

GEOFÍSICA APLICADA AL ESTUDIO DE NUEVAS ESTRUCTURAS DE IMPACTO EN BOLIVIA

Rodolfo Ayala Sánchez Ph.D.
Facultad de Ciencias Geológicas, Carrera de Ingeniería Geológica, UMSA, Av. 6 de Agosto.
Edif. HOY, Piso 7. La Paz, Bolivia.
rasayala@hotmail.com

RESUMEN

A partir de la catalogación de fragmentos de meteoritos que han sido encontrados en diferentes sitios del territorio nacional, estos se constituyen en evidencias de colisiones de otros grandes meteoritos que en el pasado geológico habrían producido cráteres de impacto o astroblemas en Bolivia. Para identificar los astroblemas se ha empleado información recopilada: histórica, geológica, imágenes satelitales y Modelos Digitales de Elevación; análisis geomorfológico y geofísica aplicada: a partir de datos de gravimetría-magnetometría satelital y terrestre. Se han identificado y estudiado ocho posibles cráteres de impacto, de diferentes diámetros desde 1.2 a 8 km, en los Departamentos bolivianos de Chuquisaca, La Paz, Oruro y Potosí, cuyos resultados aportan nuevos elementos que permiten su discriminación y confirmación, si estas son estructuras de impacto. Los tres cráteres previamente ya identificados y analizados son: Araona, Colluma y Ulo-Llica, y los otros cinco nuevos cráteres de impacto estudiados y propuestos son: Cerro Meteorito, Desierto Silole, Laguna Cráter, Maragua y Quillacas.

Palabras claves

Meteoritos, Geofísica, estructuras de impacto, cráteres, anomalías gravimétricas y magnéticas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, a nivel mundial se documenta 190 estructuras de impacto (PSAAC - Centro de Ciencia Planetaria y Espacial de la Universidad de New Brunswick, 2018 y Ernston y Claudin, 2018) y se tiene también 930 posibles lugares que son sospechosos de ser estructuras de impacto a ser confirmadas (EDEIS, 2018) clasificadas por orden de probabilidad (Figura 1).

La morfología de los cráteres de impacto terrestre está en función al diámetro del cráter; y son de dos tipos básicos de estructuras de impacto terrestre son: i) estructuras simples, hasta 4 km de diámetro, con rocas del borde levantadas y volcados, que rodean una depresión en forma de vasija y parcialmente ocupados por brechas y ii) estructuras de impacto complejos y cuencas, generalmente de 4 km o más de diámetro, con una elevación central distinta en la forma de un pico y/o anillo, un canal anular y un borde caído; las partes internas de estas estructuras están parcialmente llenas de brechas y rocas fundidas por el impacto llamadas también tectitas (Grieve, 1990).

En Sudamérica se han identificado 12 cráteres de impacto comprobados (Ernston y Claudin, 2018; PASSC, 2018) y unos 44 otros sitios a confirmar (Ayala, 2017, EDEIS, 2018) que son mostrados en la Figura 1.

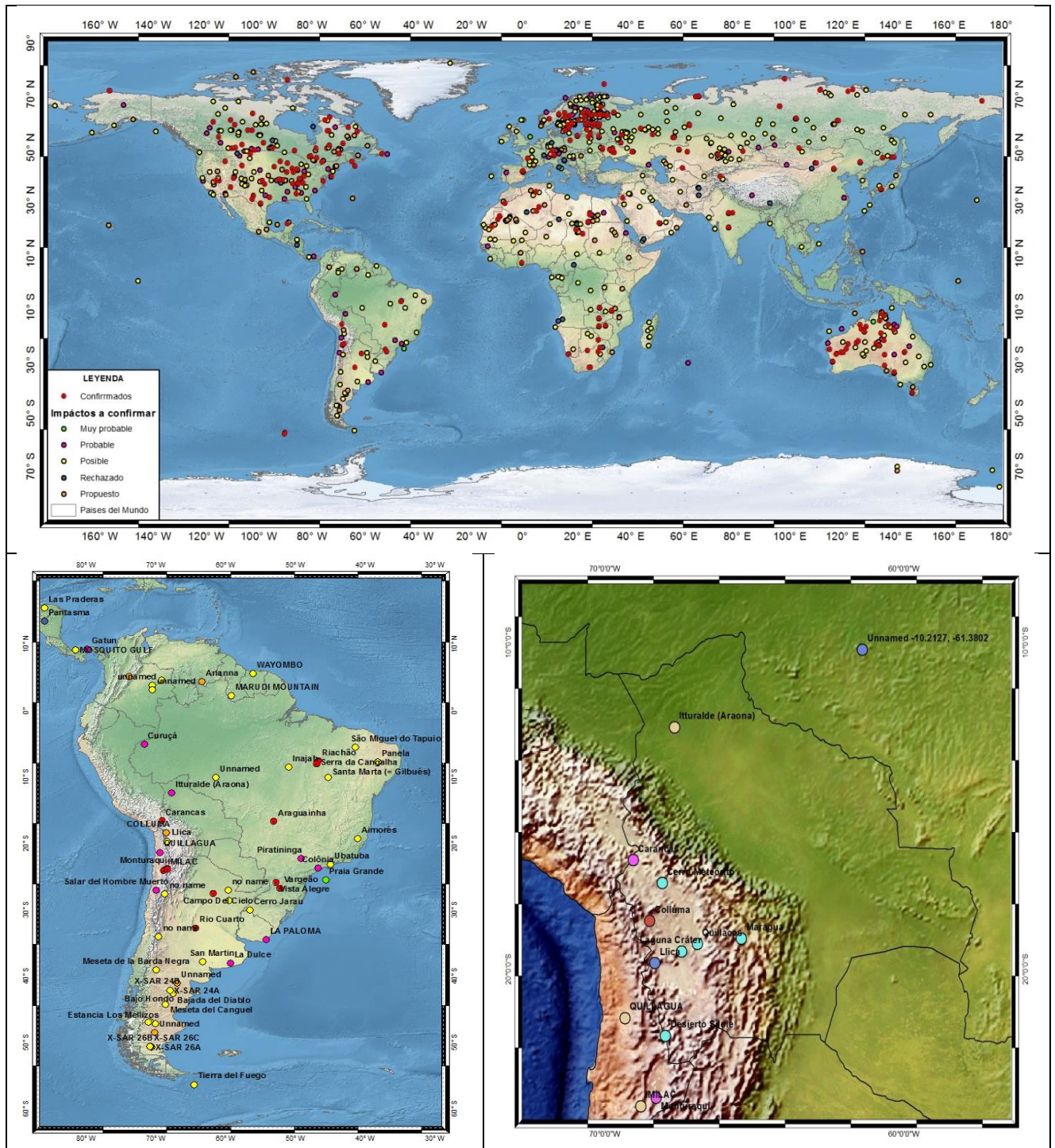


Figura 1. Mapa mundial mostrando las estructuras de impacto confirmadas (círculos de color rojo – Ernston y Claudin, 2018; PASSC, 2018) y las estructuras sospechosas de ser cráteres (círculos - EDEIS 2018) parte superior, debajo izquierda, mapa de Sudamérica y debajo derecha, mapa de impactos a confirmar en Bolivia. La topografía y batimetría es del modelo ETOPO1 - NGDC, 2014 (Fuente: Elaboración propia).

METEORITOS CAÍDOS EN BOLIVIA

Por otra parte, en Bolivia se encontraron seis meteoritos en su territorio (Ayala, 2017), el primero, es *el Pooposo*, una roca de dos kilos de hierro y níquel encontrada en Poopó y guardada en el Museo Británico de Londres y otra en el Museo de Historia Natural de Viena;

el segundo, es *el Sevaruyo*, de 12 gramos, hallado en Oruro en 2001, siendo un pedazo está en el Planetario de La Paz y otros dos en Estados Unidos; el tercero, *el Cochabamba*, de 82 gramos, se encuentra en el Museo de Viena, el cuarto, *el Bolivia*, que pesa aproximadamente 21 kilos un fragmento se encuentra en el Planetario Max Schereier y el ultimo, *sin nombre* y a reconfirmar encontrado en la provincia Sur Lipez (La Razón, 2016) y el sexto que cayeron en el Municipio de *Aiquile* en junio de 2016 (Pagina Siete, 2016) que evidencian la caída de meteoritos y por ende de posibles cráteres de impacto en el país.

POSIBLES CRÁTERES DE IMPACTO EN BOLIVIA

En el caso de Bolivia hasta el momento no se ha confirmado completamente la existencia de ninguna estructura de impacto, siendo que hay tres sitios ya identificados y a confirmar (Grieve et al., 1988; Crósta, 2004, Mollanes, 2004, Rajmon, 2009 y Ayala, 2017) que son: Iturrealde, Ulo-Llica, Colluma, mientras que los otros cinco nuevos cráteres de impacto estudiados y propuestos son: Cerro Meteorito, Desierto Silole, Laguna Cráter, Maragua y Quillacas (Figura 1).

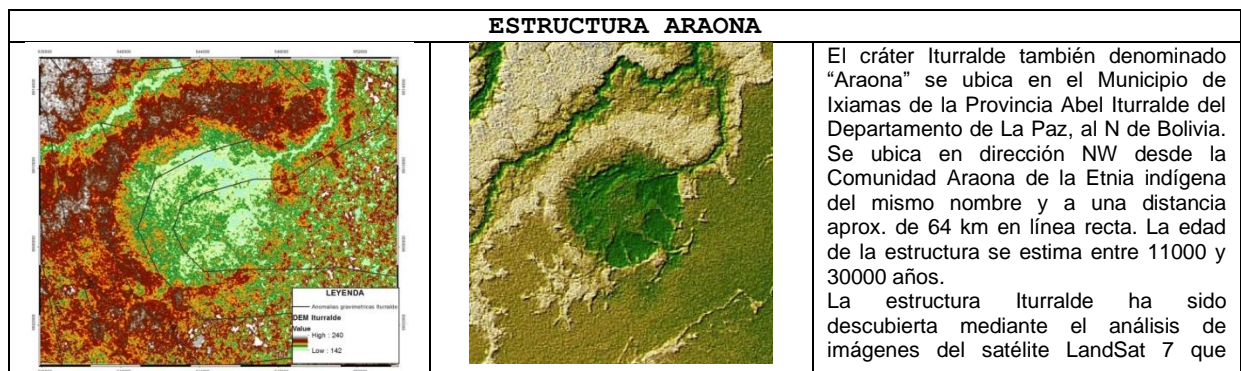
El objetivo del presente estudio es estudiar y validar las ocho posibles estructuras de impacto propuestas en Bolivia utilizando datos geomorfológicos, geológicos y geofísicos: gravimetría y magnetometría tanto espacial como terrestre que permitan aportar nuevas evidencias sobre su naturaleza.

METODOLOGÍA UTILIZADA

Para estudiar los ocho propuestos cráteres de impacto se utilizó la siguiente metodología:

- Recopilación y análisis de datos existentes: geomorfológicos, geológicos, petrográficos petrológicos y geofísicos.
- Análisis morfológico, estimación de forma, diámetro y rasgos mediante técnicas de teledetección a partir de imágenes satelitales y Modelos de Elevación de Terreno (ASTER GDEM, 2014) realizando perfiles topográficos.
- Análisis geológico (SERGEOMIN, 2000).
- Análisis de datos geofísicos espaciales tanto gravimétricos de la misión GRACE (NASA et al., 2016) y los datos del modelo digital de anomalías magnéticas mundiales - WDMAM (Dyment et al., 2015).
- Análisis de datos gravimétricos terrestres (Figura 2) del International Gravimetric Bureau - BGI (2018).
- Elaboración de modelo geofísico para cada sitio propuesto (Figura 2).
- Resultados y validez de cada estructura propuesta y estudiada (Tabla 1).

MODELOS GEOFÍSICOS DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS



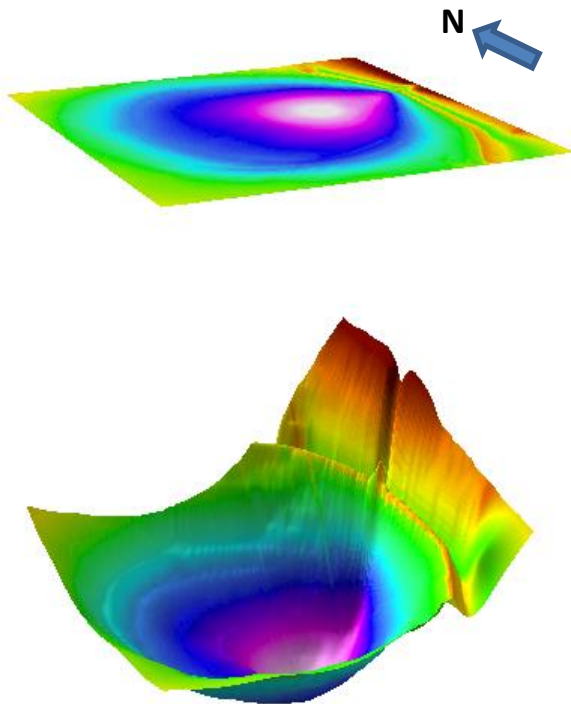
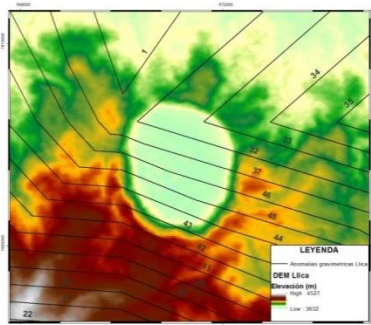


Figura 2a. Vistas en 2D (parte superior) y 3D (parte inferior) de la anomalía negativa de Bouguer aproximadamente circular típica debajo del cráter de impacto de la estructura Iturrealde (en base a los datos de Jarandilla, 2009).

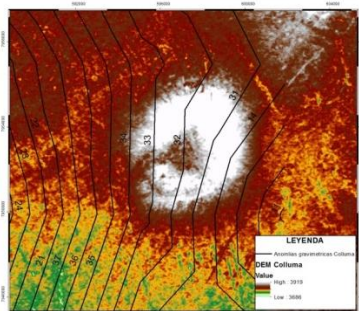
revela una estructura circular de 8 km de diámetro con diferencias de altitud entre el centro y el anillo de aproximadamente 20 m (Telleria y Lejsek, 1975; Campbell et al., 1989; ICE, 2002; Jarandilla, 2009; Acevedo et al., 2015). La zona del cráter está cubierta por bosques tropicales y se encuentra en la región morfoestructural de las Planicies Benianas relativamente plana con sábanas y bosques tropicales. La estructura Iturrealde está conformado principalmente por depósitos de cuaternarios conformados por arenas, arcillas y gravas y en los cauces de los ríos cercanos por depósitos aluviales de edad cuaternaria reciente. Al lugar se han realizado 4 expediciones: la primera en 1989 (Campbell, 1989) que por las condiciones climáticas no llegaron al lugar; la segunda expedición y tercera expedición fueron realizadas por la NASA el año 2002 para verificar si había evidencias de un carácter, la última llegando al lugar y recopilando datos (ICE, 2002) y la cuarta el año 2009 (Jarandilla, 2009). Las evidencias muestran que la teoría más probable de su origen es que correspondería a la explosión de un bólido cercano a la superficie que habría producido el cráter circular (Malkova et al., 2013). A su vez, las esférulas encontradas fuera del cráter, típicos rasgos geológicos de cráteres de impacto, y forma típica de las anomalías de gravedad (Figura 2a) muestra que hay una estructura significativa enterrada bajo el sedimento que correspondería de manera confirmada (Jarandilla, 2009; Telleria y Jarandilla, 2009, Ayala, 2017).

ESTRUCTURA ULO-LLICA



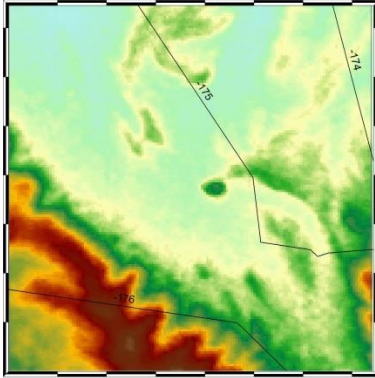
La estructura Ulo-Llica se ubica en el Municipio del mismo nombre perteneciente a la Provincia Daniel Campos, del Departamento de Potosí, al SW de Bolivia. Morfoestructuralmente se encuentra en la Cordillera Occidental y es un área de tobas y lavas volcánicas de edad neógena recubierta por depósitos cuaternarios. Se ubica en dirección NE desde la localidad de Llica a una distancia aprox. de 9 km en línea recta. La edad de la estructura no ha sido estimada y fue identificado por primera vez por Crósta (2004) como un cráter anómalo entre una región donde se presentan volcanes, por lo que se clasificaría como una estructura de impacto posible.

ESTRUCTURA COLLUMA



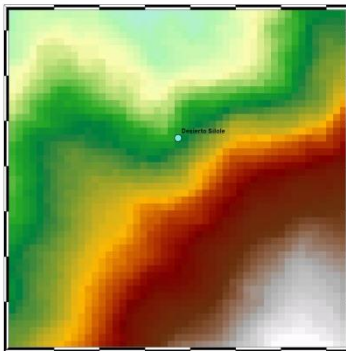
La estructura Colluma se ubica en el Municipio Turco perteneciente a la Provincia Sajama, del Departamento de Oruro, al suroeste de Bolivia. Morfoestructuralmente se encuentra en la Cordillera Occidental es un recubierta por depósitos de origen fluvioglacial de edad cuaternaria. Se ubica en dirección Noroeste desde la localidad de Huaylla a una distancia aproximada de 36 km en línea recta. Este fue identificado por primera vez por Moilanen (2004). No tiene ninguna anomalía gravimétrica asociada y correspondería probablemente a un domo volcánico colapsado y estaría descalificado.

ESTRUCTURA CERRO METEORITO



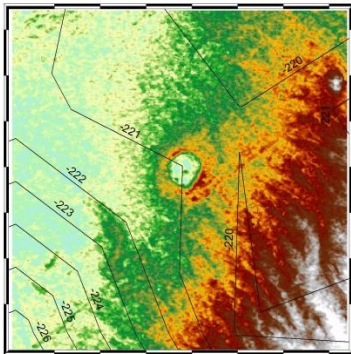
La estructura Colluma se ubica en el Municipio Turco perteneciente a la Provincia Sajama, del Departamento de Oruro, al suroeste de Bolivia y se ubica en dirección Noroeste desde la localidad de Huaylla a una distancia aproximada de 36 km en línea recta. Morfoestructuralmente se encuentra en la Cordillera Occidental podría ser un cuerpo volcánico conformado por tobas soldadas y recubierto por depósitos cuaternarios. Es promocionada por la Gobernación de La Paz – GADLP (2018) y las leyendas hablan de la ciada de cuerpo celeste de grandes dimensiones. No tiene ninguna anomalía gravimétrica asociada a una estructura de impacto siendo dudoso y probablemente correspondería a un domo volcánico erosionado de edad neógena.

ESTRUCTURA DESIERTO SILOLE



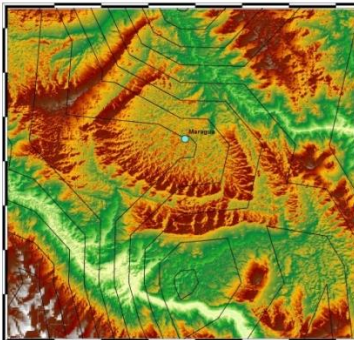
La estructura Desierto Silole se ubica en el Municipio San Pablo perteneciente a la Provincia Sur Lipez, del Departamento de Potosí, al suroeste de Bolivia (Figura 1). Morfoestructuralmente se encuentra en la Cordillera Occidental es un recubierta por depósitos de origen volcánico de edad cuaternaria. Se ubica en dirección Noroeste desde la localidad de Juntacha a una distancia aproximada de 20 km en línea recta. Es mencionado por los pobladores locales y no tiene ninguna anomalía gravimétrica asociada a una estructura de impacto siendo dudoso pudiendo ser una estructura volcánica meteorizada.

ESTRUCTURA LAGUNA CRATER



La estructura Laguna Cráter se ubica en el Municipio Salinas de Garci Mendoza perteneciente a la Provincia Ladislao Cabrera, del Departamento de Oruro, al suroeste de Bolivia en dirección Oeste a una distancia aproximada de 9 km desde la localidad de Tambo Tambillo. Morfoestructuralmente se encuentra en la Cordillera Occidental es un recubierta por depósitos de origen fluvio-glaciario de edad cuaternaria. Es mencionada y promocionada por agencias turísticas. No tiene ninguna anomalía gravimétrica asociada a una estructura de impacto siendo descalificado y más probablemente sería un maar que es un cráter volcánico ancho y bajo, producido por una erupción freático-magmática.

ESTRUCTURA MARAGUA



La estructura Maragua se ubica en el Municipio Sucre perteneciente a la Provincia Oropeza, del Departamento de Chuquisaca en la localidad del mismo nombre Morfoestructuralmente se encuentra en la Cordillera Oriental y está conformada por rocas de edad ordovícica y cretácica. Ha sido identificada por los locales como un cráter por su forma, aunque presenta una anomalía gravimétrica negativa pero no cerrada, confirmando no ser una estructura de impacto y esta descalificada siendo más bien una estructura sinclinal de forma elíptica y con cierre estructural en dirección SW formando una cuenca.

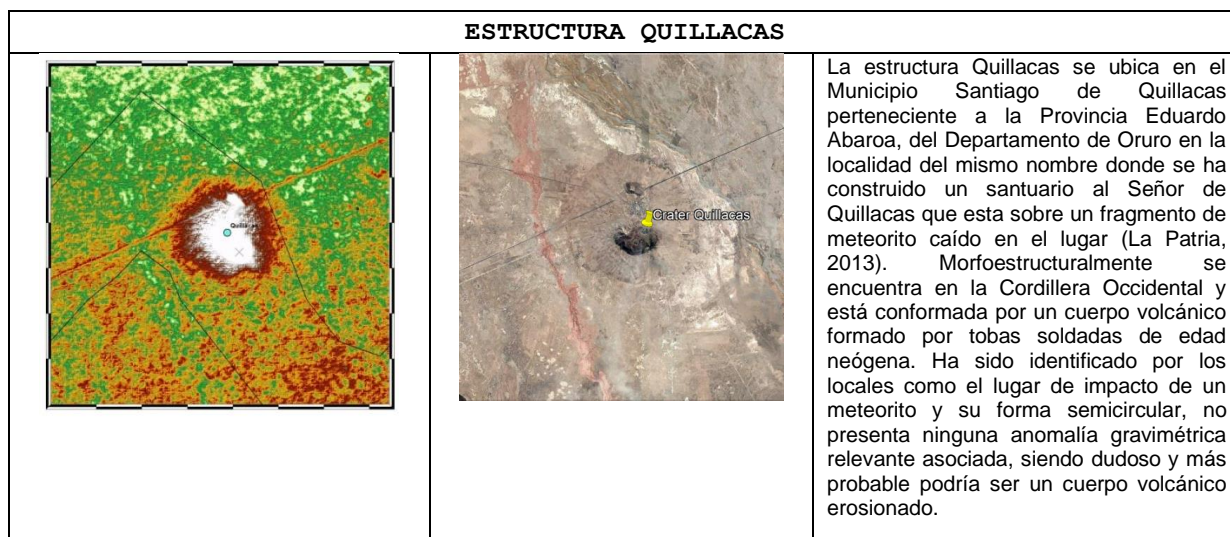


Figura 2. Mapa de anomalías de Bouguer (líneas negras en mgal) a partir de datos de gravimetría terrestre (BGI, 2018) sobre un DEM (ASTER GDEM, 2014) parte izquierda, e imágenes satelitales (Google Earth, 2018) parte central y descripción, parte derecha.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se resume los resultados del análisis, modelización geofísica y validez de las ocho estructuras de impacto propuestas.

Tabla 1. Características y validez de las estructuras de impacto propuestas en Bolivia.

NOMBRE	LOCALIZACIÓN			Edad (Ma)	ANÁLISIS MORFOLÓGICO CRÁTER			GEOLOGÍA	VDE	P y P	PRESENCIA DE ANOMALÍAS			ÍNDICE VALIDES
	LATITUD	LONGITUD	Z (m.s.n. m.)		FORMA	TIPO	DIÁMETRO (km)				MS	GS	GT	
Iturrealde (Araona)	-12.59	-67.67	1827	0.3	Estructura-SC	C	8	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depresión anular ▪ Protuberancia central ▪ Conos de deyección ▪ 3 anillos ▪ Drenaje centripetal 	Mala	No Hay minerales post-impacto y presencia Esférulas	No	No	Si	Probado
Ulo-Llica	-19.83	-68.32	3690	-	SC	S	2.8x2.5	Cráter	Buena	-	No	No	No	Posible
Colluma	-18.51	-68.08	3776	1.0	C	C	4.2x4.3	Estructura	Buena	-	No	No	No	Descalificado
Cerro Meteorito	-17.14	-68.07	4007	-	SC	C	0.4 x0.5	Estructura volcánica	Media	-	No	No	No	Dudoso
Desierto Silole	-22.04	-67.97	5124	-	Estructura-C	S	0.4x0.6	Estructura	Media	-	No	No	No	Dudoso
Laguna Cráter	-19.46	-67.43	3713	-	SC	S	1.5x1.2	Cráter	Buena	-	No	No	No	Descalificado
Maragua	-19.06	-65.43	3344	K	E	S	4.9x7.6	Estructura sinclinal	Buena	No	No	No	No	Descalificado
Quillacas	-19.24	-66.94	3834	-	C	C	3.6x3.5	Estructura	Media	-	No	No	No	Posible

VDE = Vista desde el espacio; P y M = Petrología y Petrología; MS = Magnéticas satelitales; GS = Gravimétricas espaciales; GT = Gravimétricas terrestres; C = Circular; SC = Semicircular; E= Eliptica; C = Complejo; S = Simple

CONCLUSIONES

- De las ocho estructuras propuesta la única estructura de impacto confirmada sería la del Cráter Araona por las todas las evidencias geomorfológicas, geológicas, petrográficas-petroológicas y geofísicas, demuestran que es un cráter de impacto debido a la caída de un meteorito, mientras que las estructuras Ulo-Llica y Quillacas serían posibles, las dudosas son: Cerro Meteorito y Desierto Silole, y las que estarían descalificadas serían: Colluma y Laguna Cráter y Maragua.

REFERENCIAS

- Acevedo, R.D., Maximiliano C. L., Rocca, J.F., Ponce and S.G. Stinc, 2015. Impact Craters in South America, Springer.
- ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model), 2014. The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (METI) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA).
<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html>"<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html>
- Ayala, R.R., 2017. Memorias del XVI EGAL - Encuentro de Geógrafos de América Latina – Bolivia del 26 al 29 de Abril de 2017, La Paz, Bolivia.
- BGI – International Gravimetric Bureau, 2018. Land Gravimetric Data, <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data>
- Crósta, A.P., 2004. A possible impact crater among craters (abstract). Meteoritics and Planetary Science 39 (8, Supplement): A27.
- Data Providers**, 2015. World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0, <http://www.wdmam.org>
- Dyment, J., Lesur, V., Hamoudi, M., Choi, Y., Thebault, E., Catalan, M., the WDMAM Task Force*, the WDMAM Evaluators**, and the WDMAM Campbell K.E., Grieve R.A.F., Pacheco J., Garvin, 1989. A newly discovery probable impact structure in Amazonian Bolivia, Natl. Geogr. Res. 5 (4), 495-499.
- EDEIS - Expert Database on Earth Impact Structures, 2018. <http://tsun.sccc.ru/nh/impact.php>
- Ernstson, K. Claudin, F., 2018. Ernstson y Claudin Impact Structures. Database of Earth impact structures. <http://www.impact-structures.com/database.htm>
- GADLP, 2018. Cerro Meteorito – La Paz, 2018. Bolivia es Turismo. <https://boliviaesturismo.com/cerro-meteorito-la-paz-bolivia-boliviaesturismo/>
- Grieve R. A. F., Wood C. A., Garvin J. B., Mclaughlin G. and Mchone J. F., 1988. Possible impact craters. In Astronaut's guide to terrestrial impact craters, edited. LPI Technical Report 88-03 Houston, TX, USA: Lunar and Planetary Institute. pp. 75-82.
- Grieve, R.A.F., 1990. Los cráteres de impacto en la Tierra, Scientific American, v. 262, pp. 66-73.
- ICE, 2002. http://www.blueiceonline.com/bluweb/ice_2002.pdf
- Jarandilla, I., 2009. Estudio de la génesis del cráter Iturralde, Provincia Abel Iturralde, Departamento de La Paz – Bolivia, Tesis de Grado, UMSA, La Paz, Bolivia.
- La Patria, 2013. Quillacas: la población construida en medio de un cráter de meteoro, 15 de diciembre de 2013, Bolivia.
- La Razón, 2016. Meteoritos en Bolivia, Caídos del cielo. Edición 9 nov 2016, http://www.la-razon.com/index.php?url=/suplementos/escape/Meteoritos-Bolivia-Caidos-cielo_0_2057194354.html
- Malkova K., Kletetschka G., West A., Bunch T., J. Wittke, J., 2013. Soil composition inside the posible crater in Bolivia, Iturralde: Material implying impact event of low density meteorite. 44th Lunar and Planetary Science Conference (2013). 1705.pdf .
- Moilanen J., 2004. List of probable and possible impact structures of the World. 29 October 2004. <http://www.somerikko.net/old/geo/imp/possible.htm>
- NASA, DLR, UCR, GFZ, 2016. GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment. http://www.csr.utexas.edu/grace/science_links.html
- NGDC, 2014. ETOPO1 Global Relief Model. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
- Página Siete, 2016. Reportan caída de meteoritos en tres comunidades del municipio de Aiquile.
- PASSC – Planetary and Space Science Centre, 2018. Base de Datos de Impactos Terrestres (EID). University of New Brunswick, Canadá. <http://www.unb.ca/fredericton/science/research/passc/>
- Rajmon, D., 2009. Impact database 2010.1. <http://impacts.rajmon.cz/>
- SERGEOMIN, 2000. Mapa Geológico de Bolivia, La Paz, Bolivia.
- Telleria J.L. y Jarandilla, A.I., 2009. El primer cráter de impacto descubierto en Bolivia con prospección gravimétrica, Memoria del XVIII Congreso Geológico Boliviano, Potosí, pp. 27-29.
- Telleria J.L., Lejsek, J., 1975. Interpretación tectónica del perfil gravimétrico Charaña – San Borja, Universidad Mayor de San Andrés, Instituto Geofísico Boliviano, Serie E., No. 1, Cuaderno 5, 46 p., La Paz, Bolivia.