

REGISTROS GEOLÓGICOS DE IMPACTOS METEORÍTICOS NO BRASIL: EVOLUÇÃO E ESTÁGIO ATUAL

Alvaro Penteadó CRÓSTA

RESUMO

Impactos meteoríticos são um raro tipo de processo geológico que, por suas características extremas de pressão e temperatura, são capazes de promover transformações permanentes em rochas crustais. As marcas resultantes são as estruturas denominadas “crateras de impacto”. Com o passar do tempo as crateras são geralmente modificadas por processos erosivos, tectônicos e sedimentares característicos da dinâmica geológica da Terra, até serem completamente removidas da sua superfície. Por esse motivo, o registro geológico de impactos na Terra é bastante incompleto, com tendência à preservação das crateras de maior porte e relativamente mais jovens. A maioria das crateras conhecidas na Terra se encontra em um estágio parcial de preservação, recebendo a denominação de “astroblemas”. São conhecidas atualmente cerca de 200 estruturas dessa natureza na Terra. Na América do Sul há onze estruturas formadas comprovadamente por impactos meteoríticos, sendo que as nove maiores e mais antigas estão no Brasil. Elas são parte de duas bacias sedimentares intracratônicas fanerozoicas, a do Paraná e a do Parnaíba. Suas idades estimadas variam da transição Permianotriássica ao Cretáceo Superior. Neste artigo é apresentada uma síntese sobre o atual estado de conhecimento geológico dessas estruturas, bem com suas principais características geológicas e geofísicas. São feitas também considerações sobre ações específicas de geoconservação e geopatrimônio.

Palavras-chave: Estrutura de impacto; Cratera de impacto; Astroblema; Corpos celestes; Geologia planetária.

ABSTRACT

GEOLOGICAL RECORDS OF METEORITIC IMPACTS IN BRAZIL: EVOLUTION AND CURRENTLY KNOWLEDGE. Meteoritic impacts are a rare geological process that, due to the extreme pressure and temperature conditions, can promote permanent transformations in crustal rocks. The results of such processes are the structures called “impact craters”. Over time, craters are generally modified by erosive, tectonic and sedimentary processes characteristic of the Earth’s dynamics until they are completely removed from its surface. Therefore, the geological record of impacts on Earth is quite incomplete, with a tendency to preserve only larger and relatively younger craters. Most of the known craters on Earth are just partially preserved, being referred to as “astroblemes”. There are about 200 such structures currently known on Earth. Eleven confirmed impact structures exist in South America, of which nine are in Brazil. They are part of two Phanerozoic intracratonic sedimentary basins, Paraná and Parnaíba. Their estimated ages range from the Permian-Triassic transition to the Late Cretaceous. This article presents the current state of geological knowledge about these structures and their main geological and geophysical characteristics. Some remarks about specific geoconservation and geoheritage actions are also made.

Keywords: Impact structure; Impact crater; Astrobleme; Celestial bodies; Planetary geology.

1 INTRODUÇÃO

Impactos de corpos celestes¹ de variadas dimensões representam um processo geológico de natureza exógena, presente em todos os objetos sólidos do Sistema Solar, constituindo feições morfológicas notáveis nos planetas sólidos, nas luas e em asteroides e cometas (MELOSH 1989, FRENCH 1998).

Contudo, enquanto na maioria desses objetos a tendência é que as crateras resultantes desses impactos permaneçam preservadas em suas superfícies por longos períodos, na Terra isso geralmente não ocorre. A razão para isso é que, enquanto a Terra se caracteriza pela notável dinâmica e diversidade de processos geológicos transformadores da sua superfície, na grande maioria dos demais objetos sólidos do Sistema Solar esses processos inexistem ou, quando presentes, atuam de maneira mais lenta do que na Terra (MCSWEEN *et al.* 2019).

Assim, o que se observa em nosso planeta é um registro bastante parcial, tanto no domínio espacial como no temporal, dos processos de impactos meteoríticos² que afetaram a Terra durante sua história evolutiva. A maior parte dos registros dessa natureza, notadamente os mais antigos e os de menores dimensões, já foi obliterada pelos processos ligados à dinâmica geológica do nosso planeta, que inclui a tectônica de placas e processos relacionados, bem como a erosão, transporte e sedimentação.

Como resultado dos processos de impactos em corpos sólidos, formam-se as “estruturas de impacto”. Esse termo vem sendo empregado preferencialmente para designar quaisquer estruturas geológicas formadas pelo choque de um corpo celeste contra a Terra e que se encontre em qualquer estágio erosional (FRENCH 1998). Já o termo “cratera de impacto” é empregado exclusivamente para designar as estruturas mais jovens e que se encontram relativamente preservadas da dinâmica de modificação relacionada aos processos geológicos. As crateras da Lua, por exemplo, são, em sua maioria, perfeitamente preservadas, aplicando-se assim essa designação. Finalmente, o termo “astroblema”, cunhado originalmente por DIETZ (1960) a partir das palavras grega “astro” para designar

corpo celeste e “blema” para cicatriz, é sinônimo de estrutura de impacto, ainda que menos utilizado atualmente.

O número atual de estruturas formadas por impactos meteoríticos em nosso planeta é relativamente reduzido quando comparado com outros corpos planetários, como a Lua e Marte. Esse número encontra-se atualmente em torno de 200 estruturas (KENKMANN 2021). Já no Brasil, esse número é atualmente de nove estruturas comprovadamente formadas pelo impacto de corpos celestes.

O estudo dos processos de impacto meteorítico é um campo relativamente novo do conhecimento geocientífico, tendo experimentado grande impulso a partir da exploração espacial pela humanidade, juntamente com o desenvolvimento da Geologia Planetária. Assim, a partir principalmente da década de 1960, com as várias missões espaciais lançadas pelos Estados Unidos e a então União Soviética, atualmente Rússia, e com a ida à Lua por meio das missões Apollo, constatou-se a importância de se estudar e caracterizar esse tipo de processo geológico, que até então era pouco conhecido por ser considerado de importância secundária na história geológica da Terra. Essa concepção se mostrou equivocada e hoje se sabe que os impactos meteoríticos foram o principal processo para a formação do Sistema Solar nos estágios iniciais de sua constituição e evolução e que afetaram todos os corpos que o constituem, inclusive a Terra. Além disso, os processos de impacto fornecem informações fundamentais sobre a dinâmica planetária, sobre a composição dos planetas em subsuperfície e sobre a estrutura interna dos corpos planetários.

No caso da Terra, impactos provavelmente exerceram papel importante no surgimento e evolução da vida em nosso planeta, um tópico que é atualmente objeto de intensa atividade de pesquisa. A visão científica da relação entre impactos e o surgimento da vida evoluiu intensamente nas últimas décadas, sendo consensual atualmente aquela que foca nos impactos como fator fundamental para fornecer as condições e a energia térmica necessárias à transição entre a química pré-biótica e o surgimento das primeiras formas de vida na Terra. Além disso, das cinco grandes extinções em massa da vida registradas em nosso planeta, pelo menos uma delas, ocorrida há 66 Ma no limite entre

¹ O termo “corpo celeste” é aqui utilizado para designar todo corpo sólido proveniente do espaço, independentemente de sua composição e tamanho. Assim, são englobados nesses termos os meteoritos, asteroides e cometas.

² Para fins de simplificação, o termo “impacto meteorítico” será adotado neste artigo para designar todos os tipos de impactos de corpos celestes, independentemente da natureza e da dimensão do corpo impactante.

o Cretáceo e o Paleógeno, é comprovadamente relacionada ao evento que formou a cratera de Chicxulub, no Golfo do México (SCHULTE *et al.* 2010).

1.1 Impactos meteoríticos: Um breve histórico

Impactos de grandes proporções são eventos pouco frequentes se considerada a escala de tempo a que os seres humanos estão habituados, mas, se considerarmos o tempo geológico, esse não é o caso. Embora os impactos tenham sido muito mais frequentes nos estágios iniciais de formação do Sistema Solar, e que venham decrescendo consideravelmente sua frequência ao longo do tempo, eles continuam a ocorrer e podem trazer riscos e consequências potencialmente graves à humanidade.

Nesse sentido, dois eventos de impacto relativamente recentes são emblemáticos. O primeiro deles foi o choque entre o cometa D/1993 F2 (Shoemaker-Levy) e Júpiter, ocorrido em julho de 1994. O fenômeno foi monitorado da Terra por meio de telescópios terrestres e do Telescópio Espacial Hubble, além da Sonda Galileo. O núcleo desse cometa, com cerca de 4 km de diâmetro, havia se desmembrado em 1992 devido às fortes forças gravitacionais de Júpiter. Durante seis dias, 21 fragmentos do cometa, com dimensões variando de algumas centenas de metros a 1 km, colidiram com a atmosfera de Júpiter, causando bolas de fogo e plumas que atingiram alturas de até 3.000 km. A energia combinada liberada por esses impactos foi calculada em cerca de 6 milhões de megatons de TNT, que equivalem a 600 vezes o arsenal nuclear total mundial (HOCKEY 1994).

O segundo evento foi a explosão atmosférica em 15 de fevereiro de 2013 de um meteorito de 20 metros de diâmetro a 23 km de altitude nas proximidades de Chelyabinsk, uma cidade de 1 milhão de habitantes localizada na Rússia (BOROVIČKA *et al.* 2013). A energia liberada foi equivalente a 500 quilotons de TNT, e as ondas de choque resultantes causaram ferimentos em cerca de 1500 pessoas, principalmente devido a fragmentos de vidro estilhaçado de janelas e vidraças, além danos materiais extensos em milhares de edifícios.

A percepção dos riscos potenciais ao planeta relacionados a impactos meteoríticos chegou ao ponto de que, em setembro de 2022, a missão DART (Double Asteroid Redirection Test) da NASA, especificamente projetada para testar um método para desviar asteroides potencialmente perigosos à Terra, colidiu contra o asteroide Dimorphos, com 160 metros de diâmetro. Embora

esse asteroide não representasse nenhum risco de atingir a Terra, os resultados do teste foram positivos (RIVKIN & CHENG 2023) e demonstraram a viabilidade de, no caso de uma situação de risco verdadeiro de colisão ser identificada no futuro, uma missão similar à DART possa evitar um desastre de maiores dimensões ao planeta e à humanidade. Iniciativas como essa fazem parte de uma nova área do conhecimento, denominada de “defesa planetária” (SCHMIDT 2019), que vem se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos, com forte participação da comunidade científica de ciências planetárias e das agências governamentais dedicadas à exploração espacial.

Desse modo, nas últimas décadas os impactos meteoríticos passaram de um processo geológico que não recebia muita atenção científica a um fenômeno natural de importância fundamental para a compreensão da evolução de todo o Sistema Solar (MELOSH 2011, REIMOLD & JOURDAN 2012, OSINSKI & PIERAZZO 2013, CRÓSTA *et al.* 2019a).

No Brasil, as primeiras menções à ocorrência de potenciais estruturas de impacto meteorítico datam das décadas de 1960 (KOLLERT *et al.* 1961) e 1970 (DIETZ & FRENCH 1973). Apenas no início da década seguinte surgiram os primeiros trabalhos científicos mais sistemáticos sobre algumas estruturas específicas dessa natureza no Brasil (CRÓSTA *et al.* 1981, THEILEN-WILLIGE 1981), bem como a primeira relação das estruturas de impacto brasileiras (CRÓSTA 1987). Contudo, a consolidação dessa área do conhecimento geocientífico em nosso país só viria a ocorrer ao longo das últimas duas décadas, com a realização dos estudos geológicos, geofísicos e geoquímicos de detalhe, sintetizados por CRÓSTA *et al.* (2019a, b), que permitiram estabelecer a origem meteorítica de nove estruturas, além de algumas outras potenciais que ainda carecem de dados comprobatórios mais sólidos.

É apresentada a seguir uma síntese do conhecimento atual sobre o registro de impactos no Brasil, com uma descrição sucinta das principais características das estruturas comprovadas no país. São feitas também considerações sobre os rumos futuros e o potencial dessa área do conhecimento geocientífico no país.

Aos que têm interesse nos métodos de estudos de estruturas de impacto, bem como nos principais critérios científicos empregados para determinar a origem por impacto meteorítico de uma estrutura potencial, recomenda-se a consulta a algu-

mas obras que tratam em detalhe desses assuntos: FRENCH (1998), FRENCH & KOEBERL (2010), REIMOLD & JOURDAN (2012), OSINSKI & PIERAZZO (2013) e CRÓSTA *et al.* (2019a).

2 O REGISTRO BRASILEIRO DE ESTRUTURAS DE IMPACTO METEORÍTICO

O Brasil conta hoje com nove estruturas de impacto meteorítico (Figura 1, Tabela 1) cuja ori-

gem foi comprovada com base nos critérios adotados pela comunidade científica internacional, e sumarizados por FRENCH (1998) e FRENCH & KOEBERL (2010). Essas estruturas estão exclusivamente associadas a duas bacias sedimentares intracratônicas fanerozoicas, a Bacia do Paraná e a Bacia do Parnaíba.

A Bacia do Paraná contém as estruturas do Domo de Araguainha, localizada na divisa entre os estados do Mato Grosso e de Goiás, Vista Alegre, no

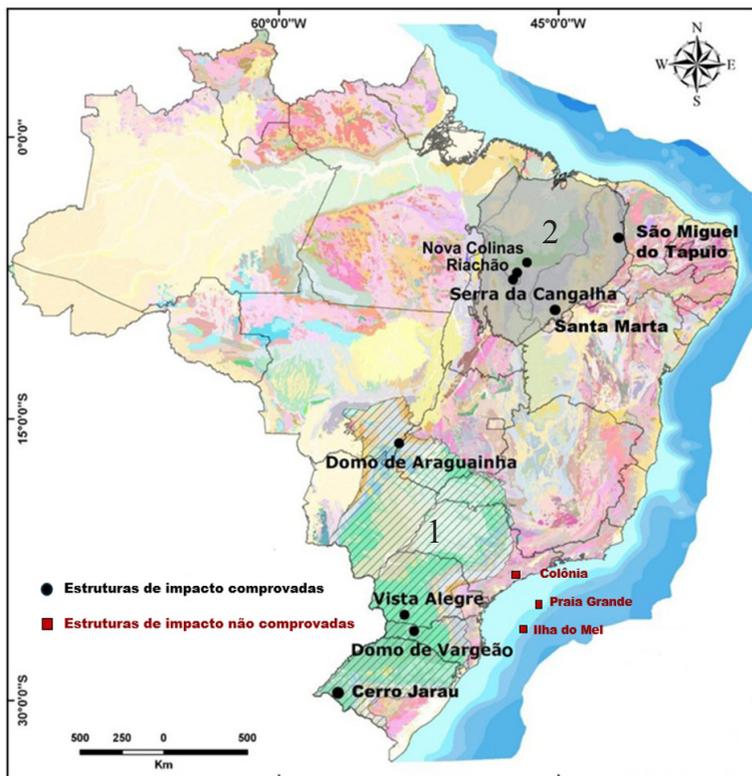


FIGURA 1 – Mapa de localização das estruturas de impacto brasileiras com as bacias sedimentares do Paraná (1) e do Parnaíba (2) delimitadas. A fundo, a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (CPRM 2004).

TABELA 1 – Estruturas de impacto de origem comprovada no Brasil e suas principais características.

	UF	Latitude	Longitude	Diâmetro	Idade (Ma)
Domo de Araguainha	MT/GO	16° 49' S	52° 59' W	40,0	254,7 ± 2,5
Vista Alegre	PR	25° 57' S	52° 41' W	9,5	<132
Domo de Vargeão	SC	26° 49' S	52° 10' W	12,4	<132
Cerro do Jarau	RS	30° 12' S	56° 32' W	13,5	<132
Serra da Cangalha	TO	08° 04' S	46° 51' W	13,7	<200
Riachão	MA	07° 43' S	46° 39' W	4,5	<200
Nova Colinas	MA	07° 09' S	46° 06' W	6,5-7,0	<200
São Miguel do Tapuio	PI	05° 38' S	41° 24' W	20,0	<150
Santa Marta	PI	10° 10' S	45° 15' W	10,0	<100

estado do Paraná, Vargeão, em Santa Catarina, e a de Cerro do Jarau, no Rio Grande do Sul.

Já na Bacia do Parnaíba encontram-se as estruturas de Serra da Cangalha, no estado do Tocantins, Riachão e Nova Colinas, ambas no estado do Maranhão, e São Miguel do Tapuio e Santa Marta, ambas no estado do Piauí.

São apresentadas a seguir as informações sobre cada uma dessas estruturas, no contexto das respectivas bacias sedimentares onde estão localizadas.

3 ESTRUTURAS DE IMPACTO NA BACIA DO PARANÁ

A figura 2 mostra a localização das quatro estruturas da Bacia do Paraná podendo-se notar a associação de três delas (Vista Alegre, Domo de Vargeão

e Cerro do Jarau) com as rochas vulcânicas da Fm. Serra Geral, sobre as quais elas foram formadas.

3.1 Domo de Araguainha (MT/GO)

O Domo de Araguainha foi assim denominado por NORTHFLEET *et al.* (1969) que atribuíram a grande feição estrutural de formato circular e 40 km de diâmetro a uma intrusão ígnea de natureza alcalina, que teria soerguido e deformado os estratos paleozóicos e formado uma estrutura do tipo dômica (Figura 3). Essa interpretação permaneceu nos trabalhos posteriores de mapeamento regional conduzidos pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) e pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) e, em particular, no

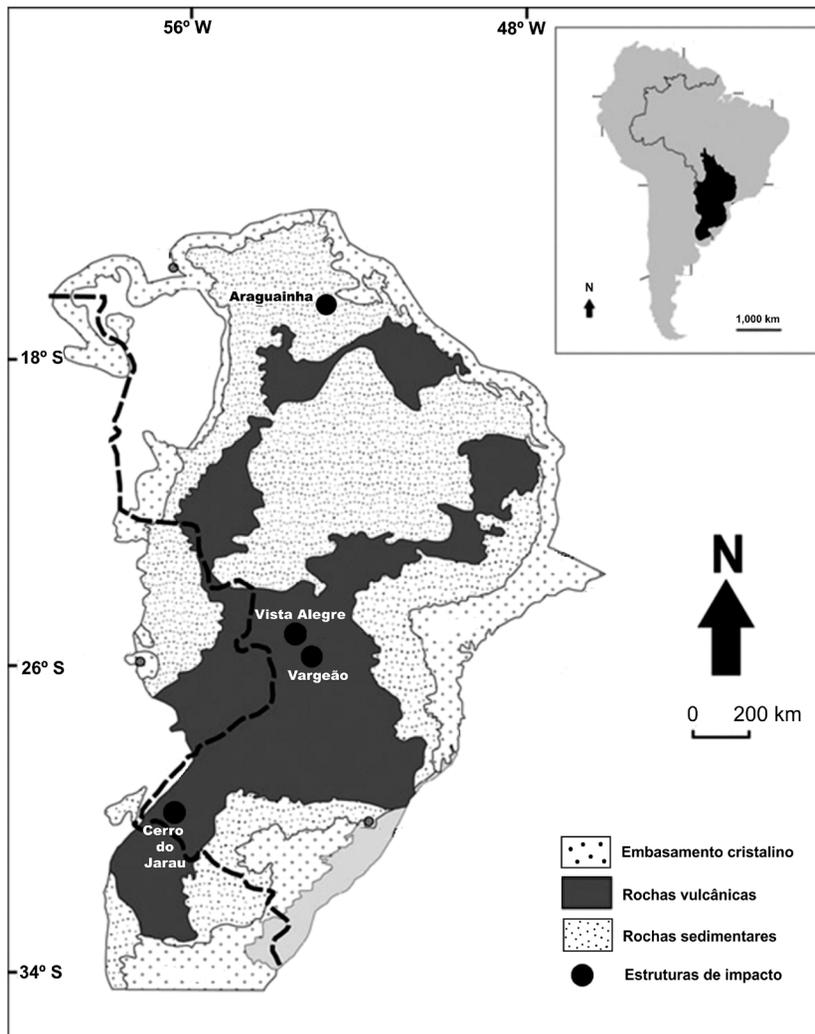


FIGURA 2 – A Bacia do Paraná e suas estruturas de impacto meteorítico. Na parte superior à direita, a localização da Bacia do Paraná em relação ao Brasil e à América do Sul (modificado de CROSTA *et al.* 2019a).

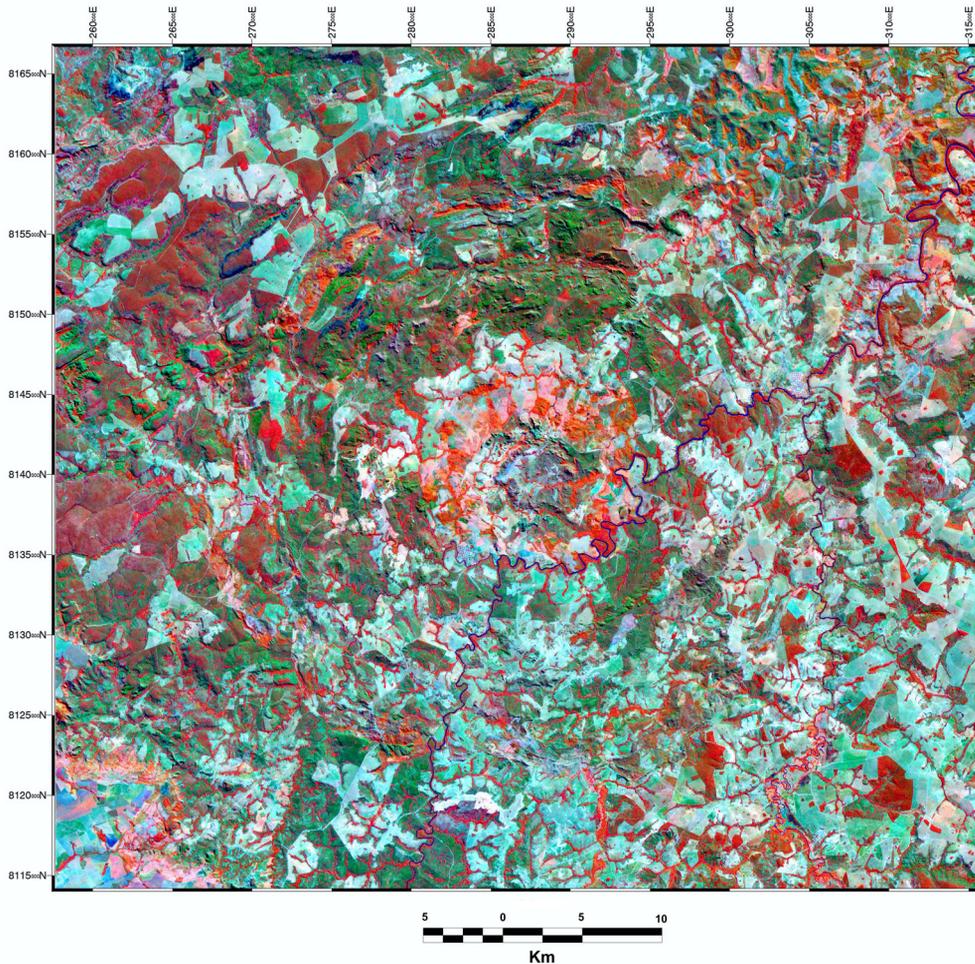


FIGURA 3 – Domo de Araguainha. Imagem do satélite Landsat, sensor ETM+, bandas 4, 5 e 3 representadas nas cores vermelha, verde e azul, respectivamente. As coordenadas estão no sistema UTM (Universal Transversa de Mercator).

levantamento geológico específico realizado por SILVEIRA FILHO & RIBEIRO (1971).

A interpretação geológica sobre a natureza do Domo de Araguainha começou a ser mudada a partir da identificação, por DIETZ & FRENCH (1973), de possíveis estruturas de impacto no Brasil. Esses autores se basearam nas primeiras imagens orbitais do então recém-lançado satélite Landsat, da NASA, nas quais identificaram duas possíveis estruturas que apresentavam características morfológicas similares a outras estruturas desse tipo que esses autores vinham analisando e que já tinham sua origem por impacto comprovada por estudos geológicos. As duas

estruturas no Brasil eram o Domo de Araguainha e a Serra da Cangalha.

À época havia somente cerca de 40 estruturas de impacto conhecidas em todo o mundo e a atribuição dessa origem às duas estruturas brasileiras foi uma grande novidade. Porém, por falta de estudos de detalhe e dados mais completos de campo³, e também por desconhecimento dessa sub-área do conhecimento no país, isso não foi amplamente aceito pela comunidade geológica brasileira. Assim, o Domo de Araguainha continuou a figurar por alguns anos mais nos mapas geológicos oficiais como sendo uma feição endógena, decorrente de uma intrusão ígnea.

³ Um dos autores desse trabalho inovador, Robert S. Dietz, chegou a vir ao Brasil em 1973 com o objetivo de visitar as duas estruturas. Porém, por dificuldades de acesso às respectivas regiões, na época bastante remotas, ele conseguiu visitar brevemente apenas o Domo de Araguainha, onde coletou amostras de rochas. De volta aos Estados Unidos, analisou lâminas delgadas dessas rochas, que revelaram a presença de feições planares de deformação (ou lamelas de choque) em grãos de quartzo que representam uma das feições diagnósticas da ocorrência de fenômenos de impacto meteorítico (DIETZ & FRENCH 1973).

As evidências da origem por impacto do Domo de Araguainha vieram por meio dos trabalhos independentes de CRÓSTA *et al.* (1981) e THEILEN-WILLIGE (1981), publicados quase simultaneamente. Eles apresentaram dados geológicos que demonstraram a ocorrência de abundantes feições de deformação por choque, exclusivamente formadas em decorrência de impactos meteoríticos de hipervelocidade, que incluem cones de estilhaçamento (*shatter cones*) e feições planares de deformação (“planar deformation features” – PDF). Esses trabalhos pioneiros foram posteriormente complementados por estudos detalhados da geologia local e das feições de deformação por impacto, realizados por VON ENGELHARDT *et al.* (1992), LANA *et al.* (2006, 2007, 2008), YOKOYAMA *et al.* (2012), HIPPERT *et al.* (2014) e HAUSER *et al.* (2017), entre outros.

Com seu diâmetro de 40 km e área de aproximadamente 1.300 km² o Domo de Araguainha é a maior estrutura de impacto conhecida na América do Sul. Seu centro encontra-se localizado na coordenadas 16° 48' 45”S/52° 59' 02”W. A formação da estrutura ocorreu há cerca de 254 Ma (TOHVER *et al.* 2012, HAUSER *et al.* 2017) tendo como alvo rochas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná e rochas cristalinas subjacentes do embasamento. A estrutura fica na divisa entre os estados de Mato Grosso e Goiás sendo atravessada quase ao meio pelo rio Araguaia.

As unidades estratigráficas afetadas pelo impacto são: o embasamento cristalino, composto por granito alcalino porfirítico do Grupo Serra Negra, filitos e meta-arenitos do Grupo Cuiabá; o Grupo Paraná (formações Furnas e Ponta Grossa) do Devoniano, o Grupo Tubarão do Permocarbonífero, por meio da Formação Aquidauana, e o Grupo Passa Dois do Permiano, com as formações Irati e Corumbataí, sendo estas as unidades estratigráficas mais jovens a serem afetadas pelo evento de impacto. O mapa geológico de Araguainha é mostrado na figura 4. Essas unidades litoestratigráficas estão arrançadas segundo um padrão circular do tipo “alvo”, com as unidades mais antigas ao centro e as unidades mais jovens progressivamente distribuídas ao redor em direção à borda da estrutura. Trata-se de um padrão típico de estruturas de impacto, notadamente em terrenos sedimentares.

O Domo de Araguainha contém todas as principais feições de deformação/metamorfismo de impacto (ou de choque) utilizadas como critérios para reconhecimento desse tipo de evento (FRENCH 1998, FRENCH & KOERBERL 2010). CRÓSTA

et al. (1981) observaram a ocorrência das seguintes feições desse tipo:

- Cones de estilhaçamento formados em filitos do Grupo Cuiabá (Figura 5).
- Lamelas de deformação cristalina em quartzo e feldspato no granito do Grupo Serra Negra, principalmente feições planares de deformação (PDF), fraturas planares (PF) e feições em pena (*feather features* – FF) (Figura 6).
- *Kink-bands* em mica no granito.
- Vidro diaplético em plagioclásio no granito.

Ocorrem também vários tipos de impactitos (rochas formadas por fragmentação ou por fusão de rochas preexistentes em decorrência de impacto meteorítico, podendo ou não conter traços do meteorito/asteroide original). A maior parte deles são brechas de impacto de vários tipos: brechas monomícticas (formadas por deformação/fragmentação de um único tipo de rocha), brechas polimícticas (mais de um tipo de rocha) e brechas com maior ou menor proporção de materiais fundidos (Figura 7).

O Domo de Araguainha foi também objeto de vários estudos geofísicos, que contribuíram para sua caracterização litológica-estrutural, tanto em superfície como em subsuperfície. Entre eles podem ser citados: MASERO *et al.* (1994), SCHNEGG & FONTES (2002), YOKOYAMA *et al.* (2012), MIYAZAKI *et al.* (2021) e LEITE *et al.* (2022).

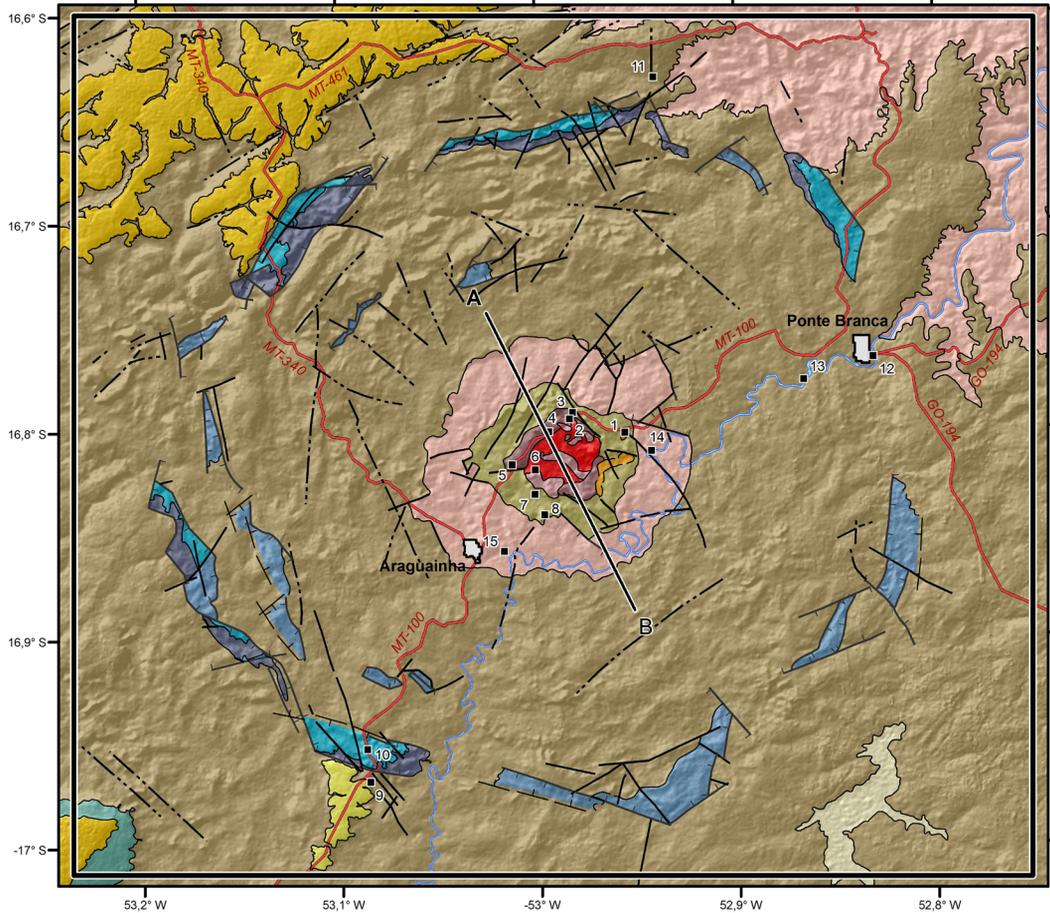
Em síntese, o Domo de Araguainha, além de ser a maior estrutura de impacto conhecida na América do Sul, e uma das maiores do mundo, é também a que apresenta a maior diversidade de feições geológicas representativas desse tipo de fenômeno e a que foi melhor caracterizada do ponto de vista geológico, estrutural, geoquímico e geofísico dentre todas as estruturas desse tipo no Brasil. Um exemplo disso são os dados geocronológicos, que indicam com razoável precisão a idade de formação da estrutura, algo que as demais estruturas brasileiras ainda não dispõem. Considerações sobre o potencial de aproveitamento geo-turístico do Domo são apresentadas ao final deste artigo.

3.2 Vista Alegre (PR)

A identificação da estrutura de impacto de Vista Alegre é relativamente recente, tendo sido inicialmente descrita por CRÓSTA *et al.* (2004). A estrutura tem um diâmetro de 9,5 km e foi identificada inicialmente por meio da observação de imagens orbitais e, após verificação em campo, as evidências de sua formação em decorrência de impacto meteorítico foram levantadas (Figura 8).

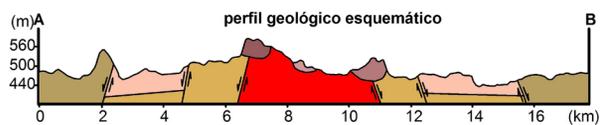
Domo de Araguainha

Mapa Geológico sobre Relevo Sombreado (SRTM 90m)



Legenda

- | | | | |
|-------|--------------------------------|-----------|----------------|
| — — | Contato aproximado | — | Contato |
| — — — | Falha indiscriminada | — · — · — | Fratura |
| - - - | Falha ou fratura aproximada | — | Rio Araguaia |
| — — — | Falha gravitacional | — | Vias de acesso |
| — — — | Falha gravitacional aproximada | | |



- | | |
|----------------------|---|
| Q2a | Depósitos aluvionares: Areia, Cascalho, Silte, e Argila |
| Qdi | Coberturas detriticas indiferenciadas: areia, cascalho, e argila |
| N1dl | Coberturas detrito-lateriticas ferruginosas: Aglomerado, Laterita, Argila, Areia, e Silte |
| K1 ³ sg | Grupo São Bento - Formação Serra Geral: Basalto, Basalto-andesito, Riolito, e Riodacito |
| T1a_1 | Formação Araguainha: Brecha de impacto com matriz fundida |
| T1a_2 | Formação Araguainha: Brecha monomítica de impacto oriunda de arenito |
| T1a_3 | Formação Araguainha: Brecha polimítica de impacto |
| P3T1c | Formação Corumbataí: Siltito, Argilito, Folhelho, e Arenito |
| P2i | Formação Irati: Folhelho, e Calcário |
| Ppd | Grupo Passa Dois - Unidade indiferenciada: Folhelho, Calcário, Siltito, Argilito, Folhelho, e Arenito |
| C2P1a | Formação Aquidauana: Diamictito, Folhelho, Arenito, e Siltito |
| Dpg | Formação Ponta Grossa: Folhelho, Pelitico, e Arenito |
| D1f | Formação Furnas: Arenito. Engloba também Gr. Rio Ivai - Formação Alto Garças: Conglomerado |
| NPcui | Grupo Cuiabá - Subunidade Indivisa: Filito, e Metarenito |
| NP ⁷ 3snn | Suíte Serra Negra - Granito Serra Negra: Biotita granito |

- geossítios
- area do geoparque
- A-B perfil geológico

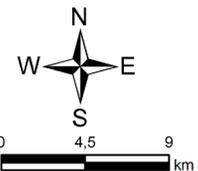


FIGURA 4 – Mapa geológico do Domo de Araguainha e seção geológica esquemática (THOMÉ-FILHO *et al.* 2012).



FIGURA 5 – Domo de Araguainha. *Shatter cones* (cones de estilhaçamento) formados em filitos do Grupo Cuiabá aflorantes no núcleo central.

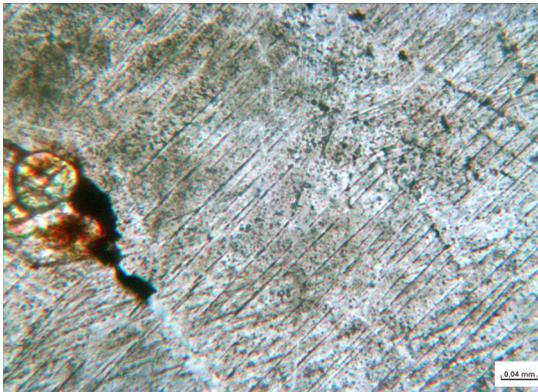


FIGURA 6 – Domo de Araguainha. Microestruturas de deformação por choque (PDF) em grão de quartzo do granito aflorante no núcleo central.



FIGURA 7 – Domo de Araguainha. Brechas de impacto com fragmentos dos vários tipos litológicos presentes e contendo uma pequena proporção de material fundido pelo impacto.



FIGURA 8 – Vista Alegre. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TanDEM-X (GOTWALD *et al.* 2020).

Ela está localizada no município de Coronel Vivida, na região oeste do estado do Paraná, tendo o centro às coordenadas 25°57'S e 52°41'W. Em seu interior encontra-se o bairro rural de Vista Alegre, que dá o nome à estrutura.

Assim como as estruturas de Vargeão e Cerro do Jarau, abordadas adiante neste artigo, Vista Alegre se formou sobre derrames de basaltos toleíticos de idade cretácea da Formação Serra Geral. A constituição envolveu também unidades mais antigas, compostas por arenitos da Formação Botucatu e, possivelmente, da Formação Pirambóia, do Grupo São Bento (Permiano Superior ao Cretáceo Inferior). Esses arenitos, bastante deformados e recristalizados, são encontrados de forma restrita no setor NW da estrutura, indicando que Vista Alegre é uma estrutura do tipo complexa e que as unidades inferiores às camadas vulcânicas foram soerguidas em várias centenas de metros como parte da formação do núcleo central da estrutura.

O detalhamento geológico e geoquímico da estrutura de Vista Alegre foi apresentado por CRÓSTA *et al.* (2010a). O conjunto de impactitos e feições diagnósticas de impacto encontrados em Vista Alegre compreende pacotes de brechas polimícticas de impacto (Figura 9) que afloram entre o centro e a borda da estrutura, principalmente ao longo de dois córregos que drenam a parte central da estrutura e encontra-se bem expostos em uma pedreira desativada situada na entrada do bairro de Vista Alegre. Nessas

brechas foram encontrados os primeiros exemplos de cones de estilhaçamento formados em basalto em todo o mundo (Figura 10), uma feição diagnóstica de impacto que, posteriormente, também foi encontrada no Domo de Vargeão. Feições microscópicas de choque, na forma de feições planares de deformação (PDF) e fraturas planares (Figura 11), também ocorrem em grãos de quartzo originalmente dos arenitos incorporados às brechas polimícticas.

A caracterização geofísica da estrutura usando o método gravitacional foi feita por FERREIRA *et al.* (2019), enquanto uma modelagem numérica da formação da cratera de impacto original de Vista Alegre foi apresentada por VASCONCELOS *et al.* (2019).



FIGURA 9 – Vista Alegre. Brechas polimícticas de impacto compostas por fragmentos de basalto e arenito em uma matriz de basalto fino. No canto inferior esquerdo há um fragmento de *shatter cone* incorporado à brecha.



FIGURA 10 – Vista Alegre. Estruturas de deformação por impacto do tipo *shatter cones* formadas em basalto.

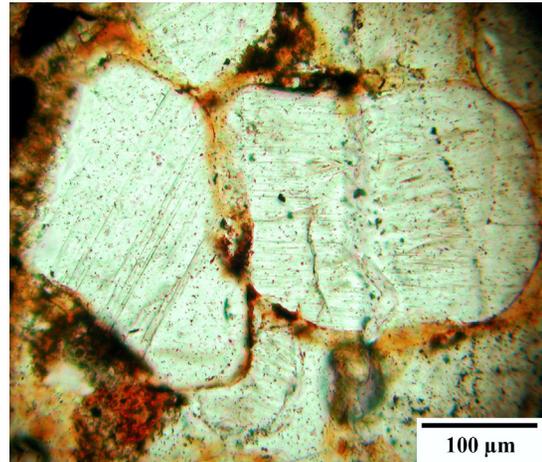


FIGURA 11 – Vista Alegre. Microestruturas de deformação por choque (PDF) em grãos de quartzo provenientes de fragmentos de arenito contidos na brecha polimíctica. Pode-se observar dois conjuntos de feições nessa fotomicrografia com nicóis paralelos.

A idade da estrutura de Vista Alegre não foi determinada pois não foram ainda encontrados materiais que possam ser datados com segurança por métodos geocronológicos isotópicos. Admite-se como idade máxima para sua formação a do vulcanismo básico Serra Geral, como a obtida por THIEDE & VASCONCELOS (2010) pelo método ^{40}Ar - ^{39}Ar , de $134,6 \pm 0,6$ Ma.

3.3 Domo de Vargeão (SC)

O Domo de Vargeão, localizado na região oeste de Santa Catarina e com centro às coordenadas $26^{\circ}49'S$ e $52^{\circ}10'W$, tem diâmetro de 12,4 km e contém em seu interior a cidade de Vargeão (Figura 12).

A feição morfológica anômala foi primeiramente identificada no final da década de 1970, a partir da observação de imagens de radar do Projeto Radambrasil. Como muitas estruturas de impacto no mundo todo, as primeiras interpretações sobre sua natureza sugeriam a ocorrência de intrusão ígnea sub-aflorante como causa para a notável estrutura circular (PAIVA FILHO *et al.* 1978).

As primeiras evidências da natureza por impacto meteorítico do Domo de Vargeão foram apontadas por CRÓSTA (1987) na forma de feições microscópicas de deformação em grãos de quartzo encontrados nos arenitos deformados, bem como da similaridade das brechas de Vargeão com rochas semelhantes de outras estruturas de impacto mundiais. Uma série de trabalhos desenvolvidos nas últimas duas décadas contribuíram para caracteri-

zar a geologia, morfologia, estruturas e as assinaturas geofísicas do Domo de Vargeão (CRÓSTA *et al.* 2009; KAZZUO-VIEIRA *et al.* 2009; CRÓSTA 2011, 2012; FERREIRA *et al.* 2015). As características descritas a seguir se baseiam nesses trabalhos.

As rochas-alvo do evento de impacto foram, neste caso, foram pacotes vulcânicos da Formação Serra Geral, bem como arenitos subjacentes das formações Botucatu e Piramboia.

Um dos aspectos mais destacados do Domo de Vargeão é a sua morfologia circular com múltiplas estruturas anelares internas, conforme se observa na figura 12. Há um forte controle estrutural por trás dessa morfologia, na forma de falhas sub-verticais que condicionam a borda escarpada da estrutura e os seus anéis internos, formadas nas rochas vulcânicas de composição intermediária (riodacitos porfíricos) e básica (basaltos toleíticos) da Formação Serra Geral. Essas estruturas se desen-

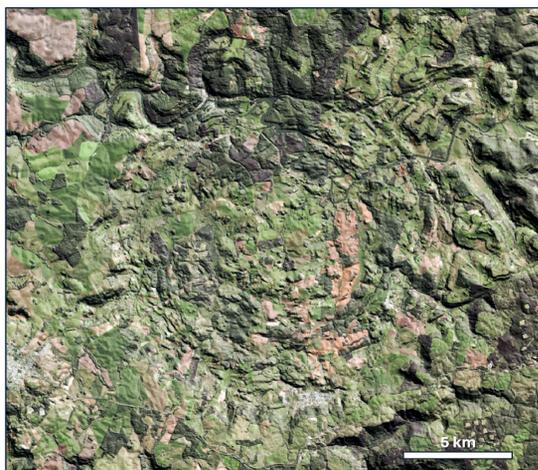


FIGURA 12 – Domo de Vargeão. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TanDEM-X (GOTTWALD *et al.* 2020).



FIGURA 13 – Domo de Vargeão. Brecha monomítica em basalto cortada por veios (pseudo-taquilitos).

volveram no estágio de modificação da cratera original, com o soerguimento do núcleo central da estrutura e o colapso das bordas. No núcleo estão parcialmente expostos arenitos deformados e recristalizados das formações Botucatu e Piramboia, que são indivisíveis nesse local devido à deformação que as afetou. Apesar da erosão ter modificado consideravelmente a morfologia original, essas estruturas se encontram parcialmente preservadas e são observáveis.

Praticamente todas as rochas que ocorrem no interior da estrutura, tanto as vulcânicas como as sedimentares, exibem algum grau de deformação, que varia desde brechagem até a fusão parcial. A ocorrência de diferentes tipos de brechas é comum, que incluem brechas monomíticas formadas nos riodacitos (Figura 13) e em arenitos (Figura 14). Há ainda brechas polimíticas com fragmentos desses três tipos litológicos em meio a uma matriz fina de cor vermelha composta majoritariamente por basalto pulverizado (Figura 15).

As feições de deformação por choque identificadas no Domo de Vargeão incluem *shatter cones*



FIGURA 14 – Domo de Vargeão. Brecha monomítica em arenito.



FIGURA 15 – Domo de Vargeão. Brecha polimítica com fragmentos de basalto, riodacito e arenito.

em basaltos (Figura 16) e arenitos (Figura 17), e micro-deformações em grãos de quartzo nos arenitos deformados (Figura 18).

Como Vista Alegre, também para Vargeão não se dispõe de datação segura que forneça sua idade de formação, admitindo-se como idade máxima a de $134,6 \pm 0,6$ Ma (THIEDE & VASCONCELOS 2010) pelo método ^{40}Ar - ^{39}Ar , ou a de $134,3 \pm 0,8$ Ma obtida por JANASI *et al.* (2011) pelo método U-Pb em badeleíta para os riodacitos pórfiros dessa região. Existe, contudo, uma datação específica para grão de zircão proveniente de veios no riodacito pór-



FIGURA 16 – Domo de Vargeão. Cones de estilhaçamento (*shatter cones*) em basalto.



FIGURA 17 – Domo de Vargeão. *Shatter cones* em arenito.

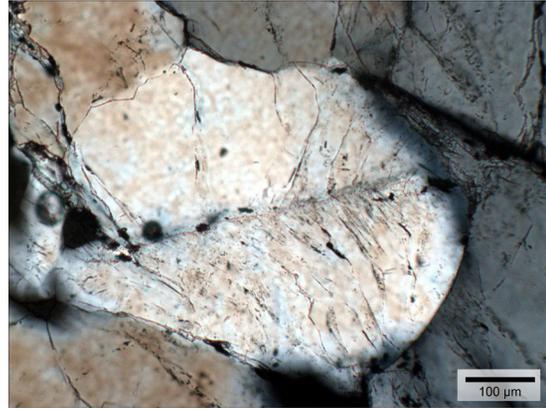


FIGURA 18 – Domo de Vargeão. Microestruturas de deformação por choque (FF) em grão de quartzo de arenito.

firo por LA-ICP-MS, que forneceu idade de $123 \pm 1,4$ Ma (NÉDÉLEC *et al.* 2013). Porém, a amostra que foi datada proveio da parte externa da borda da estrutura, o que não confere a devida confiabilidade a essa idade que pode ser devida a evento de aquecimento de natureza vulcânica ou tectônica independente do processo de impacto.

3.4 Cerro do Jarau (RS)

A terceira das estruturas de impacto brasileiras formadas sobre rochas vulcânicas da Formação Serra Geral é a de Cerro do Jarau, cujo centro encontra-se às coordenadas $30^{\circ}12'S$ e $56^{\circ}32'W$. Ela está localizada no município de Quaraí, no estado do Rio Grande do Sul, e tem um diâmetro aproximado de 13 km (REIMOLD *et al.* 2019, CRÓSTA *et al.* 2019a).

Parte da área central da estrutura se destaca de forma notável na topografia aplainada dessa região dos pampas rio-grandenses, formando as colinas com cristas salientes de conformação semicircular que alcançam até 200 m acima da planície circundante e que conferem o nome à estrutura (Figura 19). Essas elevações são formadas por arenitos recristalizados/quartzitos intensamente silicificados, cuja natureza e características despertaram a curiosidade de pesquisadores por não terem similaridade com unidades litoestratigráficas dessa porção da Bacia do Paraná (GREHS 1969). Analisando a geologia local, constituída basicamente por essas rochas quartzosas e pelos basaltos circundantes, e considerando a ocorrência de feições de deformação atípicas dessas rochas, LISBOA *et al.* (1987) sugeriram como possível origem para essa estrutura algum evento de deformação tectônica, ou então um impacto meteorítico.

As rochas-alvo pertencem ao Grupo São Bento (Cretáceo), abrangendo arenitos das formações Botucatu e Guará, que afloram em 30% da área da estrutura, e os basaltos toleíticos da Formação Serra Geral, que ocorrem no restante da área.

A geologia local compreende basaltos, exibindo diferentes graus de deformação, e brechas, além dos arenitos recristalizados já mencionados. As brechas, contudo, são de natureza distinta, sendo observadas tanto as de origem vulcânica (autobrecha, com fragmentos de basalto e arenito), como também de impacto. Visualmente não é possível diferenciar entre os dois tipos de brecha. O basalto exibe diferentes níveis de brechiação, formando texturas similares ao basalto brechado que ocorre nas estruturas de impacto de Vista Alegre e Vargeão. Esse tipo de feição de deformação é exclusivo dos basaltos que ocorrem no interior da estrutura, não sendo observado nos basaltos da região.

A identificação de feições de deformação e de impactitos que comprovaram a origem meteorítica de Cerro do Jarau se deve a CRÓSTA *et al.* (2010b) e REIMOLD *et al.* (2019). O detalhamento da estrutura de Cerro do Jarau foi apresentado por SANCHEZ *et al.* (2014). As feições de deformação por choque meteorítico descritas por REIMOLD *et al.* (2019) incluem os três tipos principais de micro-deformação em grãos de quartzo: as fraturas planares (PF), as feições-em-

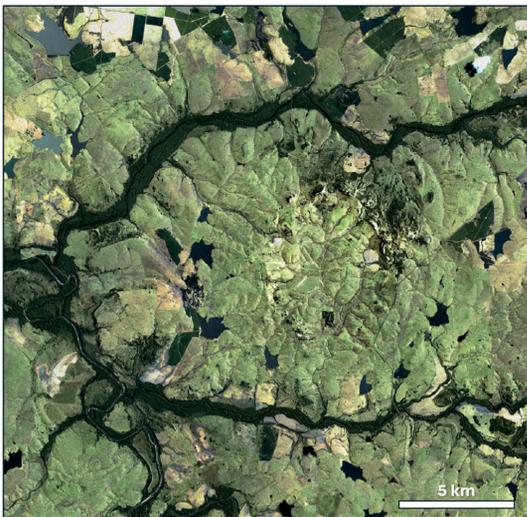


FIGURA 19 – Cerro do Jarau. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TanDEM-X (GOTTWALD *et al.* 2020).

-pena (FF) e as feições planares de deformação (PDF) (Figuras 20, 21 e 22). Essas microdeformações são típicas do regime de altíssima pressão (entre 2 e 10 GPa) e, portanto, diagnósticas desse tipo de evento.

A caracterização geofísica pelo método gravimétrico de Cerro do Jarau foi feita por GIACOMINI *et al.* (2017) e pelo método gama-espectrométrico por GARCIA *et al.* (2024).

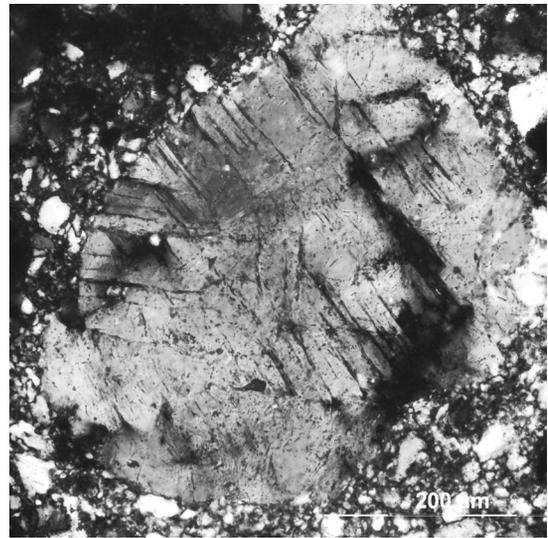


FIGURA 20 – Cerro do Jarau. Microestruturas de deformação por choque (PF) em grão de quartzo de arenito.

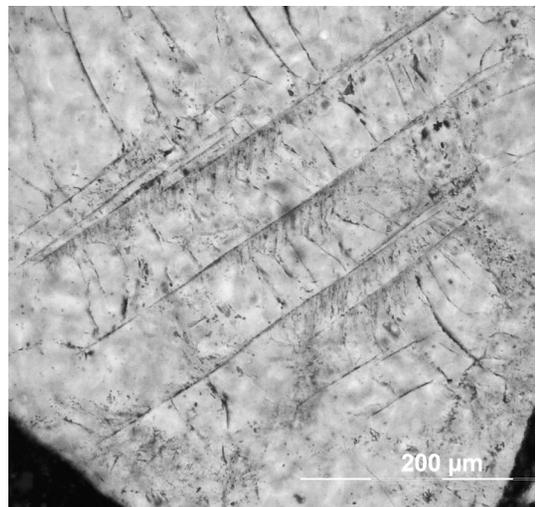


FIGURA 21 – Cerro do Jarau. Microestruturas de deformação por choque (FF) em grão de quartzo de arenito.

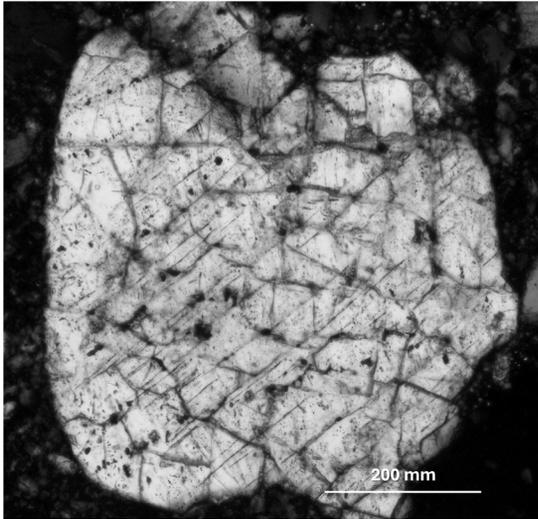


FIGURA 22 – Cerro do Jarau. Microestruturas de deformação por choque (PDF) em grão de quartzo de arenito.

4 ESTRUTURAS DE IMPACTO NA BACIA DO PARNAÍBA

A figura 23 traz a localização das cinco estruturas de impacto localizadas na Bacia do Parnaíba, sendo duas nos estados do Maranhão (Riachão e Nova Colinas) e Piauí (Santa Marta e São Miguel do Tapuio) e uma no estado do Tocantins (Serra da Cangalha).

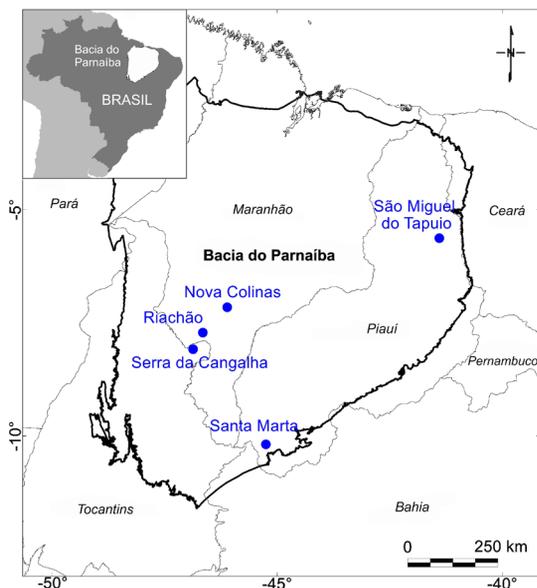


FIGURA 23 – A Bacia do Parnaíba e suas estruturas de impacto meteorítico. Na parte superior à esquerda, a localização da Bacia do Parnaíba em relação ao Brasil e à América do Sul.

4.1 Serra da Cangalha (TO)

Serra da Cangalha é, possivelmente, a mais espetacular, do ponto de vista cênico, dentre as estruturas de impacto brasileiras. Isso se deve à sua nítida morfologia circular, realçada pela erosão (Figura 24), com pronunciadas elevações de formato anelar que constituem sua parte central (Figura 25). Essas feições morfológicas destacam a estrutura de Serra da Cangalha de maneira notável na topografia regional.

Trata-se de uma estrutura de impacto do tipo complexa situada na região nordeste do estado do Tocantins, no município de Campos Lindos, com o centro às coordenadas $8^{\circ}04'S$, $46^{\circ}52'W$ e um diâmetro de cerca de 13 km.

Considerada anteriormente como uma possível intrusão de origem ígnea, Serra da Cangalha foi apontada por DIETZ & FRENCH (1973), juntamente com o Domo de Araguaiinha, como resultado da colisão de um corpo celeste com base na análise das primeiras imagens orbitais do satélite Landsat e na notável semelhança da sua morfologia com outras estruturas similares então conhecidas no mundo.

As primeiras evidências de feições de choque em Serra da Cangalha, ainda que não conclusivas, foram apontadas por McHONE Jr. (1979), após um trabalho de reconhecimento em campo com coleta de amostras. As evidências da origem por impacto da estrutura foram apresentadas por KENKMANN *et al.* (2011) e VASCONCELOS *et al.* (2013).

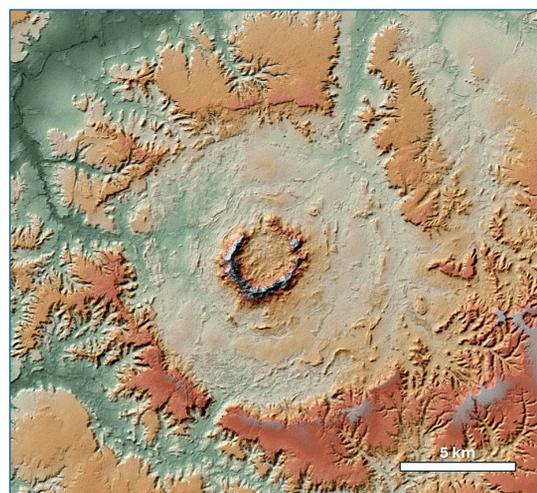


FIGURA 24 – Serra da Cangalha. Modelo digital de elevação do TanDEM-X (Elaborado por M. Gottwald).



FIGURA 25 – Vista aérea da parte central de Serra da Cangalha (foto de A. Bartorelli).

Embora se encontre em estágio erosivo relativamente avançado, Serra da Cangalha apresenta várias de suas zonas morfo-estruturais internas bem visíveis (Figura 26). Essas zonas são, do centro para a borda, (i) anel interno proeminente com 3,2 km de diâmetro circundando a depressão central com 2,2 km de diâmetro; (ii) um anel intermediário com aproximadamente 6 km de diâmetro, seguido por outro anel intermediário incompleto com 11 km de diâmetro; e (iii) anel externo com ~13 km de diâmetro, representando a borda externa da estrutura.

O colar central de Serra da Cangalha, com 5,8 km de diâmetro, é certamente a feição mais notável da sua morfologia, constituído por arenitos intensamente dobrados e silicificados com cristas verticais que se elevam a 350 m acima do terreno e circundam a depressão central da estrutura. Dessa feição se origina o nome da estrutura, pois os estratos areníticos encontram-se dobrados em formatos que sugerem os das cangalhas colocadas antigamente em animais de tropas. Curiosamente, embora essa morfologia sugira em si própria o formato de uma cratera, na verdade ela é o resultado de erosão diferencial, onde os estratos silicificados em decorrência da circulação de fluidos mobilizados pela energia do impacto foram mais resistentes do que os estratos circundantes, que foram rebaixados pela erosão destacando assim o colar central que se destaca na paisagem regional.

Segundo VASCONCELOS *et al.* (2013), as unidades stratigráficas que ocorrem em Serra da

Cangalha são, da base para o topo, a Formação Longá, do Devoniano, as formações Poti e Piauí, ambas do Carbonífero, e a Formação Pedra de Fogo, do Permiano (Figura 26).

As feições diagnósticas de choque foram identificadas por KENKMANN *et al.* (2011) e VASCONCELOS *et al.* (2013). Elas incluem *shatter cones* em arenitos de granulação grossa, e feições de microdeformação do tipo fratura planar (PF), feição-em-pena (FF) e feição de deformação planar (PDF) em grãos de quartzo das formações Longá e Poti, de brechas polimícticas e de cones de estilhaçamento em arenito da Fm. Poti (Figuras 27 e 28).

A caracterização geofísica da estrutura de impacto de Serra da Cangalha, utilizando vários métodos, foi feita por ADEPELUMI *et al.* (2005) e por VASCONCELOS *et al.* (2010; 2012a ,b), denotando sua configuração estrutural e litológica em superfície e em subsuperfície. VASCONCELOS *et al.* (2012b) aplicou a modelagem numérica para simular as condições de formação da cratera de impacto original, indicando que o impacto se deu por um corpo celeste com cerca de 1,4 km de diâmetro, que liberou energia equivalente a aproximadamente $2,74 \times 10^{20}$ J e provocou um soerguimento estrutural das camadas sotopostas em cerca de 500m.

A idade de formação da estrutura não pode ser ainda determinada pois não foram encontrados materiais passíveis de datação geocronológica. Estima-se como idade máxima, com base na stratigrafia, o Permiano Médio-Inferior (~270 Ma), atribuído à Formação Pedra de Fogo.

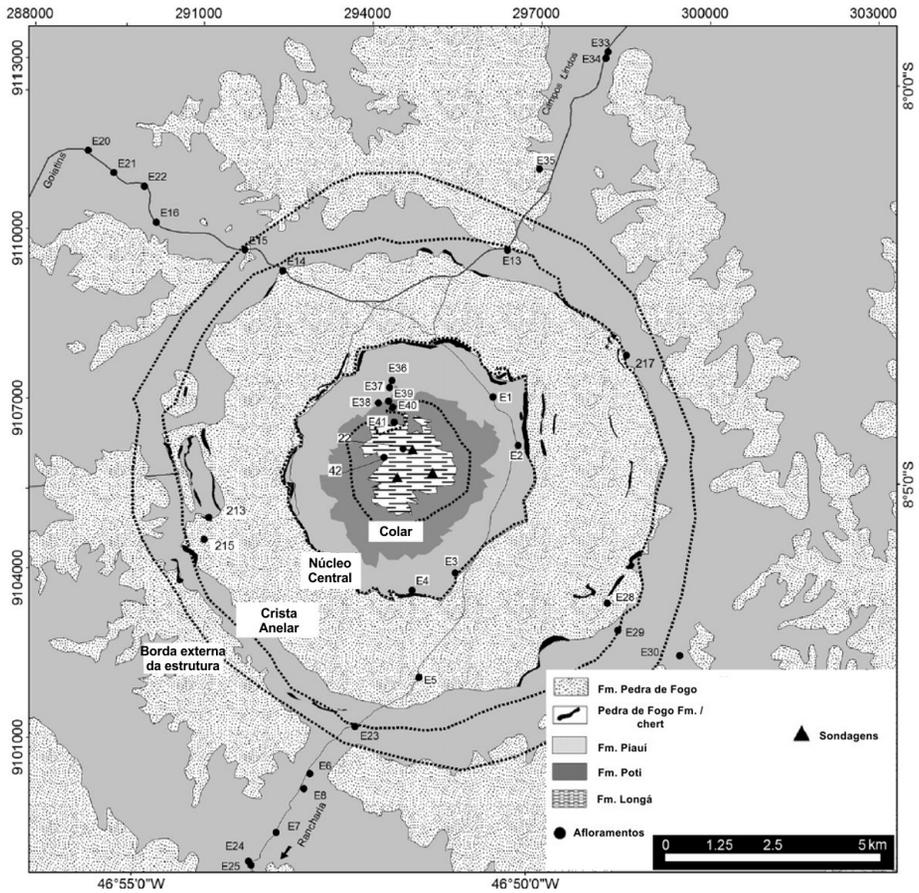


FIGURA 26 – Mapa geológico de Serra da Cangalha com as zonas morfo-estruturais (Vasconcelos *et al.* 2013).



FIGURA 27 – Serra da Cangalha. *Shatter* cones em arenitos.



FIGURA 28 – Serra da Cangalha. Microestruturas de deformação por choque (FF) em grão de quartzo de arenito.

4.2 Riachão (MA)

A estrutura de impacto de Riachão é a de menor dimensão dentre as estruturas dessa natureza comprovadas no Brasil. Com cerca de 4 km de diâmetro, encontra-se atualmente em avançado estado erosional e está localizada no município topônimo do estado do Maranhão, com centro às coordenadas 7°42'S e 46°38'W (Figura 29).

Riachão foi formada sobre rochas sedimentares predominantemente clásticas da Bacia do Parnaíba, com idades variando do Carbonífero Superior ao Permiano. A anomalia estrutural de formato circular foi primeiramente reconhecida em função de trabalhos regionais de reconhecimento geológico realizados pela Petrobras na década de 1960. Sua relação com um possível evento de impacto meteorítico foi aventada na década seguinte, a partir de observações feitas por astronautas da missão Apollo-Soyouz, que a registraram em fotografias orbitais (McHONE JR. 1979). Trabalhos de reconhecimento de campo feitos por McHONE JR. (1986) revelaram ocorrência de grãos de quartzo com conjuntos de fraturas planares, sugerindo para a origem por impacto para a estrutura. A comprovação dessa origem se deu a partir do trabalho de MAZIVIERO *et al.* (2013), que trouxe as evidências conclusivas. As características descritas a seguir se baseiam nesse trabalho.

As zonas morfo-estruturais de Riachão são constituídas por uma parte central elevada, circundada por uma depressão anelar interna e delimitada externamente pela borda elevada. Elas não são expressivas na topografia local em função do estágio

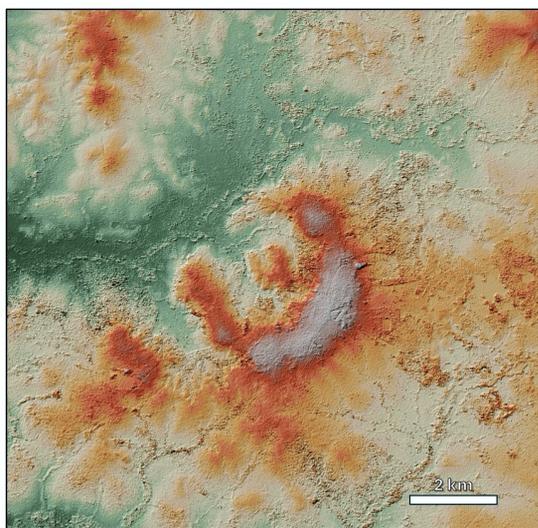


FIGURA 29 – Riachão. Modelo digital de elevação do TanDEM-X (Elaborado por M. Gottwald).

de erosão avançado, mas são refletidas pelos padrões anômalos de drenagem do tipo radial e concêntrico. A exposição das rochas do substrato é limitada também pelo desenvolvimento de cobertura de solos arenosos.

A estrutura exibe uma forma geral em ferradura com uma abertura voltada para NW formada por sua borda externa. Esta se destaca em cerca de 50 m sobre o relevo da parte externa. A parte central, de relevo suavemente elevado, está cerca de 30 m acima do terreno da depressão da bacia anelar.

As rochas expostas são arenitos, siltitos e argilitos das formações Piauí e Pedra de Fogo. As camadas sedimentares no interior da estrutura encontram-se inclinadas em ângulos que variam de 30° a 85°. Na borda da estrutura ocorrem brechas de natureza sedimentar, relacionadas à Formação Pedra de Fogo. Na bacia anelar há siltitos finamente laminados e calcilitos além de chert brechado.

As feições de deformação por choque encontradas por MAZIVIERO *et al.* (2013) em Riachão incluem vários tipos de microdeformação em grãos de quartzo (PDF, FF e PF) (Figura 30), todas de rochas provenientes da parte central da estrutura. Contudo, foram poucos os grãos deformados identificados, reforçando a ideia de que os estratos atualmente expostos se encontravam em profundidade, tendo sido expostos pela erosão. Nenhuma ocorrência de *shatter cones* foi ainda identificada.

Assim como em Serra da Cangalha, também em Riachão a idade de formação não pode ser estabelecida pois não foram encontrados materiais datáveis pelo método geocronológico. Assim, estima-se como idade máxima, com base na estratigrafia, Permiano Médio-Inferior (~270 Ma), atribuído à Formação Pedra de Fogo.



FIGURA 30 – Riachão. Microestruturas de deformação por choque em grão de quartzo de arenito.

Embora a proximidade geográfica e eventual superposição de intervalo possível de idade entre as estruturas de Serra da Cangalha e Riachão possam sugerir a possibilidade de terem sido formadas simultaneamente por um impacto duplo, não há evidência de que seja esse o caso dessas duas estruturas.

4.3 Nova Colinas (MA)

Nova Colinas é a mais recente descoberta de uma estrutura de impacto de grande dimensão no Brasil (REIMOLD *et al.* 2022). Trata-se de uma estrutura circular proeminente na paisagem regional, com diâmetro em torno de 6,5 km, localizada no município topônimo do sudoeste do estado do Maranhão, com centro às coordenadas 07°09'33"S e 46°06'30"W (Figura 31).

A existência de uma estrutura circular anômala foi primeiramente reconhecida por ABREU *et al.* (1977), em decorrência de mapeamento geológico regional, tendo sido denominada por esses autores de “Estrutura de Macapá” (nome do rio que corta a estrutura quase ao meio na direção E-W).

A estrutura aparece de forma destacada no mapa aeromagnético produzido no levantamento aerogeofísico regional da Bacia do Parnaíba, realizado pela Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis (ANP) (MARQUES *et al.* 2006). Essa assinatura geofísica notável levou SILVA (2020) a interpretá-la como tendo se formado por impacto meteorítico, sem, contudo, apresentar evidências diagnósticas desse tipo de fenômeno. A partir de um

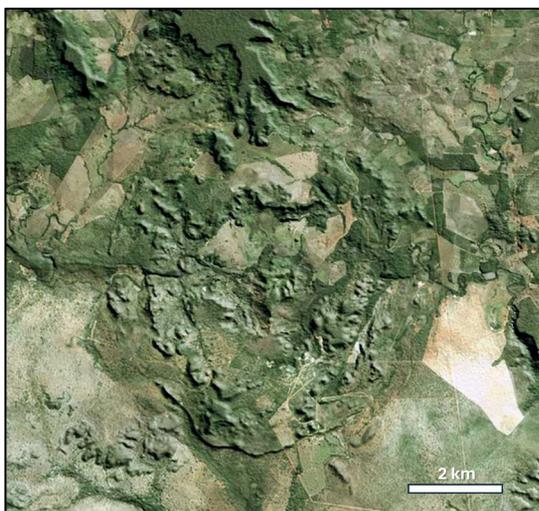


FIGURA 31 – Nova Colinas. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TanDEM-X (GOTTWALD *et al.* 2020).

trabalho de reconhecimento em campo e da análise petrográfica de amostras coletadas no interior da estrutura, REIMOLD *et al.* (2022) apresentaram essas evidências, comprovando assim a origem meteorítica de Nova Colinas.

A estrutura se formou sobre rochas sedimentares e ígneas das formações Pedra de Fogo e Motuca (Permiano), Sambaíba (Triássico) e Mosquito (Jurássico Inferior). Investigações em andamento (AVONA *et al.* 2023) indicam que a borda da estrutura é formada por rochas vulcânicas básicas da Formação Mosquito e que as litologias no interior da estrutura são predominantemente arenitos da Formação Sambaíba que formam elevações escarpadas. Os estratos areníticos expostos nas escarpas dessas elevações exibem intenso fraturamento e atitudes do acamamento variáveis, de sub-horizontais até sub-verticais, às vezes com dobras invertidas, em contraste com arenitos equivalentes da parte externa da estrutura, que exibem atitudes horizontais a sub-horizontais.

Pesquisas ainda em andamento (AVONA *et al.* 2023) indicam que nessa porção central da estrutura de Nova Colinas ocorrem estratos mais antigos, atribuídos às formações Motuca e Pedra de Fogo. A primeira ocorre em uma faixa estreita localizada na zona intermediária entre a borda da estrutura e sua elevação central e é representada por uma sequência de arenitos intercalados a lamitos da Formação Motuca, formando estruturas do tipo heterolito. Na elevação central da estrutura foi encontrada rocha composta por arenito fino com abundantes níveis de sílex, típica da Formação Pedra de Fogo, exibindo forte deformação.

Essa disposição circular e concêntrica das unidades litoestratigráficas que ocorrem em Nova Colinas configura assim o padrão em forma de alvo típico de estruturas de impacto formadas em terrenos sedimentares. A elevação topográfica central, onde ocorrem as unidades mais antigas, corresponde ao remanescente do núcleo central soerguido estruturalmente, que caracteriza as crateras de impacto do tipo complexa.

Dentre as evidências da natureza meteorítica identificadas em Nova Colinas estão as micro feições de deformação por choque em grãos de quartzo de arenitos (REIMOLD *et al.* 2022) (Figura 32a) e *shatter cones* em basalto (AVONA *et al.* 2023) (Figura 32b). As micro-feições identificadas por REIMOLD *et al.* (2022) incluem os três tipos de deformações planares (PF, FF e PDF). A análise dos planos cristalográficos de quartzo onde essas deformações se desenvolveram indica a atuação de pressões que variam

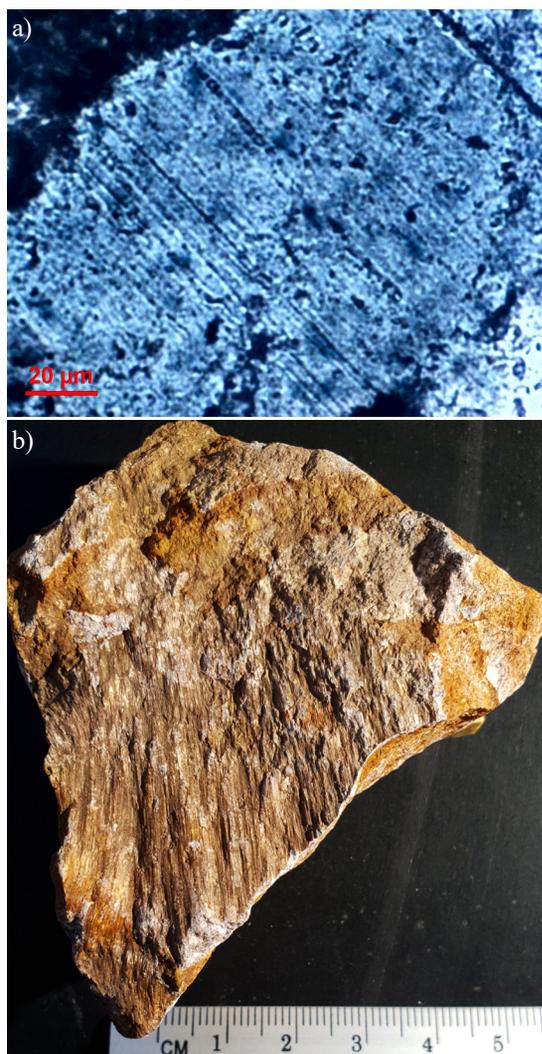


FIGURA 32 – (a) Nova Colinas. Microestruturas de deformação por choque (PDF) em grãos de quartzo de arenito. (b) *Shatter cones* em basalto.

de 5 a 20 GPa, típicas de regimes baixo a moderado de choque meteorítico (HÖRZ 1968). A ocorrência de *shatter cones* em basalto da Formação Mosquito mostra que a deformação decorrente do impacto afetou essa unidade litoestratigráfica.

Uma abordagem inicial sobre a assinatura geofísica pelos métodos magnético e gamaespectrométrico foi feita por SILVA (2020) a partir dos dados do levantamento aerogeofísico da ANP. Essa caracterização foi posteriormente detalhada por REIMOLD *et al.* (2022) e mostra uma notável anomalia magnética circular coincidente com a borda externa da estrutura, delineada por um conjunto de anomalias de comprimentos de onda curtos, idênticas às anomalias que caracterizam a área de ocorrência das rochas vulcânicas básicas e também diques de mesma

natureza da Formação Mosquito, logo ao norte da estrutura (Figura 33). Análise de dados sísmicos da estrutura de Nova Colinas encontra-se em andamento (PEREIRA *et al.* 2022) e indica a existência de um sistema de falhas e fraturas que afetou diques e soleiras associados ao vulcanismo Mosquito e camadas sedimentares na zona interna da estrutura. Também foram identificadas descontinuidades estruturais associadas ao núcleo central soerguido da estrutura.

A idade de formação da estrutura de Nova Colinas não foi ainda estabelecida. Porém, o fato da sucessão basáltica da Formação Mosquito, datada no intervalo 197-199 Ma por MERLE *et al.* (2011), encontrar-se afetada pelo impacto indica esse período como idade máxima provável para sua formação.

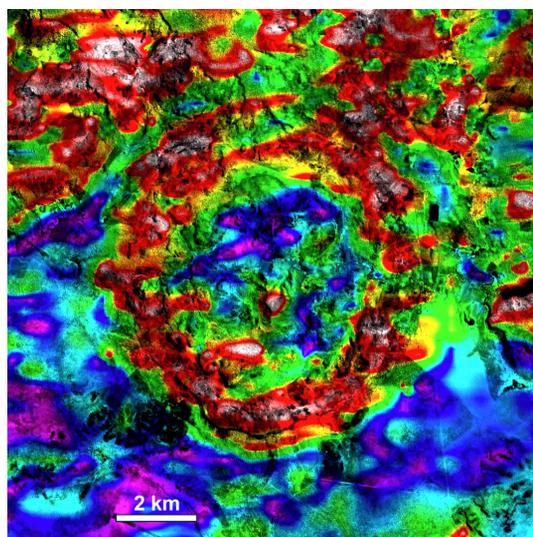


FIGURA 33 – Nova Colinas. Combinação da imagem magnética (sinal analítico do ângulo de inclinação) com a imagem do satélite Sentinel-2. O círculo em vermelho na borda da estrutura indica a notável anomalia magnética causada pela presença de rochas básicas da Fm. Mosquito.

4.4 São Miguel do Tapuio (PI)

A existência desta estrutura anômala de formato circular com cerca de 21 km de diâmetro é conhecida desde o início da década de 1980. Ela está localizada no município de São Miguel do Tapuio, na região leste do estado do Piauí, com centro às coordenadas 5°37.6'S e 41°23.3'W.

A atribuição da origem da estrutura a evento de impacto meteorítico foi aventada por TORQUATO (1981), CRÓSTA (1987) e MARTINS *et al.* (2016) com base em aspectos indiretos, tais como sua morfologia circular e zonas internas concêntricas, bem

como ao fato de que as rochas em seu interior, predominantemente constituídas por arenitos, apresentam deformação estrutural e recristalização, características que não ocorrem nas mesmas rochas fora da estrutura. Porém, as necessárias evidências comprobatórias não haviam sido estabelecidas até recentemente.

Observado em imagens orbitais de sensoriamento remoto, a estrutura de São Miguel do Tapuio exibe um relevo interno notadamente acidentado e formado por anéis internos concêntricos que alternam cristas elevadas e vales (Figura 34). Essa morfologia contrasta com o terreno externo a ela, onde o relevo é relativamente aplainado. Esses anéis internos estão delimitados externamente pela borda elevada da estrutura, que está cerca de 120 m acima da zona externa. Ao centro, ela exibe um anel elevado com diâmetro de cerca de 5 km e de relevo também acidentado. MARTINS *et al.* (2016) reconheceram as seguintes zonas morfo-estruturais: borda circular externa, zonas anelares internas, depressão anelar e núcleo central soerguido.

A geologia local compreende rochas sedimentares relacionadas à Formação Cabeças, do Devoniano da Bacia do Parnaíba, constituídas predominantemente por arenitos. Na porção sudeste da estrutura ocorrem também estratos da Formação Pimenteiras, igualmente do Devoniano.

Estudos geofísicos sobre a estrutura foram feitos por CASTELO-BRANCO *et al.* (2004), VASCONCELOS *et al.* (2010) e MARTINS *et al.* (2016), com o objetivo de determinar sua origem, se

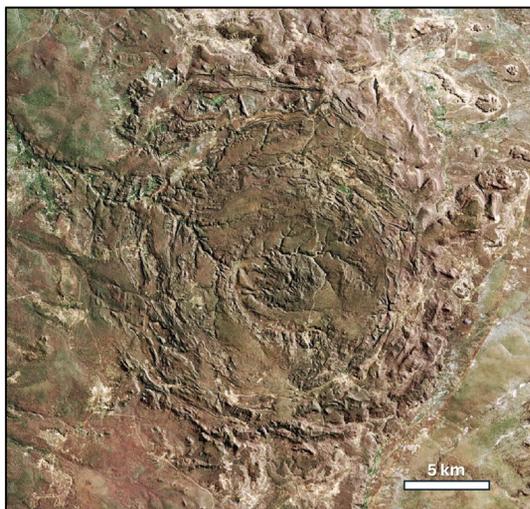


FIGURA 34 – São Miguel do Tapuio. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TANDEM-X (GOTTWALD *et al.* 2020).

por processo endógeno (intrusão de corpo ígneo), ou exógeno (impacto meteorítico). Os resultados não indicaram a presença de uma intrusão subjacente, que pudesse ter soerguido e deformado os estratos sedimentares sobrepostos, mas também não foram conclusivos quanto à origem exógena da estrutura. Os métodos magnético e gravimétrico utilizados indicam uma conspícua anomalia semicircular interna à estrutura, aberta em sua porção NW, formando um padrão tipo “ferradura”.

As evidências de impacto meteorítico, na forma de micro feições de deformação em grãos de quartzo de arenitos e de brecha monomictica de arenito coletados a ~1 km do centro da estrutura, foram reportadas por CRÓSTA *et al.* (2019c). Os arenitos exibem abundantes feições de deformação que não têm características de choque, isto é, foram formadas em regime de pressão abaixo do limite de choque (7 GPa), e são constituídas de fraturas planares extensivas e irregulares. Já a brecha contém feições típicas de choque (≥ 7 GPa), como feições planares de deformação (PDF), feições-em-pena (FF) e são fraturas planares (PF) (Figura 35).

A caracterização mais detalhada da geologia local e das características de deformação por choque da estrutura de São Miguel do Tapuio tem como obstáculo a dificuldade de acesso à parte mais central da estrutura, caracterizada por topografia bastante acidentada e pela cobertura de vegetação espinhosa da caatinga, combinada com a ausência de trilhas ou caminhos. Além disso, os arenitos dessa zona central exibem sinais de intensa laterização ferruginosa, que não só dificulta o acesso às rochas locais pela espessa cobertura laterítica, como também mascara as carac-

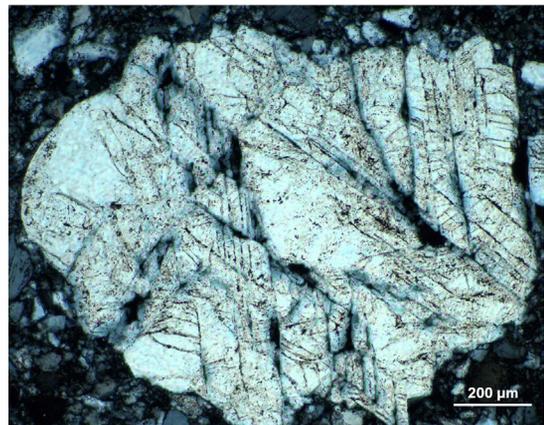


FIGURA 35 – São Miguel do Tapuio. Microestruturas de deformação por choque (PDF e FF) em grãos de quartzo de arenito.

terísticas e texturas originais da rocha, incluindo as evidências de deformação por choque.

As evidências já disponíveis da natureza meteorítica de São Miguel do Tapuio a tornam a segunda maior estrutura desse tipo do Brasil e da América do Sul.

Também neste caso, não foram encontrados materiais datáveis que permitam a determinação direta da idade de formação da estrutura de São Miguel do Tapuio. As duas únicas unidades afetadas pelo impacto são de idade Devoniana, o que sugere uma idade mais jovem do que ~360 Ma para essa estrutura.

4.5 Santa Marta (PI)

A estrutura de Santa Marta tem seu centro às coordenadas 10°10'S e 45°14'W e está localizada na região sul do estado do Piauí, no município de Corrente, sendo nomeada em razão do distrito de Santa Marta, localizado próximo à borda da estrutura. Com um diâmetro de cerca de 10 km, é uma estrutura do tipo complexa e se encontra em estágio relativamente moderado de erosão, preservando suas principais zonas morfoestruturais internas (Figura 36). O fato de que a estrutura foi recoberta por sedimentos inconsolidados de idade cenozoica, hoje parcialmente erodidos, parece ter contribuído para sua preservação. Isso a torna uma das mais bem preservadas do país e, possivelmente, do mundo dentre as que se formaram no Mesozóico (OLIVEIRA *et al* 2017).

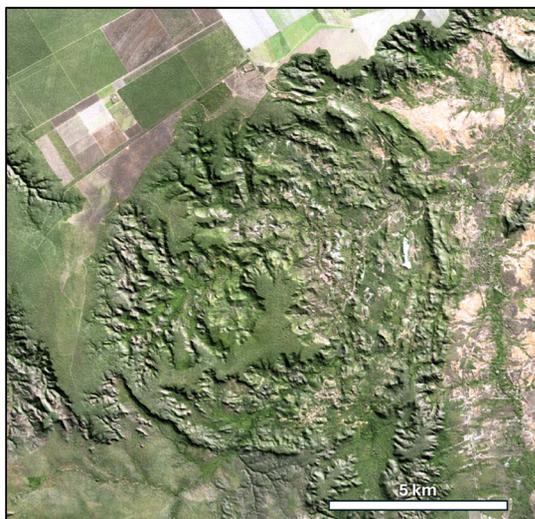


FIGURA 36 – Santa Marta. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TanDEM-X (GOTWALD *et al*. 2020).

A primeira menção à estrutura se deve a MASTER & HEYMANN (2000) que identificaram, em imagens orbitais de sensoriamento remoto, a presença de uma anomalia geomorfológica de forma circular e sugeriram a relação com um processo de impacto meteorítico. A comprovação dessa relação se deu com os trabalhos de OLIVEIRA *et al*. (2014, 2017), por meio da identificação de feições de deformação por choque encontradas de forma relativamente abundantes em rochas locais.

Na área onde se formou a estrutura há a superposição de sequências de duas distintas bacias sedimentares. As sequências mais inferiores afetadas pelo impacto, depositadas entre os períodos Siluriano e Devoniano, são relacionadas à Bacia do Parnaíba, enquanto as mais superiores, do período Cretáceo, foram depositadas no âmbito da Bacia Sanfranciscana. Além dessas sequências, parte da estrutura encontra-se recoberta por coberturas detríticas de provável idade Cenozoica, que não foram afetadas pelo impacto.

As zonas morfoestruturais que compõem a estrutura de Santa Marta são, do centro para a borda, um núcleo elevado com cerca de 3,2 km de diâmetro, bacia anelar e a borda. Esta última aparece como uma sucessão semicircular de cristas elevadas na maior parte da circunferência da estrutura, exceto pelo quadrante NW, onde ela é recoberta pela cobertura detrítica mais jovem e indeformada.

OLIVEIRA *et al*. (2014, 2017) descreveram uma variedade de tipos litológicos distribuídos de forma concêntrica formando o padrão “alvo” (*bull’s eye*), típico de crateras ou estruturas de impacto formadas em sucessões sedimentares indeformadas. As litologias compreendem, da base para o topo e, espacialmente, do centro para a borda da estrutura, conglomerados e arenitos silurianos do Grupo Serra Grande, folhelhos e arenitos devonianos da Formação Pimenteira e arenitos da mesma idade da Formação Cabeças, todas relacionadas à Bacia do Parnaíba. Da Bacia Sanfranciscana, seguem-se arenitos conglomeráticos da Formação Abaeté, pelitos e calcarenitos da Formação Quiricó, arenitos e siltitos da Formação Três Barras e arenitos com estratificação cruzada de grande porte da Formação Posse, todos elas do período Cretáceo. Esses autores identificaram dois tipos de brechas de impacto na estrutura de Santa Marta: brechas polimícticas, formadas por fragmentos de várias das litologias mencionadas e que são as mais abundantes e amplamente distri-

buídas dentro da estrutura, e brechas monomícticas, formadas pela fragmentação de rochas de um tipo litológico, que ocorre de forma mais restrita. Há ainda a ocorrência de brechas sedimentares e de brechas detríticas, estas últimas relacionadas à fragmentação e ação gravitacional sobre as coberturas cenozoicas.

Shatter cones são relativamente comuns em Santa Marta e ocorrem em arenitos e clastos de brecha de arenito em vários locais na parte central da estrutura (Figura 37a). Essas macroestruturas de choque também são desenvolvidas dentro de calhaus e blocos de quartzito arredondados que ocorrem como clastos em conglomerados na bacia anelar (Figura 37b).

Microestruturas de deformação diagnósticas de choque foram identificadas por OLIVEIRA *et al.* (2014, 2017) e incluem feições de deformação planar (PDFs) em grãos de quartzo encontradas em várias amostras de brechas de impacto da parte central da estrutura, bem como

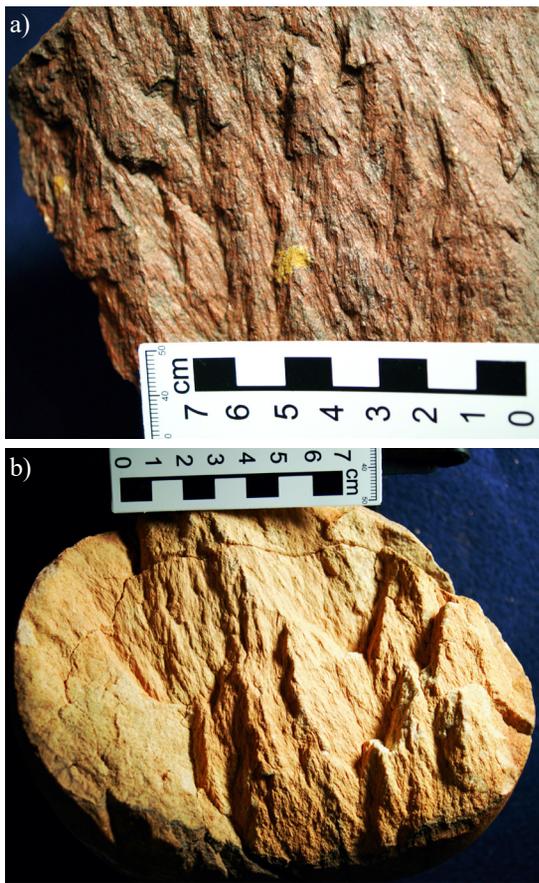


FIGURA 37 – (a) Santa Marta. *Shatter cones* em arenito. (b) *Shatter cones* no interior de calhaus de quartzito.

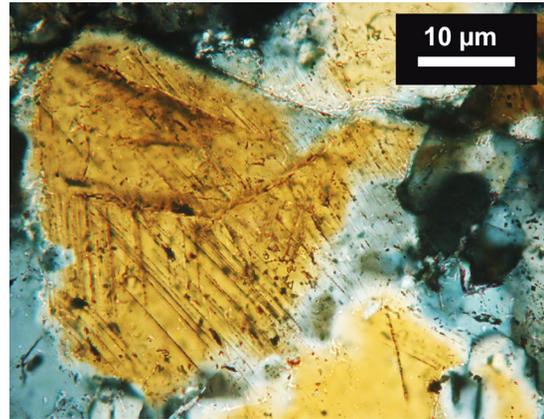


FIGURA 38 – Santa Marta. Microestruturas de deformação por choque (PDF) em grão de quartzo de arenito.

feições-em-pena (FFs) em arenitos intensamente deformados e/o brechados (Figura 38). As mesmas características de micro deformação foram observadas em grãos de quartzo de rochas portadoras de *shatter cones*.

Não há determinação da idade precisa de formação da estrutura de Santa Marta pela ausência de material datável por métodos geocronológicos isotópicos, estimando-se sua idade máxima no intervalo de 93 a 100 Ma. Essa estimativa se baseia na estratigrafia local, pois os arenitos das Formação Posse do Grupo Urucua representam a unidade lito-estratigráfica mais jovem deformada pelo impacto e têm sua idade de deposição associada a esse intervalo. Já uma sugestão de idade mínima é dada pela cobertura sedimentar indeformada da Formação Chapadão, do Cenozoico.

5 ESTRUTURAS BRASILEIRAS DE POSSÍVEL ORIGEM METEORÍTICA (AINDA NÃO COMPROVADAS)

Além das nove estruturas comprovadas de impacto no Brasil, há algumas outras cuja origem é atribuída a processos de colisão de corpos celestes, mas cuja origem ainda não foi comprovada por meio da identificação inequívoca de feições de choque, critério científico necessário e fundamental (FRENCH & KOEBERL, 2010). Três dessas estruturas são as de Colônia e Praia Grande, no estado de São Paulo, e a da Ilha do Mel, no Paraná. As duas últimas são estruturas submarinas na plataforma continental do Atlântico, no contexto sedimentar da Bacia de Santos.

5.1 Colônia (SP)

Colônia, também conhecida como “Cratera de Colônia”, fica na cidade de São Paulo, mais precisamente no distrito de Parelheiros, com centro às coordenadas 23°52'S e 46°42'20"W (Figura 39). A estrutura tem 3,6 km de diâmetro e sua origem tem sido motivo de debates desde o início da década de 1960, quando foi identificada por KOLLERT *et al.* (1961) e já associada a um possível impacto meteorítico. Desde então, uma série de estudos foram conduzidos na estrutura (*e.g.*, CRÓSTA 1987; RICCOMINI *et al.* 1991, 2005, 2011; VELÁZQUEZ *et al.* 2013, 2018, 2021; LEDRU *et al.* 2015; PRADO *et al.* 2019) sem, porém, que sua formação por impacto meteorítico pudesse ser comprovada de forma conclusiva.

A estrutura de Colônia é uma proeminente depressão circular com a borda elevada em cerca de 125 m em relação à sua porção interna deprimida, formando uma bacia de drenagem quase fechada, com uma única abertura à leste para onde toda a sua área interna é drenada (Figura 39). O interior da depressão é preenchido por rochas sedimentares detríticas correspondentes à Formação Resende (Paleógeno) da Bacia de São Paulo e por depósitos coluviais e aluviais (Neógeno). O terreno do entorno da estrutura, no qual a mesma foi formada, é composto por rochas do embasamento cristalino do Cinturão Ribeira (Neoproterozoico), predominantemente xisto, gnaíse, quartzito e migmatito.



FIGURA 39 – Colônia. Imagem composta do satélite Sentinel-2, bandas 2, 3 e 4 em RGB, superposta ao modelo digital de elevação do TanDEM-X (GOTTWALD *et al.* 2020).

A maioria dos estudos realizados em Colônia utilizaram diversos métodos geofísicos para estimar a forma, espessura e demais características do seu preenchimento sedimentar, bem como investigar eventual fenômeno endógeno que pudesse ser o responsável por sua formação. Os resultados mostraram a inexistência de mecanismo endógeno para sua formação, a configuração em forma de tigela ou bacia, e uma profundidade máxima de 400 m até o embasamento em sua porção mais central.

O preenchimento sedimentar foi analisado em detalhe até a profundidade de 14 m por meio de sondagem com testemunhos (LEDRU *et al.* 2015) e pelo método sísmico em toda sua espessura (RICCOMINI *et al.* 2011, PRADO *et al.* 2019). Combinando os dados sísmicos e de resistividade elétrica com o perfil de um poço profundo para água subterrânea perfurado no interior da estrutura até 270 m, PRADO *et al.* (2019) elaboraram uma coluna sedimentar esquemática composta por seis pacotes sedimentares compostos por misturas variáveis em espessura de quatro materiais: (i) silte e argila ricos em matéria orgânica; (ii) areia e argila com grãos grosseiros de quartzo; (iii) areia e argila com seixos de quartzo; (iv) argila com seixos e grãos de quartzo, feldspato e clastos de gnaíse. Observa-se, assim, um aumento progressivo na granulometria dos materiais detríticos misturados à argila com a profundidade. Abaixo de 270 m, e atingindo até ~ 400 m, os dados sísmicos indicam a possível presença de material de granulação grossa mal selecionado, com características compatíveis com níveis conglomeráticos e/ou com brechas autóctones de impacto (RICCOMINI *et al.* 2011, PRADO *et al.* 2019).

Apesar das evidências indiretas levantadas até o presente sugerirem uma origem exógena para a estrutura de Colônia, por processo de impacto meteorítico não há, de fato, evidências diretas cientificamente aceitas desse fenômeno. Supostas evidências nesse sentido apresentadas por VELÁZQUEZ *et al.* (2013, 2018, 2021), com base na análise de amostras provenientes de sondagem para poço de água subterrânea no interior da estrutura, não se sustentam frente à literatura (*e.g.*, REIMOLD *et al.* 2014, CRÓSTA & REIMOLD 2016, CRÓSTA *et al.* 2019a). A única “evidência” de micro-deformação por choque apresentada por VELÁZQUEZ *et al.* (2013) é a suposta ocorrência de PDF em quartzo; apesar da baixa qualidade da ilustração apresentada para essa feição, é fácil constatar que a mesma não corresponde a PDF verdadeiro e provavelmente decorre de evento tectônico de defor-

mação típico das rochas do embasamento local e, portanto, de regime de pressão muito abaixo do regime de choque. Já o artigo de VELÁZQUEZ *et al.* (2021), além de reiterar a suposta ocorrência de feições de choque em material obtido de poços perfurados para água dentro da estrutura, método de recuperação de amostra de rocha que não é adequado para esse objetivo, apresenta dados sobre supostas esférulas derivadas do impacto encontradas nesse mesmo material. Baseados apenas nas formas achatadas das esférulas (por eles denominadas de “splash forms”), e desconsiderando o fato de que nenhuma das análises geoquímicas revelou qualquer indício de material meteorítico, concluíram que elas são derivadas da fusão de rochas do embasamento devido a um evento de impacto meteorítico. Tal conclusão não encontra respaldo na vasta literatura referente a esférulas criadas por eventos de impacto (*e.g.*, GLASS & SIMONSON 2013 e referências ali citadas).

Em suma, a origem por impacto da estrutura de Colônia permanece uma questão científica ainda em aberto. Ela só deverá ser elucidada a partir da análise de rochas recuperadas de níveis na transição entre o preenchimento sedimentar e o embasamento, ou seja, de profundidades em torno de 400 m, e/ou que depósitos proximais decorrentes do impacto contendo evidências de choque ou assinaturas geoquímicas de material meteorítico. Tais depósitos podem estar preservados na Bacia de São Paulo, cuja sedimentação é parcialmente cronocorrelata com o intervalo de tempo estimado para a formação da estrutura de Colônia. RICCOMINI *et al.* (2005, 2011) estimam que ela tenha se formado em algum momento entre 5 e 36 Ma.

5.2 Praia Grande (SP)

A estrutura de Praia Grande é uma feição circular submarina cuja descoberta se deve ao desenvolvimento de atividades exploratórias para hidrocarbonetos na Bacia de Santos (CORREIA *et al.* 2005). Ela está localizada nos domínios da plataforma continental atlântica, a 200 km de distância da costa a partir da cidade de Praia Grande com centro às coordenadas 25°38'50"S e 45°37'30"W (Figura 40).

Situada abaixo de uma lâmina d'água de 1,3 km de profundidade e de uma coluna de rochas sedimentares com cerca de 4 km de espessura, Praia Grande foi identificada a partir de levantamentos sísmicos 3D realizados pela Petrobras. Sua morfologia sugere uma estrutura circular com 20 km de

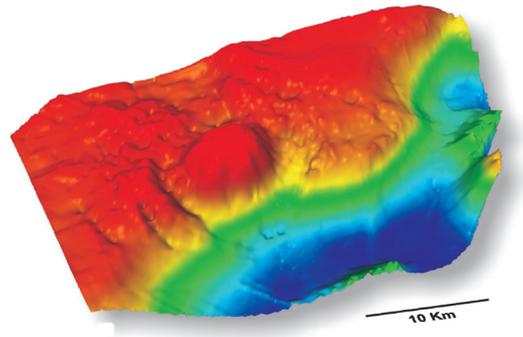


FIGURA 40 – Praia Grande. Projeção 3D de um horizonte sísmico no intervalo Santoniano, mostrando o núcleo central soerguido, circundado por uma bacia anelar e as falhas circulares concêntricas (CORREIA *et al.* 2005).

diâmetro tendo ao centro um núcleo soerguido com 4,5 km de diâmetro.

Segundo CORREIA *et al.* (2005), sua formação se deu no Cretáceo Superior, com estratos do Albiano-Santoniano como rochas-alvo, que posteriormente foi coberta por estratos mais jovens, do Cretáceo (Campaniano-Maastrichtiano) e Terciário. Com base na estratigrafia local, esses autores estimaram que a estrutura de Praia Grande se formou no intervalo entre 83,5 e 85,8 Ma.

Até o presente, não há confirmação da origem por impacto meteorítico dessa estrutura. Embora tenham sido realizadas sondagens pela Petrobras em seu interior, não há relatos da ocorrência de feições de choque nas rochas locais recuperadas.

5.3 Ilha do Mel (PR)

Assim como a estrutura de Praia Grande, também no caso da estrutura de Ilha do Mel a descoberta se deu pela Petrobras em decorrência de atividades exploratórias para hidrocarbonetos na Bacia de Santos (MENEZES *et al.* 2012). Ela é uma estrutura submarina a 210 km da costa, com o centro às coordenadas 26°37'48.3"S 46°36'0.4"W.

Com diâmetro de 6 km, a estrutura é caracterizada pelos dados de sísmica 3D como exibindo em seu interior um conjunto de estruturas anelares concêntricas, representando possíveis falhas de colapso, com um núcleo central e uma bacia anelar entre este e a borda da estrutura. Acima dela encontra-se um pacote sedimentar não deformado com 400 m de espessura. Os estratos sedimentares deformados têm idade do Plioceno-Mioceno, que sugerem uma idade de formação em torno de 5 Ma.

Também neste caso, não há confirmação da origem por impacto devido à inexistência de sondagens no interior da estrutura de Ilha do Mel.

6 GEOPATRIMÔNIO E GEOCONSERVAÇÃO: INICIATIVAS BRASILEIRAS EM ESTRUTURAS DE IMPACTO METEORÍTICO

Crateras e estruturas de impacto são sítios bastante propícios ao desenvolvimento de ações ligadas à valorização e preservação do patrimônio geológico e à conservação da geodiversidade. Um exemplo de estrutura desse tipo, e que já faz parte da rede mundial de geoparques da UNESCO (<https://www.unesco.org/en/igpp/geoparks>), é a Cratera de Ries na Alemanha (STURM *et al.* 2013). Outra cratera meteorítica que recebe centenas de milhares de visitantes a cada ano é a Meteor Crater, no estado do Arizona, Estados Unidos (KRING 2017), uma propriedade privada dotada de centro de visitação com museu e atrações abertas ao público.

No Brasil a iniciativa de criação de geoparques ainda é embrionária. No momento da escrita deste artigo apenas seis deles haviam sido oficialmente registrados junto à UNESCO, sendo que

nenhuma das estruturas de impacto brasileiras tem ainda um geoparque. Há, contudo, algumas iniciativas em algumas delas voltadas à geoconservação.

O Domo de Araguainha foi um dos primeiros sítios a ser incluído na base de dados organizada pela Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleontológicos (SIGEP), com patrocínio da International Union of Geological Sciences (IUGS) (CRÓSTA 2002). O Domo foi também incluído pela CPRM/Serviço Geológico do Brasil (SGB) na proposta de criação de geoparques brasileiros (THOMÉ-FILHO *et al.* 2012). A estrutura foi objeto de uma análise de seu potencial geo-turístico, em conjunto com outras estruturas de impacto brasileiras, por SANCHEZ e BRILHA (2017). Finalmente, em 2022 o Domo de Araguainha foi selecionado na lista dos “The First 100 IUGS Geological Heritage Sites” (IUGS 2022), sendo a única estrutura de impacto em todo o mundo a constar dessa lista (Figura 41). Apesar dessas iniciativas, até hoje o Domo de Araguainha não conta com iniciativa de fomento à visitação aberta ao público.

A estrutura de Vista Alegre também faz parte dos geossítios oficiais da SIGEP (CRÓSTA *et al.* 2013) e, em 2006, passou a integrar o Programa de Geoturismo da “Minerais do Paraná



FIGURA 41 – Araguainha “The First 100 IUGS Geological Heritage Sites” (IUGS 2022).

S.A.” (Mineropar), empresa estatal do estado do Paraná, como um dos geossítios daquele estado. Em parceria com a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e a Prefeitura Municipal de Coronel Vivida, essa iniciativa promoveu a instalação painéis informativos bilíngues em locais ilustrativos, em linguagem acessível ao público. Também foram impressos folhetos em três línguas (português, espanhol e inglês) com o conteúdo similar ao dos painéis para distribuição à população local, principalmente nas escolas, e a turistas. Em 2008, a Secretaria de Estado de Cultura do Paraná promoveu o tombamento de uma área de mais de 10 mil m² com ocorrências de impactitos contendo as principais evidências do processo de formação da cratera. Com a desativação da Mineropar e o desinteresse de administrações municipais, essas iniciativas foram descontinuadas por vários anos. Em 2023, a Prefeitura promoveu a revitalização do local tombado, instalou um mirante na borda da estrutura e deu continuidade à instalação e manutenção dos painéis e folhetos informativos (Figura 42).

O Domo de Vargeão está incluído na lista de geossítios oficiais da SIGEP (CRÓSTA *et al.* 2009). Apesar do sítio geológico ser conhecido da população em âmbito regional, até hoje não houve ainda

iniciativas de geoconservação e valorização do patrimônio por parte de autoridades em qualquer nível. Contudo, por iniciativa do Ministério Público de Santa Catarina e da Prefeitura Municipal de Vargeão, em colaboração com a Unicamp, encontra-se em fase de implantação um conjunto de painéis informativos junto a vários afloramentos representativos das rochas e impactitos, contando também com explicações gerais sobre processos geológicos de impactos celestes e sobre a geologia local. Da mesma forma como em Vista Alegre, essa iniciativa visa a divulgação científica do tema, voltada ao público em geral.

A Cratera de Colônia, além de constar da lista dos geossítios oficiais da SIGEP (RICCOMINI *et al.* 2005), foi tombada em 2003 pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico do Estado de São Paulo (CONDEPHAAT). Em 2007, a Prefeitura Municipal de São Paulo criou o Parque Natural Municipal (PNM) Cratera de Colônia, cobrindo uma área de 53 hectares abrangendo uma parte ainda sem ocupação localizada no interior da cratera. Apesar dessas iniciativas, ainda não há ações ou instalações locais permanentes acessíveis ao público. Por estar localizada em um distrito da maior metrópole da América



FIGURA 42 – Cerimônia de inauguração da revitalização da pedra de Vista Alegre (01/07/2023). Ao fundo podem ser vistos blocos remanescentes de brechas polimícticas de impacto extraídos da pedra e do lado esquerdo encontra-se o painel bilíngue (português e inglês) com os principais fatos geológicos em linguagem acessível ao público. A placa comemorativa foi descerrada na cerimônia pelo Prefeito Municipal de Coronel Vivida, Anderson M. Barreto, e pelo professor da Unicamp, Alvaro P. Crósta e está instalada em um bloco de brecha de impacto.

do Sul, a Cratera de Colônia tem um grande potencial intrínseco para o desenvolvimento de atividades científicas, educacionais e culturais. Um passo fundamental para isso é a comprovação, por métodos científicos apropriados, da sua origem por impacto meteorítico e da sua idade, o que permitirá grandes avanços científicos aos estudos paleoambientais e a elucidação dos paleoclimas vigentes na região desde a sua formação.

7 CONCLUSÕES

Neste artigo, procurou-se apresentar o estado atual de conhecimento das estruturas de impacto comprovadas em nosso país, assim como algumas das que têm potencial para terem sua gênese atribuída a esse tipo de processo geológico, mas que ainda carecem de dados adequados a estudos de detalhe.

As colisões cósmicas são o processo geológico mais fundamental, por meio do qual todos os corpos planetários se formaram. Elas vêm ocorrendo desde os primórdios da história do Sistema Solar, ainda na fase de acreção desses corpos, e persistem até os dias atuais, ainda que com uma frequência intensamente decrescente.

As estruturas geológicas que registram esse tipo de processo são as crateras de impacto meteorítico, o único tipo de estrutura presente em todos os corpos sólidos do Sistema Solar. Muito numerosas e bastante conspícuas na maioria dos corpos planetários devido à ausência ou baixa intensidade de atuação de outros processos geológicos superpostos, na Terra as crateras meteoríticas são relativamente poucas e mal distribuídas, tanto no tempo como no espaço. Isso vale para suas versões já modificadas por outros processos, denominadas de astroblemas ou estruturas de impacto.

Dentre as pouco mais de 200 crateras e estruturas desse tipo conhecidas na Terra, de todas as idades e dimensões, o Brasil figura com apenas nove delas. Esse número é acentuadamente reduzido quando se leva em conta a dimensão territorial do nosso país, assim como a natureza e idades de seus terrenos. Outros países e regiões do planeta com características geológicas similares ao Brasil, tais como o Canadá e a Austrália, registram atualmente dezenas de estruturas de impacto cada um, apesar de possuírem áreas territoriais semelhantes à do Brasil. Essa constatação leva a uma outra: a de que há potencial para a ocorrência de um número maior de estruturas desse tipo no Brasil.

O baixo número de estruturas meteoríticas no Brasil pode ser decorrência de vários fatores. O primeiro é o fato do conhecimento geológico do território brasileiro ser ainda reduzido, com expressiva parte dele contando apenas com mapas geológicos em escalas regionais. Outro fator é que as estruturas mais visíveis na superfície, quer seja por sua preservação parcial em relação aos processos modificadores (erosão, sedimentação, tectonismo etc.), quer por sua exumação, possivelmente já foram identificadas. Restariam, portanto, estruturas em grau bem mais avançado de erosão, difíceis de serem visualizadas em superfície, e/ou estruturas soterradas por camadas geológicas mais jovens. Nesses casos, os métodos geofísicos (gravimetria, magnetometria e sísmica de reflexão, principalmente), desde que realizados em escalas adequadas, podem trazer novos elementos e a potencial identificação de novas crateras e estruturas de impacto no Brasil. Por último, certamente contribui para esse número pequeno o pouco conhecimento que os geólogos brasileiros têm em relação a esse importante processo geológico, assim como em relação à correta identificação das evidências comprobatórias desse fenômeno. Os cursos de formação de profissionais de geologia no Brasil ainda não incluem em seus currículos disciplinas de geologia planetária, o que já é corriqueiro há bastante tempo em países do hemisfério norte.

Do ângulo das inovações metodológicas que podem contribuir para novas descobertas, destacam-se, nos métodos indiretos, imagens de sensoriamento remoto e modelos digitais de elevação com maior resolução espacial, e levantamentos aerogeofísicos também de maior resolução (como a sísmica 3D), combinados com técnicas avançadas de processamento, capazes de revelar características sutis que diferenciam as assinaturas de estruturas de impacto das assinaturas de estruturas formadas por outros processos. Nos métodos diretos, grandes avanços têm sido feitos na caracterização de deformação por choque em outros minerais além do quartzo, como o zircão e seu polimorfo reidita (CAVOSIE *et al.* 2018), e também em técnicas geoquímicas analíticas de alta precisão, capazes de identificar a contribuição de material de origem meteorítica em impactitos e em depósitos de impacto, tipicamente presentes em concentrações muito baixas (partes por bilhão) (por exemplo, MARTELL *et al.* 2024 e referências ali citadas). Finalmente, avanços metodológicos importantes têm sido obtidos na geoquímica isotópica, possibilitando a determinação precisa das

idades de formação de muitas das crateras de impacto e, conseqüentemente, a reconstrução, ainda que parcial, do histórico do registro geológico de impactos da Terra.

8 REFERÊNCIAS

- ABREU, F.A.M.; SILVA, J.M.R.; FARIA JÚNIOR L.E.C.; RODRIGUES, M.D.R., TRUCKENBRODT, W. 1977. *Projeto Balsas. Relatório Final*. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Convênio DNPM/UFPA, Belém, 47 p.
- ADEPELUMI, A.A.; FONTES, S.L.; SCHNEGG, P.A.; FLEXOR, J.M. 2005. An integrated magnetotelluric and aeromagnetic investigation of the Serra da Cangalha impact crater, Brazil. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150: 159–181. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.08.029>
- AVONA, P.D.; CRÓSTA, A.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; BJONNES, E. 2023. First insights from numerical modeling of the formation of Nova Colinas, Brazil. *In: ANNUAL MEETING OF THE METEORITICAL SOCIETY*, 86, Los Angeles, USA, *LPI Contribution*, nº. 2990.
- BOROVÍČKA, J.; SPURNÝ, P.; BROWN, P.; WIEGERT, P.; KALENDA, P.; CLARK, D.; SHRBNÝ, L. 2013. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature*, 503: 235–237. <https://doi.org/10.1038/nature12671>
- CASTELO-BRANCO, R.M.G.; DE CASTRO, D.L.; CUNHA, L.S. 2004. Geological, geophysical, and imaging data of São Miguel do Tapuio (SMT) astrobleme, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 39: A-61.
- CAVOSIE, A.J.; TIMMS, N.E.; FERRIÈRE, L.; ROCHETTE, R. 2018. FRIGN zircon: The only terrestrial mineral diagnostic of high-pressure and high temperature shock deformation. *Geology*, 46: 891–894. <https://doi.org/10.1130/G45079.1>
- CORREIA, G.A.; MENEZES, J.R.C.; BUENO, G.V.; MARQUES, E.J.J. 2005. Identificação de uma estrutura de impacto no Cretáceo Superior da Bacia de Santos em sismica de reflexão 3D. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 13: 123–127.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. 2004. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas – SIG e 46 folhas na escala 1:1.000.000*. CPRM, Brasília, 41 CD-ROMs.
- CRÓSTA A. P. 1987. Impact structures in Brazil. *In: J. Pohl (ed.) Research in Terrestrial Impact Structures*. Wiesbaden, Vieweg, p. 30-38.
- CRÓSTA A.P. 2002. Domo de Araguainha (GO-MT): O maior astroblema da América do Sul. *In: C. Schobbenhaus, D.A. Campos, E.T. Queiroz, M. Winge, M. Berbert-Born (eds.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília, DNPM/CPRM/SIGEP, vol. 1., p. 531-540.
- CRÓSTA, A.P. 2012. Estruturas de Impacto e Astroblemas Brasileiros. *In: Y. Hasui, C.D.R. Carneiro, F.F.M. Almeida, A. Bartorelli (eds.) Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca-Ball, p. 673–708.
- CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U. 2016. Book Review: Impact Craters in South America. *Meteoritics & Planetary Science*, 51: 996–999. <http://doi.org/10.1111/maps.12632>
- CRÓSTA A.P.; GASPAR J.C.; CANDIA M.A.F. 1981. Feições de metamorfismo de impacto no Domo de Araguainha. *Revista Brasileira de Geociências*, 11: 139-146. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.1981139146>
- CRÓSTA, A.P.; KAZZUO-VIEIRA, C.; SCHRANK, A. 2004. Vista Alegre: a newly discovered impact crater in Southern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 39, p. A–28.
- CRÓSTA, A.P.; KAZZUO-VIEIRA, C.; CHOUDHURI, A.; SCHRANK, A. 2009. Vargeão Dome, State of Santa Catarina: A meteoritic impact record on volcanic rocks of the Paraná 64 Basin. *In: M. Winge, C. Schobbenhaus, M. Berbert-Born, E.T. Queiroz, D.A. Campos (Eds.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. DNPM/CPRM/SIGEP, Brasília, vol. 2, 23–34.

- CRÓSTA, A.P.; KOEBERL, C.; FURUIE, R.A.; KAZZUO-VIEIRA, C. 2010a. The first description and confirmation of the Vista Alegre impact structure in the Paraná flood basalts of southern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 45: 181–194. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01015.x>
- CRÓSTA, A.P.; LOURENÇO, F.S.; PRIEBE, G.H. 2010b. Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul: A possible new impact structure in Southern Brazil. In: R.L. Gibson, W.U. Reimold (Eds.) *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV*. The Geological Society of America, Special Paper SPE465, GSA, Boulder. [https://doi.org/10.1130/2010.2465\(12\)](https://doi.org/10.1130/2010.2465(12))
- CRÓSTA, A.P.; KAZZUO-VIEIRA, C.; PITARELLO, L.; KOEBERL, C.; KENKMANN, T. 2011. Geology and impact features of Vargeão Dome, southern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 47: 51–71. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01312.x>
- CRÓSTA, A.P.; FURUIE, R.A.; SCHRANK, A.; KAZZUO-VIEIRA, C. 2013. Astroblema de Vista Alegre, PR: Impacto meteorítico em derrames vulcânicos da Formação Serra Geral, Bacia do Paraná, Paraná. In: M. Winge, C. Schobbenhaus, C.R.G. Souza, A.C.S. Fernandes, M. Berbert-Born, W. Sallum Filho, E.T. Queiroz, D.A. Campos (Eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. DNPM/CPRM/SIGEP, Brasília, vol. 3, p. 23-34.
- CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U.; VASCONCELOS, M.A.R.; HAUSER, N.; OLIVEIRA, G.J.G.; MAZIVIERO, M.V.; GOES, A.M. 2019a. Impact cratering: The South American record - Part 1. *Geochemistry*, 79: 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.001>
- CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U.; VASCONCELOS, M.A.R.; HAUSER, N.; OLIVEIRA, G.J.G.; MAZIVIERO, M.V.; GOES, A.M. 2019b. Impact cratering: The South American record-Part 2. *Geochemistry*, 79: 191-220. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.09.002>
- CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U.; VASCONCELOS, M.A.R. 2019c. Cerro do Jarau and São Miguel do Tapuio: Two newly confirmed, large impact structures in Brazil. In: LUNAR AND PLANETARY SCIENCE CONFERENCE, 50, *LPI Contribution* n°. 2132.
- DIETZ, R.S. 1960. Meteorite impact suggested by shattercones in rock. *Science*, 131: 1781–1784. <https://doi.org/10.1126/science.131.3416.1781>
- DIETZ, R.S.; FRENCH, B.M. 1973. Two probable astroblemes in Brazil. *Nature*, 244: 562. <https://doi.org/10.1038/244561a0>
- FERREIRA, J.C.; LEITE, E.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P. 2015. 3D gravity modeling of impact structures in basaltic formations in Brazil: part 1–Vargeão Dome, Santa Catarina. *Brazilian Journal of Geophysics*, 33: 319–332. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v33i2.723>
- FERREIRA, J.C.; LEITE, E.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P. 2019. 3D gravity modeling of impact structures in basaltic formations in Brazil: Part II – Vista Alegre, Paraná. *Brazilian Journal of Geophysics*, 37: 1-13. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v37i1.980>
- FRENCH, B.M. 1998. *Traces of catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. Lunar and Planetary Institute, Houston, LPI Contribution 954, 120 p. www.lpi.usra.edu/publications/books/CB-954/CB-954.pdf
- FRENCH, B.M.; KOEBERL, C. 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures What works, what doesn't, and why. *Earth-Sciences Review*, 98: 123–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>
- GARCIA, D.D.; LEITE, E.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; CHRISTOU, E.; CRÓSTA, A.P. 2024. Distribution of gamma-ray elements in Cerro do Jarau impact structure and a proposal of geothermal modeling. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 96(1): e20230005. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420230005>

- GIACOMINI, B.B.; LEITE, E.P.; CRÓSTA, A.P. 2017. 3D gravimetric investigation of the Cerrodo Jarau structure, Rio Grande do Sul, Brazil. *Meteoritics and Planetary Science*, 52: 565–583. <https://doi.org/10.1111/maps.12813>
- GLASS, B.P.; SIMONSON, B.M. 2013. *Distal Ejecta Layers: A Record of Large Impacts in Sedimentary Deposits*. Springer, Heidelberg, 716 p.
- GOTTWALD, M.; KENKMANN, T.; REIMOLD, W.U. 2020. *Terrestrial Impact Structures, The TanDEM-X Atlas*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich, 608 p.
- GREHS, S.A. 1969. Aspectos geológicos e geomorfológicos do Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul, Brasil. In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23, Salvador. *Anais*, 1:365–375.
- HAUSER, N.; REIMOLD, W.U.; VOLL, K.; CHAVES, J.G.S.; ALVES DE MATTOS, B.; DANTAS, E.L. 2017. Are the impact melt rocks from the Araguinha impact structure, Brazil, homogeneous? Evidence from geochemistry and Sr-Nd isotopes. In: ANNUAL MEETING OF THE METEORITICAL SOCIETY, 80, Santa Fe, *Abstract #6215*.
- HIPPERTT, J.P.; LANA, C.; WEINBERG, R.F.; TOHVER, E.; SCHMIEDER, M.; SCHOLZ, R.; GONÇALVES, L.; HIPPERTT, J.F. 2014. Liquefaction of sedimentary rocks during impact crater development. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.045>
- HOCKEY, T. 1994. The Shoemaker-Levy 9 spots on Jupiter: their place in history. *Earth Moon Planets*, 66: 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF00612878>
- HÖRZ, F. 1968. Statistical Measurements of Deformation Structures and Refractive Indices in Experimentally Shock Loaded Quartz. In: B.M. French, N.M. Short (Eds.) *Shock Metamorphism of Natural Materials*. Baltimore, Maryland, Mono Book Corporation, p 243–53.
- IUGS 2022 *The First 100 IUGS Geological Heritage Sites*. IUGS International Geosciences Program, IGCP 731, Zumaia, Espanha, 291 p. https://iugs-geoheritage.org/videos-pdfs/iugs_first_100_book_v2.pdf
- JANASI, V.A.; FREITAS, V.A.; HEAMAN, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, northern Paraná Basin, Brazil: a precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, 302: 147–153. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2011E&PSL.302..147J/doi:10.1016/j.epsl.2010.12.005
- KAZZUO-VIEIRA, C.; CRÓSTA, A.P.; GAMBOA, F.; TYGEL, M. 2009. Caracterização geofísica da estrutura de impacto do Domo de Vargeão, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27: 375–388. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2009000300006>
- KENKMANN, T. 2021. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteoritics & Planetary Science*, 56: 1024–70. <https://doi.org/10.1111/maps.13657>
- KENKMANN, T.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U. 2011. The complex impact structure Serra da Cangalha, Tocantins State, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 46: 875–889. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01199.x>
- KOLLERT, R.; BJÖRNBERG, A.; DAVINO, A. 1961. Estudos preliminares de uma depressão circular na região de Colônia, Santo Amaro, São Paulo. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 10: 57–77. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.1998310>
- KRING, D.A. 2017. *Guidebook to the Geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona*. Lunar and Planetary Institute, 2nd Edition, *LPI Contribution n° 2040*, 272 p. https://www.lpi.usra.edu/publications/books/barringer_crater_guidebook/crater_guidebook.pdf
- LANA, C.; ROMANO, R.; REIMOLD, W.U.; HIPPERTT, J.P. 2006. Collapse of large complex impact structures: implications from the Araguinha impact structure. *Geology*, 34: 9–912. <https://doi.org/10.1130/G21952.1>

- LANA, C.; SOUZA-FILHO, C.R.; MARANGONI, Y.R.; YOKOYAMA, E.; TRINDADE, R.I.F.; TOHVER, E.; REIMOLD, W.U. 2007. Insights into the morphology, geometry, and post-impact erosion of the Araguinha peak-ring structure central Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 119: 1135–1150. <https://doi.org/10.1130/B26142.1>
- LANA, C.; SOUZA-FILHO, C.R.; MARANGONI, Y.R.; YOKOYAMA, E.; TRINDADE, R.I.F.; TOHVER, E.; REIMOLD, W.U. 2008. Structural evolution of the 40 km wide Araguinha impact structure, central Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 43: 701–716. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00679.x>
- LEDRU M.-P.; REIMOLD W. U.; ARIZTEGUI D.; BARD E.; CRÓSTA A. P.; RICCOMINI C.; SAWAKUCHI A. O. 2015. Why deep drilling in the Colônia Basin (Brazil)? *Scientific Drilling*, 20 :33–39. <https://doi.org/10.5194/sd-20-33-2015>
- LEITE, E.P.; LAMBERT, J.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; BATEZELLI, A. 2022. Gamma-ray spectrometry of the Araguinha impact structure, Brazil: Additional insights into element mobilization due to hydrothermal alteration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(3): e20210182. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210182>
- LISBOA, N.A.; SCHUCK, M.T.G.O.; TRAMONTINA H.C. 1987. Reconhecimento geológico da região do Jarau, Quaraí-RS. In: SBG, SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, *Anais*, 1:319–332.
- MARQUES, R.P.; KASSAB, F.JR.; MOLINA, E.C.; ANDRADE, F.A.R. 2006. *Levantamentos aerogeofísicos para a identificação de áreas com ocorrência potencial de petróleo e gás na Bacia do Parnaíba—Tomo II, área Parnaíba -Aerolevantamento magnético e gamaespectrométrico*. Report Convênio ANP-USP, São Paulo, 109 p.
- MARTELL, J.; ALWMARK, C.; WORACEK, R.; ALWMARK, S.; HALL, S.; FERRIÈRE, L.; DALY, L.; BENDER KOCH, C.; HEKTOR, J.; JOHANSSON, S.; HELFEN, L.; TENGATTINI, A.; MANNES, D. 2024. Combined neutron and x-ray tomography—A versatile and nondestructive tool in planetary geosciences. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129: e2023JE008222. <https://doi.org/10.1029/2023JE008222>
- MARTINS, J.A.; CASTELO BRANCO, R.M.G.; CASTRO, N.A.; PEULVAST, J.-P.; LIMA JR., S.B. 2016. Morphological analysis of the São Miguel do Tapuio circular structure, Piauí, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17: 763–781. <https://www.researchgate.net/publication/312044955>
- MASERO, W.; SCHENEGG, P.A.; FONTES, S.L. 1994. A magnetotelluric investigation of the Araguinha impact structure in Mato Grosso-Goiás, central Brazil. *Geophysical Journal International*, 116: 366–376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1994.tb01803.x>
- MASTER, S.; HEYMANN, J. 2000. A possible new impact structure near Gilbués in Piauí Province, Northeastern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 35: 5.
- MAZIVIERO, M.V.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; GÓES, A.M.; REIMOLD, W.U.; CARNEIRO, C.C. 2013. Geology and impact features of Riachão structure northern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 48: 2044–2058. <https://doi.org/10.1111/maps.12213>
- MCHONE JR., J.F. 1979. Riachão Ring, Brazil: a possible meteorite crater discovered by the Apollo astronauts. *Apollo-Soyuz Test Project Summary Science Report*, 412: 193–202.
- MCHONE JR., J.F. 1986. *Terrestrial Impact Structures: Their Detection and Verification with Two New Examples from Brasil*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA, Ph.D. Thesis, 210 p.
- MCSWEEN, H.Y.; MOERSCH, J.E.; BURR, D.M.; DUNNE, W.M.; EMERY, J.P.; KAH, L.C.; MCCANTA, M.C. 2019. *Planetary Geoscience*. Cambridge University Press, Cambridge, 332 p.
- MELOSH, H.J. 1989. *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press, New York, 245 p.

- MELOSH, H.J. 2011. *Planetary Surface Processes*. Cambridge Planetary Sciences n° 13, Cambridge University Press, New York, 534 p.
- MENEZES, J.R.C.; VASCONCELOS, C.S.; RODRIGUES, L.F.; RODRIGUES, J.J.G. 2012. A estrutura de impacto Ilha do Mel: Um novo astroblema em sismica 3D na Bacia de Santos. *In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 46, Santos, *Resumos*.
- MERLE, R.; MARZOLI, A.; BERTRAND, H.; REISBERG, L.; VERATI, C.; ZIMMERMANN, C.; CHIARADIA, M.; BELLINI, G.; ERNESTO, M. 2011. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Sr–Nd–Pb–Os geochemistry of CAMP tholeiites from Western Maranhão basin (NE Brazil). *Lithos*, 122: 137–51. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.12.010>
- MIYAZAKI, M.R.; LEITE, E.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; WÜNNEMANN, K.; CRÓSTA, A.P. 2021. Bouguer anomaly inversion and hydrocode modeling of the central uplift of the Araguinha impact structure. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(Suppl. 4): e20210081. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120210081>
- NÉDÉLEC, A.; PAQUETTE, J.-L.; YOKOYAMA, E.; TRINDADE, R.I.F.; AIGOUY, T.; BARATOUX, D. 2013. In situ U/Pb dating of impact-produced zircons from the Vargeão Dome (Southern Brazil). *Meteoritics & Planetary Science*, 48: 420–431. <https://doi.org/10.1111/maps.12066>
- NORTHFLEET, A.A.; MEDEIROS, R.A.; MUHLMANN, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 12: 291–346.
- OLIVEIRA, G.J.G.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U.; GÓES, A.M.; KOWITZ, A. 2014. Shatter cones and planar deformation features confirm Santa Marta in Piauí State Brazil, as an impact structure. *Meteoritics & Planetary Science*, 49: 1915–1928. <https://doi.org/10.1111/maps.12368>
- OLIVEIRA, G.J.G.; CHAMANI, M.A.C.; GÓES, A.M.; CRÓSTA, A.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; REIMOLD, W.U. 2017. Geological investigation of the central portion of the Santa Marta impact structure, Piauí State, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 47: 673–692. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160095>
- OSINSKI, G.R.; PIERAZZO, E. 2013. *Impact Cratering: Processes and Products*. Wiley-Blackwell, Chichester, 316 p.
- PAIVAFILHO, A.; ANDRADE, C.A.V.; SCHEIBE, L.F. 1978. Uma janela estratigráfica no oeste de Santa Catarina: o Domo de Vargeão. *In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 30, Recife, *Anais*, p. 408–412.
- PEREIRA, F.L.; CRÓSTA, A.P.; VASCONCELOS, M.A.R. 2022. Geophysical Studies of Nova Colinas, Brazil's newest impact structure. *In: ANNUAL MEETING OF THE METEORITICAL SOCIETY*, 85, Glasgow, *LPI Contribution n° 2695*.
- PRADO, R.L.; ESPIN-FENOLL, I.C.; ULLAH, I.; MIURA, G.C.M.; CRÓSTA, A.P.; SANTOS, R.P.Z.; REIMOLD, W.U.; ELIS, V.R.; IMBERNON, E.; RICCOMINI, C.; DIOGO, L.A. 2019. Geophysical investigation of the Colônia structure, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 54: 2357–2372. <https://doi.org/10.1111/maps.13292>
- REIMOLD, W.U.; JOURDAN, F. 2012. Impact! Bolides, craters and catastrophes. *Elements*, 8: 19–24. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.1.19>
- REIMOLD, W.U.; FERRIÈRE, L.; DEUTSCH, A.; KOEBERL, C. 2014. Impact controversies: Impact recognition criteria and related issues. *Meteoritics & Planetary Science*, 49: 723–731. <https://doi.org/10.1111/maps.12284>
- REIMOLD, W.U.; CRÓSTA, A.P.; HASCH, M.; KOWITZ, A.; HAUSER, N.; SANCHEZ, J.P.; SIMÕES, L.S.A.; OLIVEIRA, G.J.; ZAAG, P.T. 2019. Shock deformation confirms the impact origin for the Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul, Brazil, structure. *Meteoritics & Planetary Science*, 54: 2384–2397. <https://doi.org/10.1111/maps.13233>
- REIMOLD, W.U.; FERRIÈRE, L.; CRÓSTA, A.P.; VASCONCELOS, M.A.R.; GOTTWALD,

- M.; BORGES, M.S.; ALMEIDA, T.I.R.; PEREIRA, F.L.; GÓES, A.M.; HAUSER, N.; JESSELL, M.; BARATOUX, D. 2022. Nova Colinas, Maranhão State: A newly confirmed, complex impact structure in Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 57: 1519–1541. <https://doi.org/10.1111/maps.13833>
- RICCOMINI, C.; TURCQ, B.; MARTIN, L.; MOREIRA, M.Z.; LORSCHTEITZ, M. 1991. The Colônia astrobleme, Brasil. *Revista do Instituto Geológico*, 12: 87–94. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.19910007>
- RICCOMINI, C.; TURCQ, B.J.; LEDRU, M.-P.; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, J.A. 2005. Cratera de Colônia, SP: Provável astroblema com registros do paleoclima quaternário na Grande São Paulo. In: M. Winge, C. Schobbenhaus, M. Berbert-Born, E.T. Queiroz, D.A. Campos, C.R.G. Souza (Eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, vol. 2, Brasília, CPRM/SIGEP, p. 35–44.
- RICCOMINI, C.; CRÓSTA, A.P.; PRADO, R.L.; LEDRU, M.-P.; TURCQ B.J.; SANTANNA L.G., FERRARI J.A.; REIMOLD W.U. 2011. The Colônia structure, São Paulo, Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 46: 1630–1639. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01252.x>
- RIVKIN, A.S.; CHENG, A.F. 2023. Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects. *Nature Communications*, 14: 1003. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35561-2>
- SANCHEZ, J.P.; BRILHA, J.B.R. 2017. Terrestrial impact structures as geoheritage: An assessment method of their scientific value and its application to Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89: 825–834. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160081>
- SANCHEZ, J.P., SIMÕES, L.S.A., MARTINS, L.E.B. 2014. Estratigrafia e estrutura do Cerro do Jarau: nova proposta. *Brazilian Journal of Geology*, 44: 265–276. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400020007>
- SCHMIDT, N. 2019. *Planetary Defense: Global Collaboration for Defending Earth from Asteroids and Comets*. Springer Nature, Switzerland, 475 p.
- SCHNEGG, P.A.; FONTES, S.L. 2002. Feasibility study of the geoelectric structure of the Araguinha impact, Brazil. *Earth, Planets and Space*, 54: 597–606. <https://doi.org/10.1186/BF03353048>
- SCHULTE, P.; ALEGRET, L.; ARENILLAS, I.; ARZ, J.A.; BARTON, P.J.; BOWN, P.R.; BRALOWER, T.J.; *et al.* 2010. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327: 1214–1218. <https://doi.org/10.1126/science.1177265>
- SILVA, A.B. 2020. Identification of Impact Cratering-Related Similarities Based on Airborne geophysical Data and Satellite Images: The Cabeça de Sapo Structure, Parnaíba Basin, Northeast Brasil. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 3: 97–111. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2020.v3.n2.4>
- SILVEIRA FILHO, N.C.; RIBEIRO, C.L. 1971. *Informações geológicas preliminares sobre a estrutura vulcânica de Araguinha, Mato Grosso*. Departamento Nacional de Pesquisas Minerais, Brasília, 50 p. (Relatório interno).
- STURM, S.; GERWIN, W.; DIETMAR, J.; KENKMANN, T. 2013. The Ries impact, a double-layer rampart crater on Earth. *Geology*, 41: 531–534. <https://doi.org/10.1130/G33934.1>
- THEILEN-WILLIGE, B. 1981. The Araguinha impact structure, Central Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 11: 91–97. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.19819197>
- THIEDE, D.S.; VASCONCELOS, P.M. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar results. *Geology*, 38: 747–750. <https://doi.org/10.1130/G30919.1>
- THOMÉ-FILHO, J.J.; CRÓSTA, A.P.; DE PAULA, T.L.F. 2012. Astroblema de Araguinha-Ponte Branca (GO/MT). In: C. Schobbenhaus, C.R. Silva (Eds.) *Geoparques do Brasil: Propostas*. CPRM/Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, p. 151–182.

- TOHVER, E.; LANA, C.; CAWOOD, P.A.; FLETCHER, I.R.; JORDAN, F.; JOURDAN, F.; SHERLOCK, S.; RASMUSSEN, B.; TRINIDADE, R.I.F.; YOKOYAMA, E.; SOUZA FILHO, C.R.; MARANGONI, Y. 2012. Geochronological constraints on the age of a Permo–Triassic impact event: U–Pb and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ results for the 40 km Araguainha structure of central Brazil. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 86: 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.03.005>
- TORQUATO, J.R.F. 1981. O astroblema de São Miguel do Tapuio (PI). *Ciências da Terra*, 1: 37.
- VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; MOLINA, E.C. 2010. Geophysical characteristics of four possible impact structures in the Paraíba Basin, Brazil. In: R.L. Gibsonw, W.U. Reimold (Eds.) *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV*. Geological Society of America, Special Paper 465, p. 201–217
- VASCONCELOS, M.A.R.; LEITE, E.P.; CRÓSTA, A.P. 2012a. Contributions of gamma-ray spectrometry to terrestrial impact crater studies: the example of Serra da Cangalha, northeastern Brazil. *Geophysical Research Letters*, 39: pL04306. <https://doi.org/10.1029/2011GL050525>
- VASCONCELOS, M.A.R.; WÜNNEMANN, K.; CRÓSTA, A.P.; MOLINA, E.C.; REIMOLD, W.U.; YOKOYAMA, E. 2012b. Insights into the morphology of the Serra da Cangalha impact structure from geophysical modeling. *Meteoritics & Planetary Science*, 47: 1659–1670. <https://doi.org/10.1111/maps.12001>
- VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; REIMOLD, W.U.; GOES, A.M.; KENKMANN, T.; POELCHAU, M.H. 2013. The Serra da Cangalha impact structure, Brazil: Geological, stratigraphic and petrographic aspects of a recently confirmed impact structure. *Journal of South American Earth Sciences*, 45: 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.03.007>
- VASCONCELOS, M.A.R.; ROCHA, F.F.; CRÓSTA, A.P.; WUNNEMANN, K.; GULDEMEISTER, N.; LEITE, E.P.; FERREIRA, J.C.; REIMOLD, W.U. 2019. Insights about the formation of a complex impact structure formed in basalt from numerical modeling: The Vista Alegre structure, southern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 54: 2373–2383. <https://doi.org/10.1111/maps.13298>
- VELÁZQUEZ, V.F.; RICCOMINI, C.; AZEVEDO SOBRINHO, J.M.; PLETSCHE, M.A.J.S.; SALLUN, A.E.M.; SALLUN FILHO, W.; HACHIRO, J. 2013. Evidence of shock metamorphism effects in allochthonous breccia deposits from the Colônia Crater, São Paulo, Brazil. *International Journal of Geosciences*, 4: 274–282. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.41A025>
- VELÁZQUEZ, V.F.; LUCENA, R.F.; AZEVEDO SOBRINHO, J.M.; SALLUN, A.E.M.; SALLUN FILHO, W. 2018. Petrographic investigation of target rock transformation under high shock pressures from the Colônia impact crater, Brazil. *Earth Science Research*, 7: 13–24. <https://doi.org/10.5539/esr.v7n1p13>
- VELÁZQUEZ, V.F.; GOMES, C.B.; MANSUETO, M.; MORAES, L.A.S.; AZEVEDO SOBRINHO, J.M.; LUCENA, R.F.; SALLUN, A.E.M.; SALLUN FILHO, W. 2021. Morphological aspects, textural features and chemical composition of spherules from the Colônia impact crater, São Paulo, Brazil. *Solid Earth Sciences*, 6: 27e36. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2020.12.004>
- VON ENGELHARDT, W.; MATTHÄI, S.K.; WALZEBUCK, J. 1992. Araguainha impact crater, Brazil. 1. The interior part of the uplift. *Meteoritics*, 27: 442–457. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1992.tb00226.x>
- YOKOYAMA, E.; TRINIDADE, R.I.F.; LANA, C.; SOUZA FILHO, C.R.; BARATOUX, D.; MARANGONI, Y.R.; TOHVER, E. 2012. Magnetic fabric of Araguainha complex impact structure (Central Brazil): Implications for deformation mechanisms and central uplift formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 331: 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.01.005>

Endereço do autor:

Alvaro P. Crósta* ( 0000-0003-0485-1147) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, R. Carlos Gomes, 250, Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP 13083-855, Campinas, SP, Brasil. *E-mail:* crosta@unicamp.br

*Autor correspondente

Artigo submetido em 2 de abril de 2024, aceito em 23 de maio de 2024.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.