

La mayor estructura de impacto de América del Sur: el Domo de Araguinha (Brasil)

Natalia Hauser¹

¹Laboratorio de Geocronología e Geoquímica Isotópica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil, 70910-900. E-mail: nataliah@unb.br

Los procesos de craterización por impacto, es decir todos aquellos procesos relacionados al impacto de un meteorito en una superficie y consecuente generación de un cráter, son los procesos más comunes que modifican la superficie de planetas y satélites en nuestro sistema solar y más allá. Fueron relacionados con los procesos que dieron lugar a la formación y evolución de los planetas, como así también al origen, evolución y extinción de la vida. El ejemplo más claro que tenemos es aquel relacionado a la extinción de los dinosaurios, hace aproximadamente 66 Ma (Ma: millones de años). De hecho, la madre de las extinciones en masa del registro bio-estratigráfico de nuestro planeta, el llamado evento de extinción Pérmico - Triásico está directamente relacionado con el tópico aquí tratado, el impacto de Araguinha, cuya edad coincide exactamente con esta extinción.

Fueron confirmadas en nuestro planeta, hasta el año pasado, un total de aprox. 200 estructuras de impacto (Figura1). Cuando comparamos la cantidad de estructuras de impacto confirmadas en América del Sur, un total de 11 (Crósta et al., 2019), con aquellas confirmadas en Oceanía, un total de 27 (de acuerdo al EarthImpact Database), entendemos la necesidad de que más científicos en América del Sur se dediquen al estudio de estructuras de impacto.

Cómo reconocer/diagnosticar una estructura de impacto. ¿Y después?

Existen muchas estructuras circulares que pueden ser fácilmente vistas en una imagen de satélite, como aquella de Google Earth, pero ¿cómo reconocer si estas estructuras circulares fueron producidas por el impacto de un cuerpo celeste o por algún otro proceso común en nuestro planeta? Existen métodos geofísicos¹ de tipo magnéticos, gravimétricos o sísmicos que auxilian en la identificación

¹Modelos geofísicos: son aquellos relacionados con la medición de alguna propiedad física como la velocidad de las ondas sísmicas, variaciones del campo gravitacional o del campo magnético en la superficie terrestre, para detectar anomalías que indiquen cambios en el material que está en subsuelo.

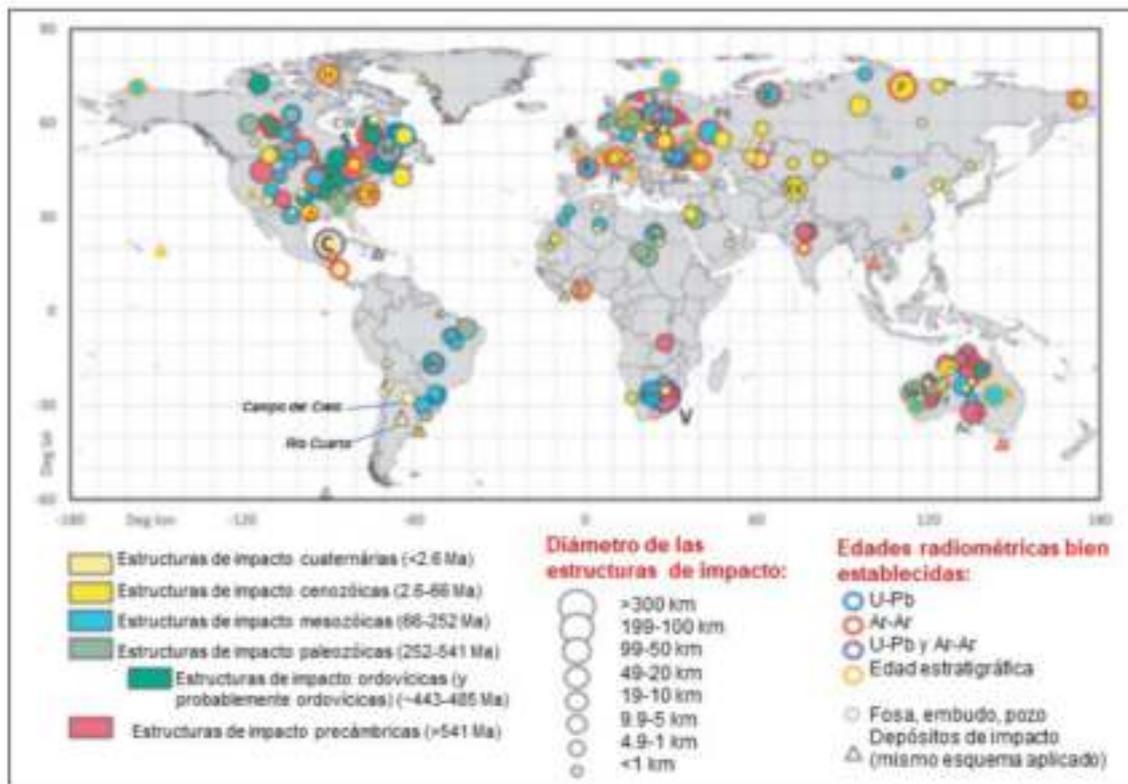


Figura 1. En este mapamundi se resume la cantidad de estructuras de impacto, un total de 200 estructuras de impacto confirmadas hasta el año pasado en nuestro planeta (adaptada de Schmieder y Kring, 2020). En la leyenda, a la izquierda, la edad de las mismas está especificada en colores, en el centro está indicado el diámetro y a la derecha está especificado el método de datación radiométrico utilizado para estimar la edad de las mismas.

de anomalías magnéticas o gravimétricas circulares a escala regional. Sin embargo, estas estructuras circulares podrían estar relacionadas con otros procesos geológicos comunes en nuestro planeta, por lo que el descubrimiento de estas anomalías solo indica la posible existencia de una estructura de impacto, pero no la diagnóstica.

Así, una anomalía geofísica sin explicación aparente, nos obligará a movernos hasta el lugar para ahondar en nuestra búsqueda, como detectives planetarios. Si bien la forma circular, ya es un indicio de que pueda tratarse de una estructura de impacto, algunas características de las mismas, llamarán la atención de cualquier científico que se encuentre en el lugar. Por ejemplo, el científico se preguntaría: ¿los bordes o la parte central de esta estructura circular están sobreelevados?, ¿se encuentran rocas "extrañas" (rocas fuertemente deformadas, por ejemplo) en el sentido de no ser comunes en ese lugar? Pues bien, si la respuesta es afirmativa, evidentemente deberemos buscar las llamadas **evidencias diagnósticas**, es decir, aquellas características producidas solo por un proceso de craterización por impacto. Estas evidencias son de escala macroscópica o deben ser buscadas en el microscopio o a través de análisis químicos. Las mismas serán explicadas, usando como caso de estudio El Domo de Araguinha. Así,

las aproximadamente 200 estructuras de impacto mostradas en la Figura 1, sin excepción, presentan alguna de las evidencias diagnósticas que nos permiten decir con total seguridad, que la estructura de impacto fue confirmada.

¿Y después? Una vez que la misma fue diagnosticada, partimos hacia el próximo conjunto de preguntas: ¿Cuándo ocurrió el impacto?, ¿qué tamaño tiene la estructura de impacto? ¿qué tamaño tenía el meteorito? ¿cuál fue la máxima temperatura y presión alcanzada?, ¿cuáles fueron las consecuencias ambientales? ¿este evento de impacto estuvo relacionado con alguna extinción en masa?

El Domo de Araguainha

A aproximadamente 760 km de la capital de Brasil, Brasilia, hacia el suroeste, se llega a la mayor estructura de impacto de América del Sur, conocida como “*O Domo de Araguainha*”. La estructura tiene 40 km de diámetro (Figura 2A), ocupa un área de 1.300 km² y es clasificada como una **estructura de impacto compleja**, es decir se caracteriza por una parte central sobreelevada estratigráficamente (*central uplift*), de aproximadamente 12 km de diámetro. Esta estructura tiene como coordenadas centrales 16°45’S y 52°59’O y es dividida por el río Araguaia, por lo que una porción de la misma está en el estado de Mato Grosso (O) y la otra porción está del lado del estado de Goiás (E). Una de las dos ciudades más pequeñas de Brasil, Araguainha, con aproximadamente 1.000 habitantes ubicada en el *central uplift*, le cede el nombre.

El Domo de Araguainha fue confirmado como una estructura de impacto en la década del 70 cuando Dietz y French (1973) publicaron un trabajo corto en Nature sobre dos estructuras de impacto erosionadas en América del Sur, reconocidas a partir de las recién salidas imágenes de satélite LandSat. Anteriormente Dietz et al. (1973) publicaron un trabajo en el que describieron la existencia de evidencias diagnósticas de un impacto meteorítico para el Domo de Araguainha, los llamados *shatter cones* (en español podría traducirse como “conos rotos”) y estructuras planares en el mineral cuarzo (SiO₂).

Geología y división estructural

El impacto ocurrió hace aproximadamente 252 Ma atrás (Hauser et al., 2019), en la parte nordeste de lo que entonces era la cuenca de Paraná. Las **rocas afectadas** por el impacto, fueron la secuencia paleozoica (rocas entre 415 y 250 Ma) de la cuenca y probablemente el basamento cristalino (de aproximadamente >480 Ma) de la misma (Figura 2A). Estas rocas afectadas por el impacto corresponden a rocas graníticas intruidas en rocas metamórficas muy antiguas, y también la columna sedimentaria que cubre a estas rocas, y que se depositó durante prácticamente todo el Paleozoico.

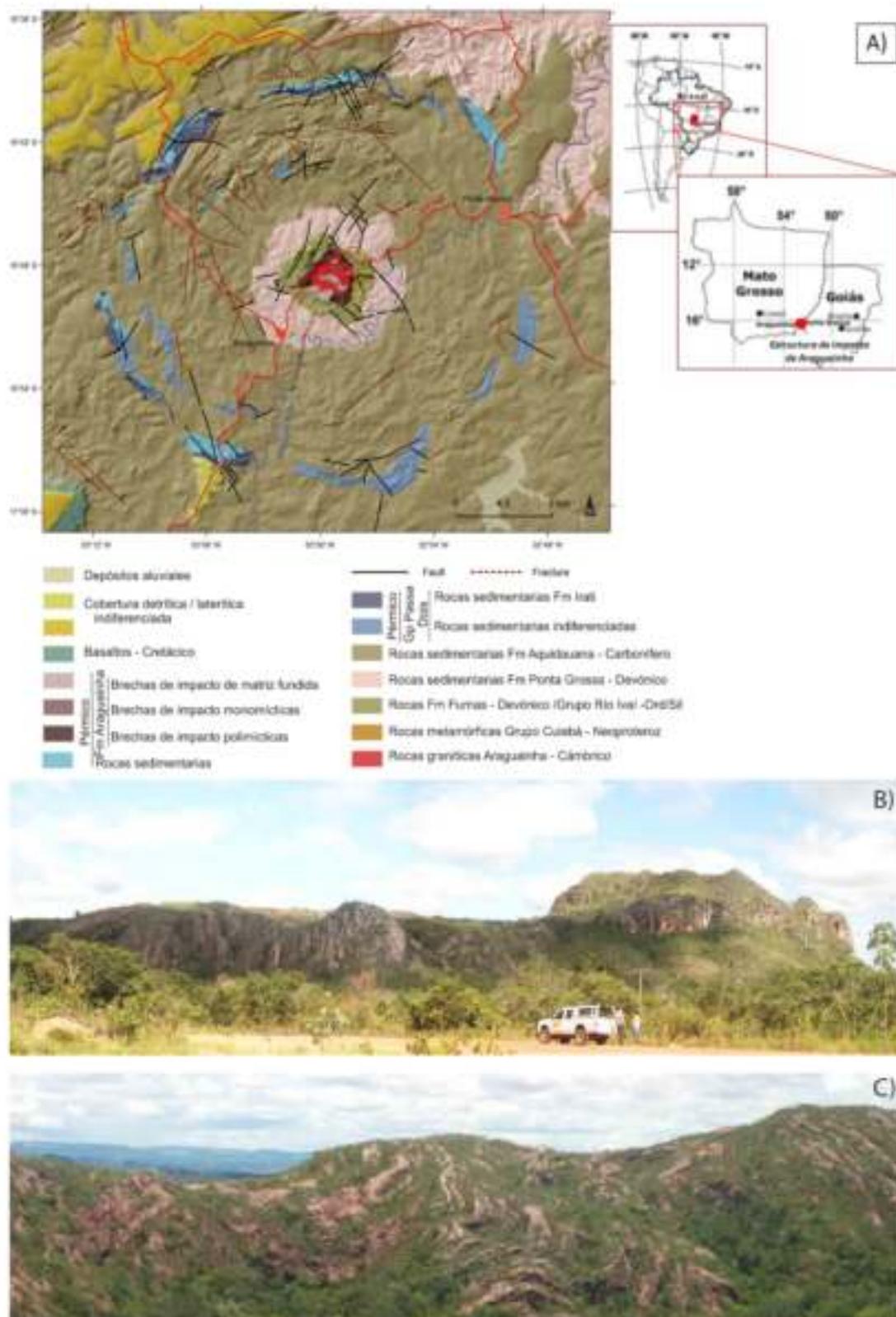


Figura 2. A) Localización de la estructura de impacto de Araguainha en la parte central de Brasil y mapa geológico sobrepuesto a TAndEM-X DEM (Crósta et al., 2019 y Gottwald et al., 2020). Aspecto de la deformación en el anillo interno: B) Sierra de La Arnica y C) Morro Pelado. Los estratos de la Formación Furnas están fuertemente verticalizados y deformados.

Estructuralmente, Araguainha puede ser dividida en una parte central, “*central uplift*”, de aproximadamente 12 km de diámetro, en una cuenca anular y en una zona de dos anillos externos.

El central uplift está formado por un **pico central** de entre 4-5 km de afloramientos del granito alcalino feldespático y por las rocas de caja del Grupo Cuiabá. Las rocas que caracterizan el central uplift son las más antiguas y muestran indicios de haber experimentado diferentes metamorfismos², de los cuales el último ocurrió en el Pérmico (es una de las divisiones del tiempo geológico y que corresponde al último periodo de la Era Paleozoica).

Este pico central está rodeado por un cinturón discontinuo de brechas polimícticas (rocas sedimentarias compuestas por fragmentos de rocas impactadas de diferente origen), seguido por 1-2 km de un **anillo interno** (*inner collar*) de rocas altamente deformadas correspondientes de la Formación Furnas. El anillo interno está segmentado por fallas en varios megabloques que se expresan topográficamente como la Sierra de Árnica, localizada en el sector nordeste (Figura 2B) y el Morro Pelado (Figura 2C) localizado al sur y que alcanzan de decenas a centenas de metros y representan una de las evidencias más impactantes de deformación por impacto en esta área. Los procesos geológicos internos pueden producir pliegues de las mismas dimensiones o quizás mayores, pero la formación de los mismos demorará mucho tiempo, de cientos a millones de años.

La **cuenca anular** se encuentra entre el central uplift y los anillos externos. El límite entre el central uplift y la cuenca anular estaría localizado en el último afloramiento (exposición de roca en la superficie) en el cual se observa la inversión estratigráfica debida al impacto, es decir, donde las rocas más antiguas (filitas del Grupo Cuiabá, Neoproterozoico) fueron superpuestas sobre aquellas más jóvenes (pelitas de la Formación Ponta Grossa, Devónico). Como Araguainha es una estructura erosionada, esta inversión estratigráfica no llega a ser observada. Las principales unidades que se encuentran en la cuenca anular son los estratos de las formaciones Ponta Grossa y la parte inferior de la Formación Aquidauana (Carbonífero).

Existen dos anillos externos, uno a 10-12 km y el otro a 14-18 km desde el centro de la estructura. El colapso del central uplift, unos minutos después del impacto, generó un movimiento de las capas de rocas hacia afuera y su deformación, lo cual se observa muy bien en estos anillos. Los anillos externos se presentan segmentados por fallas normales. En los mismos se observa en contacto la Formación

²Metamorfismo: proceso geológico que genera la recristalización de una roca por aumento de la presión y temperatura, en estado sólido. Las rocas resultantes se denominan rocas metamórficas.

Formación de una estructura de impacto compleja

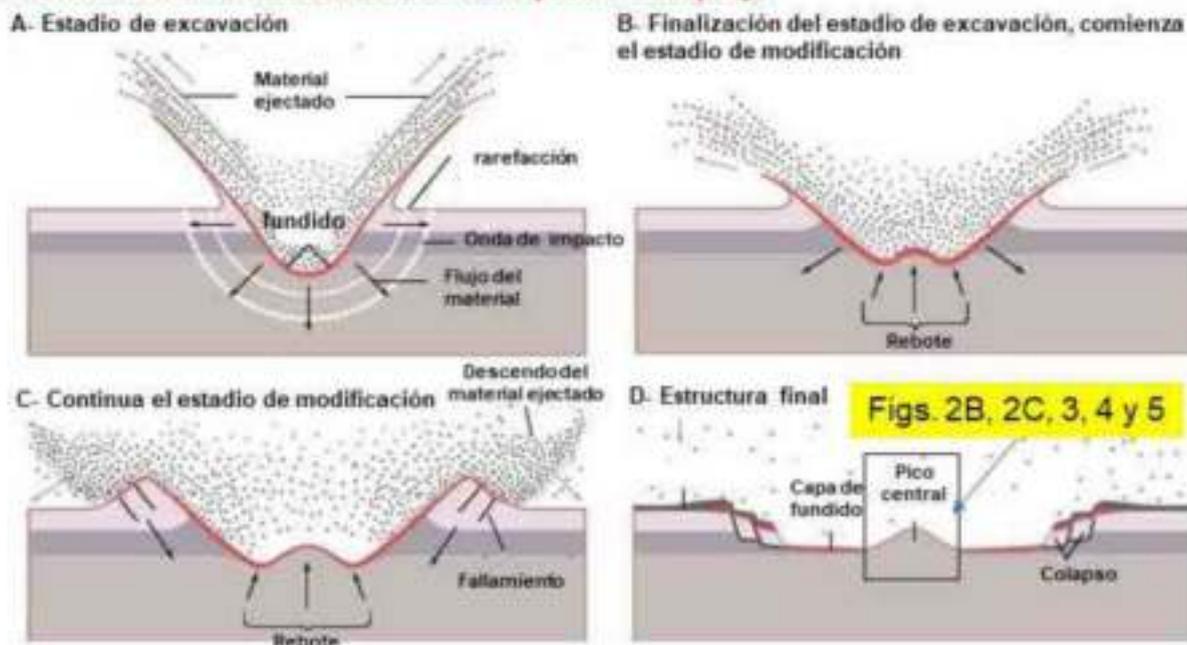


Figura 3: Las cuatro etapas principales en la formación de una estructura de impacto compleja. La misma se caracteriza por la elevación central e por una serie de anillos concéntricos. Modificada de la Enciclopedia Británica (<https://www.britannica.com/science/meteorite-crater/The-impact-cratering-process>).

Aquidauana (Carbonífero) con el Grupo Passa Dois (Pérmico).

En la Figura 3, se muestra de forma esquemática las cuatro etapas en la generación de una estructura de impacto compleja: A) Estadio de excavación y generación de fundido, B) Finalización del estadio de excavación y comienzo del estadio de modificación, C) Continúa el estadio de modificación con la caída del material eyectado y D) Estructura final, en la que se observa la formación del pico central y los anillos concéntricos.

Impactitas

Las **impactitas** son todas aquellas rocas producidas o modificadas durante un evento de impacto meteorítico. En el caso de la estructura de impacto de Araguinha, fueron reconocidas brechas de impacto con matriz fundida (*impact melt rock*), depósitos de brechas polimícticas de impacto, suevitas (*suevite*) y brechas monomícticas.

En función de la composición y modo de ocurrencia fueron reconocidas dos tipos de brechas de impacto con matriz fundida: las denominadas de **tipo-I** (Figura 4A), que tienen como precursor al granito

alcalino feldespático y son por lo tanto de composición granítica, afloran como diques rojos intruidos en el granito o como mantos; y las de **tipo-II** (Figura 4B), que tiene como precursor areniscas y conglomerados y son de composición silícica y se encuentran donde las de tipo-I están en contacto con el basamento o como blobs (porciones redondeadas) de fundido dentro de la brecha polimíctica de impacto (suevitas). Los diques³ tienen orientación errática y son subverticales, normalmente tienen una extensión de entre 10-100 cm y siempre intruyen (es decir se introducen dentro) al granito. Contienen una mezcla cataclástica (tipo de roca fracturada por deformación), porciones angulosas de material granítico con metamorfismo de impacto y material granítico sin metamorfismo en una matriz fundida. Las de tipo II, se presentan en campo con estructuras de bandeamiento por flujo y en el microscopio, se observa que está compuesta por más de 90% de cuarzo, recrystalizado desde un vidrio.



Figura 4: Características en campo y en muestra de mano de las brechas de impacto con matriz fundida que afloran en el central uplift.

A) de tipo-I, en la muestra de mano se observa que son rocas porfíricas, con cristales de cuarzo y de feldespato potásico estirados y parcialmente fundidos (*schlieren*) inmersos en una matriz afanítica rica en hematita (Fe_2O_3). Tienen como precursor al granito. B) de tipo-II, en la muestra de mano todavía es posible distinguir los clastos de cuarzo en el medio de una matriz fundida con bandeamiento por flujo. En este caso el precursor probablemente fue un conglomerado.

Visto que **brechas polimícticas de impacto** se forman en la etapa de excavación y eyección de las unidades afectadas por el impacto, las mismas pueden tener clastos de las diferentes unidades de la cuenca de Paraná. Afloran como un cinturón alrededor del granito alcalino feldespático, las filitas del Grupo Cuiabá y los diques rojos que lo intruyen. En el caso de que en la misma también se encuentre material fundido (normalmente de tipo-II) reciben el nombre de **suevita**.

Las evidencias del metamorfismo de impacto en el Domo de Araguainha

Existen algunas características comunes a todas las estructuras de impacto confirmadas en nuestro planeta. Las mismas pueden ser de escala mesoscópica hasta escala microscópica.

³Dique: cuerpo tabular compuesto por roca fundida por el impacto.

A seguir serán descriptas estas evidencias tomando como caso de estudio El Domo de Araguainha.

Los **Conos rotos** (*Shatter cones*) son estructuras cónicas que ocurren como agregados de conos en las rocas (Figura 5B). Se caracterizan por la presencia de estrías en la superficie que nacen en el ápice del cono y terminan en la base de cada cono. Estas estructuras nunca fueron encontradas asociadas a procesos volcánicos, tectónicos o sísmicos. Como siempre fueron asociados a fenómenos de impacto, la presencia de *shatter cones*, es considerada una evidencia diagnóstica en la confirmación de estructuras de impacto antiguas. En la estructura de impacto de Araguainha, la mejor exposición de los *shatter cones* es en el sector noroeste del central uplift. Se trata de un afloramiento de filitas (roca metamórfica de bajo grado) asignados al Grupo Cuiabá cortado por la ruta MT-100, que une las ciudades de Araguainha y Ponte Branca. Pueden ser reconocidos de forma aislada en áreas donde la brecha polimíctica está en contacto con el basamento de filitas.

Las **Microestructuras planares** (*Planar Deformation Features - PDFs*), reconocidas en el microscopio, son simplemente conjuntos de planos estructurales controlados cristalográficamente, que tienen un espesor de entre 1-2 μm y una distancia de 10 μm entre un plano y otro. Estos planos pueden llegar a penetrar todo el cristal o a menudo, como ocurre en areniscas, ocurren solo en la superficie del cristal. Como solo son producidos por metamorfismo de impacto, entran en la clasificación de las evidencias diagnósticas e indican presiones de entre 10 y 30 GPa (que equivalen a 100 - 300 kbar). El mineral más común que presenta estas microestructuras planares es el cuarzo, en él pueden ser observado conjuntos de dos, tres o más sets de PDFs. En Araguainha, fue observado tanto en las muestras de granito como en las de brechas polimícticas (Figura 5A, detalle) y brechas de impacto con matriz fundida. Fueron también identificados en feldespatos potásico y circón.

Circón (ZrSiO_4) con textura granular (*granular zircon*), se usa para indicar agregados policristalinos del mismo mineral circón de aproximadamente 5-10 μm que se forman en la superficie del mineral circón (Figura 5C). Son interpretados como producto de la recristalización de un vidrio diaplético (de la palabra griega diaplesso = destruir golpeando), producido por las altas temperaturas y presiones alcanzadas durante el metamorfismo de impacto. El término vidrio diaplético fue introducido para describir una fase amorfa sin vesículas ni estructuras de flujo. Los límites del mineral primario, su composición química y zonificación se conservan.

Presencia de **material meteorítico**; normalmente se realizan análisis químicos e isotópicos, con el objetivo de investigar la presencia de material meteorítico en las brechas de impacto con matriz fundida. Los análisis químicos podrán ayudar a identificar la presencia de elementos no comunes en las rocas de

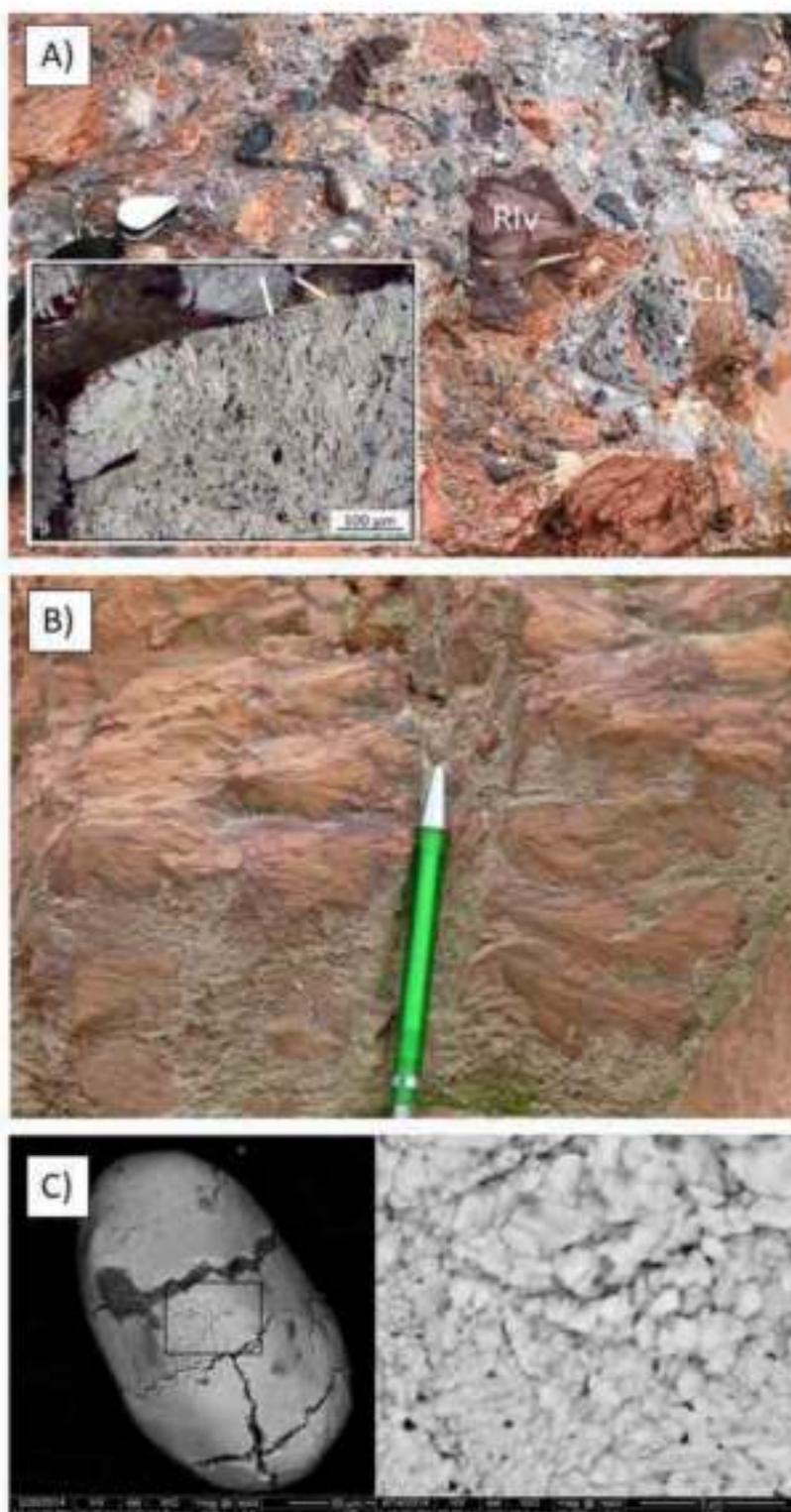


Figura 5: A) Aspecto de la brecha polimictica que aflora en el sector norte del central uplift. Clastos del Grupo Río Ivaí (Riv) y del Grupo Cuiabá (Cu) son observados. En detalle se observa un cristal de cuarzo de la brecha polimictica al microscopio. En él es posible apreciar los planos de PDFs en por lo menos dos sets. B) *Shatter cones* en las filitas del Grupo Cuiabá. C) Imagen de un cristal de circón, tomada en el microscopio electrónico de barrido. A la derecha se muestra un detalle de estos agregados policristalinos desarrollados en la superficie de este cristal de circón.

nuestro planeta, como el Iridio (Ir) que forma parte del Grupo de los elementos del platino. Para poder investigar cuál fue la composición del meteorito (¿rocoso, férrico?) se utiliza el par isotópico Re-Os. En Araguainha, fueron realizados estudios de este tipo, pero hasta la fecha, no fue encontrado ningún resquicio del meteorito en términos de Ir o razones isotópicas que permitan concluir sobre el tipo de meteorito.

Edad del impacto y consecuencias ambientales para el final del Pérmico

Varias edades radiométricas fueron obtenidas en las brechas de matriz fundida del Domo de Araguainha. El principal método utilizado fue el de U-Pb en circón y en monacita (ver [Arzadún, 2020, Temas B&GNOA, vol. 10, nº 3](#)), dos minerales accesorios comunes en estas brechas. Las edades obtenidas oscilan entre 251 y 259 Ma. Teniendo en cuenta el error analítico de las mismas, el evento de impacto habría ocurrido al final del Pérmico (aprox. 251,9 Ma, *International chronostratigraphic chart*, <https://stratigraphy.org/timescale/>). Al final del Pérmico, la mayor extinción en masa habría terminado con prácticamente el 90% de las especies marinas y 70% de los vertebrados terrestres. Algunos autores como Tohver et al. (2013) habrían relacionado este evento de impacto con esta extinción. Según ellos, la actividad sísmica asociada habría permitido la liberación del gas metano desde las rocas ricas en materia orgánica de la Formación Irati (Grupo Passa Dois), con el subsiguiente efecto invernadero.

No son muy claras las causas que habrían producido esta gran extinción en masa, pero la configuración del supercontinente de Pangea, las condiciones climáticas y el extenso vulcanismo de las *Siberian Traps*, seguramente influyeron en conjunto. Así probablemente el impacto de Araguainha, con la generación de una estructura de impacto de solo 40 km de diámetro, con la liberación de gas metano a la atmósfera, podría entrar en la lista de los causantes de la gran extinción en masa del final del Pérmico.

Conclusiones

El Domo de Araguainha ha sido investigado significativamente, sin embargo, todavía existen varias preguntas no resueltas, como ser: ¿cuál fue la penetración del proyectil en las rocas afectadas?, ¿cuál fue la máxima temperatura y presión alcanzada durante el impacto?, ¿cuál fue el verdadero diámetro de la estructura de impacto, fue un impacto oblicuo o vertical?, ¿cuál es el verdadero nivel de erosión actual de la estructura?, ¿cuál sección de la columna estratigráfica mostrada habría contribuido significativamente en la formación de las brechas de matriz fundida? Y la lista continúa. Debido a la preservación de las impactitas, la estructura de impacto de Araguainha es un excelente laboratorio natural no solo para entender los procesos de craterización por impacto, sino también una herramienta pedagógica natural.

En Argentina, existen dos lugares relacionados con eventos de impacto, Campo del Cielo (Chaco) y Río Cuarto (Córdoba). El primero reúne pequeños cráteres y “*penetration funnels*” de indiscutido origen por impacto, debido a la asociación con fragmentos de meteoritos de hasta 37 toneladas. Por el contrario, el origen de las numerosas estructuras alargadas en Río Cuarto, es alternativamente relacionado con impacto oblicuo o a estructuras de ablación por viento. Seguramente hay varias estructuras de impacto esperando ser descubiertas en Argentina y en América del Sur. Para eso, la comunidad científica sudamericana necesita de más personas abocadas al estudio de estructuras de impactos, el resultado de un proceso planetario.

REFERENCIAS

- ARZADÚN G. 2020. La edad de las rocas. *Temas de B&G NOA*, 10 (3): 7-15.
- CRÓSTA AP, WU REIMOLD, MAR VASCONCELOS, N HAUSER, GJG OLIVEIRA, MV MAZIVIERO, AM GÓES. 2019. Impact cratering: The South American record – Part I. *Chemie der Erde-Geochemistry*, online first, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.001>
- DIETZ RS., 1972. Shatter cones (shock fracturs) in astroblemes, in *Terrestrial Cryptoexplosion Features*. XXIV International Geol. Cong., Montreal, Sec 15, pp. 112-118.
- DIETZ RS., BM FRENCH. 1973. Two probable astroblemes in Brazil. *Nature* 244:561-562.
- GOTTWALD M, T KENKMANN, WU REIMOLD. 2020. *Terrestrial Impact Structures, The TanDEM-X Atlas, Part 1 and 2*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, 608 pp. (ISBN 978-3-89937-261-8).
- HAUSER, N., WU REIMOLD, A CAVOSIE, AP CRÓSTA, WH SCHWARZ, M TRIELOFF, C DA SILVA MAIA DE SOUZA, L PEREIRA, EN RODRIGUES, M BROWN. 2019. Linking shock textures revealed by BSE, CL and EBSD with U-Pb data (LA-ICP-MS and SIMS) in zircon from the Araguinha impact structure, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science* 54, 10, 2286–2311, doi: 10.1111/maps.13371
- SCHMIEDER M., DA KRING. 2020 Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, vol. 20, 1. doi.org/10.1089/ast.2019.2085
- TOHVER E., C CAWOOD, C RICCOMINI, C LANA, RIF TRINDADE. 2013. Shaking a methane fizz: Seismicity from the Araguinha impact event and the Permian–Triassic global carbon isotope record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 387:66–75.