



ISSN: 2007-9656

LATINMAG LETTERS

June 2022 - Volume 12 - Number 1
LL22-1201Rs

RESEARCH PAPER

Published on behalf of the Latin American Association of Paleomagnetism and Geomagnetism by the Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

Caracterización de las brechas de impacto del Cráter Chicxulub a partir de la litología y susceptibilidad magnética.

Ramiro Raya-Ramírez, L. Pérez-Cruz, R. Venegas-Ferrer,
E.M. García-Garnica, J.E. Escobar-Sánchez, M. Velazco-Villareal,
J. Urrutia-Fucugauchi

12 pages, 8 figures

Latinmag Letters can be viewed and copied free of charge at:
<http://www.geofisica.unam.mx/LatinmagLetters/>

Papers contents can be reproduced meanwhile the source is cited



Caracterización de las Brechas de Impacto del Cráter Chicxulub a partir de la litología y susceptibilidad magnética

Ramiro Raya-Ramírez^{1,2}, Ligia Pérez-Cruz^{*1,2,3}, Rafael Venegas-Ferrer^{1,2}, Edgar M. García-Garnica^{1,4}, J. Elia Escobar-Sánchez^{2,5}, Miriam Velasco-Villarreal^{1,6}, Jaime Urrutia-Fucugauchi^{1,2}

¹ Programa Universitario de Perforaciones en Océanos y Continentes, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán 04510 México, México

² Instituto de Investigación Científica y Estudios Avanzados Chicxulub, Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, Sierra Papacal, Mérida 97302, Yucatán, México

³ Coordinación de Plataformas Oceanográficas, Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán 04510 México, México

⁴ Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán 04510 México, México

⁵ Escuela Nacional de Estudios Superiores ENES-Sede Mérida, Mérida Yucatán, México

⁶ Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Querétaro, México

* corresponding author e-mail: perezcruz@igeofisica.unam.mx

Received: May 2022; Published: June 2022

Abstract. In this study, magnetic property logs are used to characterize and investigate the impact structures in the Santa Elena borehole in the Chicxulub Crater. Contrasts in magnetic susceptibility values allowed characterizing the impactites and documenting the inverted stratigraphy in the lower carbonate-rich breccia and the upper breccia rich in molten material and basement. The magnetic susceptibility log correlates with the breccias' lithology, texture, and mineralogy. The magnetic response is dominated by iron and titanium oxides, magnetites, maghemite, and hematite. The contact between the carbonate sediments and the breccia units is located at 332 m. The upper unit of the impactites, between 347.05 and 332.05 m, shows graded bedding with breccia fragments. At the top the clasts are less than 1 mm, and cross-lamination is observed, while at the base, the clasts are coarse-grained. Variations in susceptibility indicate alterations in magnetic minerals and remagnetization due to hydrothermal effects. The matrix variations correspond to the low amplitude trends in the log. The high values are associated with the basement and granite clasts that present the highest magnetic susceptibility values.

Keywords: *Chicxulub Crater, Magnetic Susceptibility, Impact breccias, Santa Elena borehole*

Resumen. Los registros de propiedades magnéticas se han empleado para caracterizar y estudiar las estructuras y secuencias de impacto en el Pozo Santa Elena, en el Cráter Chicxulub. Los contrastes en los valores de la susceptibilidad magnética han permitido caracterizar las impactitas y documentar la estratigrafía invertida en las brechas inferiores ricas en carbonatos y las brechas superiores ricas en material fundido y basamento. El registro de susceptibilidad magnética se correlaciona con la litología, textura y mineralogía en las brechas. La respuesta magnética es dominada por óxidos de hierro y titanio, magnetitas, maghemita y hematita. El contacto entre los sedimentos carbonatados y las unidades de brecha se localiza a los 332 m de profundidad. La unidad superior de las impactitas entre 347.05 y 332.05 m presenta estratificación gradada con fragmentos de brecha. En la cima los clastos son menores a 1 mm y se observa laminación cruzada, mientras que en la base los clastos son de grano grueso. Las variaciones en la susceptibilidad indican alteraciones de los minerales magnéticos y remagnetización por efectos hidrotermales. Las tendencias de baja amplitud en el registro son dominadas por las variaciones de la matriz. Los valores altos se asocian con los clastos de basamento y granitoides que presentan los valores más altos de susceptibilidad magnética

Palabras Clave: *Cráter Chicxulub, Susceptibilidad Magnética, Brechas, Pozo Santa Elena.*



1. Introducción

El Cráter Chicxulub se formó hace 66 millones de años por la colisión de un asteroide de 10-15 km de diámetro en la plataforma de Yucatán. El impacto es un evento único en la evolución de la vida en el planeta y marca la extinción masiva de organismos en la frontera Cretácico/Paleógeno (K/Pg), que afectó alrededor del 76% de las especies (Alvarez *et al.*, 1980; Schulte *et al.*, 2010). La estructura de impacto fue descubierta a finales de la década de los 70's (Penfield, Camargo, 1981). El cráter tiene un diámetro de 200 km y es el mejor preservado en el registro terrestre. La capa de eyecta fina tiene una distribución global y es el marcador de la frontera K/Pg. Se caracteriza por presentar una morfología multianillo, con un anillo de picos constituido por una cadena anular de montes en el centro.

Los estudios en el cráter, basados en perforaciones con recuperación continua de núcleos y análisis de laboratorio, han permitido la caracterización de distintas unidades. El primer programa de perforación con recuperación continua de núcleos incluyó ocho pozos en los sectores centro y sur de Yucatán, incluyendo los pozos Santa Elena, Peto y Tekax, que muestrean las secuencias de impactitas y los sedimentos post-impacto (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996; 2011).

Los estudios de carácter inter- y multidisciplinario han enfatizado la necesidad de contar con la caracterización litológica y mineralógica de la estructura, y la estratigrafía de las secuencias sedimentarias pre- y post-impacto; formadas por brechas de carbonatos, brechas de roca fundida, basamento, la unidad de roca fundida y de impactitas.

La susceptibilidad magnética es un proxy muy útil para identificar cambios en la litología que permitan caracterizar unidades litoestratigráficas, procesos de sedimentación, diagénesis y oxidación-reducción; constituyendo una herramienta eficaz de correlación estratigráfica (Thompson, Oldfield, 1986; Dunlop, Ozdemir, 2001; Pérez-Cruz, Urrutia-Fucugauchi, 2010). Los registros de propiedades magnéticas comúnmente son empleados para estudiar estructuras y secuencias de impacto (Pilkington, Grieve, 1992; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996, 2012; Ellwood *et al.*, 2003; Pilkington *et al.*, 2004; Louzada *et al.*, 2008; Yokoyama *et al.*, 2012; Delgadillo-Peralta *et al.*, 2015; Agarwal *et al.*, 2019).

En particular, en el Cráter Chicxulub, los contrastes en los valores de susceptibilidad magnética permiten caracterizar la secuencia de brechas y distinguir, por ejemplo, las dos unidades de brechas con estratigrafía invertida en el Pozo Tekax, con las brechas inferiores ricas en carbonatos y las brechas superiores ricas en material fundido y basamento (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996).

En este trabajo, se presentan resultados de la caracterización de la secuencia de brechas, con registros de susceptibilidad magnética, empleando una mayor resolución en intervalos selectos.

2. Cráter Chicxulub

El Cráter Chicxulub localizado en el sector noroeste de la península de Yucatán, en el Golfo de México



(Fig. 1) es uno de los tres cráteres de impacto con morfologías multianillo de mayor tamaño en el registro terrestre, junto con el cráter Sudbury en Canadá y Vredefort en el Sur de África.

La estructura del cráter está caracterizada por anomalías gravimétricas y magnéticas semicirculares. El sector central se caracteriza por altos valores gravimétricos y una anomalía magnética dipolar invertida, asociadas con el levantamiento central del basamento (Sharpton *et al.*, 1993; Gulick *et al.*, 2013). En superficie la estructura se marca por una depresión topográfica, fracturas y un anillo de cenotes sobre el borde del cráter, formado por compactación diferencial del material fragmentado.

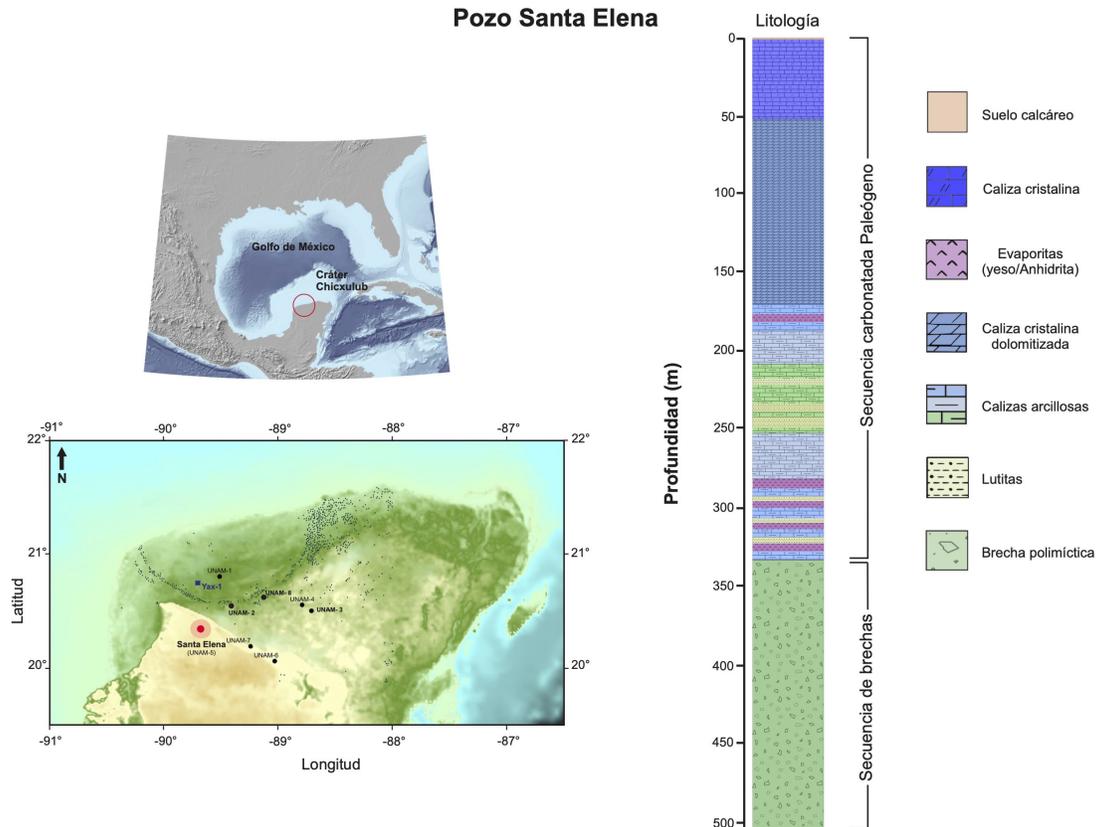


Figura 1. Pozo Santa Elena, Programa de perforaciones Científicas Chicxulub. (a) Localización del Pozo Santa Elena (U5) y de los pozos del primer programa de perforaciones científicas de la UNAM. (b) Columna del Pozo Santa Elena (García-Garnica, Perez-Cruz, 2021).

El cráter tiene un diámetro de 200 km, con centro geométrico en la línea de costa en Chicxulub Puerto. La excavación transiente involucró movimientos de rocas de la corteza inferior y media, con formación del levantamiento central y el anillo de picos. El colapso de la pluma de eyecta emplazó material a altas temperaturas, formando cortinas laterales que se desplazaron miles de kilómetros. La fracción fina se dispersó en forma global. Las brechas próximas se emplazaron con una estratigrafía invertida con unidades ricas en clastos de roca fundida, basamento y brechas ricas en carbonatos. La unidad de roca fundida se extiende en la zona central del cráter, con paquetes en la zona anular. El impacto dio origen a un sistema hidrotermal, activo por un periodo de unos 2-3 millones de años (Kring *et al.*, 2004; 2020, Escobar-Sánchez, Urrutia Fucugauchi, 2010; Velasco-Villareal *et al.*, 2011; Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2011).



El Pozo Santa Elena se localiza en el sector sur de la estructura, en el extremo norte de la Sierra de Ticul. La perforación de 504 m de profundidad muestreó las secuencias de carbonatos y de brechas de impacto (Fig. 1b).

La columna está constituida por una delgada capa de suelo, subyacente a una secuencia de calizas arcillosas o margas, y calizas cristalinas dolomitizadas, alternando con capas de lutitas y algunos lentes evaporíticos. Los depósitos de impactitas se localizan a 332 m de profundidad, formados por brechas polimícticas con clastos de carbonatos, evaporitas y basamento (Fig. 1) (García-Garnica, Pérez-Cruz, 2021). Los fragmentos de basamento incluyen granitos, granodioritas, ígneas extrusivas y metamórficas. Los clastos de evaporitas incluyen fragmentos de anhidritas y yeso. En las brechas se observan minerales de cuarzo, feldespatos, vidrio diapléctico y roca fundida.

3. Métodos

La identificación y caracterización de la mineralogía y propiedades magnéticas a lo largo de todo el Pozo Santa Elena se ha reportado en estudios anteriores (e.g., Velasco-Villarreal *et al.*, 2011). Sin embargo, en este estudio, se seleccionaron núcleos correspondientes a los intervalos con valores altos de susceptibilidad magnética asociados con cambios en sus características litológicas, y se realizaron análisis con más detalle.

La susceptibilidad magnética se midió con un equipo de susceptibilidad magnética Bartington MS2E, con una resolución de muestreo de 1 cm a lo largo de los núcleos. Se tomaron mediciones adicionales en muestras perforadas, empleando un equipo Bartington MS2B, de doble frecuencia.

Este estudio incluyó mediciones de propiedades magnéticas con análisis de ciclos de histéresis, adquisición de magnetización remanente isoterma y curvas de variación de la susceptibilidad con temperatura. Las mediciones de histéresis se realizaron con un equipo PMC MicroMag 2900 y las curvas de susceptibilidad en función de la temperatura con un equipo Bartington MS2W para altas temperaturas (Dunlop, Ozdemir, 2001).

4. Resultados

En el registro de susceptibilidad magnética en la secuencia de brechas del Pozo Santa Elena (Fig. 2), se observan variaciones de gran amplitud, asociados a la litología y a los minerales magnéticos (ferrimagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos), como se explica a continuación.

4.1 Susceptibilidad y propiedades magnéticas

Las variaciones en el registro de susceptibilidad marcan los cambios en composición y concentraciones relativas de minerales magnéticos, tamaño de los minerales, texturas y grados de alteración (Fig. 2). Los resultados indican que los portadores de la magnetización remanente son principalmente magnetitas y titanomagnetitas, con estados de dominio pseudo-sencillo. Ejemplos de ciclos de histéresis y un diagrama de estado de dominio se muestran en la Figura 3, y las curvas de variación de la susceptibilidad en función de la temperatura en la Figura 4.

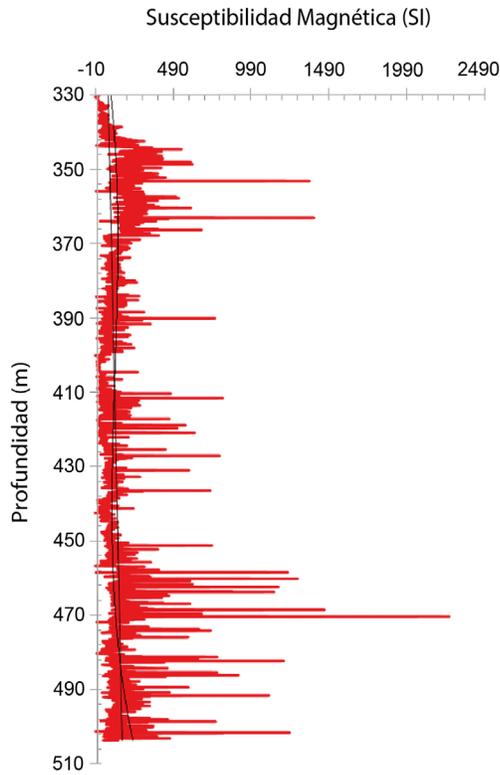
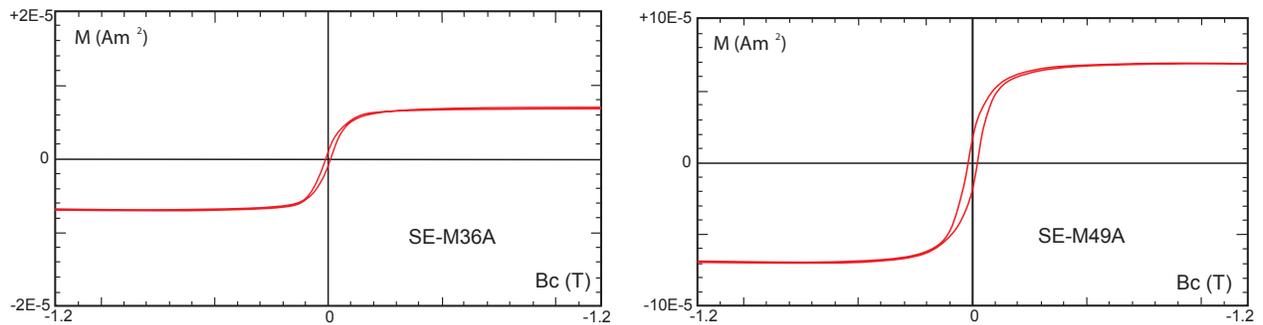


Figura 2. Registro de susceptibilidad magnética del Pozo Santa Elena (adaptada de Urrutia Fucugauchi *et al.*, 2014). Curvas de tendencia de baja amplitud e intervalos con variabilidad y valores altos.



a) Pozo Santa Elena
Secuencia brechas

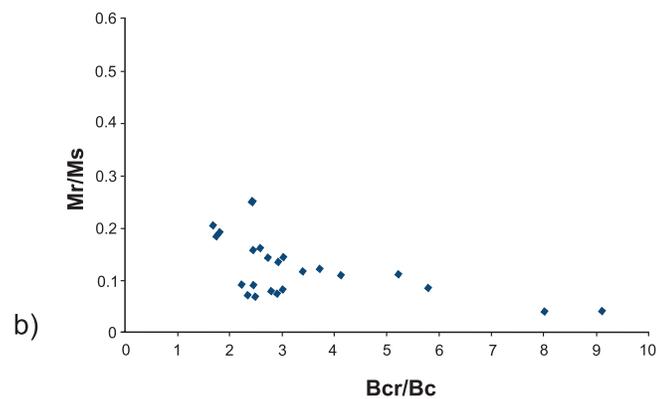


Figura 3. (a) Ciclos de histéresis. (b) Diagrama de estado de dominio.

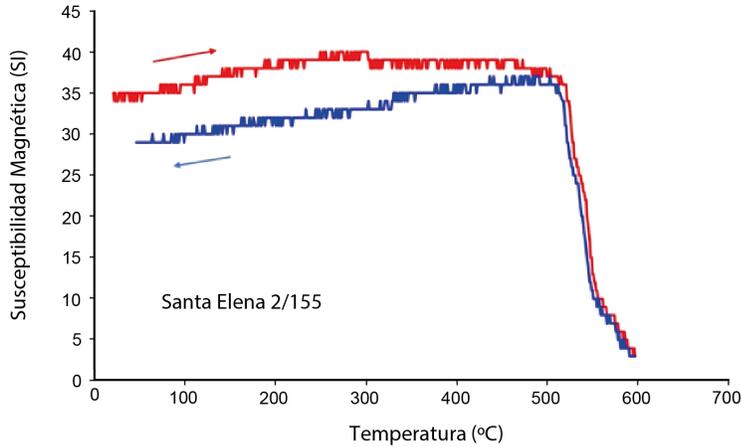


Figura 4. Curva de variación de susceptibilidad en función de la temperatura.

4.2 Litología y características texturales

A continuación se describe la litología y las características texturales de intervalos seleccionados, que representan los principales cambios en la secuencia de brechas.

Intervalo de 352.85 a 355.95 m (Núcleo caja 106)

Este intervalo está conformado por brechas de color gris verdoso con fragmentos de calizas arcillosas

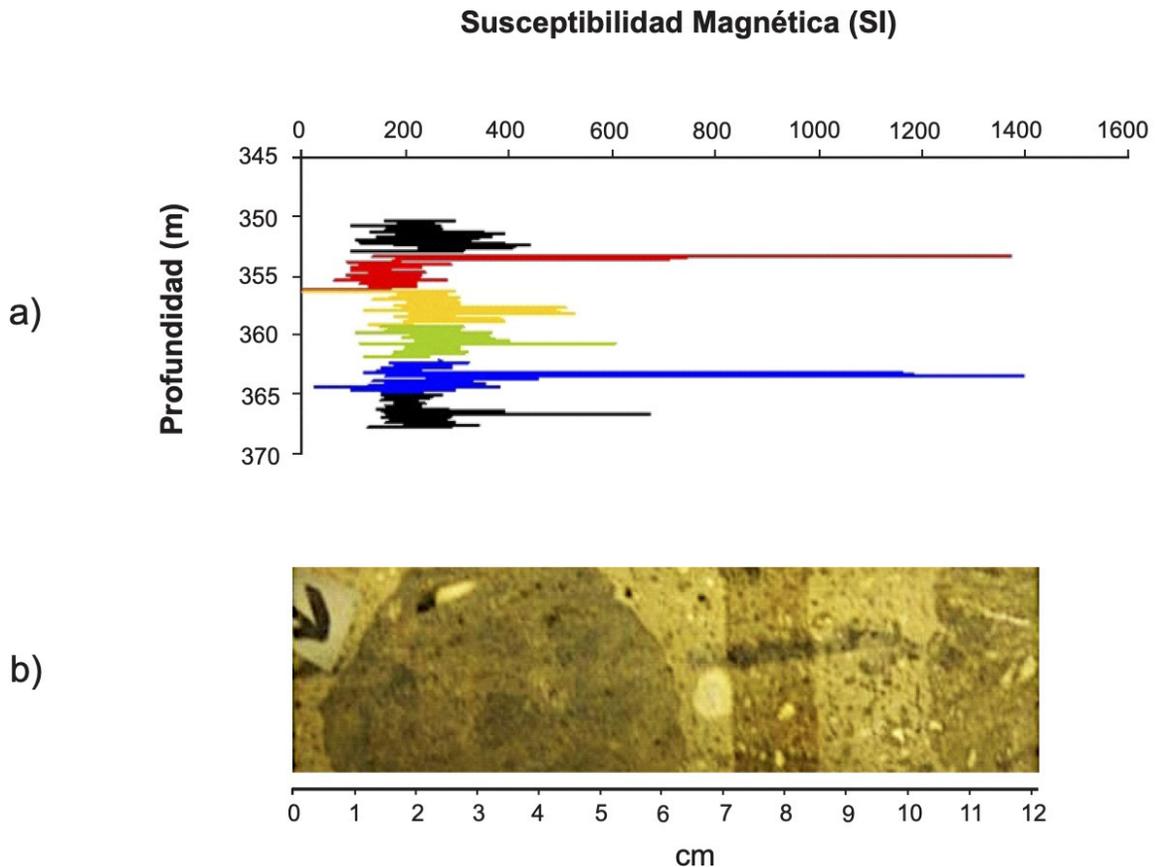


Figura 5. (a) Registro de susceptibilidad magnética en intervalo el intervalo que va de 345 a 370 m. (b) Imagen digital del segmento del núcleo en la profundidad de 353 m, correspondiente a valores altos de susceptibilidad magnética.



y evaporitas. El tamaño de los clastos varía de 0.5 a 3 cm, subangulosos a subredondeados, mal clasificados y sin graduación. La matriz es arenosa muy fina o limosa. Se observan abundantes nódulos de lutita que a veces rodean los fragmentos de mayor tamaño. Los clastos de anhidrita (blanco y negro) son subangulosos, poco abundantes y de tamaños aproximadamente entre 1 y 2 cm. La matriz representa alrededor del 10%.

La susceptibilidad magnética en el intervalo muestra variaciones de valores de 0 a $1364.3 \cdot 10^{-6}$ SI. (Fig. 5).

Este intervalo está conformado por brechas con fragmentos de caliza, lutitas (con abundantes nódulos) y anhidrita (menos abundantes), con clastos que varían de 0.5 a 3 cm. Los fragmentos varían de subanguloso a subredondeado; material mal clasificado, sin gradación, matriz de arena muy fina a limosa superior al 10%, soportando a la roca con algunos fragmentos esporádicos de vidrio. Por ejemplo, a los 359.15 m se observa un fragmento de granito metamorizado de color verde claro de unos 2 cm de longitud.

Los valores de susceptibilidad magnética en este segmento del núcleo muestran variaciones de 101.3 a $604.7 \cdot 10^{-6}$ SI.

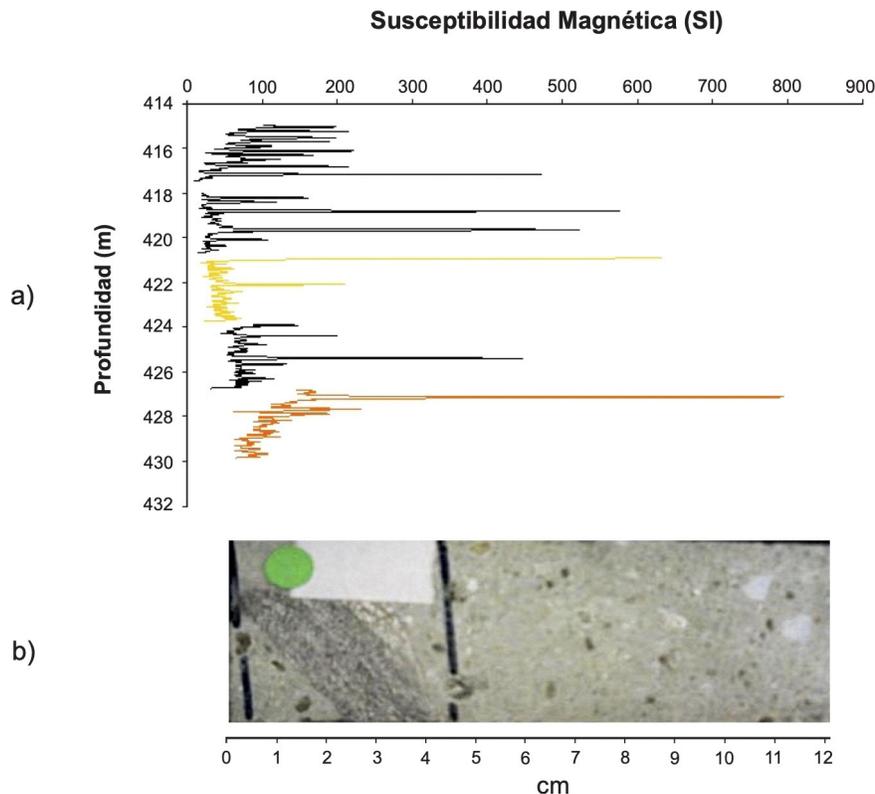


Figura 6. (a) Registro de susceptibilidad magnética correspondiente a la profundidad de 415 a 430 m. (b) Imagen digital del segmento del núcleo en la profundidad de 420.9 m, correspondiente a los valores altos de susceptibilidad magnética.

Intervalo de 420.10 a 423.15 m (Núcleo caja 129)

En este intervalo las brechas son de color verde claro a pardo, compuestas por fragmentos de 3.5 a 7 cm, que van de angulosos a subredondeados, con mala clasificación debido a la irregularidad en el tamaño de los clastos y con textura fluidal, característica de las rocas que han sufrido un metamorfismo. Presentan

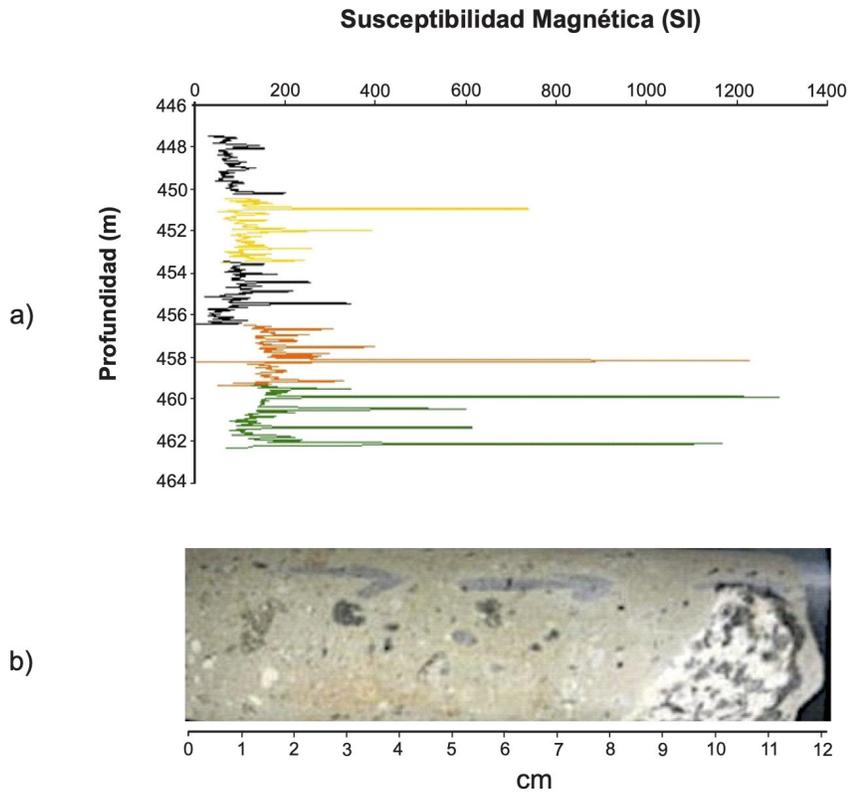


Figura 7. (a) Registro de susceptibilidad magnética del intervalo 446 a 464 m. (b) Imagen digital del segmento de núcleo con clastos de basamento.

algunos fragmentos de gneis, cuarzo y feldespatos, fragmentos de calizas, y rocas intrusivas y extrusivas acompañadas con matriz vítrea. La matriz representa aproximadamente el 40% del total de la roca, los fragmentos son en su mayoría vidrio alterado y en menor cantidad arcillosas.

Los valores de susceptibilidad magnética en este segmento del núcleo varían entre 16.2 a $625.9 \cdot 10^{-6}$ SI (Fig. 6).

Intervalo de 456.75 a 459.65 m (Núcleo caja 141)

En este intervalo las brechas son de color gris verdoso, constituidas por clastos de roca semiangulosos y semiesféricos de caliza y rocas cristalinas, vidrio sin alterar en una matriz arcillosa y fragmentos de roca recristalizada. El porcentaje de matriz es de aproximadamente 20%. El tamaño de los clastos va de 1 mm a 6 cm, muy mal clasificados y con una gradación normal.

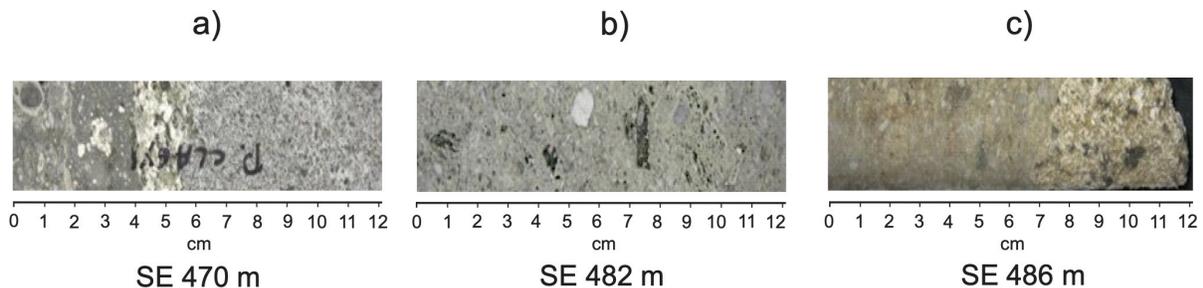


Figura 8. Imágenes digitales de núcleos con valores altos de susceptibilidad magnética. Núcleos que muestran clastos de basamento. Núcleos corresponden a las profundidades de (a) 470.34 m, (b) 482.34 m y (c) 486.15 m.



Los valores de susceptibilidad magnética en este segmento varían de 0 a $1226.3 \cdot 10^{-6}$ SI (Fig. 7).

A lo largo de la secuencia de brechas, entre 332.05 y 347.05 m, se presenta estratificación graduada normal. En la cima los clastos son menores a 1 mm y se presenta laminación cruzada, mientras que en la base, los fragmentos son de grano grueso. En la secuencia superior de brechas entre 347.05 a 412.05 m, se observan fragmentos angulosos en la cima, con 1 a 4 cm de diámetro y en la base con diámetros menores a 0.5 cm. También se presentan fragmentos de vidrio y se observan lentes de brecha con mayor concentración de fragmentos pequeños de tamaños menores a 5 mm. En el intervalo de 412.05 a 464.80 m, se presentan clastos de texturas ígneas con vesículas y el tamaño de clastos disminuye. En el intervalo de 464.80 a 503.9 m se presentan fragmentos de basamento de 0.5 a 1.5 cm, muy angulosos. Las tendencias de baja amplitud en el registro de susceptibilidad (Fig. 2) son dominadas por la respuesta de la matriz. Los valores altos se asocian con efectos de los clastos que presentan los valores más altos de susceptibilidad magnética (Fig. 8).

5. Discusión

A partir de los cambios de litología, textura y mineralogía, y su correlación con el registro de susceptibilidad magnética se caracterizaron las unidades de brecha en el Pozo Santa Elena, en el Cráter Chicxulub. El amplio rango de variación de la susceptibilidad magnética se asocia a la heterogeneidad de las brechas, matriz, texturas, concentración de clastos y efectos de alteración. La matriz en las brechas presenta una variación que va del predominio de carbonatos a la presencia de roca fundida. Los clastos son de carbonatos, basamento y partículas de roca fundida.

La susceptibilidad magnética en las brechas es dominada por óxidos de hierro y titanio, magnetitas, maghemita y hematita, además de sulfuros e hidróxidos, mostrando un amplio rango de variación, con valores altos asociados a minerales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos (Fig. 2). En las unidades superiores de brechas se presenta estratificación graduada con fragmentos de brecha.

En la secuencia de brechas del Pozo Santa Elena, los análisis de magnetización remanente natural, coercitividad, variación de la susceptibilidad con temperatura e histéresis, indican que los portadores de la magnetización remanente son principalmente magnetitas y titanomagnetitas, con estados de dominio pseudo-sencillo (Fig. 3). Las direcciones de magnetización muestran polaridades reversas y normales, que sugieren remagnetización, posiblemente por alteración hidrotermal, que es comparable con lo encontrado en el Pozo Yaxcopoil-1, perforado en el sector de terrazas del cráter, en donde se observan efectos de alteración hidrotermal en la mineralogía y en propiedades magnéticas (Kring *et al.*, 2004; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2004; Pilkington *et al.*, 2004; Velasco-Villarreal *et al.*, 2011).

Los estudios de la dinámica del impacto y formación del cráter, análisis de emplazamiento de la eyecta y material de fusión, requieren caracterizar las secuencias de impactitas y sedimentos pre- y post-impacto. En este contexto, las brechas del Pozo Santa Elena, se caracterizan por la heterogeneidad en composición mineralógica, química, texturas, etc., con matrices ricas en carbonatos, roca fundida y basamento. Estas características son el reflejo de los procesos de excavación y formación del cráter, de la deformación de la zona de impacto y de las alteraciones hidrotermales (Pierazzo, Melosh, 2000; Kring *et al.*, 2004; Collins *et al.*, 2008; Navarro *et al.*, 2021).



La variaciones en los registros estudiados están asociados al impacto, que produjo la profunda excavación y fragmentación de las rocas de la corteza a profundidades del orden de 25 km (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2011), lo cual incluyó el levantamiento del basamento y la formación de una estructura central que se eleva varios kilómetros sobre el cráter. Los efectos de turbulencia, el colapso de material dentro de la nube y cortinas de eyecta depositaron el material fragmentado en la zona del cráter, emplazando las secuencias de impacto (Pierazzo, Melosh, 2000; Collins *et al.*, 2008; Urrutia-Fucugauchi, Pérez-Cruz, 2009; Gulick *et al.*, 2013).

6. Conclusiones

El análisis de susceptibilidad magnética en el Pozo Santa Elena permite caracterizar la secuencia de impacto, ya que los valores en las unidades de brecha muestran fluctuaciones amplias asociadas a la heterogeneidad de los materiales, a los clastos, matriz, minerales, texturas, distribución y grados de alteración. Los valores de susceptibilidad bajos están relacionados a matrices ricas en carbonatos y/o matrices en donde predominan clastos de carbonatos, mientras que los valores altos caracterizan matrices ricas en roca fundida y basamento. Valores intermedios marcan unidades de brecha ricas en partículas de roca fundida. Las tendencias de baja amplitud en el registro son dominadas por la respuesta de la matriz. Los fragmentos de granodioritas y granitos presentan los valores más altos de susceptibilidad magnética (Fig. 8).

La respuesta magnética en las brechas se asocia a óxidos de hierro y titanio (magnetita, maghemita y hematita). La mineralogía registra efectos de alteración hidrotermal. Los carbonatos presentan baja susceptibilidad y las brechas presentan valores variables con alta susceptibilidad. Los valores altos se asocian a los clastos de basamento.

Agradecimientos

El estudio forma parte de los proyectos de exploración geofísica y perforaciones del cráter Chicxulub y la Frontera Cretácico/Paleógeno. Se agradece el apoyo técnico en laboratorio de Víctor Macias, Martin Espinosa, a la M. en C. Marysol Valdez Hernández por el apoyo en algunas figuras, y a los estudiantes de servicio social y tesis. Contribución IICEAC-22-04.

Referencias

- Agarwal, A., Kontny, A., Kenkmann, T., Poelchau, M. H., 2019. Variation in magnetic fabrics at low shock pressure due to experimental impact cratering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124 (8), 9095-9108.
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 280, 1095-1108.
- Collins, G. S., Morgan, J. Barton, P., Christeson, G.L., S. Gulick, S., Urrutia-Fucugauchi, J., Warner, M., and Wünnemann, K. 2008. Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is



- caused by target heterogeneity. *Earth Planetary Science Letters*, 270, 221-230.
- Delgadillo-Peralta, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Pérez-Cruz, L. Velasco-Villarreal, M., 2015. Rock magnetic and AMS fabrics characterization of suevitic breccias from the Cretaceous-Paleogene Chicxulub impact crater. *Revista Mexicana Ciencias Geológicas*, 32 (1), 145-155.
- Dunlop, D. J., Özdemir Ö, 2001. *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge University Press, Cambridge, 573 pp.
- Ellwood, B. B., MacDonald, W. D., Wheeler, C., Benoist, S. L., 2003. The K-T boundary in Oman: identified using magnetic susceptibility field measurements with geochemical confirmation. *Earth Planetary Science Letters*, 206 (3-4), 529-540.
- Escobar Sánchez, J. E., Urrutia Fucugauchi, J., 2010. Chicxulub crater post-impact hydrothermal activity - evidence from Paleocene carbonates in the Santa Elena Borehole. *Geofísica Internacional*, 49, 97-106.
- García-Garnica, E. M., Pérez-Cruz, 2021. Hyperthermal events recorded in the Palaeogene carbonate sequence of southern Gulf of Mexico-Santa Elena borehole, Yucatan Peninsula. *Geological Journal*, 1-15. <https://doi.org/10.1002/gj.4285>
- Gulick, S., Christesen, G., Barton, P., Grieve, R., Morgan, J., Urrutia Fucugauchi, J., 2013. Geophysical characterization of Chicxulub crater. *Reviews Geophysics*, 51 <https://doi.org/10.1002/rog.20007>
- Kring, D. A., Hörz, F., Zurcher, L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2004. Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: Initial results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico. *Meteoritics & Planetary Science*, 39 (6), 879-897. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00936.x>
- Kring, D.A., Tikoo, S. M., Schmieder, M., Riller, U., Rebolledo-Vieyra, M., Simpson, S. L., Osinski, G.R., Gattacceca, J., Wittmann, A., Verhagen, C. M., Cockell, C. S., Coolen, M., Longstaffe, F. J., Gulick, S., Morgan, J., Bralower, T., Chenot, E., Christeson, G., Claeys, P., Ferrière, L., Gebhardt, C., Goto, K., Green, S., Gulick, S., Jones, H., Lofi, J., Lowery, C., Ocampo-Torres, R., Pérez-Cruz, L., Pickersgill, A., Poelchau, M., Rae, A., Rasmussen, C., Sato, H., Smit, J., Tomioka, N., Urrutia-Fucugauchi, J., Whalen, M., Xiao, L., Yamaguchi, K., 2020. Probing the hydrothermal system of the Chicxulub impact crater. *Science Advances*, 6 (22): 1 – 9. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aaz3053>.
- Louzada, K. L., Weiss, B. P., Maloof, A. C., Stewart, S. T., Swanson-Hysell, N. L., Soule, S. A., 2008. Paleomagnetism of Lunar impact crater, India. *Earth and Planetary Science Letters*, 275 (3-4), 308-319.
- Navarro, K. F., Urrutia-Fucugauchi, J., Villagran-Muniz, M., Sánchez-Aké, C., Perez-Cruz, L., Navarro-González, R., 2021. Physical characterization of a simulated impact-vapor plume using laser ablation of Chicxulub sediments. *Planetary and Space Science*, 206, 105311.
- Pérez Cruz, L., Urrutia Fucugauchi, J., 2010. Holocene laminated sediments from the southern Gulf of California: geochemical, mineral magnetic and microfossil study. *Journal of Quaternary Science*, 25, 989-1000. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jqs.1386>
- Penfield, G. T., Camargo, A., 1981, Definition of a major igneous zone in the central Yucatán platform with aeromagnetism and gravity, *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 51, 37.



- Pierazzo, E. Melosh, H. J., 2000. Understanding oblique impacts from experiments, observations, and modelling. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 28, 141-167.
- Pilkington, M., & Grieve, R. A. F., 1992. The geophysical signature of terrestrial impact craters. *Reviews of Geophysics*, 30 (2), 161-181.
- Pilkington, M., Ames, D. E., Hildebrand, A. R., 2004. Magnetic mineralogy of the Yaxcopoil-1 core, Chicxulub. *Meteoritics and Planetary Science*, 39 (6), 831-841.
- Sharpton, V. L., Burke, K., Camargo, A., Hall, S. A., Lee, D. S., Marin, L. E., Suárez, G., Quezada, J. M., Spudis, P. D., Urrutia Fucugauchi, J., 1993. Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis. *Science*, 261 (5128), 1564-1567. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.261.5128.1564>.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Barton, P. J. Bown, P. R., Bralower, T. J., Christeson, G. L., Claeys, P., et al., 2010. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327 (5970), 1214-1218. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1177265>
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental Magnetism. Allen & Unwin: *Springer, London*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-8036-8>
- Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., Trejo-Garcia, A., 1996. UNAM Scientific Drilling Program of Chicxulub Impact Structure-Evidence for a 300-kilometer crater diameter. *Geophysical Research Letters*, 23 (13), 1565-1568. <https://doi.org/10.1029/96GL01566>
- Urrutia-Fucugauchi, J., Morgan, J., Stöffler, D., Claeys, P., 2004. The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP). *Meteoritics & Planetary Science*, 39 (6), 787-790.
- Urrutia Fucugauchi, J., Pérez Cruz, L., 2009. Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces. *International Geology Review*, 51, 1079-1102. <https://doi.org/10.1080/00206810902867161>
- Urrutia Fucugauchi, J., Camargo, A. Z., Pérez-Cruz, L., Pérez-Cruz, G., 2011. The Chicxulub multiring impact crater, Yucatan carbonate platform, Mexico. *Geofísica Internacional*, 50, 99-127.
- Urrutia Fucugauchi, J., Delgadillo-Peralta, M., Pérez-Cruz, L., Velasco-Villarreal, M., 2012. Heating-induced changes in the anisotropy of magnetic susceptibility of impact breccias, Chicxulub crater (Mexico). *Studia Geophysica Geodaetica*, 56, 769-787
- Velasco Villarreal, M., Urrutia Fucugauchi, J., Rebolledo Vieyra, M., Pérez Cruz, L., 2011. Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater – Implications for ejecta emplacement and hydrothermal Processes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 186 (3), 154-171. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.04.003>
- Yokoyama, E., Trindade, R. I. F. D., Lana, C., Souza Filho, C. R. D., Baratoux, D., Marangoni, Y.R., Tohver, E., 2012. Magnetic fabric of Araguinha complex impact structure (Central Brazil): Implications for deformation mechanisms and central uplift formation. *Earth Planetary Science Letters*, 331, 347-359.