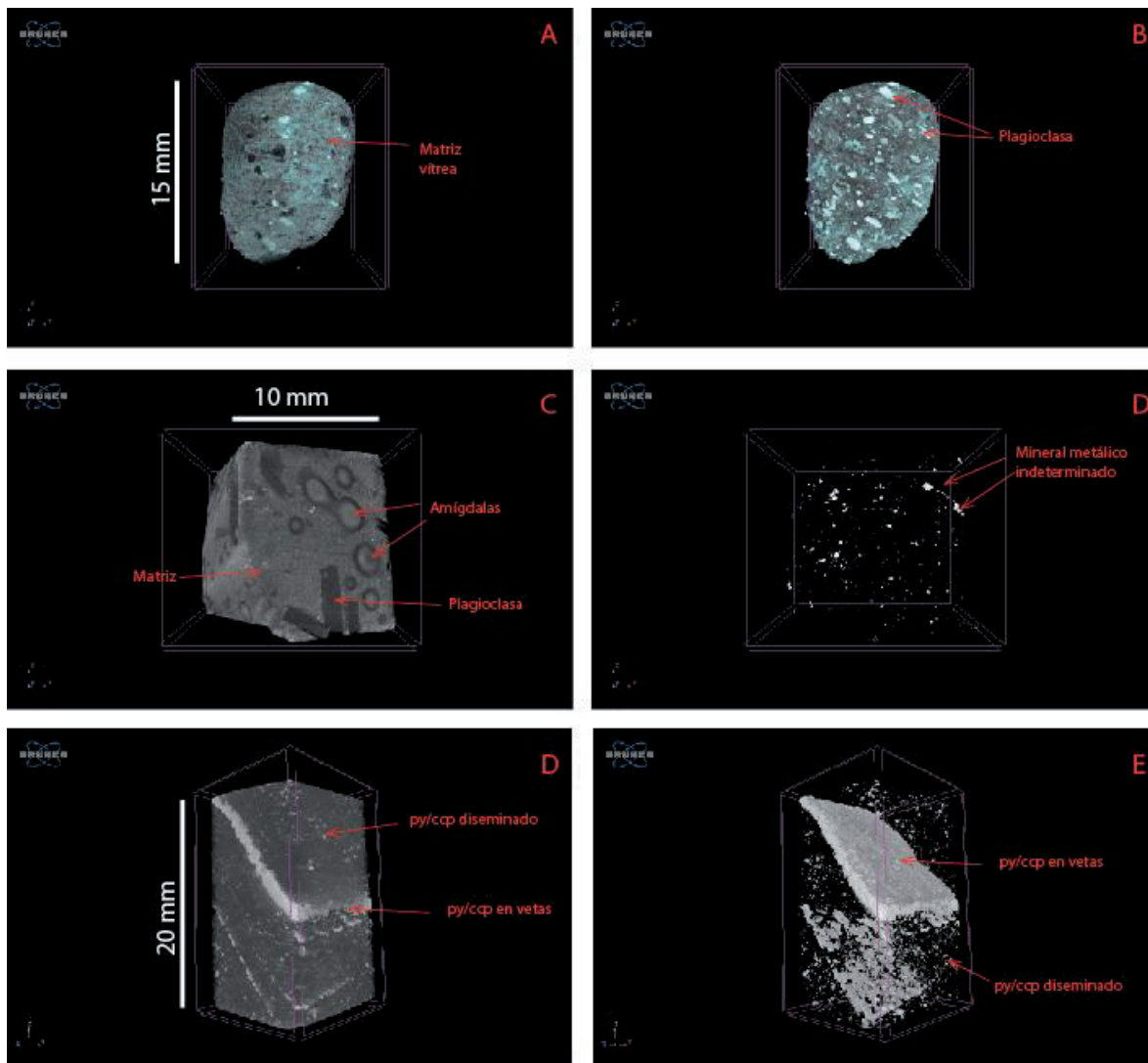


Figura 3. Reconstrucción 3D de las muestras analizadas y realce de algunos de sus componentes. a y b) Pómez; c y d) Andesita amigdaloidal d y e) Pórfido andesítico.

Tabla 1. Parámetros utilizados en cada muestra, notar la diferencia en el tamaño de pixel y tiempo de escaneo en la muestra andesita (resolución intermedia).

ID muestra	Tamaño de pixel (μm)	Tiempo de Escaneo (min)	Distancia Fuente/Objeto (mm)
Pómez	26,00	28	196,69
Pórfido	26,50	43	200,49
Andesita (baja resolución)	26,49	43	200,45
Andesita (resolución intermedia)	13,24	199	200,45