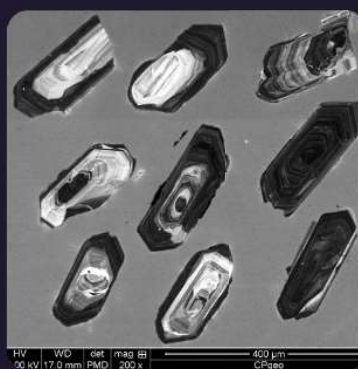


SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA

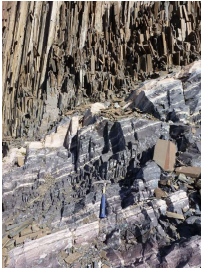
ANDRÉA RITTER JELINEK
CARLOS AUGUSTO SOMMER



IMAGENS DE CAPA E CONTRACAPA



Fotografia aérea do setor norte da Serra do Segredo, em Caçapava do Sul, RS, onde se destacam a Pedra do Segredo, em primeiro plano, e a Pedra da Abelha, logo à esquerda, geofórmulas esculpidas sobre conglomerados fluviais da Bacia do Camaquã. Ao fundo, alguns cerros formados por rochas metamórficas e o imponente alto de Caçapava, sobre granitoides diversos, rochas que registram diferentes momentos do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil. A paisagem faz parte do Geoparque Caçapava Aspirante Unesco e é parcialmente inserida no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. Imagem obtida por Felipe Guadagnin. Legenda de André Weissheimer de Borba e Felipe Guadagnin.



Contato entre rochas sedimentares da Bacia do Paraná e soleira de diabásio do Grupo Serra Geral. Pedreira Carollo, região de Montenegro, RS. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.

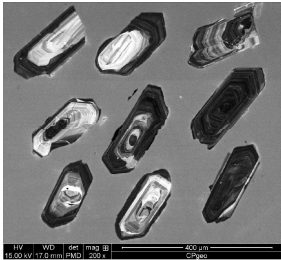


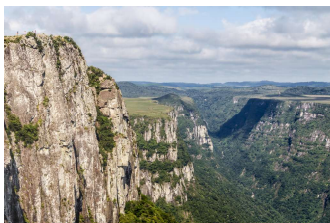
Imagem de catodoluminescência de cristais de zircão pertencentes ao Batólito de Florianópolis. Aumento de 200 vezes. Imagem e legenda de Andréa Ritter Jelinek.



Fotografia aérea oblíqua apresentando a morfologia da região correspondente ao extremo do Litoral Norte do RS, à direita observa-se a cidade de Torres/RS. Em primeiro plano observa-se a morfologia do campo de dunas localizado no Parque Estadual de Itapeva. Unidade essa localizada sobre o sistema Laguna-Barreira IV (holocênico). Logo após o baixio, na retaguarda do campo de dunas, ocorre a morfologia do sistema Laguna-Barreira III (pleistocênico). Ao fundo, com o relevo mais elevado, encontra-se a Formação Serra Geral pertencente à Bacia do Paraná. Imagem obtida por Eduardo H. R. Russo. Legenda de Eduardo Guimarães Barboza.



Minas do Camaquã, Mineração de cobre a céu aberto, Caçapava do Sul. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.



Derrames ácidos do Grupo Serra Geral, Bacia do Paraná, na região do Cânion Fortaleza, Parque Nacional da Serra Geral, Cambará do Sul, RS. Imagem licenciada de Depositphotos. Legenda de Carlos Augusto Sommer.



PUBLICAÇÃO ESPECIAL DO NÚCLEO RS/SC DA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

**CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA
DO RIO GRANDE DO SUL E
DE SANTA CATARINA**

Editores

Andréa Ritter Jelinek
Carlos Augusto Sommer



Porto Alegre, RS, 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra, sem autorização expressa dos autores ou da editora. A violação importará nas providências judiciais previstas no artigo 102, da Lei nº 9.610/1998, sem prejuízo da responsabilidade criminal. Os textos deste livro são de responsabilidade de seus autores.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

Edição: 1ª

Ano: 2021

Editora Compasso Lugar Cultura

Responsável André Suertegaray Rossato

Porto Alegre - RS - Brasil

Telefones (51) 984269928

compassolugarcultura@gmail.com

www.compassolugarcultura.com

Editores:

Andréa Ritter Jelinek

Carlos Augusto Sommer

Diagramador: Gabriel Zambom

Revisão de Texto: Gustavo Saldivar

Conselho Editorial Compasso Lugar Cultura

Álvaro Heidrich

Carlos Henrique Aigner

Cláudia Luíza Zeferino Pires

Dakir Larara Machado da Silva

Dilermando Cattaneo da Silveira

Dirce Maria Antunes Suertegaray

Helena Copetti Callai

Jaeme Luiz Callai

João Osvaldo Rodrigues Nunes

Laurindo Antonio Guasselli

Maíra Suertegaray Rossato

Nelson Rego

Roberto Verdum

Rosa Maria Vieira Medeiros

Sinthia Batista

Realização

Sociedade Brasileira de Geologia

Diretoria Núcleo RS/SC:

Diretora Presidente: Andréa Ritter Jelinek

Diretor Vice-Presidente: Carlos Augusto Sommer

Diretor Secretário: Lucas Debatin Vieira

Diretor Financeiro: Breno Leitão Weichel

Diretora de Programação Técnico-Científica: Rosemary Hoff

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

J47c

Jelinek, Andréa Ritter.

Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina /Andréa Ritter Jelinek e Carlos Augusto Sommer, organização – Sociedade Brasileira de Geologia - Porto Alegre : Compasso Lugar-Cultura, 2021.

504 p., il. col.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

<https://doi.org/10.29327/537860>

1. Geologia 2.Sociedade Brasileira de Geologia 3. Coletâneas de textos I. Jelinek, Andréa Ritter II. Sommer, Carlos Augusto III. Título

CDD 551

CDU 551.1/.4

Bibliotecária Responsável: Catarina Strapação Guedes Vianna CRB-10/2469

Índices para catálogo sistemático:

1. Geologia 551

As Crateras de Impacto Cerro do Jarau (RS) e Domo do Vargeão (SC), Brasil

Ruy Paulo **Philipp**^{1*}, Carlos Augusto **Sommer**¹, Jairo Francisco **Savian**¹,
Elder **Yokoyama**², Matheus Philipe **Brückmann**³

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

²Instituto de Geociências, Universidade de Brasília

³Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

* autor correspondente: ruy.philipp@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

As evidências da existência de meteoros e de outros corpos celestes são muito antigas e estão registradas nas mitologias das antigas civilizações. Em tempos modernos, observamos o impacto de corpos celestes na superfície da Lua e em outros planetas, como Marte, Mercúrio e Júpiter, por exemplo. Também são frequentes as imagens da passagem e os fragmentos físicos de meteoritos, que caíram na superfície da Terra, os quais estão conservados em museus, em universidades e em centros de pesquisa. O impacto de meteoritos transfere elevadas taxas de pressão para uma área muito restrita, que absorve o impacto, através da propagação de ondas de choque entre as rochas. O impacto resulta em uma estrutura deprimida, de forma circular e/ou elíptica, que, por vezes, apresenta soerguimento central. Essa estrutura é acompanhada pela formação de rochas metamórficas características, como brechas de impacto e de fusão, além de estruturas, como cones de estilhaçamento (*shatter cones*), e de feições microscópicas, de deformação planar, que marcam a ruptura da estrutura cristalina dos minerais das rochas impactadas, como *Planar Fractures* (PF), *Planar Deformational Features* (PDF) e *Feather Features* (FF). Estas feições são diagnósticas do metamorfismo de impacto (*schock metamorphism*) (French, 1998; French & Koeberl, 2010; Poelchau & Kenkmann, 2011).

Na superfície da Terra, a preservação das crateras de impacto é limitada, em função da dinâmica interna do planeta e do desgaste dos processos intempéricos na superfície. As estruturas de impacto mais preservadas foram geradas durante o Fanerozoico (<540 Ma), e constituem a sua maioria. Entretanto, em ambientes desérticos e em áreas de grande estabilidade tectônica, como nos crátons, estão preservadas crateras de idades Pré-Cambrianas, como Vredefort (África do Sul, 160 km, 2.02 Ga), Shoemaker (Austrália, 30 km, 1.63 Ga) e Sudbury (Canadá,

dá, 130 km, 1.85 Ga); esta última, associada a um complexo ígneo estratiforme, cuja origem dos magmas é atribuída ao choque do impacto (*e.g.* Baratoux & Reimold, 2016; Schmieder & Kring, 2020).

A cratera Chicxulub, com cerca de 180 km de diâmetro, situada na Península do Iucatã, no sudeste do México, é uma das maiores estruturas de impacto soterradas da Terra. Ocorrido no limite entre o Cretáceo e o Paleógeno (66 milhões anos atrás), este impacto é interpretado como um dos principais fatores envolvidos em um processo de extinção em massa da fauna e da flora, que incluiu os dinossauros (Schulte *et al.*, 2010). Anteriormente, visto como um fenômeno restrito e pouco identificado, o reconhecimento do impacto de meteoritos aumentou com o acesso a imagens de satélite. Os olhares do mundo observaram o cruzamento de cometas e de nuvens de meteoros (Ex. Liríadas, Eta-Aquaridas, Geminídeos, entre outras), e a coleta de amostras de meteoritos resultou em um grande banco de dados mineralógico, geoquímico, geocronológico e isotópico (Norton & Chitwood, 2008). A promoção de simpósios, de congressos e de outras atividades, relacionadas à geologia de impacto, proporcionou o envolvimento de pesquisadores de outras linhas tradicionais (Geologia Estrutural, Mineralogia, Petrologia, Geofísica), que, de modo inesperado, tiveram que enfrentar os efeitos do metamorfismo de impacto no curso de suas investigações. As demandas geológicas mais recentes têm identificado novos desafios, como caracterizar e determinar os efeitos de impactos preservados na superfície da Terra, bem como aplicar estes conhecimentos em problemas geológicos significantes, como a prospecção de minerais metálicos e de água subterrânea, no turismo científico e nas atividades de preservação do patrimônio.

A feição mais característica das crateras de impacto é a sua forma circular ou

elíptica, observada em antigas imagens de radar, em fotografias aéreas e em mapas topográficos. A partir do ano 2000, os dados coletados pela Missão Topográfica de Radar Embarcado (*Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)), permitiram a obtenção de modelos digitais de alta resolução de terrenos. As imagens de diversos satélites (LANDSAT, ASTER) e as imagens do *Google* permitiram o rápido acesso às formas da superfície da Terra. Entretanto, uma feição circular em uma imagem pode representar outros fenômenos geológicos, como caldeiras vulcânicas, diques anelares e radiais, complexos alcalinos e/ou feições de erosão diferencial em rochas sedimentares e vulcânicas. Desta forma, os dados de campo são fundamentais, para uma avaliação definitiva (French, 1998; French & Koeberl, 2010). O impacto de meteoritos ocasiona a formação de brechas de impacto, de fusão e de injeção nas porções mais superficiais e, em zonas mais profundas, as rochas impactadas mostram estruturas do tipo cones de estilhaçamento e microestruturas de deformação planar, principalmente, em tectossilicatos. As brechas têm estrutura maciça e se caracterizam por clastos (fragmentos) angulosos das rochas impactadas e por porções irregulares de vidro vulcânico, envoltas por uma matriz fina, contendo fragmentos de minerais. Nas rochas impactadas, os cones de estilhaçamento se caracterizam por feições de forma cônica ou de leque, com dimensões entre 10 cm e 35 cm, constituídas por um conjunto de fraturas curvas, que formam estrias divergentes, que se irradiam a partir de um de um ponto apical (Sagy *et al.*, 2004; French & Koeberl, 2010; Baratoux & Reimold, 2016). Ao microscópio, as rochas impactadas conservam suas estruturas e minerais originais e registram o choque, formando microestruturas denominadas feições de deformação planar (PF, PDF e FF), que afetam a rede cristalina do quartzo e dos feldspatos. Estas

feições resultam de deformações, associadas à passagem da onda de choque, e caracterizam estruturas diagnósticas de impacto de meteoritos (French & Koeberl, 2010; Poelchau & Kenkmann, 2011).

As principais estruturas de impacto registradas no Brasil, como Araguainha (MT-GO), Serra da Cangalha (TO), entre outras, mostram as feições descritas acima e comprovam a origem, relacionada ao impacto de meteoritos. A região sul do Brasil se destaca no cenário nacional pelas crateras de impacto de Vista Alegre (PR), de Vargeão (SC) e do Cerro do Jarau (RS). Estas últimas estruturas têm dimensões entre 10 km e 15 km e estão situadas na porção oeste dos estados do RS e de SC (Fig. 1). A idade máxima para o impacto é a idade de resfriamento das lavas básicas do Grupo Serra Geral (Formação Torres), de ~130 Ma. Tais estruturas apresentam porção central (núcleo) soerguida, expondo, em janelas estruturais, os arenitos eólicos sotopostos, pertencentes ao Grupo São Bento (formações Botucatu e Guará), de idade Juro-Cretácea. Este capítulo apresenta uma revisão das crateras do Cerro do Jarau e de Vargeão, com destaque para a divulgação de novos dados sobre a primeira estrutura de impacto.

Também foram registradas quedas de meteoritos no RS e em SC, com a descrição de meteoritos pétreos (Hermenegildo, Lavras do Sul, Mafra, Putinga, Santa Bárbara e Santa Vitória do Palmar) e metálicos (Blumenau, Caçapava do Sul, Cruz Alta, Nova Petrópolis, Porto Alegre, Santa Catharina e Soledade). No RS, um dos meteoritos mais bem preservados é o Putinga (Keil *et al.*, 1978), espécime pétreo de condrito do tipo-L, com 45 cm de diâmetro e com 300 kg de peso, coletado na cidade homônima, em 1937, e mantido no Instituto de Geociências, da UFRGS (Fig. 2).

2 ESTRUTURAS DE IMPACTO DA REGIÃO SUL

2.1 Cerro do Jarau

A estrutura do Cerro do Jarau é o remanescente erodido de uma cratera situada na porção sudeste da Bacia do Paraná (coordenadas 30°11'S/56°32'W), na Divisa entre Brasil e Uruguai (Fig. 1B). A cratera tem forma elíptica e possui cerca de 20 km de comprimento (E-W) e 16 km de largura (N-S). A porção central soerguida é composta por dois núcleos circulares, constituídos por rochas sedimentares do Jurássico Superior, envoltas por lavas básicas da Formação Torres, do Cretáceo Inferior (Fig. 2C). O núcleo principal se destaca, no relevo regional, por um conjunto de cristas, constituídas por arenitos eólicos, ricos em quartzo, da Formação Botucatu, com disposição arqueada e que caracterizam o seu limite externo (Figs. 2A e 2B). A porção central, e rebaixada, tem morfologia plana e está composta por arenitos arcoseanos alterados da Formação Guará (Fig. 2E). Os arenitos de ambas as formações apresentam composição rica em quartzo e ocorrência subordinada de feldspatos, caracterizando uma composição dominada por sublitarenitos, para as rochas da Fm. Guará, e por sublitarenitos a quartzoarenitos, para as rochas da Fm. Botucatu (Fig. 1G). A avaliação da proveniência detrítica, por análise petrográfica dos arenitos de ambas as formações, indicou composições derivadas do interior cratônico ou de reciclagem orogênica (Fig. 1H). O contato entre as rochas vulcânicas e os arenitos da Fm. Botucatu está encoberto, na maior parte da estrutura. Quando expostos, entretanto, os contatos são por falha e estão marcados, em campo, por zonas de intenso fraturamento. Na porção leste, o contato entre as lavas basálticas e as areias eólicas está caracterizado pela formação de peperitos, constituindo corpos com disposição sub-horizontal e com espessuras entre 30 cm e 2 metros (Philipp *et al.*, 2010).

Inicialmente, a estrutura foi interpretada como o resultado da intrusão de um cor-

po ígneo subvulcânico ou relacionada à evolução de estruturas tectônicas regionais. A interpretação como uma cratera de impacto foi suportada pelo reconhecimento de feições de deformação planares (PF e PDF) em grãos de quartzo e de feldspato (Hachiro *et al.*, 1995) e, mais tarde, por brechas de impacto, acompanhadas por estruturas do tipo *shatter cones* em arenitos e em basaltos impactados (Philipp *et al.*, 2010; Crósta *et al.*, 2010a). Levantamentos de gravimetria na estrutura constataram uma anomalia negativa no núcleo central, com um pequeno núcleo positivo, relacionado a fontes magmáticas de subsuperfície, envolto por anomalias positivas, que correspondem às cristas de arenitos eólicos, que marcam o limite externo do núcleo soerguido (Calbo, 2006). A análise estratigráfica detalhada e os dados termocronológicos de traços de fissão da apatita demonstraram que a estrutura experimentou dois períodos principais de erosão, após o evento de impacto, entre 100-80 Ma e 65-22 Ma (Oliveira *et al.*, 2016; Machado *et al.*, 2019). No entanto, enquanto a erosão foi suficiente para remover os depósitos (brechas), relacionados ao impacto, o piso da estrutura permaneceu bem preservado e exposto, com geometria concêntrica e fraturamento radial, típicos de uma grande cratera de impacto (Crósta *et al.*, 2010a; Philipp *et al.*, 2010). A evolução do conhecimento, as principais propostas estratigráficas e a caracterização das feições diagnósticas podem ser encontradas em Philipp *et al.* (2010), em Crósta *et al.* (2010a) e em Sánchez *et al.* (2014).

2. 1. 1 Aspectos morfológicos e estruturais

A estrutura do Cerro do Jarau tem forma elíptica, ressaltada, nas imagens de satélite, por uma rede de drenagens, com padrões radial e anelar complexos, dispo-

tos de modo centrípeto, na porção central, e centrífugo, na porção externa da estrutura (Fig. 2D). Os limites externos são definidos pelos arroios Garupá e Quaraí-Mirim, ao norte e ao sul, e pelo rio Quaraí, a oeste. O núcleo central foi soerguido e está composto por duas estruturas circulares, situadas lado a lado, com cerca de 4 quilômetros e de 7 quilômetros de diâmetro (Fig. 2F). A porção externa do núcleo principal constitui, em mapa, um círculo quase completo, e caracteriza, em campo, um relevo positivo, composto por cristas arqueadas de arenitos eólicos da Fm. Botucatu (Fig. 2C). A porção interna é plana e rebaixada e expõe os arenitos arco-seanos alterados da Fm. Guará. A estrutura menor, localizada a oeste, constitui uma colina pouco elevada, composta por arenitos da Fm. Botucatu. Ambas as estruturas centrais estão envoltas por uma área de relevo plano, constituída por derrames basálticos da Fm. Torres. O contato entre as unidades sedimentares está marcado por uma discordância angular preservada no setor sudoeste da estrutura. Em quase toda a extensão do núcleo, os contatos são por falha, com exposições alinhadas de lajeados rochosos, com intenso fraturamento (Fig. 3A). Os cortes de estrada e os lajeados situados na porção leste da estrutura, expõem a mistura entre lavas e areias eólicas, na forma de peperitos (Fig. 3D). A estreita coroa de “brechas vulcânicas” (Sánchez *et al.*, 2014), que envolve o núcleo soerguido, preserva o registro da superfície de interação entre as lavas e a areia (Fig. 2C).

Observações estruturais e de sensoriamento remoto mostram que as feições concêntricas estão distribuídas em três áreas, situadas a 4-5 km, a 6-8 km e a 10-12 km do centro da estrutura (Fig. 2F). As feições principais, situadas no núcleo, definem o contato entre as rochas sedimentares e as vulcânicas. A principal característica são as cristas de arenitos eólicos, que delimitam e

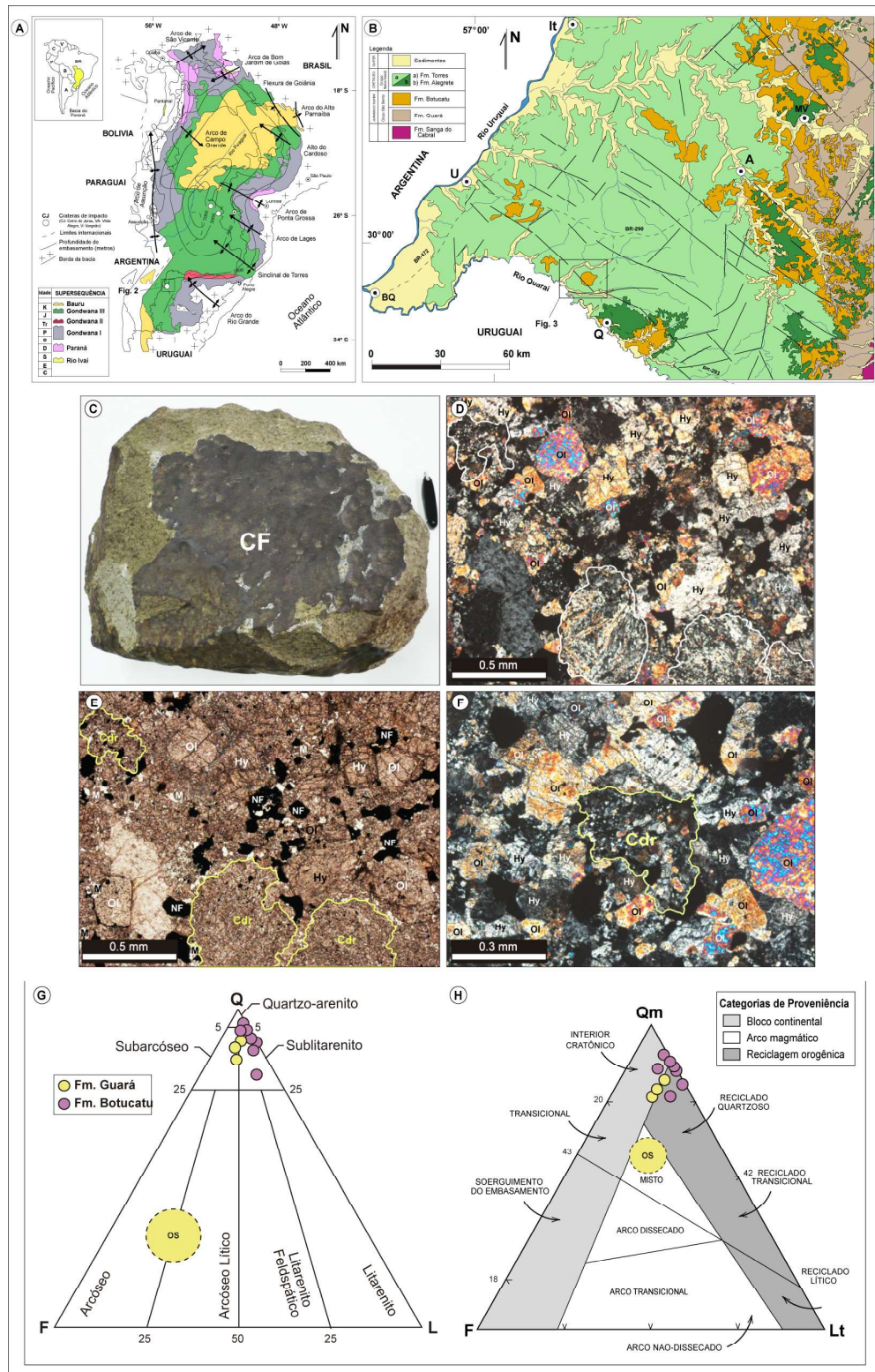


Figura 1 – A) Localização da Bacia do Paraná, na América do Sul, e mapa geológico, destacando as superseqüências deposicionais, as principais estruturas tectônicas e a localização das crateras de impacto da região sul do Brasil; B) Mapa geológico da região oeste do RS; C) Foto do Meteorito Putinga; D) Fotomicrografia, em nicóis descruzados, de uma seção delgada do meteorito, destacando os principais minerais e côndrulas (Cdr); E) Mesma imagem anterior, em nicóis cruzados; F) Detalhe da imagem anterior. Legenda: Hy - Hiperstênio, M - Maskelenita, NF - óxidos de ferro e níquel e Ol - Olivina; G) Diagrama de classificação dos arenitos das formações Guarani e Botucatu; e H) Diagrama de proveniência dos arenitos (OS = composição dos arenitos da Fm. Guarani de Osório, RS).

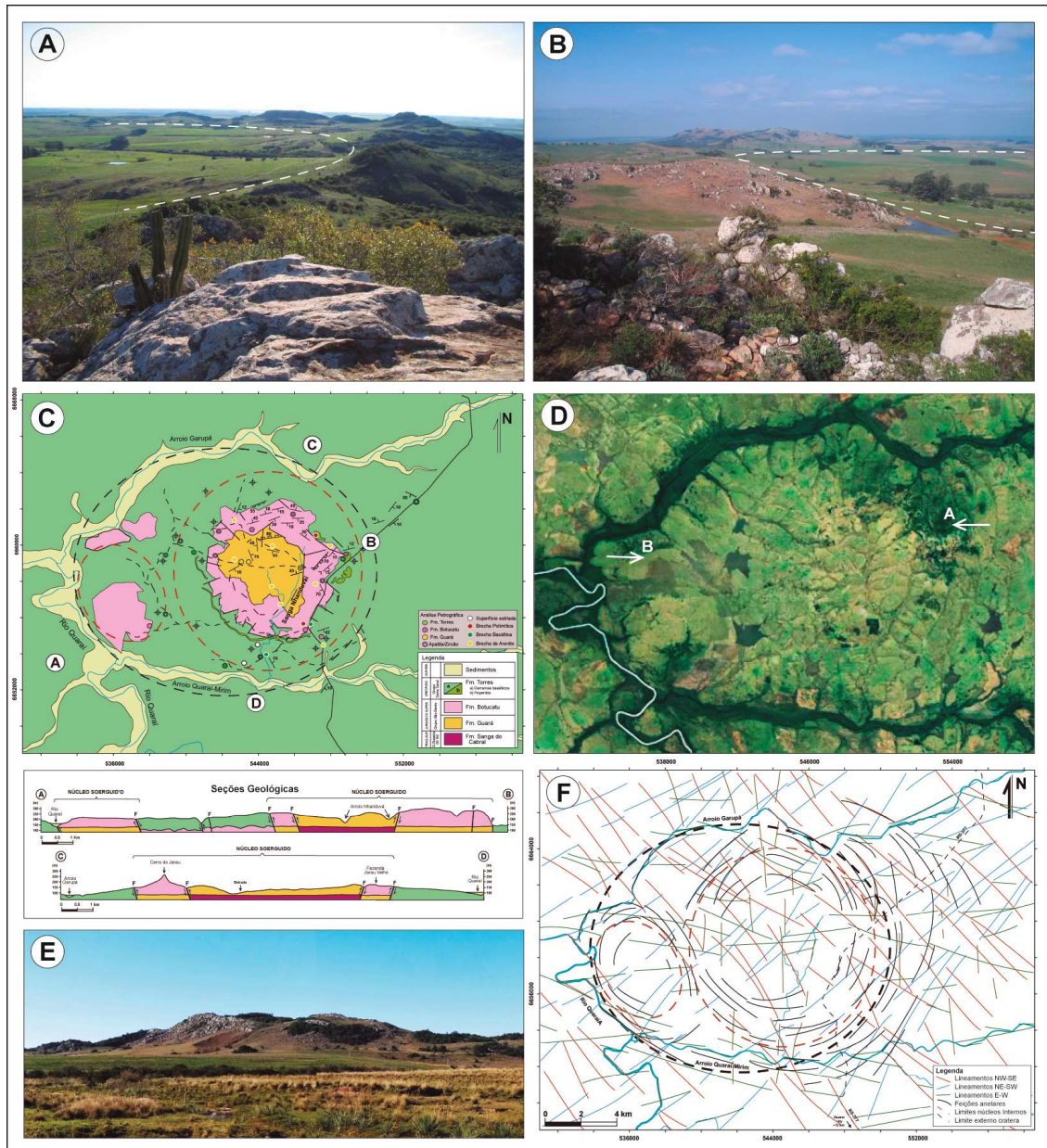


Figura 2 – A) Vista geral do Cerro do Jarau, constituída por uma crista arqueada de arenitos eólicos da Fm. Botucatu, que caracterizam o limite externo do núcleo principal da estrutura (vista para leste, seta A, Fig.2D); B) Mesma feição anterior, vista a partir do extremo oeste (seta B, Fig.2D); C) Mapa geológico do Cerro do Jarau, destacando a forma elíptica da estrutura de impacto (linha preta tracejada) e os dois núcleos internos (linha vermelha tracejada) (seções geológicas AB e CD, indicadas no mapa); D) Imagem de satélite do *Google* na mesma escala do mapa anterior; destacando o aspecto radial e anelar dos sistemas de drenagens; E) Vista do Cerro do Jarau, a partir do centro da estrutura; e F) Interpretação da imagem de satélite da Fig.2D, destacando os principais lineamentos tectônicos e as estruturas anelares geradas pelo impacto do meteorito,

que circundam o núcleo elevado, principalmente, em seu segmento norte (Fig. 3A). As feições concêntricas, situadas nas porções intermediárias e externas, estão registradas nos basaltos, que envolvem o núcleo, como longas fraturas, em forma de anel, com 2 km

a 6 km de comprimento. Os limites da cratera estão definidos por estruturas concêntricas, observadas nos basaltos da Fm. Torres, constituindo zonas de fraturas e sistemas de falhas, em forma de arco, separados por dezenas a centenas de metros. Não há consen-

so, quanto à localização da borda da estrutura, principalmente, pela ausência de uma feição de relevo. A maioria sugere um diâmetro em torno de 13,5 km (Crósta *et al.*, 2010a; Philipp *et al.*, 2010), porém os arranjos concêntricos observados nas imagens sugerem um limite de 20 km a 22 km. Os anéis interno e intermediário foram segmentados por falhas radiais (ou oblíquas) e não mostram evidências de deslocamento lateral. Os basaltos externos preservam uma estrutura de fluxo sub-horizontal (Fig. 3C).

A geometria do acamadamento das rochas sedimentares é complexa, com dificuldades impostas pela estratificação cruzada de grande porte e pela intensa rede de fraturas dos arenitos. Alguns autores relatam mergulho das camadas para fora da estrutura (Crósta *et al.*, 2010a), enquanto outros destacam uma disposição centrípeta (Sánchez *et al.*, 2014) ou, mesmo, uma indefinição, devido à natureza das estratificações (Philipp *et al.*, 2010). Os dados estruturais indicam um padrão centrípeta para o acamadamento dos arenitos da Fm. Guará no núcleo central (Crósta *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2014). A parte central da estrutura constitui um alto estrutural principal de 7 km de diâmetro, composto por um núcleo plano circular de 4-5 km de largura, de arenitos da Fm. Guará, envoltos na sua porção norte por um colar externo de cristas de arenitos eólicos da Fm. Botucatu, com cerca de 1-2 km de largura e 270 m de elevação (Philipp *et al.*, 2010; Crósta *et al.*, 2010a). Esta feição arqueada é afetada por falhas e por fraturas radiais, que segmentam as cristas e que controlam a instalação dos principais sistemas de drenagens. A área circundante é uma depressão rasa e plana, composta por fluxos de basalto da Fm. Torres. Uma segunda estrutura elíptica, com cerca de 5 km de diâmetro e delimitada por falhas anelares, ocorre a oeste do núcleo principal, expondo os arenitos da Fm. Botucatu.

O soerguimento do núcleo é o resultado da ascensão das rochas sedimentares que se encontravam sotopostas pela cobertura de basaltos da Fm. Torres, pelo alívio de carga, após o impacto e durante os estágios intermediários de constituição da cratera. Este soerguimento é acompanhado pela formação de sistemas de falhas radiais e anelares, que são feições estruturais muito proeminentes na porção central da cratera. A duas estruturas soerguidas do núcleo estão separadas por uma falha longa e contínua, de direção NW-SE, que se estende para além dos limites da cratera. Esta falha é seccionada pelas estruturas do impacto, sugerindo que o mesmo é posterior à formação desta estrutura tectônica. Apesar das feições lineares bem desenvolvidas, o reconhecimento das falhas em campo é raro, provavelmente, pelo intenso fraturamento, que afeta os arenitos, e pela ausência de camadas marcadoras. As falhas radiais estão dispostas em toda a estrutura, enquanto as falhas anelares se concentram no núcleo, no contato entre os arenitos e os basaltos. A continuidade das superfícies de falhas varia de poucos metros a centenas de metros, e os principais conjuntos de fraturas estão dispostos ortogonalmente às falhas radiais e são subparalelos às falhas anelares. As falhas radiais se destacam e mostram uma extensão restrita, com relação às falhas regionais, de direções NW-SE e NE-SW, geradas antes do impacto. Outra característica importante é o desenvolvimento de bandas de cisalhamento cataclásticas nas zonas de falhas.

A brechação dos arenitos impactados do núcleo forma diques de brechas de impacto monomíticas, de até um metro de espessura, além de veios de 1-5 mm de espessura (Fig. 3E). Os diques são raros e ocorrem, ao longo das principais falhas radiais. As brechas são constituídas por clastos de arenitos, com formas angulosas, de tamanho milimétrico a centimétrico, envoltas por uma

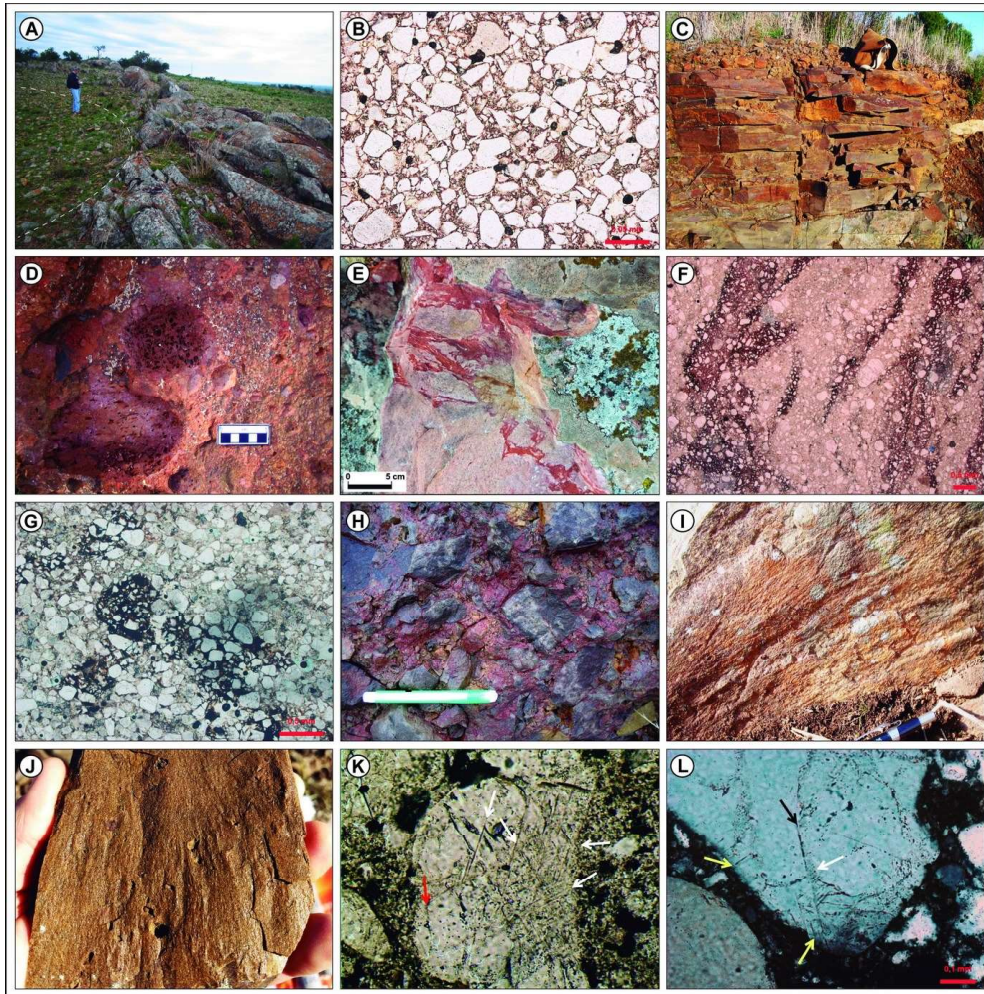


Figura 3 – A) Crista arqueada, expondo os arenitos da Fm. Botucatu na porção NW do núcleo; B) Fotomicrografia do quartzo arenito da Fig.3A; C) Basalto da Fm. Torres, com estrutura de fluxo subhorizontal; D) Peperito, constituído por fragmentos subarredondados de basaltos vesiculares/amigdaloidais, envoltos por matriz constituída por grãos de quartzo (areia fina a média); E) Brecha de impacto monomítica em forma de dique, constituída por fragmentos angulosos de arenitos arcoseanos, envoltos por material afanítico, de cor vermelha (vidro alterado) (Fm. Guará, na porção centro-leste do núcleo); F) Fotomicrografia, em nicóis descruzados, da brecha anterior, mostrando a porção vítrea alterada em tom escuro, grãos de quartzo (areia fina-média) e uma matriz fina; G) Detalhe da imagem anterior, ressaltando as porções vítreas, com formas ameboides; H) Brecha de impacto monomítica, com fragmentos de basalto porfirítico de cor cinza, envoltos por matriz avermelhada, constituída por fragmentos milimétricos de basalto, cobertos por vidro vulcânico alterado; I) Cones de estilhaçamento, em arenito eólico, da Fm. Botucatu, na porção norte do núcleo principal; J) Mesma feição, em arenitos eólicos da porção leste do núcleo; K) Fotomicrografia de arenito da Fm. Guará, destacando grão de quartzo (areia média – ~ 0.4 mm), com microestruturas do tipo PDF, desenvolvidas em três orientações cristalográficas (setas brancas) e com estruturas do tipo PF (seta vermelha); e L) Fotomicrografia de quartzo arenito da Fm. Botucatu, destacando grão de quartzo tamanho areia grossa (1.2 mm), com microestruturas do tipo PDF, desenvolvidas em duas orientações cristalográficas (setas amarelas e pretas), em parte, acompanhadas por estruturas do tipo FF (seta branca).

matriz homogênea, de cor vermelha e de granulação fina a criptocristalina, interpretada como vidro vulcânico alterado (Figs. 3F e 3G). Os veios são observados, junto aos diques, e são constituídos por uma matriz criptocristalina vermelha (oxidada), com pe-

quenos fragmentos de minerais.

A feição mais característica dos arenitos da porção central da estrutura é o intenso fraturamento. As estruturas radiais e anelares, observadas nas imagens de satélite, manifestam-se, em campo, como exten-

os campos de matacões e como blocos intensamente afetados por sistemas de fraturas. As fraturas de cisalhamento e de extensão observadas estão associadas com a formação de bandas de deformação cataclástica, indicando que a deformação rúptil gerada pelo impacto foi absorvida pela movimentação relativa das falhas radiais e anelares e pela quebra tectônica dos grãos, durante o fluxo cataclástico localizado. A formação comum de bandas de deformação cataclástica nos arenitos eólicos é o principal elemento de deformação observado nas zonas afetadas pelas falhas. As bandas de deformação dissipam a energia mecânica, associada à cinemática das falhas, formando finas faixas cataclásticas, de espessuras entre 1 mm e 5 mm, constituídas por uma matriz fina, que envolve os grãos de areia. Estas estruturas diminuem a porosidade dos arenitos e causam o aumento da coesão da rocha, associada à cimentação e à dissolução do quartzo.

2. 1. 2 Estruturas tectônicas e de impacto

A geologia da porção oeste do RS expõe os derrames basálticos do Grupo Serra Geral, com ocorrências localizadas de rochas sedimentares do Grupo São Bento. Os arenitos da Formação Guará definem a base estratigráfica do Cerro do Jarau, e caracterizam, pela sucessão de fácies fluviais e eólicas, um ambiente desértico, de condições semiáridas (Scherer & Lavina, 2006). Os arenitos eólicos da Fm. Botucatu, que os recobrem, marcam a evolução para um amplo deserto, de condições áridas. A evolução final da BP foi caracterizada por processos de deformação rúptil, relacionados à separação continental e à abertura do Oceano Atlântico Sul. Na região oeste do RS, os principais sistemas de falhas de direção NW-SE, Jaguari-Mata e Alegrete-Ibaré, estiveram ativos entre o Triássico Médio e a metade do Cretáceo e controlaram a estruturação do Arco do Rio Grande, de direção N50-60°W, cujo soerguimento condicio-

nou os sistemas fluviais, que depositaram parte das unidades dos grupos Rosário do Sul e São Bento (Philipp *et al.*, 2018). Estas estruturas também atuaram na ascensão e no extravasamento das lavas do Grupo Serra Geral. Os arenitos da Formação Botucatu ocorrem ao longo de duas trilhas alinhadas segundo a direção N45°W (Uruguaiana-Quaraí e Itaqui-Alegrete) (Fig. 1B). Na fronteira com o Uruguai, estão expostos em quatro janelas estruturais descontínuas, sugerindo um controle tectônico, embora exista a possibilidade de o vulcanismo não ter encoberto totalmente as dunas do deserto Botucatu. Na região do Cerro do Jarau, as dunas do deserto Botucatu interagiram com os derrames basálticos e, depois, foram soterradas pelas lavas básicas da Fm. Torres (Scherer & Lavina, 2006).

As falhas de direção NE-SW estiveram relacionadas à ruptura do Gondwana e à abertura do Oceano Atlântico, bem como aos estágios pré-rifte e sin-rifte da Bacia de Pelotas (Stica *et al.*, 2013). Os movimentos de expansão do assoalho oceânico resultaram em tensões compressionais de direção NW-SE, que reativaram os sistemas de falhas desta direção e que afetaram os derrames da formação Torres. O Sistema de Falhas Uruguaiana-Quaraí constitui um conjunto descontínuo de falhas normais, subparalelas, que controlam o rio Quaraí e que cruzam, em diagonal, a estrutura do Cerro do Jarau. Estas estruturas tectônicas foram superpostas pelas estruturas geradas com a formação da cratera do Cerro do Jarau, conforme podemos observar no mapa de lineamentos, extraído da imagem de satélite ASTER, que mostra uma grande intensidade de lineamentos, de extensão reduzida e de disposições concêntrica e radial, concentrados na área da estrutura (Fig. 2F). Na porção central do mapa, observa-se duas falhas de direção NW-SE, que se estendem para fora da estrutura, sugerindo que as mesmas são anterior-

res ao impacto. Deste modo, a relação entre as estruturas tectônicas regionais e aquelas geradas pelo impacto sugere que a formação da cratera ocorreu, após a formação das falhas de direção NW-SE. Os principais períodos de ativação tectônica da Bacia de Pelotas foram estimados entre 134 Ma e 113 Ma (Sticca *et al.*, 2013), e podem sugerir que o impacto ocorreu, após este período.

2. 1. 3 Feições metamórficas do impacto

O reconhecimento de brechas de impacto, de cones de estilhaçamento em arenitos e em basaltos e de feições de deformação intracristalina confirma a estrutura de impacto (Crósta *et al.*, 2010a; Philipp *et al.*, 2010). Os raros depósitos de brechas de impacto polimíticas e monomíticas são preservados no núcleo central da estrutura. As brechas polimíticas e de fusão contêm clastos de arenito e de basalto parcialmente derretidos e contorcidos e são encontradas como diques e como veios, que cortam os arenitos das formações Guará e Botucatu (Figs. 3E-3G). Cones de estilhaçamento, com tamanhos entre 5 cm e 15 cm, foram observados em arenitos (Fig. 3I) e em basaltos, situados na porção central (Fig. 3J) (Philipp *et al.*, 2010; Crósta *et al.*, 2010a). Microestruturas dos tipos PF e PDF em cristais de quartzo e em feldspato (Philipp *et al.*, 2010; Crósta *et al.*, 2010a) e, recentemente, a identificação de microfraturas do tipo FF (Reimold *et al.*, 2018) confirmam a passagem das ondas de choque em rochas impactadas (Fig. 3L). Estudos petrográficos de Crósta *et al.* (2010a) e de Reimold *et al.* (2018) concluíram que a quantidade de pressão liberada pelo impacto foi entre 2 Gpa e 10 Gpa. Essa energia escavou uma seção vertical de 300 m a 500 m, através das rochas sedimentares do Grupo São Bento (Jurássico Superior) e dos basaltos de cobertura do Grupo Serra Geral (Cretáceo Inferior).

2. 2 Domo do Vargeão

A estrutura de impacto do Domo de Vargeão está situada na região oeste de Santa Catarina (coordenadas 26°49'S/52°10'W), entre os limites dos municípios de Vargeão, de Faxinal dos Guedes e de Passos Maia (Fig. 4A). A estrutura tem um diâmetro de 12,4 quilômetros e constitui uma depressão circular, com múltiplos anéis internos, constituindo colinas elevadas e um núcleo central soerguido, com 3 km de diâmetro (Fig. 4B). As principais feições de impacto estão concentradas no núcleo soerguido e expostas em cortes de estradas e em pedreiras (Crósta *et al.*, 2012). A feição circular identificada, inicialmente, em imagens de radar, foi descrita como uma depressão circular, com um padrão de fraturas anelares e radiais, geradas sobre rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral (ver referências em Crósta *et al.*, 2012). A ocorrência de arenitos da Fm. Botucatu na porção central foi primeiramente interpretada como uma janela estratigráfica, relacionada a uma intrusão alcalina não aflorante e associada a outros corpos, que cortam a bacia (Lajes e Anitápolis).

O mapeamento da área do Domo do Vargeão, associado à prospecção de petróleo e de gás, identificou três derrames de rochas básicas e um derrame superior, de rochas ácidas. Os autores ressaltaram os contatos por falha entre os arenitos e os basaltos, confirmados pela identificação de brechas no interior da estrutura. Foram sugeridas quatro prováveis origens para esta estrutura: (i) tectônica; (ii) explosão criptovulcânica, por escape de gases ou pelo choque de um meteorito; (iii) caldeira vulcânica; ou (iv) intrusão de um complexo alcalino. Posteriormente, Hachiro *et al.* (1993), entre outros, descreveram PDFs em grãos de quartzo e de feldspato e formação de vidro diaplético, comprovando a origem por impacto. A estrutura que afetou as rochas vulcânicas básicas e as rochas sedi-

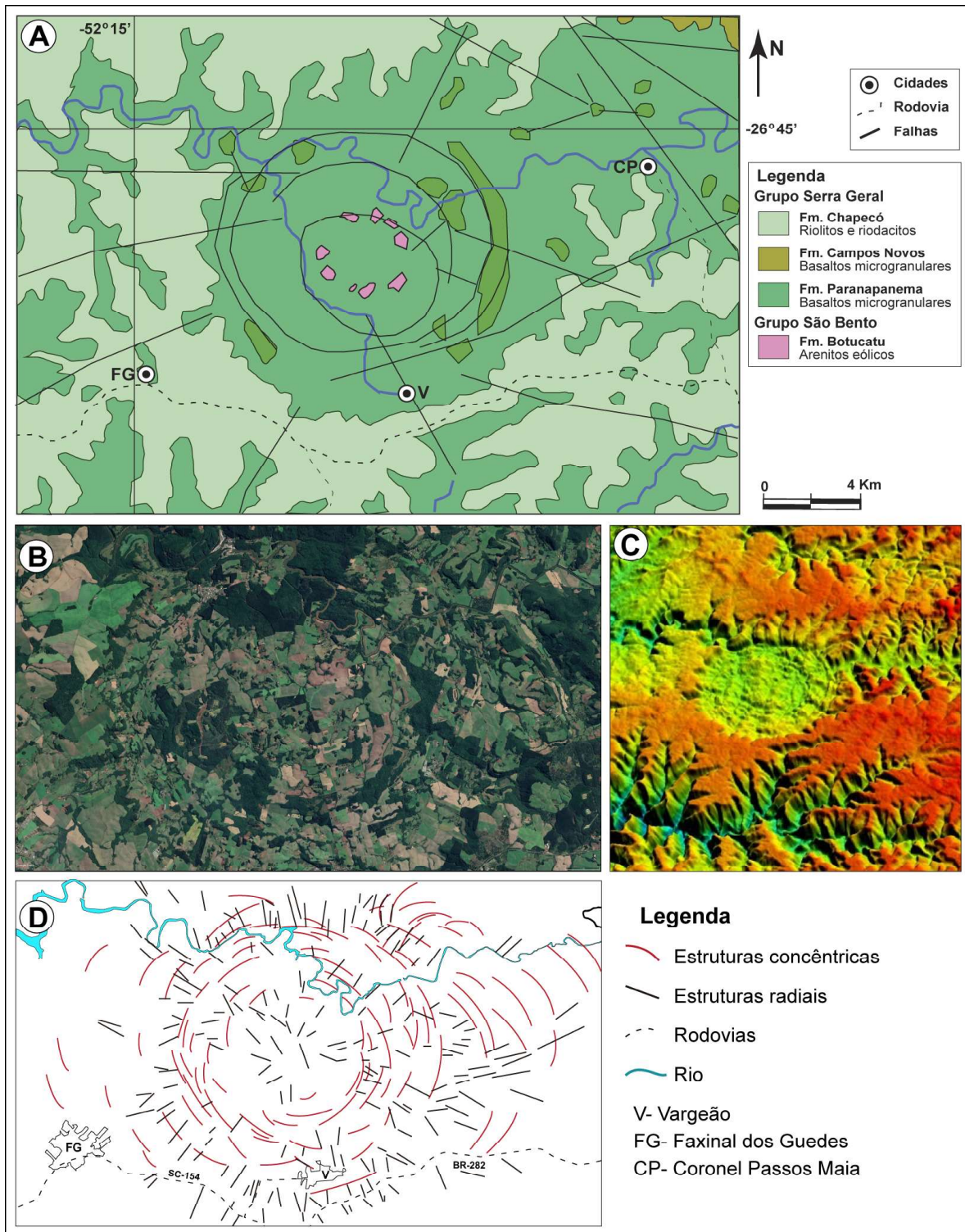


Figura 4 – A) Mapa geológico da estrutura de impacto do Domo do Vargeão (modificado de Wildner *et al.* (2014)); B) Imagem de satélite do *Google*, destacando a feição circular da estrutura de impacto do Vargeão (SC); C) Imagem de SRTM da estrutura de impacto do Domo do Vargeão; e D) Interpretação da imagem de satélite, destacando as estruturas concêntricas (em vermelho) e as radiais (em preto).

mentares da Bacia do Paraná teve sua idade de impacto, de 123 Ma (Nedelec *et al.*, 2013), determinada por datação U-Pb em zircão.

2. 2. 1 Aspectos morfológicos e estruturais

Apesar do estágio avançado de erosão, a morfologia original da estrutura do Domo de Vargeão está preservada por um padrão de drenagem controlado por falhas e por fraturas radiais e anelares, em parte, dissecado pelos rios Chapecozinho e Barra Grande (Fig. 4D). Situada em meio aos platôs de derrames de basaltos da Fm. Paranapanema e de corpos menores, de composição ácida, a estrutura de impacto do Domo de Vargeão é caracterizada por um núcleo central soerguido, que expõe os arenitos da Fm. Botucatu, originalmente situados abaixo dos derrames basálticos. Em imagens de satélite e em modelos de elevação do terreno (SRTM), a morfologia circular é complexa, com padrão multianelar registrado em campo por conjuntos de cristas topográficas, com desníveis abruptos, em sua borda, de até 150 m (Fig. 4C).

A ascensão do núcleo esteve associada à formação de falhas rúpteis na porção central e nos limites da cratera. Logo após o contato do meteorito com a superfície terrestre, ocorreu a fase de escavação, que define as bordas da cratera temporária, as quais evoluem e entram em colapso, ao longo de falhas gravitacionais concêntricas, que alternam segmentos anelares soerguidos (*horsts*) e abatidos (*grabens*), definindo a formação final da cratera (Crósta *et al.*, 2012). As principais falhas rúpteis marcam os movimentos inversos, que afetam a porção central, e os normais, nas porções externas. Associado a essas falhas, foram descritas as principais feições de alteração hidrotermal, desenvolvidas após o impacto (Yokoyama *et al.*, 2015).

2. 2. 2 Aspectos litológicos e feições metamórficas do impacto

A porção central do Domo de Vargeão expõe grandes blocos de arenitos eólicos da Fm. Botucatu, delimitados por falhas, em contato com os derrames basálticos do-

minantes da Fm. Paranapanema, do Grupo Serra Geral, e/ou com brechas delas derivadas (Fig. 4A). Ao longo de toda a porção leste da estrutura, e em partes restritas das porções NW e SW, ocorrem pequenos corpos anelares, constituídos por basaltos da Fm. Campos Novos. Em áreas mais externas e elevadas, as rochas básicas são recobertas pelos riódacitos da Fm. Chapecó. São reconhecidos protólitos de todas as unidades, embora as rochas registrem graus variados de deformação em toda a porção central da estrutura. Os arenitos têm cor rosa e composição quartzosa, apresentando estratificação cruzada, de médio porte. Ocorrem como blocos de dimensões métricas e estão muito brechados, com fragmentos irregulares, envoltos por uma matriz arenosa parcialmente cominuída e de granulação variável. Os basaltos têm cor preta a cinza escura e textura afírica a porfirítica, com fenocristais ripiformes de plagioclásio, imersos em uma matriz fina a afanítica. Os derrames do tipo *pahoehoe* apresentam estrutura de fluxo, com disposição sub-horizontal, e zonas vesiculares no topo.

As feições de campo do metamorfismo de impacto incluem as brechas de impacto e as brechas de fusão (com clastos de rochas basálticas), os cones de estilhaçamento, desenvolvidos em arenitos e em basaltos, e as feições microscópicas, associadas aos processos de deformação intracristalina em grãos de quartzo e em feldspatos. Crósta *et al.* (2012) descrevem brechas de impacto monomíticas, constituídas por fragmentos de basaltos, envoltos em uma matriz fina e mal selecionada, ou compostas por fragmentos de arenitos (Fig. 5A). Também são observadas brechas polimíticas (Fig. 5B). As brechas de fusão apresentam fragmentos angulosos de rochas basálticas, envoltos por porções vítreas, com estrutura fluidal, de cor preta a avermelhada (alterada), gerados pela fusão parcial das rochas pré-existentes. Em-

bora de ocorrência restrita, as brechas de impacto estão concentradas no núcleo da cratera, onde constituem áreas métricas, que envolvem arenitos e basaltos não deformados (Crósta *et al.*, 2012). As brechas constituem as cristas concêntricas, que caracterizam o núcleo soerguido. Nesta mesma região, os cones de estilhaçamento, observados em basaltos e em arenitos impactados, mostram cones individuais, de dimensões entre 10 centímetros e 35 centímetros (Fig. 5C). A passagem da onda de choque afetou os arenitos e os basaltos impactados, que mostram feições microscópicas de deformação rúptil, como cataclase e cominuição, e feições de deformação planares (PDFs) em grãos de quartzo e em feldspatos (Fig. 5D) (Crósta *et al.*, 2012). Medidas de direções cristalográficas de PDFs distintas indicaram que o impacto gerou picos de pressão superiores a 20 GPa (Kazzuo-Vieira *et al.*, 2004). De modo semelhante ao das feições encontradas no Cerro do Jarau, os grãos de quartzo dos arenitos mostram a formação de bandas de deformação, constituindo faixas de cominuição, que afetam os grãos e a matriz dos arenitos. Estas feições são pós-deposicionais e pós-diagenéticas (Crósta *et al.*, 2012).

2.3 Vista Alegre

A estrutura de impacto de Vista Alegre, situada na porção oeste do Paraná (coordenadas 25°57'S/52°41'W), tem estruturas e feições muito semelhantes às descritas no Vargeão e no Cerro do Jarau. Formada, também, sobre rochas vulcânicas básicas, apresenta diâmetro de 9,5 km e idade máxima de 120 milhões de anos (Crósta *et al.*, 2010b). Está caracterizada por uma depressão circular, com bordas externas íngremes e com um relevo interno suave, sem um núcleo central soerguido destacado, mas também contém, em seu interior, blocos de arenitos eólicos de camadas inferiores. As bordas da estrutura

estão caracterizadas por basaltos fraturados, por vezes, com falhas radiais incipientes (Fig. 5E). A porção central apresenta brechas de impacto monomíticas e polimíticas (Fig. 5F), cones de estilhaçamento em arenitos e em basaltos e feições do tipo PDFs em grãos de quartzo (Pittarello *et al.*, 2015).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As crateras de impacto do Cerro do Jarau, do Domo de Vargeão e de Vista Alegre estão caracterizadas por feições circulares, marcadas por sistemas de falhas e de fraturas concêntricas e radiais. A porção central soerguida expõe os arenitos sotopostos das formações Guará e/ou Botucatu, envoltos por derrames de basaltos do Grupo Serra Geral (formações Torres e Paranapanema). As porções de núcleo estão muito deformadas e mostram ocorrências restritas de brechas de impacto, acompanhadas por cones de estilhaçamento em arenitos e em basaltos e também mostram feições de deformação planar (PF, PDF e FF) em grãos de quartzo e em feldspatos. Este conjunto de feições caracteriza o metamorfismo de impacto que afetou todas estas estruturas. A forma elíptica da estrutura do Cerro do Jarau pode sugerir que o ângulo de impacto do meteorito, com relação à superfície do Terreno foi entre 60° e 80°, enquanto as formas circulares do Domo de Vargeão e de Vista Alegre indicam um alto ângulo de impacto. No caso de Vista Alegre, embora o núcleo soerguido seja pouco definido, o menor grau de erosão favorece à preservação de uma maior quantidade de impactitos (*i.e.* brechas polimíticas e monomíticas).

O conjunto de evidências apresentadas, até o presente, confere destacada importância às estruturas de impacto do Cerro do Jarau, do Domo de Vargeão e de Vista Alegre, como raras ocorrências de crateras de impacto em território brasileiro. Tais estruturas

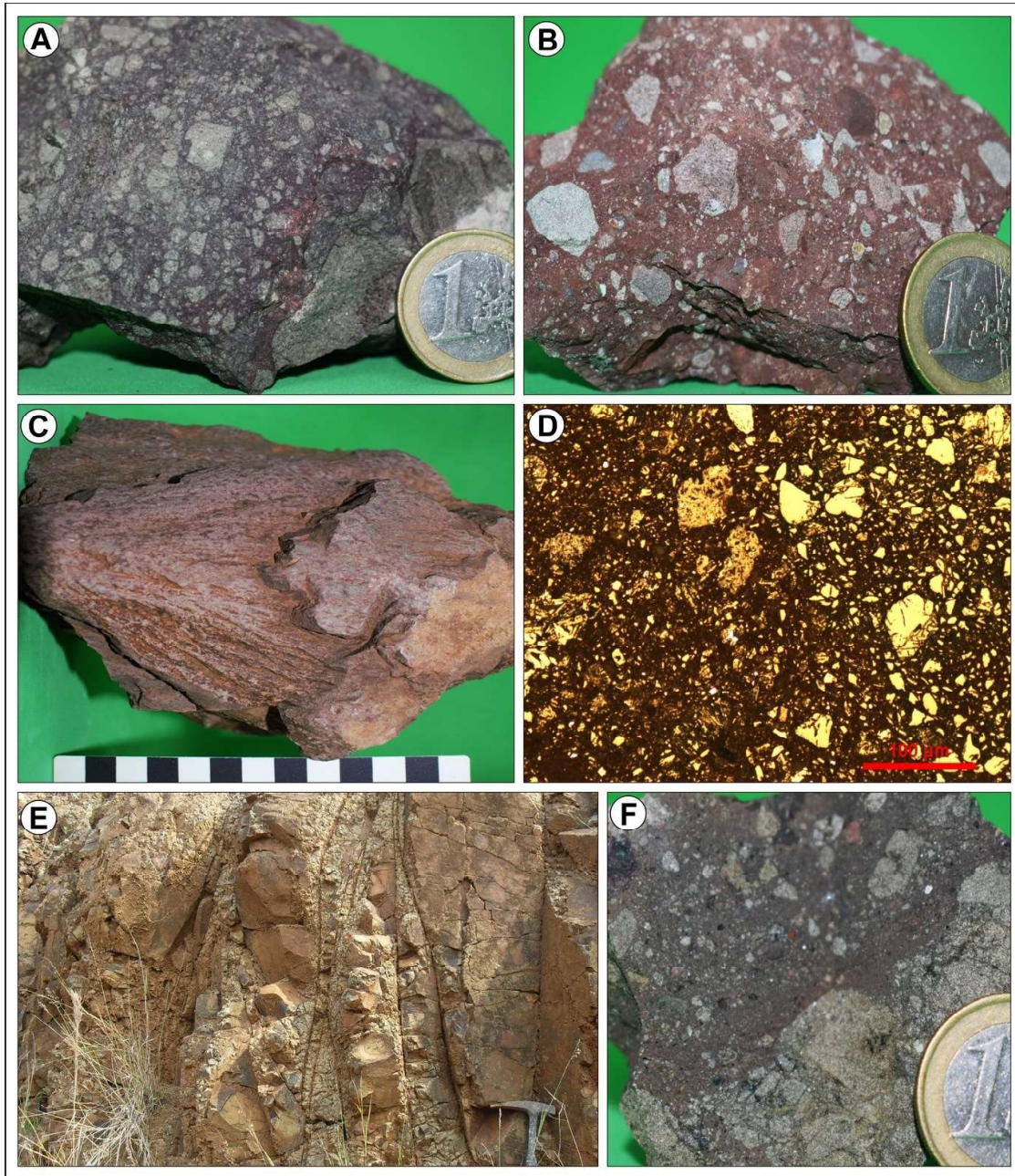


Figura 5 – A) Brecha de impacto monomítica, com fragmentos de arenitos; B) Brecha de impacto polimítica, com clastos de arenitos e de basaltos; C) Cones de estilhaçamento (*Shatter Cones*), em basalto; D) Fotomicrografia, em nicóis descruzados, da brecha de impacto monomítica da Figura 5A, destacando os clastos de arenitos e de grãos de quartzo, envoltos por uma matriz vítrea (cor marrom escuro); E) Aspecto do basalto impactado da estrutura de Vista Alegre (PR), ressaltando faixas de rochas cominuídas, ao longo das fraturas do impacto; e F) Brecha de impacto polimítica de Vista Alegre.

afetaram as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral, que apresentam idade de ca. 134-131 Ma e que delimitam a idade mínima do impacto. Igualmente, estas estruturas apresentam características favoráveis, enquanto sítios geológicos, das quais se destacam a fa-

cilidade de acesso às áreas dos eventos e aos principais afloramentos representativos. Destacam-se as características cênicas destacadas e a colaboração da população local, que se mostra atuante na divulgação e na preservação destes patrimônios naturais.

Nesse sentido, sua transformação em sítio geológico contribuirá, para fins de estudos científicos e de geoturismo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio à pesquisa, através da bolsa de produtividade e da bolsa de doutorado concedida a Matheus P. Brückmann, e ao prof. Heinrich T. Frank pelas fotos do Meteorito Putinga.

REFERÊNCIAS

- Baratoux, D. & Reimold, W. U. 2016. The current state of knowledge about shatter cones: Introduction to the special issue. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(8): 1-46.
- Calbo, V. S. 2006. *Resposta geofísica da Estrutura do Cerro do Jarau, Quaraí RS*. Porto Alegre, 59p. Trabalho de Conclusão, Instituto de Geociências, UFRGS.
- Crósta, A. P., Lourenço, F. S. & Pribe, G. H. 2010a. Cerro Jarau, Rio Grande do Sul: A possible new impact structure in Southern Brazil. *In: Gibson, R. L. & Reimold, W. U. (Ed.). Large meteorite impacts and planetary evolution IV*, Geol. Soc. of Amer., Sp. Paper, 465: 173-190.
- Crósta, A. P., Koeberl, C., Furuie, R. & Kazzuo-Vieira, C. 2010b. 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.
- Crósta, A. P., Kazzuo-Vieira, C., Pitarello, L., Koeberl, C. & Kenkmann, T. 2012. Geology and impact features of Vargeão Dome, southern Brazil. *Meteoritics & Planet. Sci.*, 47: 51-71.
- French, B. M. 1998. *Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. Houston, Lunar and Plan. Inst., 130p.
- French, B. M. & Koeberl, C. 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98: 123-170.
- Hachiro, J., Coutinho, J. M. V., Frascá, M. H. B. O. & Menezes C. M. 1993. O estrutura de impacto de Vargeão (SC): Evidências petrográficas de um crateramento criptoexplosivo por petardo extraterrestre. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, III*, 1993, Rio de Janeiro. *Boletim de Resumos*. Rio de Janeiro, SBG, p. 276-281.
- Hachiro, J., Coutinho, J. M. V. & Coimbra, A. M., 1995. The Cerro do Jarau astrobleme (Rio Grande do Sul), Brazil: A Cretaceous cryptoexplosive structure. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, Resumo das Comunicações*, 67(4): 20.
- Kazzuo-Vieira, C., Crósta, A. P. & Choudhuri, A. 2004. Impact features from Vargeão Dome, Southern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 39: A52.
- Keil, K., Lange, D., Ulbrich, M. N. C., Gomes, C. B., Jarosewich, E., Roisenberg, A. & Souza, M. J. 1978. Studies of Brazilian meteorites XIII. Mineralogy, petrology and chemistry of the Putinga, Rio Grande do Sul, Chondrite. *Meteoritics*, 13(2): 165-175.
- Koeberl, C. & Henkel, H. 2005. *Impact Tectonics*. Berlin, Springer-Verlag, 552p.
- Nedelec, 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(3): 420-431.
- Norton, O. R. & Chitwood, L. A. 2008. *Field Guide to Meteors and Meteorites*. London, Springer, 287p.
- Pitarello, L., Nestola, F., Viti, C., Crósta, A. P. & Koeberl, C. 2015. Melting and cataclastic features in shatter cones in basalt from the Vista Alegre impact structure, Brazil. *Meteoritics*

& *Planetary Science*, 50: 1-26.

Poelchau, M. H. & Kenkmann, T. 2011. Feather features: A low-shock-pressure indicator in quartz. *Journal of Geophysical Research*, 116: B02201, DOI:10.1029/2010JB007803.

Philipp, R. P., Rolim, S. B. A., Sommer, C. A., Souza Filho, C. R. & Lisboa, N. A. 2010. A estrutura de impacto de Cerro do Jarau. *Revista Brasileira de Geociências*, 40: 468-483.

Philipp, R. P., Schultz, C. L., Kloss, H. P., Horn, B. L. D., Soares, M. B. & Basei, M. A. S. 2018. Middle Triassic SW Gondwana paleogeography and sedimentary dispersal revealed by integration of stratigraphy and U-Pb zircon analysis: the Santa Cruz Sequence, Paraná Basin, Brazil. *Journal South American Earth Science*, 88: 216-237.

Reimold, W. U., Crósta, A. P., Hasch, M., Kowitz, A., Hauser, N., Sánchez, J. P., Simões, J. S. A., Oliveira, G. J. & Zaag, P. 2018. Shock deformation confirms the impact origin for the Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul, Brazil, structure. *Meteoritics & Planetary Sciences*, 54(10): 1-14.

Rossetti, L., Lima, E. F., Waichel, B. L., Hole, M. J., Simões, M. S. & Scherer, C. M. S. 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka igneous province in southern Brazil. *Journal of Volcanol. Geoth. Res.*, 355: 98-114.

Sagy, A., Fineberg, J. & Reches, Z. 2004. Shatter cones: Branched, rapid fractures formed by shock impact. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 109: B10209.

Sánchez, J. P., Simões, L. S. A. & Martins, L. E. B. 2014. Stratigraphy and structure of Cerro Jarau: New proposal. *Brazilian Journal of Geology*, 44(2): 265-276.

Scherer, C. M. S. & Lavina, E. L. C., 2006. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, southernmost Brazil. *Gondwana Research*, 9: 475-484.

Schmieder, M. & Kring, D. A. 2020. Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact, Structures and Deposits. *Astrobiology*, 20(1): 91-141.

Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Barton, P. J., Bown, P. R., Bralower, T. J., Christeson, G. L., Claeys, P., Cockell, S. C., Collins, G. S., Deutsch, A., Goldin, T. J., Goto, K., Grajales-Nishimura, J. M., Grieve, R. A. F., Gulick, S. P. S., Johnson, K. R., Kiessling, W., Koeber, C., Kring, D. A., MacLeod, K. G., Matsui, T., Melosh, J., Montanari, A., Morgan, J. V., Neal, C. R., Nichols, D. J., Norris, R. D., Pierazzo, E., Ravizza, G., Rebolledo-Vieyra, M., Reimold, W. U., Robin, E., Salge, T., Speijer, R. P., Sweet, A. R., Urrutia-Fucugauchi, J., Vajda, V., Whalen, M. T. & Willumsen, P. S. 2010. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous Paleogene Boundary. *Science*, 327: 1214-1218.

Stica, J. M., Zalán, P. V. & Ferrari, A. L. 2013. The evolution of rifting on the volcanic margin of the Pelotas Basin and the contextualization of the Paraná e Etendeka LIPs in the separation of Gondwana in the South Atlantic. *Marine and Petrol. Geology*, 50: 1-21.

Yokoyama, E., Nédélec, A., Baratoux, D., Trindade, R. I. F., Fabre, S. & Berger, G. 2015. Hydrothermal alteration in basalts from Vargeão impact structure, south Brazil, implications for recognition of impact-induced hydrothermalism on Mars. *Icarus*, 252: 347-365.

Wildner, W., Camozzato, E., Toniolo, J. A., Binotto, R. B., Iglesias, C. M. F. & Laux, J. H. 2014. *Mapa geológico do Estado de Santa Catarina (1:500.000)*. Rio de Janeiro, CPRM.