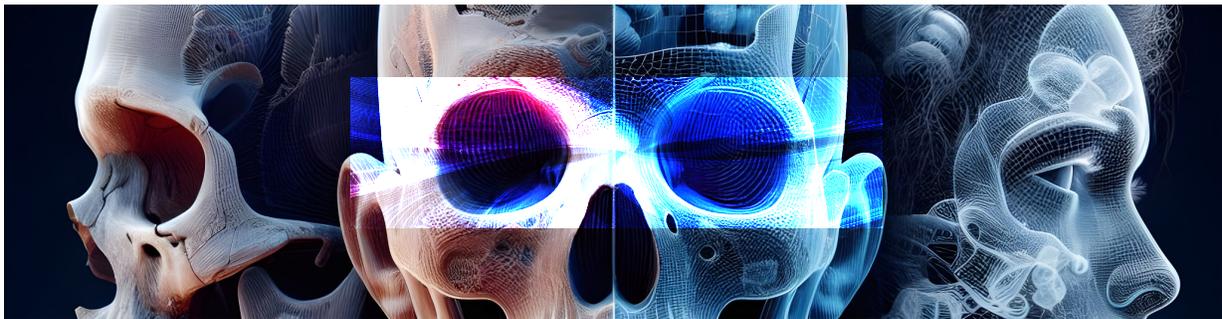
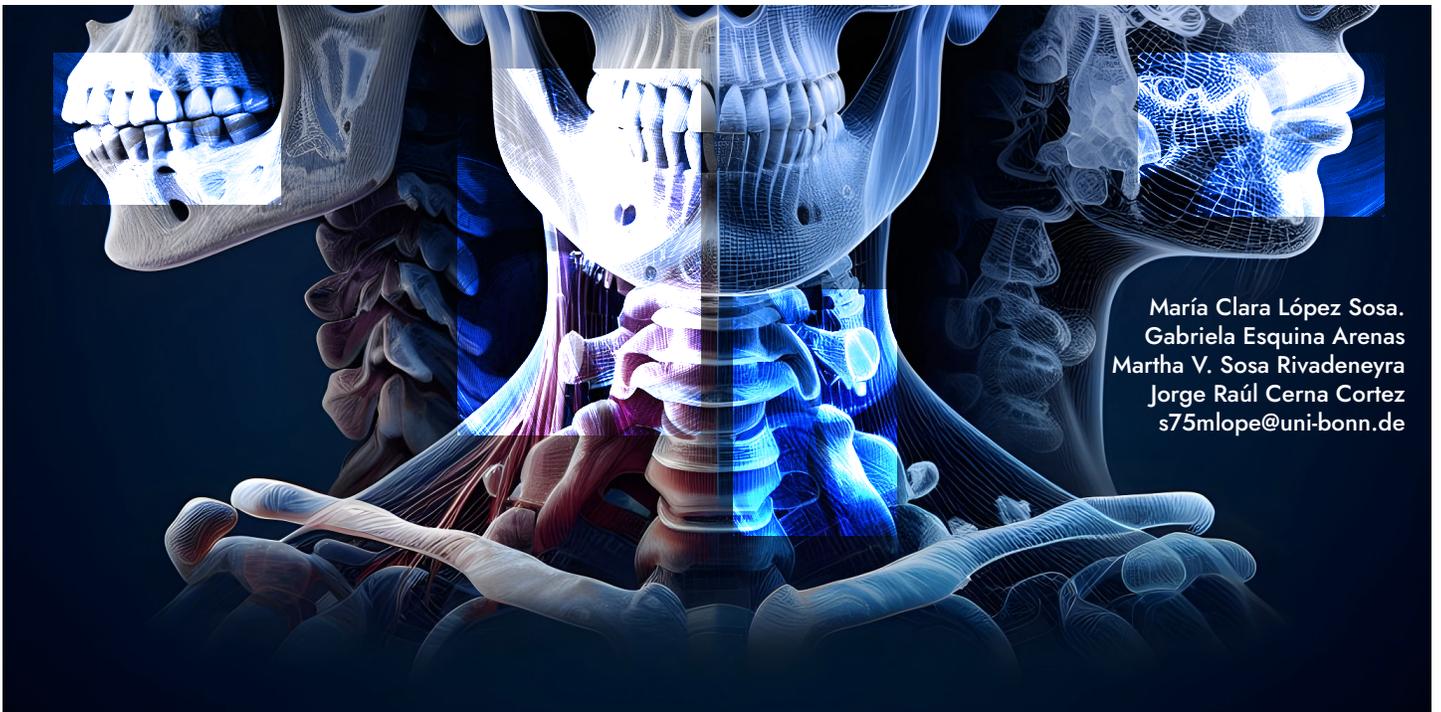




La microtomografía computarizada
bajo un enfoque multidisciplinario:



Bioantropología



La microtomografía computarizada (microTC) es una técnica de imagen que utiliza rayos X para obtener imágenes tridimensionales de alta resolución de estructuras microscópicas, como tejidos biológicos, materiales porosos o componentes electrónicos. Esto se realiza mediante la aceleración de electrones, que al golpear con un objetivo metálico producen rayos X de baja energía y una alta resolución espacial, mismos que, a su vez, se utilizan para capturar imágenes de secciones transversales de la muestra desde diferentes ángulos de rotación. Las imágenes radiográficas obtenidas se combinan posteriormente para reconstruir una representación tridimensional de la muestra (Buzug, 2008; véanse figuras 1 y 2).



Figura 1. Microtomógrafo computarizado de fuente dual (225kV/450kV) del Centro Avanzado de Pruebas Analíticas No Destructivas de la BUAP.

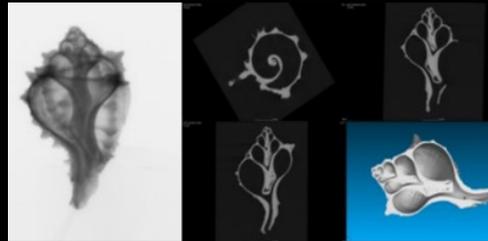
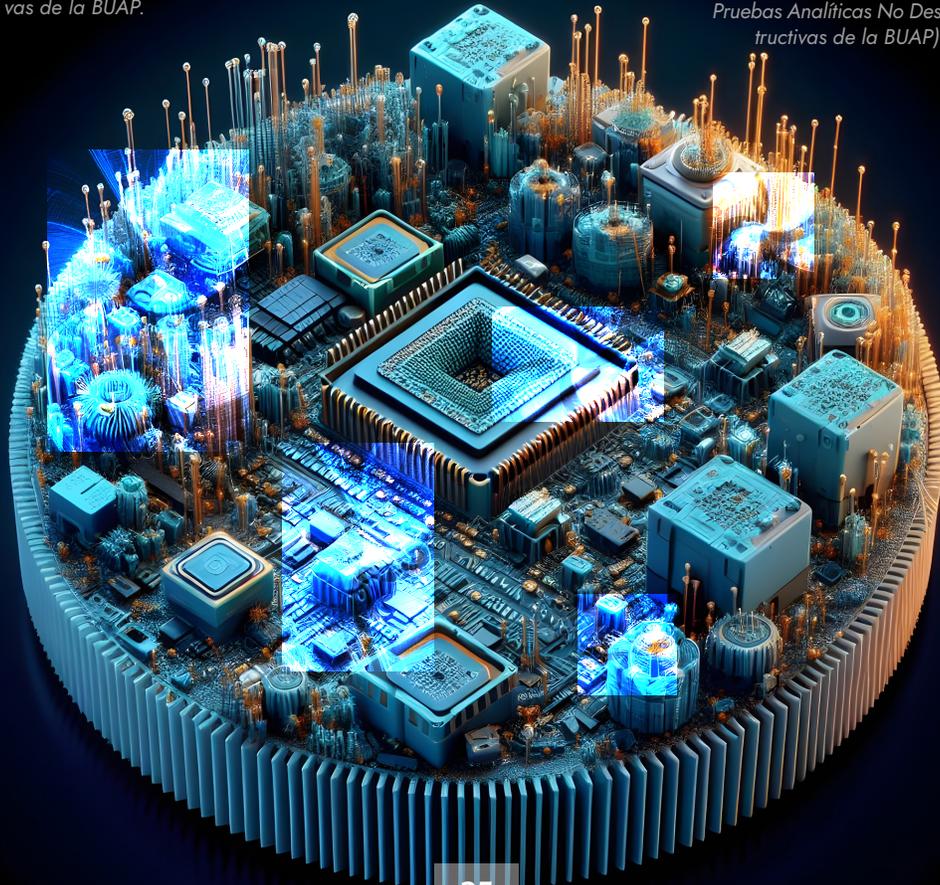


Figura 2. Izquierda: imagen radiográfica obtenida de un caracol marino. Derecha: reconstrucción 3D de escaneo microtomográfico a caracol marino (imágenes 2D y 3D de reconstrucción obtenidas del Centro Avanzado de Pruebas Analíticas No Destructivas de la BUAP).



La principal diferencia entre los escáneres clínicos e industriales en términos de su configuración es la forma en que se realiza la rotación (véase figura 3). En los escáneres clínicos, el aparato de escaneo se rota alrededor del paciente a alta velocidad, mientras que, en la mayoría de los sistemas industriales, el aparato de escaneo está fijo y la muestra se rota. Esto permite la construcción de escáneres TC industriales más estables y precisos, ya que se pueden implementar sistemas mecánicos de alta precisión para modificar las posiciones relativas de la muestra, el detector y la fuente de rayos X. También se pueden construir estructuras térmicamente estables para garantizar mediciones precisas (Carmignato et al., 2018; De Chiffre, 2014).

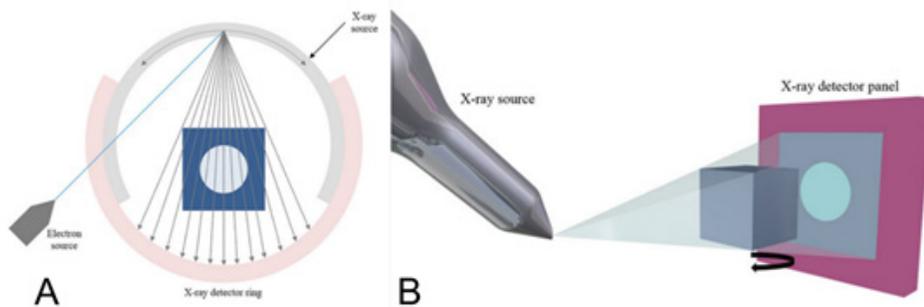


Figura 3. Configuración de tomógrafos. A) Clínico: los anillos de fuente y detector se desplazan a través de ángulos de 210° y están dispuestos de manera no coplanar para permitir la superposición. B) Industrial: configuración de escaneo de haz cónico, mostrando cómo estos sistemas adquieren datos volumétricos en 3D en una sola rotación (Carmignato et al., 2018).

En el ámbito industrial, la microTC se ha convertido en una herramienta esencial para la inspección de materiales y componentes donde la preservación de los componentes es crucial, dada su capacidad de evaluar su calidad e integridad sin causar daño. Además, esta técnica se ha aplicado en la investigación de materiales, permitiendo estudiar en detalle la microestructura y las propiedades mecánicas de diversos materiales (De Chiffre, 2014).

En las últimas décadas, la tecnología de microTC ha experimentado mejoras significativas, logrando escanear objetos de diferentes tamaños y densidades con mayor precisión y en menos tiempo, permitiendo que los sistemas de microTC puedan ser utilizados en diferentes áreas de investigación.



LA MICROTC COMO HERRAMIENTA BIOANTROPOLÓGICA

En el campo de la bioantropología, el uso de microTCs ha sido frecuentemente adoptado para examinar la morfología craneana con la finalidad de discutir temas como la movilidad, expansión, adaptación y diversificación de los humanos anatómicamente modernos (e.g. Bergmann et al., 2022; Gicqueau et al., 2023), y más recientemente también han sido implementadas para investigaciones sobre poblamiento americano y los diversos procesos adaptativos y migratorios que tuvieron lugar desde principios del Holoceno (e.g. Hubble et al., 2020; Menéndez et al., 2019).



Estos trabajos se sirven de herramientas de la antropología virtual y la morfometría geométrica, las cuales permiten comparar la forma, en este caso de cráneos humanos, para posteriormente cuantificar y analizar su variación (Mitteroecker y Gunz, 2009). Para ello, es necesaria la captura de coordenadas cartesianas (en dos o tres dimensiones) o landmarks localizados en puntos homólogos de los cráneos, que regularmente son definidos a partir de rasgos anatómicos (véase figura 4A; Mitteroecker y Gunz, 2009).

Si bien esto solía ser efectuado por medio de aparatos móviles que facilitaban la toma de datos sobre el material osteológico, o bien a partir de fotografías, hoy en día los modelos tridimensionales resultan particularmente útiles y prácticos, ya que no es necesaria la manipulación de los huesos y permite la preservación del acervo. Del mismo modo, específicamente el uso de microTCs ha hecho posible examinar estructuras internas que antes solo pudieron ser analizadas por medio de moldes, los cuales implicaban la destrucción del hueso y, por ende, un daño irreversible al patrimonio.

Tal es el caso del laberinto óseo del oído interno, que es una estructura de pequeñas dimensiones y forma compleja, que se encuentra albergado dentro del hueso temporal del cráneo (véase figura 4B), y que en las últimas décadas ha sido estudiado con distintos fines dentro de la antropología biológica y la biología evolutiva. Por un lado, el laberinto óseo nos ha brindado información acerca de la audición y el equilibrio, enriqueciendo investigaciones sobre el desarrollo del bipedismo y la locomoción (e.g. Spoor et al., 2003), pero además también ha demostrado ser útil para indagar sobre relaciones genéticas y distancias biogeográficas, siendo especialmente interesante para las investigaciones sobre los procesos de expansión de nuestra especie (e.g. Ponce de León et al., 2018). Además, esto último ha sido igualmente explorado en los últimos años en el contexto forense, dentro del marco de las investigaciones enfocadas en la identificación humana (e.g. Uhl et al., 2022).





Particularmente en relación con el laberinto óseo, la microTC juega un papel clave y promisorio ya que, si bien este fenotipo puede ser observado en TCs médicas, la resolución de este tipo de imágenes no permite la reconstrucción tridimensional a detalle, lo que significa que los análisis se ven limitados y la información recuperada también es menor (véase figura 5). Esto también tiene implicaciones en la reproducibilidad de los estudios, así como en la interpretación de los datos. Además, cabe mencionar que en contraste con las TCs médicas, una microTC de un cráneo proporciona imágenes nítidas de diferentes elementos anatómicos, lo que da pauta no solo al estudio morfológico de la superficie craneofacial o del laberinto óseo, sino también de otros rasgos y estructuras tanto externas como internas, proveyendo de materiales que pueden ser usados para múltiples objetivos, impulsando futuros estudios a corto y a largo plazo, y en diferentes áreas de la investigación antropológica.

Finalmente, de especial significado para los bioantropólogos es el tema de la conservación, dada la actual producción masiva de estudios genéticos que implican irremediamente la invasión y destrucción de materiales osteológicos. Aunque los posibles alcances de la paleogenética son indudables, la extracción de muestras no garantiza la presencia de material genético y, por tanto, la posibilidad de análisis. Es también de mencionar que las muestras son extraídas generalmente de dientes y de la porción petrosa del hueso temporal, que es justamente en donde se localiza el laberinto óseo. Por tal motivo, la generación de microTCs es de gran relevancia para la bioantropología, ya que esta provee de alternativas viables, reproducibles y no invasivas a los estudios genéticos.

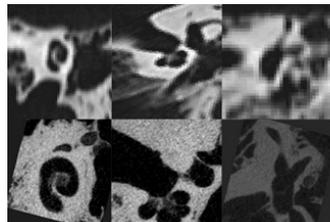
Conclusiones

La aplicación de la microTC mediante el uso de rayos X penetrantes ofrece una valiosa herramienta de análisis visual no destructivo que no solo ha sido de gran utilidad para la investigación industrial, sino también para otras disciplinas como la bioantropología. En este sentido, la microTC ha permitido la realización y desarrollo de una gran variedad de investigaciones y estudios de materiales osteológicos que forman parte del patrimonio antropológico y cultural. Finalmente, se enfatiza el rol clave que juega la microTC en el resguardo y documentación del material osteológico durante la realización de estudios destructivos, siendo esta una herramienta que asiste y fomenta la protección y preservación del acervo antropológico, paleontológico y arqueológico, al mismo tiempo que impulsa y abastece a dichas áreas de investigación de materiales de calidad, permitiendo la realización de estudios futuros, así como la generación y compartición de conocimiento.

Figura 4. A) Modelo tridimensional de un cráneo humano con landmarks (esferas amarillas) colocados en diferentes puntos craneométricos. B) Visualización de la posición del laberinto óseo del oído interno. (TCs recuperadas de la base de datos correspondiente a la serie osteológica del NMNH - Lynn Copes, 2012).



Figura 5. Comparación de la resolución de una tomografía médica y una microtomografía para la visualización y digitalización del laberinto óseo del oído interno. (TC médica recuperada de la base de datos correspondiente a la serie osteológica del NMNH - Lynn Copes, 2012; microTC recuperada de la base de datos de Wilhelm Wimmer y colaboradores, 2019).



Referencias

- Buzug, M. T. (2008). *Computed Tomography. From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT*. Heidelberg:Springer.
- Carmignato, S., Dewulf, W., y Leach, R. (Eds.) (2018). *Industrial X-Ray Computed Tomography*. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-59573-3.
- De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J.-P., Schmitt, R., y Weckenmann, A. (2014). "Industrial applications of computed tomography". *CIRP Annals*, 63(2), pp. 655–677. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.011.
- Bergmann, I., Hublin, J. J., Ben-Ncer, A., Sbihi-Alaoui, F. Z., Gunz, P., y Freidline, S. E. (2022). "The relevance of late MSA mandibles on the emergence of modern morphology in Northern Africa". *Scientific Reports*, 12(1), p. 8841. DOI: 10.1038/s41598-022-12607-5.
- Gicqueau, A., Schuh, A., Henrion, J., Viola, B., Partiot, C., Guillon, M., Golovanova, L., Doronichev, V., Gunz, P., Hublin, J. J., y Maureille, B. (2023). "Anatomically modern human in the Châtelperronian hominin collection from the Grotte du Renne (Arcy-sur-Cure, Northeast France)". *Scientific Reports*, 13(1), p. 12682. DOI: 10.1038/s41598-023-39767-2.
- Hubbe, M., Terrazas Mata, A., Herrera, B., Benavente Sanvicente, M. E., González González, A., Rojas Sandoval, C., Avilés Olguín, J., Acevez Núñez, E., y Von Cramon-Taubadel, N. (2020). "Morphological variation of the early human remains from Quintana Roo, Yucatán Peninsula, Mexico: Contributions to the discussions about the settlement of the Americas". *PloS one*, 15(1), p. e0227444. DOI: 10.1371/journal.pone.0227444.
- Menéndez, L. P., Rademaker, K., y Harvati, K. (2019). "Revisiting east–west skull patterns and the role of random factors in South America: Cranial reconstruction and morphometric analysis of the facial skeleton from Cuncaicha Rockshelter (southern Peru)". *PaleoAmerica*, 5(4), pp. 315-334. DOI: 10.1080/20555563.2019.1703167.
- Mitteroecker, P., y Gunz, P. (2009). „Advances in geometric morphometrics". *Evolutionary biology*, 36, pp. 235-247. DOI: 10.1007/s11692-009-9055-x.
- Spoor, F., Hublin, J. J., Braun, M., y Zonneveld, F. (2003). "The bony labyrinth of Neanderthals". *Journal of Human Evolution*, 44(2), pp. 141-165. DOI: 10.1016/S0047-2484(02)00166-5.
- Ponce de León, M. S., Koesbardiati, T., Weissmann, J. D., Milella, M., Reyna-Blanco, C. S., Suwa, G., Kondo, O., Malaspinas, A. S., White, T. D., y Zollikofer, C. P. (2018). "Human bony labyrinth is an indicator of population history and dispersal from Africa". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16), pp. 4128-4133. DOI: 10.1073/pnas.1717873115.
- Uhl, A., Karakostis, F. A., y Harvati, K. (2022). "The Application of Bony Labyrinth Methods for Forensic Affinity Estimation". *Biology*, 11(7), p. 1088. DOI: 10.3390/biology11071088
- Copes, L. E. (2012). *Comparative and Experimental Investigations of Cranial Robusticity in Mid-Pleistocene Hominins*. Tesis de doctorado. Arizona State University.
- Wimmer, W., Anschuetz, L., Weder, S., Wagner, F., Delingette, H., y Caversaccio, M. (2019). Human bony labyrinth dataset: Co-registered CT and micro-CT images, surface models and anatomical landmarks. *Data in brief*, 27, p. 104782. DOI: 10.1016/j.dib.2019.104782.

